

**T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜNEL YANGINLARINDA JET FANLARIN KONUMU - HAVA
İLETİM YÖNÜ VE FAN HIZININ TAHLİYEYE ETKİSİNİN
SİMÜLASYON İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET BAŞIBEYAZ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TEZ DANIŞMANI
Dr. Öğr. Üyesi Üsame DEMİR**

BİNGÖL-2023



T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**TÜNEL YANGINLARINDA JET FANLARIN KONUMU - HAVA İLETİM YÖNÜ
VE FAN HIZININ TAHLİYEYE ETKİSİNİN SİMÜLASYON İLE
İNCELENMESİ**

Dr. Öğrt. Üyesi Üsame DEMİR danışmanlığında, Mehmet BAŞİBEYAZ tarafından hazırlanan bu çalışma 10/02/2023. tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Pof. Dr. Cengiz ÖNER

İmza :

Üye : Doç Dr. Gökhan ÇOŞKUN

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Üsame Demir

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir

ÖNSÖZ

Tez çalışmaları süresince yardımlarını ve bilgi birikimini esirgemeyen, çalışmaların tamamlanabilmesi için gerekli desteği veren başta değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Üsame Demir'e ve Doç. Dr. Gökhan ÇOŞKUN hocama teşekkür ederim.

Son olarak bende büyük emekleri olan, benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve dualarını esirgemeyen anne ve babama, tezin hazırlanması sırasında gösterdikleri sabır, fedakârlık ve desteklerinden dolayı eşime ve biricik kızıma özellikle teşekkürü bir borç bilirim.

.

Mehmet BAŞIBEYAZ

Bingöl 2023

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı.....	3
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
3.1. Tünelin Çalışma Alanı.....	9
3.2. Pyrosim Programın Arayüzü.....	12
3.3. Modelde Uygulanan Çalışma Yöntemi.....	14
3.4. Türkiye’de Tünel Güvenliği.....	20
3.5. Avrupa (AB)’da Tünel Güvenliği.....	24
3.6. Tünel Hesaplamalarında Kullanılan Standartlar.....	25
3.7. Karayolu Tünellerinde Havalandırma Sistemleri.....	25
3.8. Erzurum İli İçin Hava Kalitesi Değerleri.....	27
3.9. Rize İli İçin Hava Kalitesi Değerleri.....	28
3.10. Havalandırma Sistemleri Hakkında Genel Tanımlar.....	29
3.10.1. Doğal Havalandırma.....	30
3.10.2. Mekanik Havalandırma (Boylamasına) Havalandırma.....	31
3.10.2.1. Merkezi Jet Fan ve Saccardo Nozul’un Birlikte Kullanıldığı Sistem.....	32
3.10.2.2. Merkezi Jet Fan ve Baca Sisteminin Birlikte Kullanıldığı Sistem.....	32

3.10.2.3. Fan ve Baca Şaftın Birlikte Kullanıldığı Sistem.....	33
3.10.2.4. Jet Fanların Kullanıldığı Boylamasına Havalandırma Sistemi	33
3.10.3. Yarı Enine Havalandırma Sistemi.....	34
3.10.3.1. Hava Enjeksiyonu Yapılan Yarı Enine Havalandırma Sistemi.....	34
3.10.3.2. Hava Emilimi Yapılan Yarı Enine Havalandırma Sistemi.....	35
3.10.3.3. Hava Emilimli ve Enjeksiyonlu Yarı Enine Havalandırma Sistemi.....	35
3.10.4. Enine Havalandırma Sistemi.....	36
3.10.5. Karma Havalandırma Sistemi.....	36
3.11. Kritik Hız.....	37
3.12. Tünel Havalandırma Hesap Yöntemleri.....	41
3.12.1. PIARC Hesaplama Yöntemi ve Havalandırma Performans Gereksinimi.....	42
3.12.2. Temiz Hava Talebinin Hesaplanma Yöntemi.....	43
3.12.2.1. Trafik Hacmi.....	43
3.12.2.2. Araçların Trafik İçerik Karışımı.....	44
3.12.2.3. Binek Otomobil Birimi, Binek Araçlar , Kamyon ve Otobüsler.....	44
3.12.3. Tüneldeki Hız Limiti, Konumu ve Tasarım Yılı.....	45
3.12.4. Duman ve Emisyon Gazları İçin Kabul Edilen Sınır Değerler.....	45
3.12.5. Ağır Vasıta Araçlar (HGV) İçin Emisyon Hesaplama Yöntemi....	47
3.12.5.1. Kütle Etkisi (F_M).....	47
3.12.6. Binek Araçlar (PC) İçin Emisyon Hesaplama Yöntemi.....	47
3.12.6.1. Yükseklik Faktörü ve Yaşlanma Faktörünün Açıklaması.	48
3.12.6.2. Benzinli Araçlar (PC) İçin Emisyon Hesaplama Yöntemi.....	48
3.13. Yangın Durumunda Basınç Kaybı Hesapları	49

3.13.1. Duvar Sürtünmesi Nedeniyle Tünel Boyunca Basınç Kaybı Hesaplamaları.....	49
3.13.2. Giriş ve Çıkış Yapılarında Tekil Basınç Kaybı Hesaplamaları.....	50
3.13.3. Atmosferik Kaybı Nedeniyle Tekil Basınç Kaybı Hesaplamaları	50
3.13.4. Yangın Mahalindeki Basınç Kaybı Hesaplamaları.....	50
3.13.5. Baca Etkisi Sebebiyle Basınç Kaybı Hesaplamaları	51
3.13.6. Araçların Durması Sebebiyle Basınç Kaybı Hesaplamalar.....	51
3.14. Basınç Kaybına Göre Jet Fan Seçimi ve Hesabı.....	51
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	56
4.1. 30 MW Yangın Gücü İçin Simülasyon Analizi ve Sonuçları.....	56
4.1.1. 30 MW Yangın Gücündeki Senaryoların 100-200-300-400-500 Saniyeki Duman Görünürlüklerinin Analizi.....	58
4.1.2. 30 MW Yangın Gücündeki Senaryoların 100-200-300-400-500 Saniyedeki Duman Hızlarının Analizi.....	64
4.1.3. 30 MW Yangın Gücündeki Senaryoların 100-200-300-400-500 Saniyeki Sıcaklık Analizi.....	71
4.1.4. 30 MW Yangın Gücündeki Senaryoların 100-200-300-400-500 Saniyeki CO ₂ Dağılımı.....	78
4.1.5. 30 MW Yangın Gücündeki Senaryoların 100-200-300-400-500 Saniyeki CO Dağılımı.....	84
4.2. 100 MW Yangın Gücü İçin Simülasyon Analizi ve Sonuçları.....	90
4.2.1. Analizi Yapılan Senaryoların Duman Görünürlükleri	92
4.2.2. Analizi Yapılan Senaryoların Duman Akış Hızları.....	98
4.2.3. Analizi Yapılan Senaryoların Sıcaklık Dağılımları.....	104
4.2.4. Analizi Yapılan Senaryoların CO ₂ Dağılımı.....	110
4.2.5. Analizi Yapılan Senaryoların CO Dağılımı.....	116
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	122
KAYNAKLAR.....	124
ÖZGEÇMİŞ.....	128

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
PIARC	: Dünya yol birliği
HRR	: Isı salınım hızı
FDS	: Yangın dinamiği simülasyonu
NIST	: Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü
CAD	: Bilgisayar destekli tasarım
JPG	: Birleşik fotoğraf uzmanları grubu
PNG	: Taşınabilir ağ grafiği
GIF	: Grafik değiştirme biçimi
DXF	: Çizim değişim formatı
DWG	: Çizim depolama dosyası
STL	: 3D dosya formatı
IFC	: Endüstri hazırlık sınıfı
FBX	: 3B model dosyası
MW	: MegaWatt
HRRPUA	: Alan başına ısı salınım oranı
LES	: Büyük Girdap Simülasyonu
CO	: Karbonmonooksit
KGM'	: Karayolları Genel Müdürlüğü
UNECE	: Karayolu Tünelleri Uzmanlar Grubu'nun Tavsiyeleri Nihai Raporu
CIE	: Uluslararası Aydınlatma Komisyonu
APK	: Avrupa Parlamentosu Konseyi
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
NFPA	: Ulusal Yangından Koruma Birliği
ABK	: Avrupa Birliği Komisyonu
AB	: Avrupa Birliği
NFPA	: Ulusal Yangından Koruma Birliği

LPG	: Sıvılaştırılmış petrol gazı
CAQI	: Genel hava kalite endeksi
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
HGV	: Ağır vasıta araç
EURO	: Avrupa Emisyon Standardı
JF	: Jet fan
PM	: Partikül madde
NO _x	: Azot oksit
D _h	: Hidrolik çap
K	: Tünel yüzey katsayısı
S	: Tünel alanı
P	: Tünel çapı
μm	: Mikrometre
ρ	: Havanın yoğunluğu (kg/m ³)
c _p	: Sabit basınçlı havanın özgül ısı katsayısı (J/kg.K)
K _g	: Eğim düzeltme katsayısı
T _f	: Yangın bölgesi duman sıcaklığı
V _c	: Kritik hız (m/sn)
T	: Ortam sıcaklığı (K)
Q	: Yangın yükü (Watt)
A	: Tünel kesit alanı (m ²)
K ₁	: Birimsiz sabit
V	: Duman yayılım hızı (m/sn)
PC	: Binek araç
D _{pcu}	: Tünel içerisindeki trafik hacmi
a	: otobüs/kamyon yüzdesi)
NO ₂	: Azot dioksit
ppm	: Toplam madde miktarının milyonda bir birimi
K	: Sönümlleme katsayısı
F _d	: Dinamik itki kuvveti

s	: İletim
$E-E^{\circ}$	: Sönümlleme için yoğunluk
$q_{ex(v,i)}$	: Ortalama araç ve emisyon faktörü (m^2/h , araç; g/h , araç)
$q_{ne(v)}$	: Egzoz dışındaki partiküller için emisyon değeri
f_m	: kütle etkisi faktörü
f_h	: yükseklik faktörü
f_e	: Emisyon standart faktörü
n_{veh}	: Tünelden geçmesi tahmin edilen araç sayısı
f_a	: katalizörlü araçlar için yaşlanma faktörü
C_{adm}	: Tünelde kabul edilen limit emisyon gazı değeri (g/m^3)
C_{amb}	: Dış ortam havası içerisindeki limit emisyon gazı değeri (g/m^3)
L	: Tünel uzunluğu (m)
D	: Trafik hacmi
λ	: Ampirik sürtünme katsayısı
ρ_o	: Ortam hava yoğunluğu (kg/m^3)
V_o	: Havanın doğrusal hızı (m/sn)
ξ	: Tekil basınç katsayısı
W_w	: Rüzgar hızı
V_v	: Taşıt ortalama hızı
cv	: Aerodinamik katsayısı
A_v	: Taşıtların rüzgara maruz kalan dik doğrultudaki ortalama değeri (m^2)
mm	: milimetre
kW	: KiloWatt
CD_{pc}	: Oto aerodinamik katsayısı
CD_{tr}	: Ağır vasıta aerodinamik katsayısı
A_{pc}	: Otomobil kesit alanı
Re	: Reynold sayısı
S_{ms}	: Hava yoğunluğu
A_{tr}	: Ağır vasıta kesit alanı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Kırık Tüneli uydu görüntüsü.....	10
Şekil 3.2.	Kırık tüneli (İspir) çalışma alanı.....	10
Şekil 3.3.	Kırık Tüneli tünel tip kesiti.....	11
Şekil 3.4.	Kırık Tüneli plan profil kesiti.....	11
Şekil 3.5.	FDS simülasyon ekranı.....	13
Şekil 3.6.	Pyrosim programın arayüzü ve model tünelin görüntüsü.....	15
Şekil 3.7.	Modeldeki mesh sayıları ve görüntüsü.....	15
Şekil 3.8.	Tünel içindeki aracın görüntüsü.....	16
Şekil 3.9.	Aracın geometrik konumu a) Car bottom, b) Car top, c) yangın yüzeyi.	17
Şekil 3.10.	Tünelde jet fan yerleşimi.....	18
Şekil 3.11.	Bir tünelde çıkan yangın dumanının zaman ve hava akışına göre dağılımı.....	26
Şekil 3.12.	Rize ili için hava kalitesi ve polen tahmini.....	29
Şekil 3.13.	Doğal havalandırma.....	30
Şekil 3.14.	Tüneldeki hava hızının dağılımı.....	30
Şekil 3.15.	Tüneldeki kirlilik seviyesinin dağılımı.....	31
Şekil 3.16.	Doğal havalandırmanın baca sistemi ile kullanılması.....	31
Şekil 3.17.	Jet fan ve Saccardo nozullu boyuna havalandırmanın şematik gösterimi.....	32
Şekil 3.18.	Merkezi Jet fan ve baca sisteminin birlikte kullanıldığı sistem.....	33
Şekil 3.19.	Fan ve baca şaftının birlikte kullanıldığı sistem.....	33
Şekil 3.20.	Jet fanların kullanıldığı boylamasına havalandırma sistemi.....	34
Şekil 3.21.	Yarı enine havalandırma sistemi.....	34
Şekil 3.22.	Hava enjeksiyonu yapılan yarı enine havalandırma sistemi.....	35
Şekil 3.23.	Hava emilimi yapan yarı enine havalandırma sistemi.....	35
Şekil 3.24.	Hava emilimli ve enjeksiyonlu yarı enine havalandırma sistemi.....	36
Şekil 3.25.	Enine havalandırma sistemi.....	36

Şekil 3.26.	Yangın yükü ve eğime bağlı olarak K_1 ve K_g değişim grafiği.....	38
Şekil 3.27.	KGM tarafından devam eden tünmelerin ortalama proje maliyetleri.....	42
Şekil 4.1.	30 MW yangın gücü için jet fanların tünel içindeki konumu.....	57
Şekil 4.2.	30 MW yangının %50 - %75 debi artış ve azalış sonucu zamana bağlı ısı yayılım oranı.....	57
Şekil 4.3.	30 MW yangın gücünün 100. saniyedeki senaryoların tünel boyunca duman görünürlükleri.....	58
Şekil 4.4.	30 MW yangın gücünün 200. saniyedeki senaryoların tünel boyunca duman görünürlükleri.....	60
Şekil 4.5.	30 MW yangın gücünün 300. saniyedeki senaryoların tünel boyunca duman görünürlükleri.....	61
Şekil 4.6.	30 MW yangın gücünün 400. saniyedeki senaryoların tünel boyunca duman görünürlükleri.....	62
Şekil 4.7.	30 MW yangın gücünün 500. saniyedeki senaryoların tünel boyunca duman görünürlükleri.....	63
Şekil 4.8.	30 MW yangın gücünün 100. saniyedeki senaryoların tünel boyunca akış hız dağılımı.....	65
Şekil 4.9.	30 MW yangın gücünün 200. saniyedeki senaryoların tünel boyunca akış hız dağılımı.....	66
Şekil 4.10.	30 MW yangın gücünün 300. saniyedeki senaryoların tünel boyunca akış hız dağılımı.....	68
Şekil 4.11.	30 MW yangın gücünün 400. saniyedeki senaryoların tünel boyunca akış hız dağılımı.....	69
Şekil 4.12.	30 MW yangın gücünün 500. saniyedeki senaryoların tünel boyunca akış hız dağılımı.....	70
Şekil 4.13.	30 MW yangın gücünün 100. saniyedeki senaryoların sıcaklık dağılımları.....	72
Şekil 4.14.	30 MW yangın gücünün 200. saniyedeki senaryoların sıcaklık dağılımları.....	74
Şekil 4.15.	30 MW yangın gücünün 300. saniyedeki senaryoların sıcaklık dağılımları.....	75

Şekil 4.16.	30 MW yangın gücünün 400. saniyedeki senaryoların sıcaklık dağılımları.....	76
Şekil 4.17.	30 MW yangın gücünün 500. saniyedeki senaryoların sıcaklık dağılımları.....	77
Şekil 4.18.	30 MW yangın gücünün 100. saniyedeki senaryoların CO ₂ dağılımları.	78
Şekil 4.19.	30 MW yangın gücünün 200. saniyedeki senaryoların CO ₂ dağılımları.	80
Şekil 4.20.	30 MW yangın gücünün 300. saniyedeki senaryoların CO ₂ dağılımları.	81
Şekil 4.21.	30 MW yangın gücünün 400. saniyedeki senaryoların CO ₂ dağılımları.	82
Şekil 4.22.	30 MW yangın gücünün 500. saniyedeki senaryoların CO ₂ dağılımları.	83
Şekil 4.23.	30 MW yangın gücünün 100. saniyedeki CO dağılımları.....	84
Şekil 4.24.	30 MW yangın gücünün 200. saniyedeki CO dağılımları.....	86
Şekil 4.25.	30 MW yangın gücünün 300. saniyedeki CO dağılımları.....	87
Şekil 4.26.	30 MW yangın gücünün 400. saniyedeki CO dağılımları.....	88
Şekil 4.27.	30 MW yangın gücünün 500. saniyedeki CO dağılımları.....	89
Şekil 4.28.	100 MW yangın gücü için jet fanların tünel içindeki konumu.....	90
Şekil 4.29.	100 MW ve 30 MW yangının zamana bağlı ısı yayılım oranı.....	91
Şekil 4.30.	100 MW yangının %50 - %75 debi artış ve azalış sonucu zamana bağlı ısı yayılım oranı.....	91
Şekil 4.31.	S-F'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman görünürlükleri.....	92
Şekil 4.32.	S-G'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman görünürlükleri.....	93
Şekil 4.33.	S-H'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman görünürlükleri.....	95
Şekil 4.34.	S-I'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman görünürlükleri.....	96
Şekil 4.35.	S-J'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman görünürlükleri.....	97
Şekil 4.36.	S-F'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman akış hızları.....	98
Şekil 4.37.	S-G'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman akış hızları.....	100
Şekil 4.38.	S-H'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman akış hızları.....	101
Şekil 4.39.	S-I'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman akış hızları.....	102
Şekil 4.40.	S-J'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman akış hızları.....	103
Şekil 4.41.	S-F'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca sıcaklık dağılımları.....	104
Şekil 4.42.	S-G'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca sıcaklık dağılımları.....	105
Şekil 4.43.	S-H'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca sıcaklık dağılımları.....	107

Şekil 4.44. S-I'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca sıcaklık dağılımları.....	108
Şekil 4.45. S-J'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca sıcaklık dağılımları.....	109
Şekil 4.46. S-F'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO ₂ dağılımları.....	110
Şekil 4.47. S-G'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO ₂ dağılımları.....	111
Şekil 4.48. S-H'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO ₂ dağılımları.....	113
Şekil 4.49. S-I'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO ₂ dağılımları.....	114
Şekil 4.50. S-J'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO ₂ dağılımları.....	115
Şekil 4.51. S-F'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO dağılımları.....	116
Şekil 4.52. S-G'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO dağılımları.....	118
Şekil 4.53. S-H'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO dağılımları.....	119
Şekil 4.54. S-I'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO dağılımları.....	120
Şekil 4.55. S-J'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO dağılımları.....	121

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	Trafiğe açık tünellerin bölgelere göre dağılımı.....	2
Tablo 3.1.	L=709 m tünel modelin mesh konumu ve sayısı.....	16
Tablo 3.2.	Yangın simülasyon programında kullanılan veriler.....	18
Tablo 3.3.	Analiz sonucu belirlenecek parametreler.....	19
Tablo 3.4.	Yangın büyüme oranlarına göre [kW/s ²] değerleri.....	20
Tablo 3.5.	Tünel güvenliği proje kriterleri.....	21
Tablo 3.6.	Aylara göre rüzgar hızı değerleri.....	27
Tablo 3.7.	Hava kalite indeksi.....	28
Tablo 3.8.	Bazı ülkelerin yangın tasarım yükleri.....	39
Tablo 3.9.	30 MW-100 MW ve eğimin %-4,750, %4,750 olduğu kısımlar için kritik hız hesabında kullanılan değerler.....	39
Tablo 3.10.	30 MW ve eğimin %-4,750, %4,750 olduğu kısımlar için kritik hız hesap sonuçları.....	41
Tablo 3.11.	100 MW ve eğimin %-4,750, %4,750 olduğu kısımlar için kritik hız hesap sonuçları.....	41
Tablo 3.12.	Trafik durumuna ve araç hızlarına göre trafik hacmi.....	43
Tablo 3.13.	Trafik durumuna göre CO ve K değerleri.....	45
Tablo 3.14.	Araç motorlarının emisyon standartları.....	46
Tablo 3.15.	Negatif eğimli tüpün 30 MW yangın gücüne göre basınç kaybı.....	52
Tablo 3.16.	Negatif eğimli tüpe göre 30 MW ve 100 MW yangına göre jet fanların konumu ve adedi.....	53
Tablo 3.17.	Negatif eğimli tüpün 100 MW yangın gücüne göre basınç kaybı.....	55
Tablo 4.1.	30 MW yangın gücü için havalandırma senaryoları.....	56
Tablo 4.2.	100 MW yangın gücü için havalandırma senaryoları.....	90

TÜNEL YANGINLARINDA JET FANLARIN KONUMU - HAVA İLETİM YÖNÜ VE FAN HIZININ TAHLİYEYE ETKİSİNİN SİMÜLASYON İLE İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında eğimli bir tünel yangınında jet fanların konumu, hava iletim yönü ve fan hızının tahliye etmesinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımı ile incelenmiştir. Tüneller coğrafi engebelerin aşılıp, buna bağlı mesafelerin azalmasıyla hayatımızın büyük bir parçası olan ulaşımı kolaylaştırmaktır. Tünellerde çıkan yangın ve kazalarda çok ağır sonuçlar meydana gelmektedir. Yangınlarda ölümlerin en büyük sebebi çıkan duman gazlarının entübe (solunması) ile oluşmaktadır. Tünelde araçlardan çıkan emisyonları düşürerek acil durumlarda çıkan sıcak dumanları kullanıcılardan uzaklaştırılmalıdır. Bu tez çalışmasında Erzurum ve Rize arasında yapılmakta olan Kırık Tüneli için basınç kayıpları, jet fanların sayısı, debisi, hava iletim yönü belirlenmiştir. Tünel 7091 m boyunda at nalı kesitindedir. Ayrıca tünelin %-4,75 eğimli olduğu ve bu eğime göre geometri oluşturulmuştur. 709 m için tünel modellenmiştir. Tünelin çok uzun olması sebebiyle tünelin çıkış kısmında özellikle dumandan etkilenme oranı yüksek olacağından dolayı çıkış kısmının analizleri yapılmıştır. Amaç tünelde bir araç yangını durumunda daha hassas analiz sonuçları elde etmektir. Kırık Tüneli için 30 MW ve 100 MW yangın yükü için analiz yapılmıştır. Konumuna göre yerleştirilen jet fanların debileri %50 ile %75 artırıldı ve azaltıldı. Böylelikle her yangın gücü için 5 durum belirlendi ve duman tahliyesi simülasyon ile incelendi. Farklı jet fan debilerine göre tünelde meydana CO, CO₂, hız, görünürlük ve sıcaklık durumları analiz sonucunda belirlenmiştir. Yapılan simülasyon sonucunda 30 MW ve 100 MW yangın yüklerinde belirlenen jet fan debileri ile havalandırma sistemleri yangın esnasında duman tahliyesini gerçekleştirebilmiştir. Fakat bu yangın yükleri için %50 ve %75 debi azalttığımız jet fanların itki kuvveti yetersiz kalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Pyrosim, jet fan, duman tahliye, eksenel havalandırma, eğimli tünel.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF JET FANS POSITION, AIR TRANSMISSION DIRECTION AND FAN SPEED ON DISCHARGE IN TUNNEL FIRES BY SIMULATION

ABSTRACT

In this thesis, the effects of the jet fans position, air direction and fan speed on the evacuation in an inclined tunnel fire were investigated with Computational Fluid Dynamics software. Tunnels are to facilitate transportation, which is a big part of our lives, by overcoming geographical obstacles and reducing the distances associated with it. Fires and accidents in tunnels have severe consequences. The most significant cause of death in fires is caused by intubating (breathing) the smoke gases. By reducing the emissions from the vehicles in the tunnel, the hot fumes that come out in emergencies should be removed from the users. This thesis determined the pressure losses, the number of jet fans, the flow rate, and the air transmission direction for the Kırık Tunnel, which is being built between Erzurum and Rize. The tunnel is 7091 m long and has a horseshoe section. In addition, the tunnel has a slope of -4.75%, and the geometry was created according to this slope. The tunnel is modeled for 709m. Because the tunnel is very long, the analysis of the exit section of the tunnel was made since the rate of exposure to smoke would be high, especially in the exit section of the tunnel. The aim is to obtain more precise analysis results for a vehicle fire in the tunnel. Analysis was performed for 30 MW and 100 MW fire loads for Kırık Tunnel. The flow rates of the jet fans placed according to their position were increased and decreased by 50% to 75%. Thus, five situations were determined for each firepower, and smoke evacuation was analyzed by simulation. According to different jet fan flow rates, CO, CO₂, velocity, visibility, and temperature conditions in the tunnel were determined as a result of the analysis. As a result of the simulation, the jet fan flow rates determined at 30 MW and 100 MW fire loads and ventilation systems were able to perform smoke evacuation during a fire. However, the thrust of the jet fans, for which we reduced the flow rate by 50% and 75% for these fire loads, was insufficient.

Keywords: Pyrosim, jet fan, smoke ventilation, axial ventilation, inclined tunnel.

1. GİRİŞ

Tünel ifadesine kavramsal olarak bakıldığında, ulaşım veya araç yolunun bir miktarının yer üstünden geçmesinin teknik açıdan çok olası bulunmadığı veya ilgili yeni durumun ekonomik açıdan uygun olmadığı hallerde söz konusu yolların bir miktarının yer altından yapılmasına olanak tanıyan yer altı yapılarıdır. Tüneller genel olarak bakıldığında coğrafi engebelerin aşılıp, buna bağlı mesafelerinde azalmasıyla, hayatımızın büyük bir parçası olan ulaşımı daha da kolaylaştırmaktır. Bu tünellerdeki en büyük konu güvenlidir. Tünelde çıkabilecek tehlikelerden biri yangındır. Yangınlı kazalarda yaralanma ve ölümlerin çoğu duman dumanın solunması ile meydana gelmektedir (URL 1).

Türkiye Cumhuriyeti 59. 60. ve hükümetleri tarafından 2023 hedeflerinin gerçekleşmesi bağlamında ülkemiz içerisinde Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı açısından birçok sayıda karayolu tüneliyle hayata geçmiş olup, planlama yapılmıştır. Tünel projelerinde yaşanan inşaat çalışmalarında Türk inşaat sektörleri müteahhitlik bağlamında ciddi tecrübeler kazanılmış olup ancak yangın ve acil haller esnasında tünelin güvenli manada işletiliyor olması ve sistemin geliştirilmesi hususunda hala müşavirlik merkezli hizmet türleri yurtdışı merkezli sağlandığı görülmektedir. Coğrafi yapısı nedeniyle son yıllarda daha efektif bir ulaşım ağı için, tünel çalışmalarına ciddi önem atfedilmiştir. 2003 senesine değin 50 km uzunluğuna sahip olan 83 adet tünel varken, 2022 Karayolları Genel Müdürlüğü nezdinde hesaplanan tünel envanterine göre de 224 adet tek tüplü, 125 adet çift tüplü olmak üzere 407,337 km uzunluğunda toplam 349 adet tünel olduğu görülmüştür

Yaşanan gelişmelere baktığımızda bir tünel yangını durumunda tünelde çıkan sıcak hava ve zehirli dumanı hızlı bir şekilde tahliye edilememektedir. Yangın istatistiklerine baktığımızda duman parçalarının solunmasında, toksik gazdan boğulmadan ölüm sayısı %85'ini oluşturmaktadır (Yu et al., 2014). Tünel yangınlarını deneysel olarak araştırmak tehlikeli ve çok maliyetlidir. Bunun yanında modelin küçültüp araştırmasıyla sonuçlar elde edilmektedir. Böylelikle daha etkin sonuç veren bir tünelin araştırması girişimi için faaliyetler yürütülmüştür.

Tablo 1.1. Trafiğe açık tünellerin bölgelere göre dağılımı (URL 2)

DEVLET VE İL YOLLARI ÜZERİNDEKİ TRAFİĞE AÇIK TÜNELLERİN BÖLGELERE GÖRE DAĞILIMI (2022)												
BÖLGE ADI	TÜNEL ADEDİ		TOPLAM TÜNEL ADEDİ	0-500 m ARASI TÜNELLER	0.5-1 km ARASI TÜNELLER	1-2 Km ARASI TÜNELLER	2-3 km ARASI TÜNELLER	3 km DEN UZUN TÜNELLER	TEK TUP TÜNELLER	ÇİFT TUP UZUNLUK		TOPLAM UZUNLUK
	TEK TUP	ÇİFT TUP								SAĞ TUP	SOL TUP	
1.Bölge	0	0	0	0	0	0	0	0				0
2. Bölge	0	3	3	2	0	0	0	1		4636,00	4593,00	9229,00
3. Bölge	1	1	2	2	0	0	0	0	457	402	402	1261,00
4. Bölge	1	1	2	0	0	1	1	0	2071,00	903	1050,00	4024,00
5. Bölge	1	21	22	6	7	6	2	1	225	23700,00	23642,00	45567
6. Bölge	0	0	0	0	0	0	0	0				0
7. Bölge	35	21	56	31	12	9	2	2	19781,6	21152,81	20921,88	61856,2
8. Bölge	2	13	15	10	2	2	1	0	816	9449,00	9348,00	19613
9. Bölge	3	2	5	2	2	1	0	0	1606,00	1554,00	1529,00	4689,00
10. Bölge	114	43	157	84	40	23	6	4	61608,00	64625,00	63626,00	189859
11. Bölge	13	3	16	12	1	2	1	0	6711,00	2430,00	2370,00	11511
12. Bölge	5	4	9	6	1	1	1	0	4595,00	2064,00	1677,00	8336,00
13. Bölge	10	3	13	7	2	4	0	0	6215,00	22934,00	2400,00	10909
14. Bölge	1	2	3	0	2	0	1	0	606	3210,00	3314,00	7130
15. Bölge	33	7	40	29	7	3	0	1	10847,	8582,00	9902,00	29331
16. Bölge	5	1	6	6	0	0	0	0	1362,00	330	330	2022,00
18. Bölge	0	0	0	0	0	0	0	0				
TOPLAM	224	349	349	197	76	52	15	9	116900	145331,8	145104,8	407337

Tünellerde riskli materyallerden çıkabilecek en yaygın tehlike olarak yangın oluşma durumu bilinmektedir. Yangın, tünel içerisinde meydana gelebilecek en şiddetli kaza şekilleri arasında yer almaktadır. Tünellerde, hareket etmeye devam eden vasıtaların salınımları tünellerin içinde ciddi bir salınımına ve kirliliğe de sebep olmaktadır. Uzun karayolu bulunan tüneller içerisinde ve kurp biçiminde bulunan tünellerde hava sirkülasyonu ciddi oranda risk ortaya koymaktadır. Kullanılan bütün tünellerde doğal havalandırma yöntemiyle hava almalarının sağlanması mümkün görünmemektedir.

Karayollarında ki proje kriterlerin de trafik yoğunluk durumu şerit başına 2000 araç ve uzunluğu da 1000 m'den daha büyük olan tüneller içinde mekanik olarak havalandırma yapılma zarureti bulunmaktadır. Havalandırma sisteminin tasarımı ve seçiminde belli unsurların dikkate alınmalıdır. Söz konusu unsurlar; tünel uzunlukları, tüp sayıları, tünelin konumu ve yangın güvenliği faktörleri belirlenmektedir (Alhazmy ve Borat, 2003).

Tünel yangınlarının tünelin geometrik şekli, eğimsel özellikleri, havalandırma sistemlerinin de bulunduğu özellikleri, dış ortamda ki koşulları, yangın kaynağı yansımaları, yanma reaksiyonunu meydana getiren unsurların oransal durumları benzeri pek çok parametreden doğrudan veya dolaylı olarak etkilenmektedir (Altay, 2016). Yangın ve benzeri acil bir olay durumunda ortamdan tümüyle duman ve sıcak gazlarda yaşanan uzaklaştırılma durumları, ortam içindeki temiz hava verilme hali kişilerin kaçmalarını sağlayacakları benzeri itfaiye personelinden yangına çok daha kolay müdahalelerin edilmesini ortaya koymaktadır. Bu, sebeple de yangın bölgesinden geçen hava hızı daima kritik hız değerinden çok daha büyük ya da eşit olmak durumundadır. Böylelikle duman ve sıcak gazlar akışların bulunmuş oldukları yere doğru yönlendirilmiş olacak olup, kişilerin güvenli olarak dumandan etki duymadan güvenli olarak bölgeye geçmeleri olağan olmaktadır (Kayılı vd., 2008). Günümüzde gelişmekte olan teknolojik durumla beraber hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) tünellerin duman tahliyesinde tercih edilmektedir. Tünel içerisinde yangınların akış analizleri yapılarak ANSYS Fluent, ANSYS CFX, FDS, PHOENICS, STAR CCM+, PyroSim ve PATHFINDER gibi yazılımlar kullanılarak numerik olarak modellenmektedir. Elde edilen sonuçlar ile en uygun ve pratik duman tahliye sistemi oluşturulmaktadır. Yangın güvenliği uzmanları ve yangın mühendisleri tarafından bahsi geçen yazılımlar tam boyutta çözüm oluşturma yetisine sahip ve direkt olarak yanma reaksiyonu meydana getirmeye izin vermemesi benzeri durumlarından kaynaklı tercih edilmektedir.

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmadaki amaç, yapılmakta olan bir tünelde başta yangın olmak üzere herhangi bir duman sirkülasyonu oluşumunda tüneldeki duman tahliyesini sağlayacak model, teknik yaklaşım ve planlamalar hazırlamaktır. Ayrıca tüneler de referans olarak alınan PIARC'ın sunmuş olduğu hesaplama parametrelerine bağlı kalarak Excel'de yangın yüküne bağlı

olacak şekilde tünel basıncı kayıplarının hesaplanarak, temiz havayı sağlayacak olan jet fan sayısında, konumunda ve kapasitelerinde belirlenmeler yaşanmıştır. Erzurum ve Rize arasında yapılmakta olan Kırık-İspir Tüneli baz alınarak sayısal verileri kullanarak PyroSim duman tahliyesi üzerine çalışılacak, programdan elde edilmiş olan duman yoğunluk konsantrasyonlarının, tünel içindeki sıcaklık değerlerinin ve tünel kullanıcılarının tahliye edilmesi adına gerekli ortamın net şekilde ortaya konulup konulmadığı, duman yönetiminin de uygun bir biçimde yapılıp yapılmadığı Pyrosim yazılımından elde edilen verilere göre grafiklerden analiz yapılıp ve yorumlanacaktır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Gerçek boyutuyla örtüşmüş olan tünellerin tümü, gerçekleştirilen testler çoğunlukla yüksek maliyeti bulunan zaman alıcı ve lojistik olarak uygulaması çok karışık olan çalışmaların başında gelmektedir. Dahası pek çok ekipman eksikliğinden kaynaklı söz konusu testlerden elde edilmiş olan veriler bir takım hallerde oldukça eksik kalmaktadır.

Alanyazın taramasında bulunan çalışmalara bakıldığında ise tünel yangın güvenliği bağlamında çalışma yürüten çalışmacılar ya da uzmanların, gerçek boyut içindeki tüneller kullanılarak ya da ölçeklendirilmiş bir model tünel üzerinden deneysel ya da nümerik çalışmalar yürüttükleri gözlemlenmiştir.

Wu and Bakar (2000). mevcut kritik havalandırma hızı tahmin yöntemlerinde belirsizliklerinden yangın gücünün kritik havalandırma hızı üzerindeki etkisi ve tünel geometrisinin kritik hız üzerindeki etkisini incelemiştir. Tünellerde detaylı sıcaklık ve hız dağılımları yapılmış ve kritik hızın tünel geometrisi ile değiştiğini göstermiştir. Ayrıca, yangına karşı kritik hızın iki varyasyon rejimi olduğu açıkça gösterildi. Yangın dumanları içindeki sıcaklık dağılımının analizi, kritik havalandırma koşullarında iki yangın dumanı dağılımı olduğunu göstermiştir. Beş tünel için deneysel verilerin, ölçeklendirme için kullanabilecek basit formüllerle ilişkilendirilebileceği görülmüştür.

Atkinson and Wu (1996). tünel eğimiyle kritik hız durumu özelindeki etkileşme mekanizmasını incelemek adına düz zemin yapısıyla %10'luk seviyeye kadar eğimli tünel modelleri içerisinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Söz konusu çalışmaların sonunda da, düz bir tünel ile eğimli bir tünel özelinde olabilecek kritik hızlar içerisindeki ilişkilere bakılmıştır.

Oka and Atkinson (1995). blokaj etkisinde bulunan ısı yayma oranları ile ortaya konan etkiye odaklanmışlardır. Yangının tünel genişliğinin büyük kısmını işgal ettiği ve tavana doğru yükselerek arttığı ve kritik hızlarının azaldığı gözlemlenmiştir.

Hu et al. (2007). yapmış oldukları araştırmasında tünel içerisinde bulunan duman sıcaklığının değişim algoritmasını ortaya koymuşlardır. Duman hareket yönünde bulunan havalandırma hızlarının etki durumunu ve tünel içerisindeki bariyer etkisinin duman sıcaklığıyla ve hareketi üzerindeki etkilerini de araştırmışlardır.

Kurioka et al. (2003). tünel içinde oluşan yangının yakın bölgesinde gerçekleşen bütün olay sarmalını analizlemişlerdir. Alev topunun eğim kazanması, görünür alev yüksekliğinde artışlar için ampirik formüller 1/10 ölçekli model tünel kullanılarak elde edilmiştir.

Vauquelin and Wu (2006). tünelde yangın meydana geldiğinde dumanın geri akışını önlemek için propan gazı alevi kullanan bir termal model ve yangın kaynaklı dumanın sürekli bir izotermal salınımı ile temsil edildiği densimetrik model incelemelerini yapmıştır.

Kashef et al. (2009). iki ayrı alan içinde (birisi düz alan ve diğeri kavisli alan) meydana getirilen uzun bir yol tüneli içerisinde 30 MW'lık bir etkinlik ile duman yayılma durumunu kontrol altına alabilmek adına değişik acil durum havalandırma yöntemlerinin tümü ve ortaya koydukları performansa bakılmıştır. Çalışmanın sonunda kavisli alan içerisindeki duman geri tepme durumunu en aza indirmek adına, kavisli alan boyunca tavan jet fanlarının kurulmasının önemi ortaya konulmuştur.

Ch Cheong et al. (2009). yanan tahta ve plastik paletlerin basitleştirilmiş bir temsili geliştirdi ve FDS simülasyonu ile yangın büyüme özelliklerini yeniden üretebildiği gösterdi. Ahşabın modellemek sınırlı olduğunu belirtilmektedir. Tüm alevleri yakalamak için uygun bir alan oluşturmanın önemli olduğunu görülmüştür. HRR üretmek mümkündür fakat yakıtın çökmesini yeniden üretemedi.

Çoşkun vd. (2018) FDS yazılımı ile bina modellenmişlerdir. Binanın terasındaki ışıklık bölgesine göre kapalı ve açık olması durumu ve ışık olan alana ise duman tahliye fanı eklenmiş olup 5 farklı senaryo incelenmiştir.

Fan et al. (2013), küçük ölçekli bir tünel modeli akışkanlar mekaniği laboratuvarında yapılmıştır. Froude sayısı temel alınarak yapılan ölçeklendirme ile değişik şekillerde

dizilmiş tahta malzemeler model tünel içinde kontrollü bir ortamda yakılmıştır. Değişik havalandırma hızlarında yangının ısıl gücü, gaz konsantrasyonu, kütle azalma hızı ve tünel boyunca oluşan sıcaklık değerleri llerek değişik kesit alanlarına sahip yanan parçaların etkisi araştırılmıştır.

Dinler ve Kaçan (2020) uzun bir karayolu tüneli (14500m) içindeki taşıt yangını için 30 MW için acil durrum modellemesi yapılmış olup kritik nokta belirleyerek 1000 metresi incelenmiştir. Sıcaklık değerlerini incelenmiş ilk 30 m ortalama 30 K zerinde, CO emisyon değerlerinin ise 400 ppm altına inilmediğini belirlemişlerdir.

elik (2011) tünel yangınlarında deneysel ve nümerik çalışmasında etanol, benzin ve etanol ve benzin karışımı olmak üzere üç farklı sıvı yakıt türünün farklı miktarlarda, farklı geometrilerde ve farklı havalandırma şartları altındaki yangın durumunu incelemiştir. Yanma sonucu ortaya çıkan gazlar ve yanma miktarları ölçülmüş ve analiz edilmiştir. Bu deneylerin nümerik çalışmaları bir CFD kodu olan Fire Dynamics Simulator (FDS) ile yapılmıştır.

Wang et al. (2010) eğimli bir yol tünelinde jet fanların aerodinamik davranışını ve tünel havalandırma sistemi üzerindeki etkilerini araştırılmak için hesaplamalı bir çalışma yapılmıştır. Eğimli bir tünelde statik ve dinamik basınç değişimlerinin monoton olmadığı bulunmuştur. Basıncın tamamen geri kazanılması için gereken mesafe yaklaşık 90–120 olduğunu incelemişlerdir.

Karaslan vd. (2013) kısa bir tünel incelenmişlerdir. Yangın kaynağını simüle Yangın dikdörtgensel havuzunu tünel zeminin merkezine yerleştirilmişlerdir. Yangın kaynaklı duman hareketini ve sıcaklık dağılımını FLUENT yazılımını kullanarak incelemişlerdir.

Aydın vd. (2020) yaptığı çalışmada tünel sayısının fazla olduğu Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan Gümüşhane ve Trabzon illerinde 17 adet tünel için gidiş ve geliş yönü için güvenlik ve işletim problemleri ve tünelin sürücü davranışı üzerindeki etkileri ortaya koymuşlardır.

He et al. (2021) bir tünel yangını meydana geldiğinde tavana monte edilen duman ve sıcaklık dedektörünün tepki hızının önemine ve jet motorlarının tasarımıını araştırmak için sayısal

deney ve simülasyon gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği üzerinde farklı noktalara monte edilen 24 adet sıcaklık ölçerle birlikte, CO ve O₂ gazlarının konsantrasyonu, gaz hızı ve basınç değişimi değerleri deneyler sırasında ölçümlenmiş ve kayıt edilmiştir. Yangın kaynağı olarak LPG kullanmıştır. HAD yazılımı ile Fire Dynamics Simulator ile nümerik analizler gerçekleştirilmiştir (Gültek, 2017).

Se et al. (2012). yangın kaynağının farklı boyutlarını Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) incelemişlerdir. Hava akış hızı, sıcaklık ve fan konumlarını etkinleştirerek analizi incelemişlerdir.

Eftekharian et al. (2014). Banana® jet fan normal düz bir fanın etkinliğini araştırmak ve emisyonların tünelden boşaltma performanslarını karşılaştırmayı ve rüzgarın etkisi ile tünelin giriş, çıkışında dağ bloklarının hava akımı alanı üzerindeki etkiside incelenmiştir.

Musto and Rotondo (2014). Jet fanın Coanda etkisini ve dolayısıyla tavanındaki kayma gerilimini azaltmak için eğimli susturucularla (pitch angle $\alpha = 6^\circ$) donatılmıştır. HGV yüzeyinde yangın ayarlayarak simüle edilmiş ve jet fan itki kuvvetleri, ortalama hız değerleri için sayısal sonuçlar elde etmişlerdir.

Lee and Ryou (2005). Buna benzer bir çalışmada aynı hidrolik çapa sahip bir tünelin eni ve boyu arttıkça kritik hızın arttığını tespit etmişlerdir.

Caliendo et al. (2012). Çift yönlü kavisli bir yol tüneline modellemek için CFD modellenmesi yapmıştır. 50 Mw bir ağır yük taşıtın simüle edildi. En kötü senaryonun tünelin ortasında ve sürüş merkezinde olduğunu belirledi ve 3 m/s kritik havalandırma hızının önlendiğini göstermiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Tünelin Çalışma Alanı

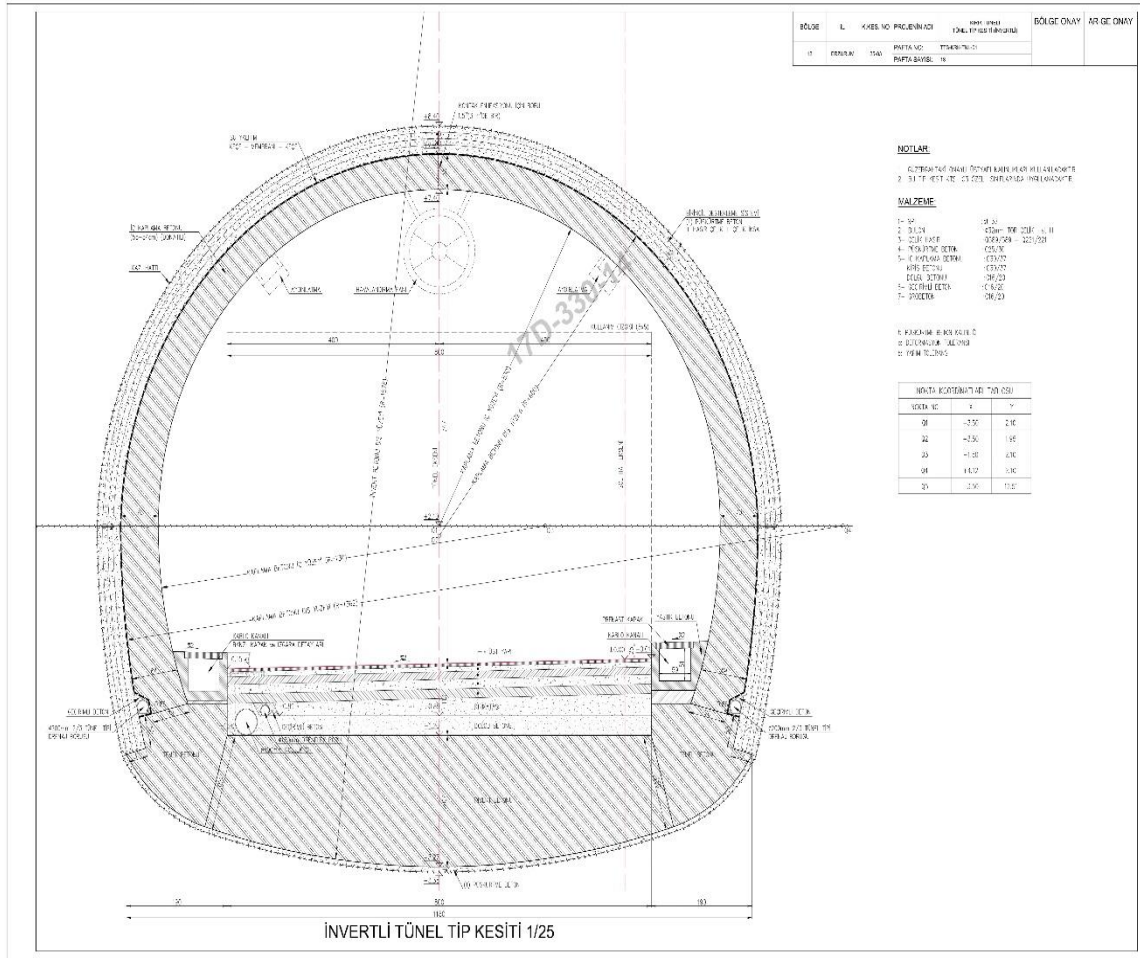
Çalışma, Erzurum ili Rize karayolunda yapılmakta bulunan Kırık tüneline yapılacaktır. Şekil 3.1’de Kırık Tünelinin uydu görüntüsü görülmektedir (URL 3). Şekil 3.2 de tünelin çalışmaları görülmektedir Şekil 3.3 de tünel tip kesiti ve Şekil 3.4 de ise tünelin plan profil kesiti görülmektedir. Kırık Tüneli Türkiye’nin kuzey-güney koridorundaki yol ağını kuvvetlendirerek geçtiği bölgede ulaşım sorununu ortadan kaldıracaktır. Kırık Tüneli Projesiyle Rize’yi Erzurum’a bağlayan yolun boyunca açık kalması, çığ havzalarının da tünel içine alınarak fiziki standardının yükseltilmesi ve çığ tehlikesi sebebiyle can ve mal kaybının önlenmesi, trafik güvenliğinin sağlanması amaçlanmaktadır. Bu tünelle her iki şehir arasındaki mesafe 33 kilometre daha kısalmış olacak. 15.8 km’lik proje bünyesinde 2x7.100 metrelik çift tüp tünel ve 8.679 metrelik bağlantı bulunurken, tünelin tamamlamasıyla mevcut yol 33 km kısılacaktır. Kırık tüneline 06.11.2014 tarihinde işe başlanmış %20 keşif artışı verilerek işin tamamlanması öngörülmüş, ancak tünel zemininin zayıf olması nedeniyle iş tamamlanamamış, 15.09.2019 tarihinde geçici kabulü yapılmıştır. Mevcut keşif ve ihale şartlarında proje tamamlanamadığından, ikincil işlerin dahil olduğu ikmal ihalesi 12.06.2020 tarihinde yapılmıştır. 19.07.2022 tarihi itibarıyla, sözleşme fiyatları ile yapılan iş tutarı 327.379.638,33 TL’dir.



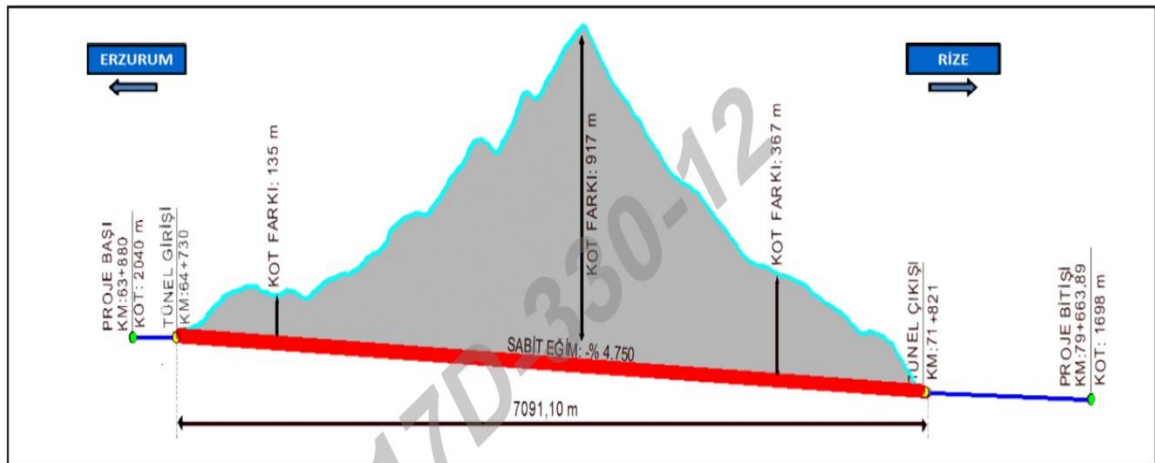
Şekil 3.1. Kırık Tüneli uydu görüntüsü (URL 3)



Şekil 3.2. Kırık (İspir) Tüneli çalışma alanı



Şekil 3.3. Kırık Tüneli tünel tip kesiti

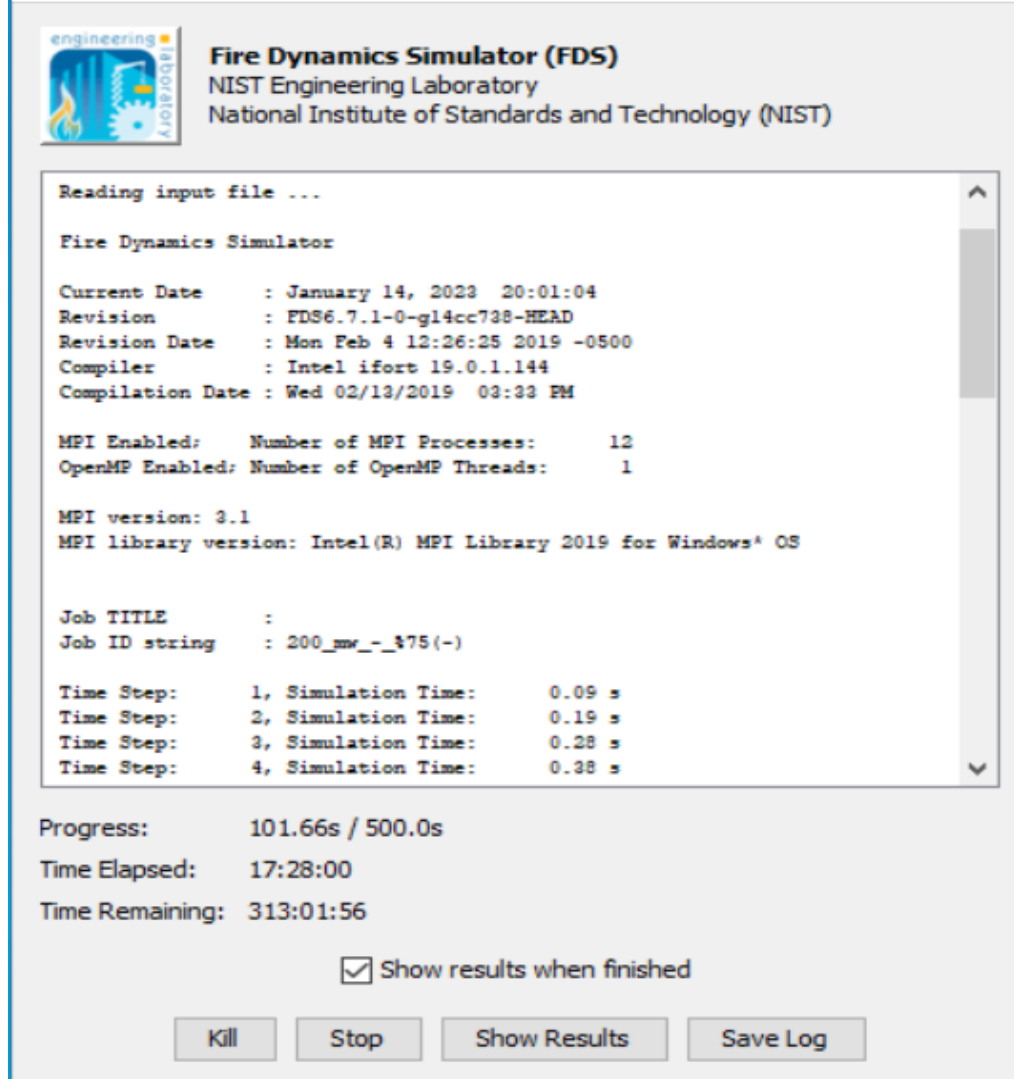


Şekil 3.4. Kırık Tüneli plan profil kesiti

3.2. PyroSim Programın Arayüzü

Kırık tüneline oluşacak bir yangın veya herhangi bir sebeple oluşan duman tahliyesini sağlamak amacıyla jet fan havalandırma ve Pyrosim yazılımı yardımıyla en uygun sistem oluşturulmaktadır. Yapılan çalışmalarda optimum çözüme ulaşmak için incelenen senaryolar, HAD yazılımlarından FDS (Fire Dynamics Simulator) programının son versiyonu yardımıyla oluşturulmuştur. FDS düşük hızlı akışlar için Large-Eddy simülasyonu kodudur. Türbülans hesaplaması Doğrudan Sayısal Simülasyonu veya Büyük Girdap Simülasyonu ile çözüm yapılabilir. LES modeli büyük ölçekteki girdapları hesaplar termal iletkenlik, viskozite gibi yayımları kısa sürede çözüm yapmaya olanak tanımaktadır. Yangın sırasında duman içinde bulunan gaz bileşenlerinin çözümlemesini yapmaktadır. Pyrosim ara yüz programının özellikleri FDS için geliştirilmiş bir grafik ara yüz programıdır. FDS, nümerik olarak düşük hızlı ($Ma < 0,3$) Navier-Stokes denklemleri yardımıyla özellikle yangın kaynağından duman ve ısı taşınımı gibi ısı termal güdümlü akışın simüle edilmesinde kullanılır. Yangın programını Thunderhead Engineering şirketi geliştirilmiştir. Arka planda çözümü yapan program ise NIST Amerika Birleşik Devletleri Ticaret Bakanlığı'nın Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü geliştirilmiştir. CAD elde edilen mimari çizimleri IFC, DXF, DWG, FBX, STL, FDS formatları formatları olarak yazılıma aktarılması ve model oluşturulması mümkündür. Alternatiflerine baktığımızda ise GIF, JPG veya PNG arka plan görseli olarak kullanmak mümkündür. (Forney and Smokeview, 2016).

Pyrosim yazılımı mesh yapısını farklı hacimlere ayırma fırsatı sağlamaktadır. Çözümlemeyi hızlandırmak için bilgisayarın ram kapasitesine ve işlemci sayısına bağlı olarak paralel işlem yapılırken hazırlanan çizim içerisinde hücre aralıklarını istenilen bölgelerde arttırma, istenilen bölgelerde azaltmaya da imkân vermektedir. Bu durum çözümün hassas olmasını ve istenilen bölgeye odaklanamayı sağlamaktadır. PyroSim her türlü engel, boşluk, duvar ve deliklerle bina ve tünel modellemeyi yapan yüksek seviyeli 2 boyutlu (2D) ve 3 Boyutlu (3D) geometri oluşturmasını sağlamaktadır (Khandoker et al., 2018).



Şekil 3.5. FDS simülasyon ekranı

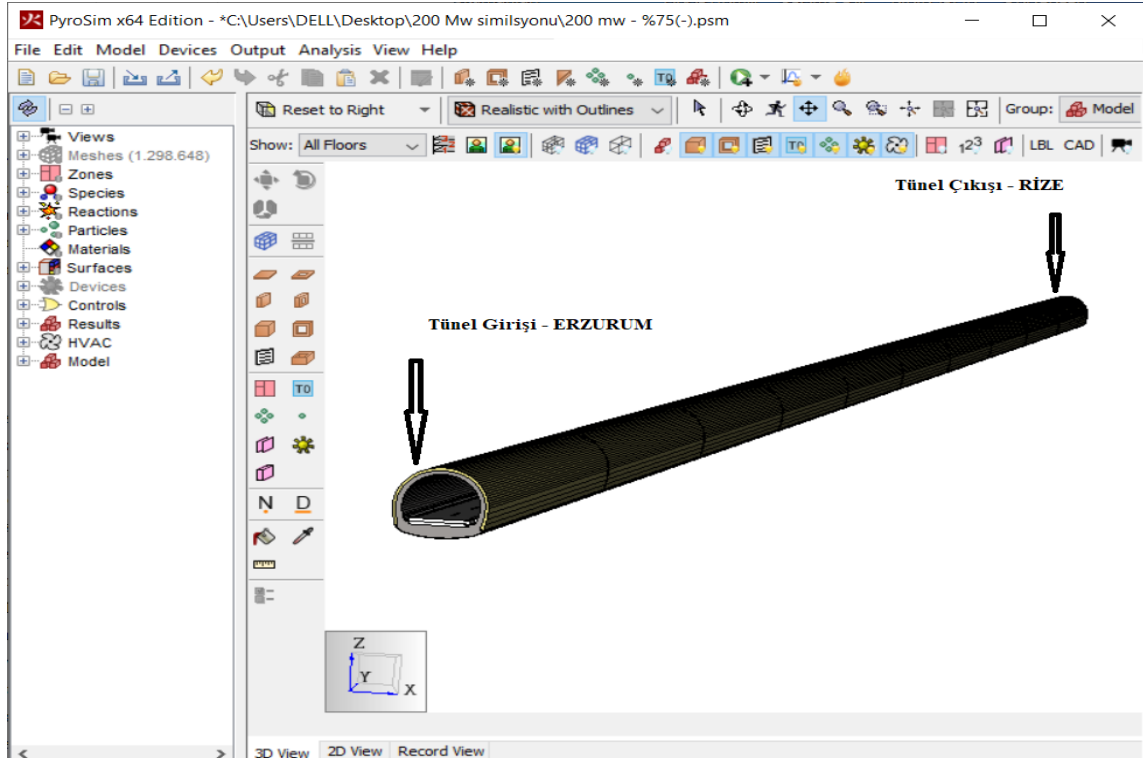
Tünelde uzunluk boyunca işlev görecektir bir duman tahliyesi tasarımı ve altyapısının sağlanması hedeflenmektedir. Tünelde küçük araçlarla birlikte daha çok büyük araç sirkülasyonu olacağı düşünülerek yüksekliği ve uzunluğu dikkate alınarak optimum itme gücüne sahip jet fan seçilmektedir. Bu büyük araçların taşıyacağı yükün değişkenlik göstermesi sebebiyle oluşacak olası yangının şiddetinin de çoğu zaman büyük olacağını göstermektedir. Tünelde kullanacak jet fanlar, yarattıkları itme kuvveti ile önlerindeki hava kütlesine hızla vurarak geniş bir alandaki havayı iterek ve sürükleyerek harekete geçirebilme gücüne sahip olmaktadır. Jet fanların itme gücüne bağlı olarak havayı süpürme mesafeleri şirketlerin ürün kataloglarında mevcut halde bulunmaktadır. Süpürme mesafelerine göre fanlar, paralel ve seri olarak tünel tasarımına göre yerleştirilmektedir.

Burada tünelin konumuna göre yerleştirilen acil durum fanlarının debi kapasiteleri belirlenerek, bu fanların doğru çalışabilmesi için havalandırma kanallarının tasarımı ve gerekli fan basınçları belirlenecektir. Bu amaçla, günlük ve acil durum (yangın) havalandırma hesapları yapılmış olan tünel içerisinde 3 boyutlu zamana bağlı olarak simülasyonları yapılmaktadır. Doğal hava şartları da tünel hesaplamalarında önemli bir yer tutmaktadır. Havanın sıcaklığı ve nemi jet fan itki güçlerini etkilemektedir. Ayrıca araç akış yönünün aksine oluşacak rüzgâr, yangın anında dumanın tünel içerisinde tahliyesini zorlaştıran etkilere biri olacağı için tahliyede bu etkenlerde dikkate alınmaktadır.

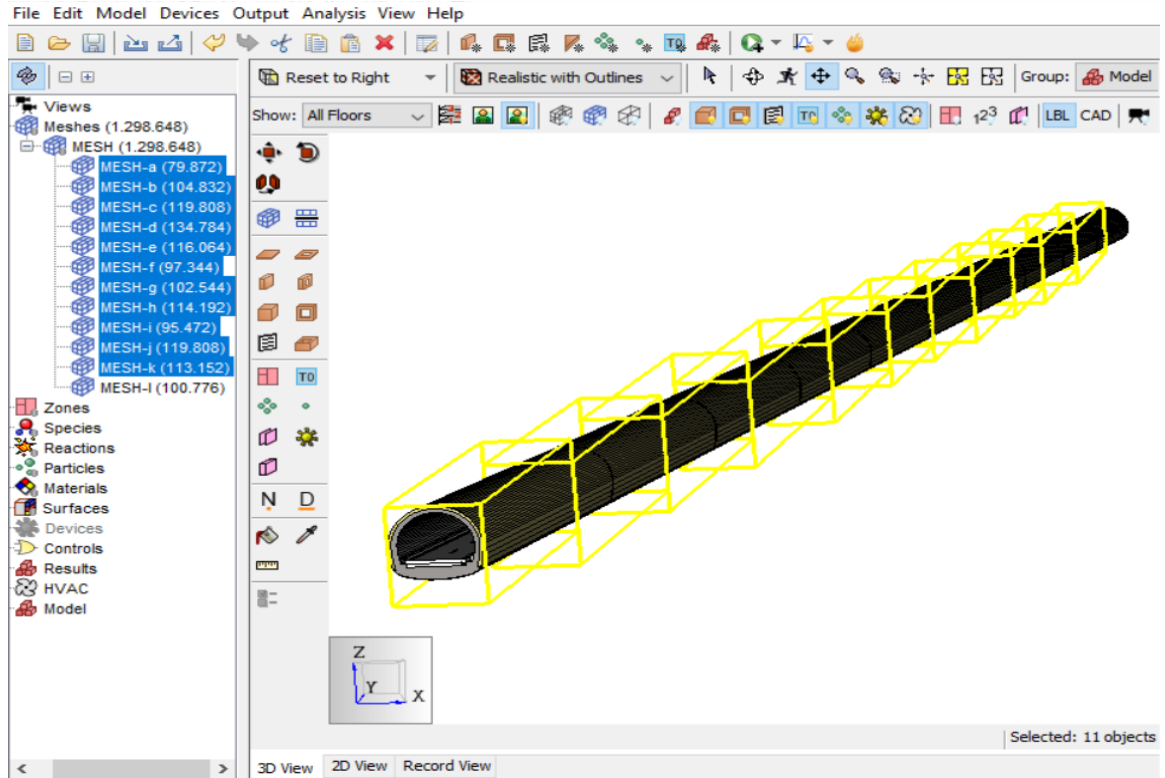
3.3. Modelde Uygulanan Çalışma Yöntemi

Tünel modellemeyi önce tünel kesitleri SketchUp da üç boyutlu çizilmiş ve daha sonra AutoCAD programında DXF kaydedilmiştir. 3 boyutlu olarak hazırlanmış ve yangın anındaki dumanı simüle edilmiştir. Pyrosim programında ise analiz için tünelin 709 m'si için tünel modeli oluşturulmuştur. 7091 m boyuna, 7.47 yüksekliğine, 11.8 m enine sahiptir. Pyrosim programında ise analiz için tünelin 709 m'si için tünel modeli oluşturulmuştur. Eğimli bir yapıya sahip olduğundan dolayı %-4,750 eğimli tünel modeli oluşturulmuştur.

Tünel işletme sıcaklığı 288 K° ve yoğunluğu 1.200 kg/m³ değerindedir. Rüzgâr hızı 4 m/s ve duvar pürüzlülük katsayısı 0.02 alınmıştır. Büyük boyutlu ağ içeren bir modelde çoklu ağ oluşturularak çözüme ulaşamamaktadır. Modeldeki mesh sayısı 1.298.648 hücreye bölünmüştür ve 12 split (bölme) yapılarak daha hassas çözüme ulaşmak için hücreler kendi içinde bölünmüştür ve böylelikle çözüm süresi kısaltılmaya çalışılmıştır. Şekil 3.6 da pyrosim programının arayüzü ve modelin görüntüsü görülmektedir. Yangın gücünün yüksek simülasyonlar düşük yangın gücündeki durumlara göre daha kısa sürelerde tamamlandığı görülmüştür. Daha hassas çözümler için orta sıklıkta meshler seçilmelidir. Yangın yükleri için cell size (hücre boyutu) 0.5x0.5x0.5 alınmıştır. Şekil 3.7 de mesh yapısı ve sayısı görülmektedir.



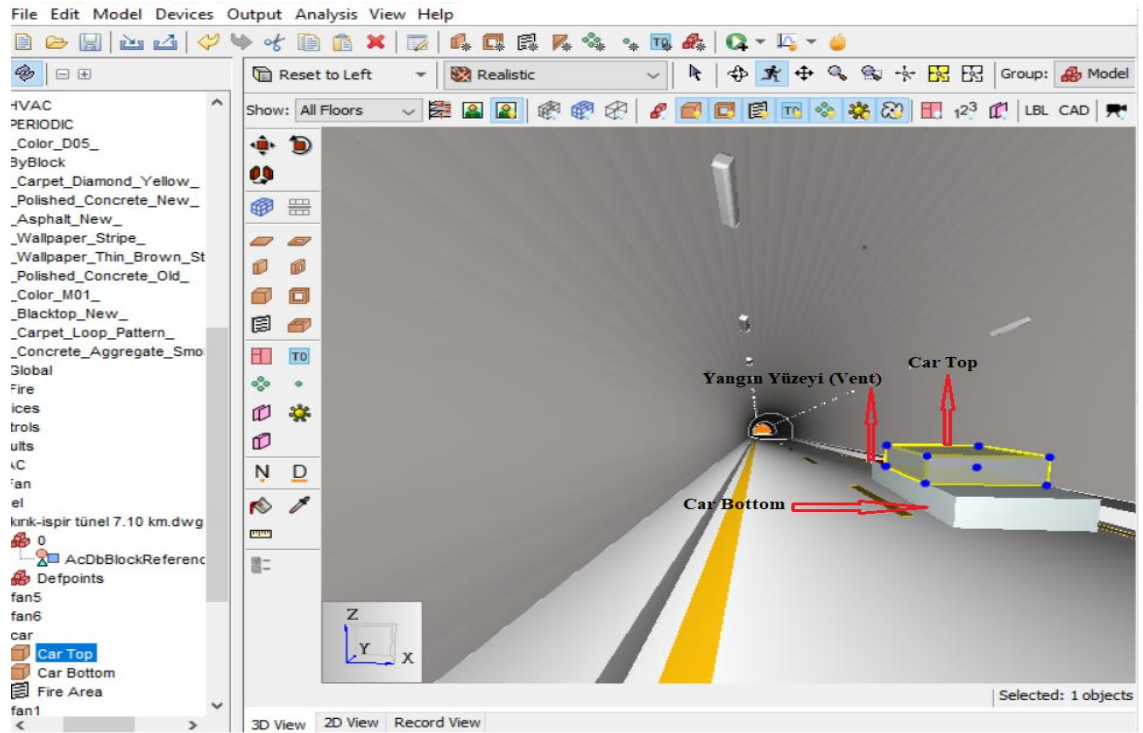
Şekil 3.6. Pyrosim programının arayüzü ve model tünelin görüntüsü



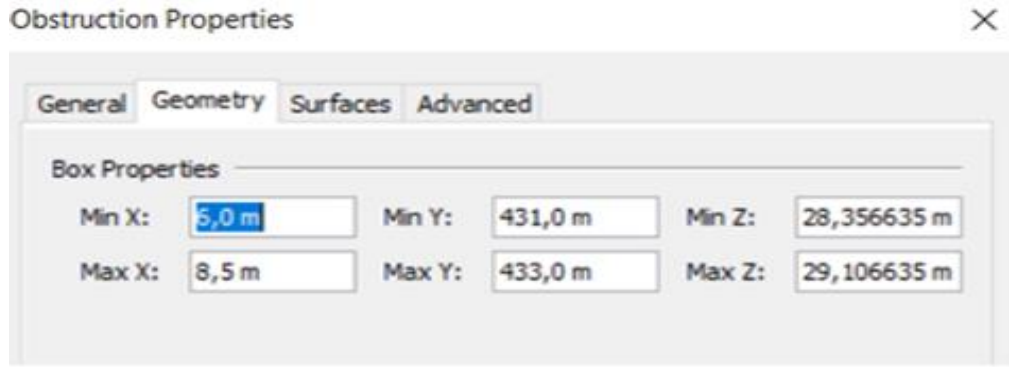
Şekil 3.7. Modeldeki mesh sayıları ve görüntüsü

Tablo 3.1. L = 709 m tünel modelin mesh konumu ve mesh sayısı

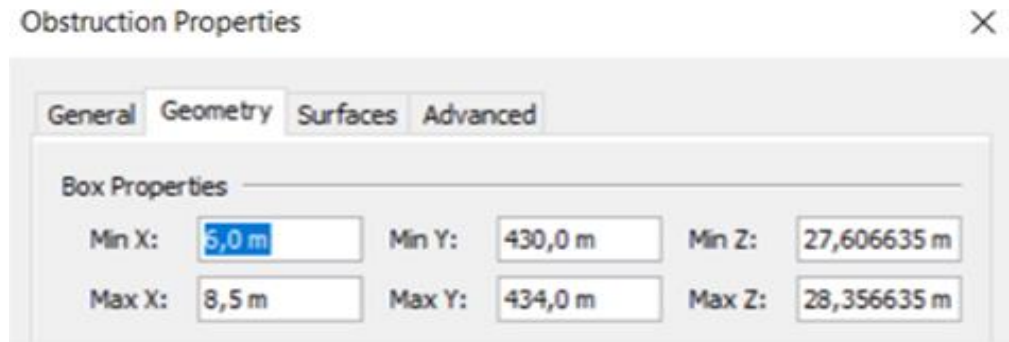
	Min Y (m)	Max Y (m)	Mesh Sayısı	Cell Size (m)
Mesh a	0	48	79.872	0,5x0,5x0,5
Mesh b	48	104	104.832	0,5x0,5x0,5
Mesh c	104	168	119.808	0,5x0,5x0,5
Mesh d	168	240	134.784	0,5x0,5x0,5
Mesh e	240	302	116.064	0,5x0,5x0,5
Mesh f	302	354	97.344	0,5x0,5x0,5
Mesh g	354	412	102.544	0,5x0,5x0,5
Mesh h	412	473	114.192	0,5x0,5x0,5
Mesh i	473	524	95.472	0,5x0,5x0,5
Mesh j	524	588	119.808	0,5x0,5x0,5
Mesh k	588	652	113.152	0,5x0,5x0,5
Mesh l	652	709	100.776	0,5x0,5x0,5



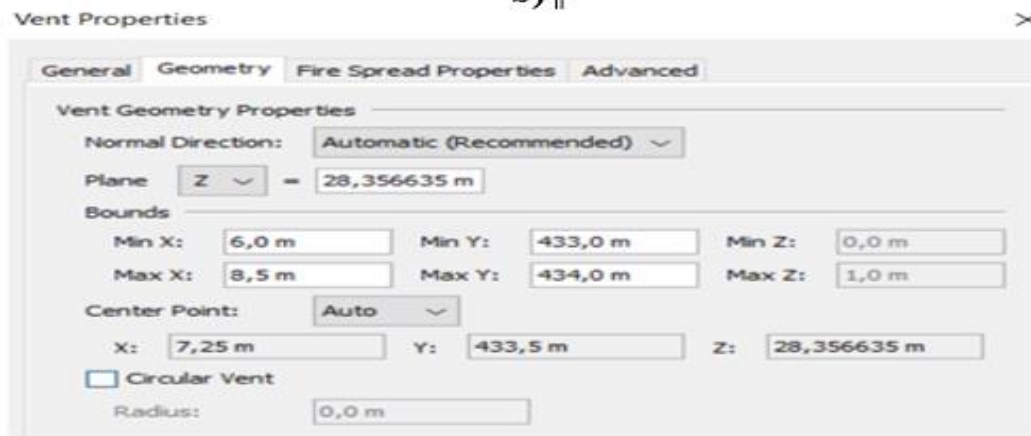
ekil 3.8. Tnel içindeki aracın görüntüsü



a)



b)



c)

Şekil 3.9. Aracın geometrik konumu a) Car bottom, b) Car top, c) yangın yüzeyi

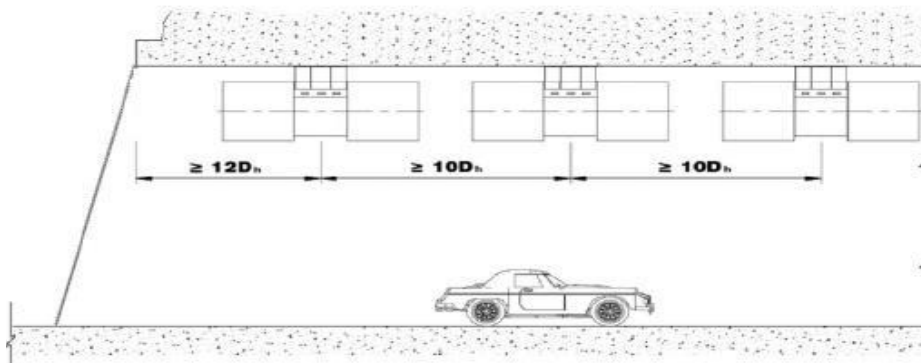
Yangın yüzeyi tanımladıktan sonra reaksiyonları tanımlanmalıdır. Şekil 3.9 da aracın geometrik konumu ve car aracın modeli ölçüleri görünmektedir. Car bottom (a) altaki yüzey modelini, car top (b) ise üsteki modelini göstermektedir. Yangın kaynağı literatürde yer alan heat release rate (ısı salınım hızı) ve tanımladığımız car aracı tünele yerleştirilmiştir. Tüm durumlar için (2,5x1x1) car yangın reaksiyonu (c) oluşturulmuştur. İş üretimi, CFD ile yangın simülasyonlarında hesaplamalarda visibility (görünürlük)

değerini belirleyen önemli faktörlerden biri olup yangın sırasında yanan malzemenin cinsine bağlıdır. Yapılan çalışmalarda yanma ürünleri Tablo 3.2. de verilen değerler kullanılmaktadır.

Tablo 3.2. Yangın simülasyon programında kullanılan veriler.

<i>Yakıt İsmi:</i>	<i>Car</i>	<i>Yakıt Tipi</i>	<i>Simple Chemistry Model</i>
<i>Kritik Alevlenme Sıcaklığı: 1327 C°</i>			
<i>Yakıt Kompozisyonu</i>		<i>Yanma Ürünleri</i>	
<i>Karbon</i>	1	<i>CO</i>	0.044
<i>Hidrojen</i>	1.93	<i>SOOT (İS)</i>	0.117
<i>Oksijen</i>	0.45	<i>Hidrojen Oranı</i>	0.1
<i>Nitrojen</i>	0.091		

Tünel de jet fanların konumu karayolları tüneli havalandırma sistemi başlığı altında excell olarak belirlenmiştir ve buna göre jet fan yerleştirilmiştir. Şekil 3.10 da jet fanların yerleşimi için alınması gereken şekil görünmektedir. Burada tünelin giriş ve çıkışında $12 \cdot D_h$ alınmalıdır ancak fanlar arasına ise $10 \cdot D_h$ (hidrolik çap) mesafede fanlar yerleştirmelidir.



Şekil 3.10. Tünelde jet fan yerleşimi

30 MW ve 100 MW yangın için jet fan debileri %50 ve %75 azaltıp artırılması yapılarak simüle edilmiştir. Debilerin azaltılması jet fan hızıyla doğru orantılı olarak çalışmaktadır. Fan hızlarının düşmesi duman tahliyesini zorlaştırmaktadır. Tünel içinde kullanılan duman

dedektörü (smoke detector) sayesinde duman en yakın jet fana geldiğinde itki kuvveti aktif hale gelmektedir. Modelimiz smoke detector yangın bölgesine yakın (5, 400, 36) koordinatlarına göre konumlandırılmış ve Cleary Photoelectric P1 tipi seçilmiştir. Tünelin giriş ve çıkışına vent yüzeyi tanımlamıştır Orda amaç open yüzeyi yapılarak tünelden duman tahliyesi çıkışı gözlemlemektir. Tablo 3.3 modelde 2D Slice X=5.5 m olacak şekilde tünelin ortadan ortaya bölünmüştür. Hangi yüzeyde hangi gaz fazı kalitesini bulmak istediğimiz ve bu sonuçların nasıl görünmek istediğimizi tanımlaması gerektiği görülmektedir. Amaç istediğimiz noktadaki verileri analiz etmek ve sonuçları elde etmektir.

Tablo 3.3. Analiz sonucu belirlenecek parametreler

Animated Planar Slices				
XYZ Plane	Plane Value	Gas Phase Quntity	Use Vector?	Cell Centered?
X	5,5 m	[Species: SOOT] Volume Fraction	NO	NO
X	5,5 m	Visibility	NO	NO
X	5,5 m	Temperature	NO	NO
X	5,5 m	[Species: CO] Volume Fraction	NO	NO
X	5,5 m	[Species: CO ₂] Volume Fraction	NO	NO
X	5,5 m	[Species: O] Volume Fraction	NO	NO
X	5,5 m	Velocity	YES	NO

HRRPUA (Alan başına ısı salınım oranı) ise 2.5 m^2 yangın alanı için sırasıyla 12000 kW/m^2 , 40000 kW/m^2 ve 80000 kW/m^2 olarak alınmıştır. Simülasyonda yangının $Q = a \cdot t^2$ ifadesi ile büyüdüğü kabul edilecektir ve burada a yangın büyüme oranını t^2 ise alev yayılımına göre değişen bir değerdir. Hızlanma süresi t^2 bağlı olarak 461 sn alınmıştır. Örneğin yangın büyüme grafiğine baktığımızda hızlı bir 500 sn de 4000 kW ulaşmaktadır. Simülasyon yapılacak tünel 30 MW (30000 kW) ve 100 MW (100000 kW) olarak alınacaktır. Yangın gücünün %20 radyasyonla ortama kabul yayıldığı kabul edilirse bunun 24000 kW ile 80000 kW'lık enerjisi duman ve hava hareketiyle tünel içerisinde yayılım gösterildiği kabul edilmektedir. $Q = a \cdot t^2$ buradan 30 MW orta hızda büyüyen yangın, 100 MW ise çok hızlı bir yangın olduğu sonucu ortaya çıkarmaktadır. Tablo 3.4. de yangın büyüme oranlarına göre $[\text{kW/s}^2]$ değerleri görülmektedir.

Tablo 3.4. Yangın büyüme oranlarına göre $[\text{kW/s}^2]$ değerleri

Yangın Büyüme Oranı	Örnek Tipik Senaryolar	α değeri [kW/s ²]
Yavaş	Yoğun bir şekilde paketlenmiş kâğıt ürünleri	0.00293
Orta	Geleneksel yatak/bazalı yatak geleneksel koltuk	0.1172
Hızlı	PU şilte(yatay), PE paletler, 1 m yüksekliğinde istiflenmiş	0.0469
Çok Hızlı	Yüksek raflı depolar 5 m yüksekliğinde istiflenmiş PE sert Köpük	0.1879

3.4. Türkiye’de Tünel Güvenliği

Tünellerde bulunan minimum güvenlik parametrelerine göre proje kriterlerini ortaya konulma durumuyla alakalı komisyonun aktarımı; Kapalı yapılar olduğundan dolayı, açık olan yollara göre trafik güvenliğininin daha fazla önlem alınması gerekmektedir. Dünya genelinde geçerli güvenlik kriterleri uygulaması olduğu için ülkelere göre farklılık göstermektedir. 07.09.2004 tarihinde KGM tarafından oluşan komisyon, dünya genelinde bu uygulamalara rehber olarak kullanımda ki;

- UNECE- Karayolu Tünelleri Uzmanlar Grubu’nun Tavsiyeleri Nihai Rapor
- PIARC- Dünya Yol Birliği
- CIE (Uluslararası Aydınlatma Komisyonu)
- APK’nin 29.04.2004 tarih ve 2004/54/EC sayılı Trans-Avrupa Karayolu Ağı Tünelleri İçin Minimum Güvenlik Gereksinimleri

Karayolu ağı için minimum Güvenlik Gereksinimlerinin altyapı önlemleri bu Genelgeye göre ele alınmıştır. Yapılmış ve yapılacak olan tünellerde güvenliğin artması gerekmektedir (Karakaş, 2011). Türkiye’de güvenliğin mevzuata girmesi, tünel çalışmışlarının daha önemli hale getirmeyi planlamaktadır. Atılacak adımlarda Türkiye ile Avrupa Birliği direktifi hazırlanan genelgeyle eksiklik ve farklılıkları öngörüp teknik çalışmayı sonuçlandırmaktır. Tünel projelerinin minimum güvenlik gereksinimlerine göre yapılmalı ve ülkenin bütçe planı dikkate alarak sağlanmalıdır. Yangın, sabotaj, trafik kazası sonucunda hasarları görülebilir bir seviyeye getirmek için acil durum alanları hesap etmelidir. 10. Ulaştırma Şurasında; 2023 de KGM planında Kuzey-Güney koridorunu oluşturulması hedeflenmiştir. Dağlık bir koridoru olan Kuzey-Güney akslarda tünel sayısı

artmakta olup tünel güvenliğinin önemini ön plana gelmektedir. Tünelde acil durum planlamaları, kazalar ve taşıtlar arasındaki mesafeyi tüneli işleten idare önlemini almalıdır.

Tablo 3.5. Tünel güvenliği proje kriterleri (Bilgin, 2014)

	*: Zorunlu		°:Zorunlu Değil		•:İstisna ile birlikte zorunlu			□:Tavsiye edilir
	ASGARİ GEREKSİNİMLER ÖZETİ		Trafik ≤2000 araç/şerit		Trafik >2000 araç/şerit			AÇIKLAMALAR
			0.5-1 km	>1 km	0.5-1 km	1-3 km	>3 km	
Yapısal Önlemler	Tüp Sayısı ≥2	1						15 yıllık trafik tahmini 1000 araç/şerit'i aşıldığını öngürse zorunludur. (3)
	Eğim ≤%5	2	*	*	*	*	*	Coğrafi koşullar uygunsa zorunludur.
	Yaya yolları	3.1, 3.2	*	*	*	*	*	Acil şeritler yoksa 3.1 maddesinde açıklanan koşul sağlanmadıkça zorunludur.
	En fazla her 500 m'de acil çıkışlar	3.3, 3.9	°	°	*	*	*	Mevcut tünelerde her bir duruma göre değerlendirilecektir.
	En fazla her 1500 m'de acil servisler için Enine Geçişler	4.1	°/•	°	°/•	°/•	•	Tünel 1500 m'de uzun ve ikiz tüplü ise zorunludur.
	Her bir portal çıkışında Orta Reflüj Geçişi	4.2	•	•	•	•	•	Coğrafi imkanın olduğu ikiz veya çok tüplü tünel çıkışlarında zorunludur.
	En fazla her 1000 m'de Cepler	5	°	°	°	°/•	°/•	1500 m'de uzun, acil şeritleri olmayan, yeni iki yönlü tüneller için zorunludur. 1500 m'de uzun mevcut tünelerde analize bağlıdır.

Tablo 3.5. (Devam): Tünel güvenliği proje kriterleri (Bilgin, 2014)

	Yanıcı ve Toksik Madde Drenajı	6	*	*	*	*	*	Tehlikeli madde taşınmasına izin verilen tünelerde zorunludur.
	Yapının Yangına Dayanıklılığı	7	•	•	•	•	•	Lokal bir çökmenin afetle sonuçlanabileceği yerlerde zorunludur.
Aydınlatma	Normal Aydınlatma	8.1	•	•	•	•	•	
	Güvenlik Aydınlatması	8.2	•	•	•	•	•	
	Tahliye Aydınlatması	8.3	•	•	•	•	•	
Havalandırma	Mekanik Havalandırma	9	°	°	°	•	•	
	(Yarı) Enine Havalandırma	9.5	°	°	°	°	•	İki yönlü ve control merkezi olan tünelerde zorunludur.
Acil Durum İstasyonları	En fazla her 150 m’de	10	*	*	*	*	*	İçerisinde telefon ve iki söndürücü bulunur. Yeni tünelerde en fazla 150 m de bir, mevcut tünelerde en fazla 250 m aralıklarla bulunur.
Su Temini	En fazla her 250 m’de	11	•	•	•	•	•	Yoksa, başka bir şekilde yeterli su kaynağı sağlaması zorunludur.
İşaretlemeler		12	•	•	•	•	•	Acil haberleşme telefonu, yangın tüpü, cep, acil çıkışlar gibi kullanıcılara sunulan tüm tesislerde dahil olmak üzere gerekli yatay ve düşey işaretlemeler yapılacaktır.
Kontrol Merkezi		13	°	°	°	°	•	Bir kaç tünelin izlenmesi bir tek control merkezinde merkezileştirilir.

Tablo 3.5. (Devam): Tünel güvenliği proje kriterleri (Bilgin, 2014)

İzleme Sistemi	Görüntü	14	o	o	o	o	•	Kontrol merkezi varsa zorunludur.
	Yangın Algılama	14	•	•	•	•	•	Bu iki sistemden en az biri control merkezi olan tünellerde zorunludur.
Ekipmanı	Tünel içerisinde en fazla her 1000 m’de trafik sinyalleri	15.2	o	o	o	o	□	Kontrol merkezi varsa ve uzunluğu 3 km’yi aşıyorsa önerilir.
Haberleşme Sistemleri	Acil servisler için Tekrarlı Radyo Yayını	16.1	o	o	o	•	•	
	Tünel kullanıcıları için Acil Radyo Mesajları	16.2	•	•	•	•	•	Tekrarlı radio yayını ve control merkezinin olduğu yerlerde zorunludur.
	Sığınaklar ve çıkışlarda Anons Sistemi	16.3	•	•	•	•	•	Tahliye durumundaki tünel kullanıcılarının dışarı çıkmadan önce beklemeleri gereken yerlerde örneğin sığınaklarda zorunludur. Ayrıca tünel boyunca girişim oluşturmayacak ve işitebilir bir ses seviyesi sağlayacak şekilde gerekli aralıklarla tesis edilmelidir.
Acil Güç Kaynağı		17	•	•	•	•	•	En azından tünel kullanıcılarının tahliyesi süresince , kaçınılmaz olan güvenlik ekipmanlarını işlevsel tutacaktır.
Yangına Dayanıklı Malzeme		18	•	•	•	•	•	Gerekli güvenlik fonksiyonlarını sürdürmeyi amaçlayacaktır.

Tablo 3.5 de bir tünelde güvenli bir proje gerçekleştirilmek istediğimiz dikkat edilmesi gereken kriterleri göstermektedir. Örneğin tabloya baktığımızda bir şeritte trafikten geçen araç sayısı 2000 den fazla ve tünelin uzunluğu 3000 metreden uzunsa mekanik havalandırma yapılması gerektiğini göstermektedir. Su temini zorunluluğu, işaretlemeler, yangın kontrol sistemi, sığınaklar ve çıkışlarda anons sistemi zorunluluğu bulunmaktadır.

Trafik hacmi olarak trafiğin açıldığı tarihteki araç/sayısı dikkate alınarak değerlendirme yapılacaktır hesaplamalarda her araç bir birim kabul edilecektir. Türkiye'nin engeli çok coğrafi yapısından kaynaklı birçok miktarda karayolu tünellerine sahip olmasıyla dikkat çekmektedir. Tüneldeki emniyetin sağlanmasına yönelik mühendislik hizmeti gerçekleştirilirken öncelikle ülkemizde geçerli olan yönetmelikler ve Standartlar esas alınacaktır. Fakat aşağıdaki standart/yönetmelik düzenlemelerden faydalanılmalıdır:

- İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirme Yönetmeliği
- 1303/2014 Avrupa Birliği Komisyonu Regülasyonu (TSI SRT)
- MIL-STD-882, Sistem Güvenlik Programı Sistemleri
- NFPA 13 NFPA 14, NFPA (Yangın kurulum standartları)
- TSE EN 54-1 Yangın Algılama ve Yangın Alarm Sistemleri,
- Trans-Ac9-09e Nolu UNECE Tavsiyeleri
- İlk Yardım Yönetmeliği ve İşyerlerinde Acil Durumlar Hakkında Yönetmelik

3.5. Avrupa (AB)'da Tünel Güvenliği

Avrupa Birliği'ne üye olan ülkelerde, malların, kişilerin, hizmet ve sermayenin serbest dolaşımının sağlanmasında ortaya çıkan güçlükler, ortak bir ulaştırma politikası oluşturma ihtiyacını ortaya koymuştur. ABK (Avrupa Birliği Komisyonu) 12.09.2001 tarihinde ulaştırma hizmetlerinden yararlananların ihtiyaçlarına cevap veren bir ulaştırma politikası oluşturmak amacıyla “ 2010 için Avrupa Ulaştırma Politikası: Karar Verme Zamanı” isimli Beyaz Kitabı yayınlanmıştır. Beyaz Kitap'ta değişik taşımacılıktaki darboğazların hafifletilmesi, taşımacılık araç hizmetlerini kullanan AB vatandaşlarının ihtiyaç ve taleplerini dikkate alan bir ulaştırma stratejinin uygulanmasına yönelik 60 kadar önlem sunulmuştur (To and Barker, 2001).

Tünelin Güvenliğinin Geliştirilmesi adlı başlıkta ve direktifinde tünel müşterileri adına üst seviyede bulunan güvenlik seviyesi oluşturacak en alt seviyede ki standartları tayin edecektir. Mevcut ulaşım sisteminin sürdürebildiği soruları gündeme gelmiştir. AB Direktifinin yürürlüğe girmesiyle bu güvenlik kriterlerine uyulduğu görülmektedir. Avrupa da yakın zamanda meydana gelen büyük tünel yangınları, trafiğin güvenilir kılınabilmesi ve güvenliğin sağlanabilmesi için tünel yapımında uygun malzeme seçiminin önemini göstermiştir. Yangınlar yapıya büyük hasar verilmekte ve insanların ölmesine neden olan yangınlardır. Yangın anında tünel içindeki hava sıcaklığı 1000 °C üzerine çıkmaktadır. Yangın çok çabuk gelişmekte uzun süre devam etmektedir. Yangınla mücadele de yol kaplaması yanmaz, toksik gaz yaymamalı ve görünürlüğü sağlayabilmek için berrak olmalıdır. Beton önceden beri toksik gaz yayan asfaltın yerine tercih edilmektedir.

3.6. Tünel Hesaplamalarında Kullanılan Standartlar

Elektromekanik işler ile ilgili olarak uluslararası işlerde sık kullanılan standartlar:

- ASSE Amerikan Ulusal Standartları (ANSI/ASSP Z359.2)
- ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013
- NFPA 130-502
- CETU (Fransa Standardı)
- Norwegian Public Roads Administration, (NPRA)
- PIARC (World Road Association)
- RABT (Almanya Standardı)
- BD 78/79 (İngiltere Standardı)

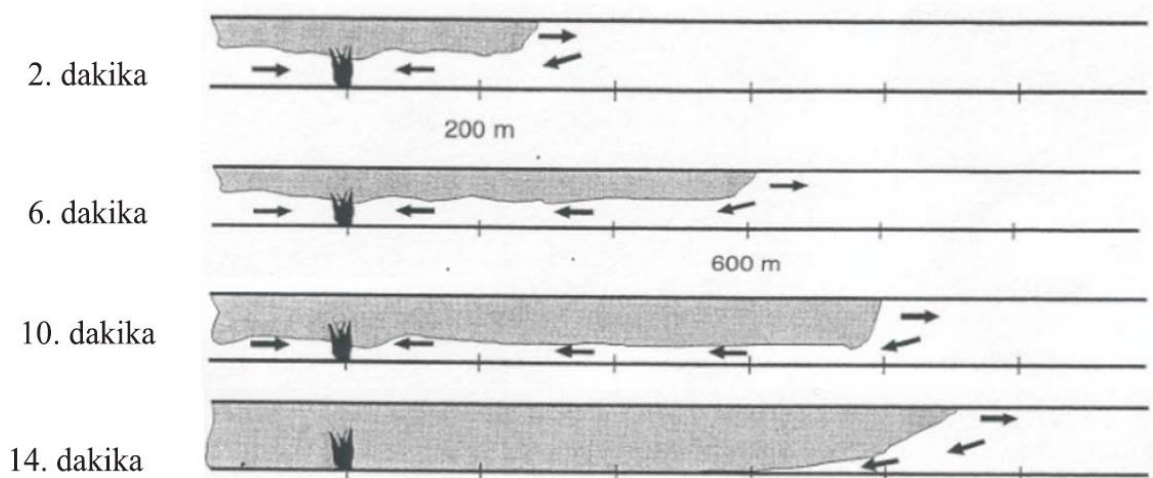
3.7. Karayolu Tünellerinde Havalandırma Sistemleri

Atmosfere giriş ve çıkış ağzı bulunan, taşıtların seyahat ettikleri kapalı hacme karayolu tüneli denilmektedir. Tüneller bazı kriterleri sağlaması durumunda doğal olarak havalandırabilmektedir. Bu kriterleri sağlayamadığında trafik piston etkisi ve mekanik havalandırma ekipmanlarıyla sağlanabilmektedir. Tünellerde mekanik havalandırma acil durum ve günlük havalandırma olmak üzere iki amacı vardır. Tünelin günlük kullanımı sırasında araçların tünel içerisinde bıraktıkları emisyon gazlarının tünel içerisinde

uzaklaştırılması günlük havalandırma olarak adlandırılırken, tünel içerisinde yangın çıkması durumunda dumanın tünel içerisinden tahliye etmesine acil durum havalandırılması denir. Bir karayolu tüneline havalandırma sisteminde ana hedefler şunlardır (PIARC, 1999).

- ❖ Tünelin her yerine yeterli miktarda taze hava sağlayacak kapasite sınırında olmalı
- ❖ Araçlardan açığa çıkmış olan istenmeyen gazları, yasal sınırlar içinde tutmak
- ❖ Tünel içinde herhangi bir yangının oluşması halinde dumanın kontrollü ortamı terk etmesinin gerçekleşmesi
- ❖ Tünel kullanıcılarının tahliyesinde ihtimallerin düşünülmesi,
- ❖ Tahliye işlemlerinden sonra, itfaiye ekiplerine hızlı bir şekilde tepki verebilmesi

Şekil 3.11.'de duman tabakasının altında teneffüs edilebilir hava kalmasını sağlayacak şekilde duman tabakasını dağılmasını sağlamalı ve duman akışın altından insan olmayan yöne süpürmelidir. Kısa bir sürede insanlar güvenli noktalara ulaştırılmalıdır. Diğer tüpe ve kaçış yollarına duman dağılmasını engellemelidir. $V < V_{kr}$ havalandırmanın olmadığı dumanın tünel içerisinde her iki tarafa yayılmış olan durum, $V = V_{kr}$ havalandırmanın çalıştığı fakat hava hızının yavaş kalmasından kaynaklı kişilerin tahliye edilecek olan tarafa doğru duman tabakasının yayılmayı sürdürdüğü durum, $V > V_{kr}$ yangın dumanının kişilerin tahliye olacakları yerde geri ilerlemelerinin engellenmesiyle oluşacak kritik hıza ulaştığı güvenli durumu göstermektedir.



Şekil 3.11. Bir tünelde çıkan yangın dumanının zaman ve hava akışına göre dağılımı (Kayılı vd., 2010)

Kapalı alanlarda petrol ürünleri (Asfalt, mazot, katran, LPG, parafin, benzin vd.) yangınlarında oksijen yetersizliğinden dolayı yanmamış yakıtlarla ikincil bir patlama oluşur. Havalandırma sistemi tam yanmayı sağlayacak şekilde yanmamış gazları seyreltmek için yeterli miktarda havayı yangın alanına gönderebilmelidir. Otomotiv alanında yaşanan bütün gelişmeler ve araç motorları adına getirilmiş olan yeni emisyon standartları ışığında, araçlardan yayılmış olan emisyon değerleri de oldukça düşüş göstermektedir. Daha önce yapılan tünellerde emisyon değerleri dikkate alınmamıştır. CO emisyon gazını seyreltmek amacıyla tasarlanmıştır.

3.8. Erzurum İli İçin Hava Kalitesi Değerleri

Erzurum ili denizden yüksekliği 1869 m’dir. Uzun yıllar Meteorolojik parametrelerin ortalama değerleri sıcaklık 5,6 °C , en yüksek sıcaklık 36.5°C’dir. En yüksek rüzgâr hızı 108 km/saat, ortalama nispi nem 65,2 ve güneşlenme süresi 6,5 saattir. Tablo 3.6’da aylara göre rüzgâr hâkim hızları görünmektedir. Rüzgarlar esme frekansına bağlı olarak kirli havayı dağıtabilir ya da uzaklaştırabilmektedir Rüzgar hakim hızı (W1975-2011) şeklindedir ve hakim rüzgar bölgenin her yerinde aynıdır.

Tablo 3.6. Aylara göre rüzgâr hızı değerleri (Karaca vd., 2013)

	O	Ş	M	N	M	H	T	A	E	Ek	K	A
Ort. Rüzgar Hızı (m/sn)	1,3	2,6	2,7	3,4	3	2,7	4	3,8	3,1	2,8	2,7	1,3
Hakim Rüzgar yönü	SS W	W	W	WSW	WSW	E	ENE	E	ENE	WSW	WSW	WSW
Max Rüzgar Yönü ve Hızı	E 12,9	W 16,5	WSW 16,5	WSW 21,1	SSW 22,6	W 22,6	ESE 17,3	WSW 22,3	SSW 18,9	S 21,2	W 15,3	ENE 13,5

Tablo 3.7 de hava kalitesi veya hava kirlilik seviyesi gösteren sayısal bir ölçek kullanılmıştır. Hava kalite indeksi 6 kademedir geldiğini 1 ölçeği çok iyi kalite havayı ve

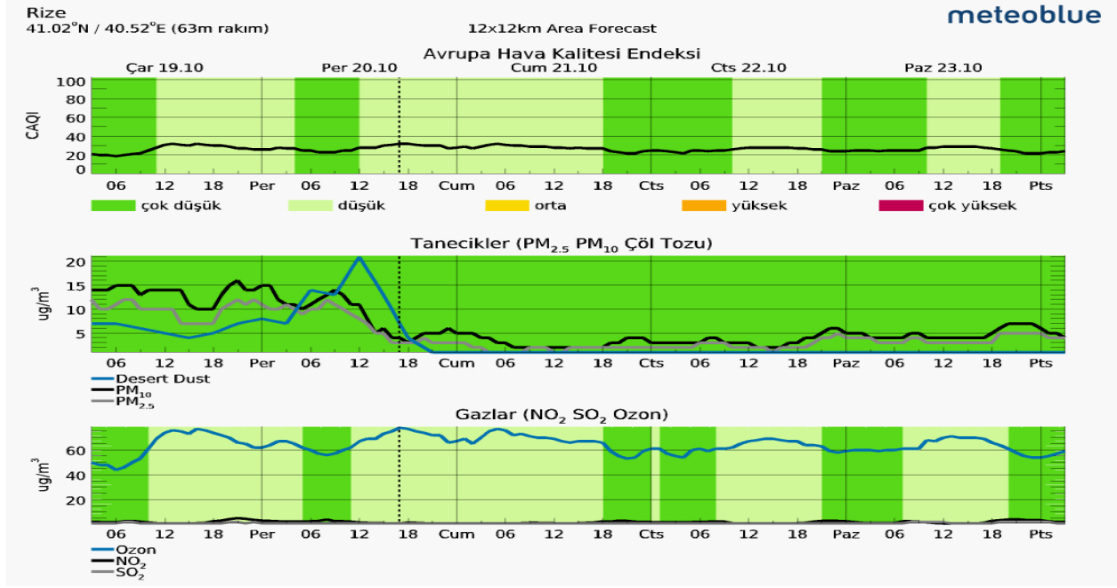
6 ise kirli havayı göstermektedir. Nem faktörü faktörü hava kirliliği üzerinde olumlu tesirler oluşturmaktadır. Hava kütlesi içerisinde SO₂ konsantrasyonu yüksek olduğu zamanlarda H₂SO₄ oluşturduğu için bu durumlarda nemli hava daha çok olumsuz rol alır. Sisli günlerin artması hava kirliliğini de olumsuz etkiler. Hava Kirliliği; havadaki katı, sıvı, gaz şeklindeki yabancı maddelerin insan ve çevre kalitesine zarar veren yoğunluk ve sürede bulunmasıdır. Kimyasal reaksiyonlar ve yakma prosesleri esnasında ortama karışan tüm gaz ve partiküllere emisyon denir.

Tablo 3.7. Hava kalitesi indeksi (URL 4)

	SO ₂	NO ₂ PO	CO	O ₃	PM ₁₀
Hava Kalite İndeksi	1 saatlik ortalama (µgr/m ³)	24 saatlik ortalama (µgr/m ³)	24 saatlik ortalama (µgr/m ³)	1 saatlik ortalama (µgr/m ³)	24 saatlik ortalama (µgr/m ³)
1 (çok iyi)	0-50	0-45	0-1,9	0-35	0-25
2 (iyi)	51-199	46-89	2-7,9	36-89	26-69
3 (yeterli)	200-399	90-179	8-10,9	90-179	70-109
4 (orta)	400-899	180-299	11-13,9	180-239	110-139
5 (kötü)	900-1499	300-699	14-39,9	240-359	140-599
6 (çok kötü)	>1500	>700	>40	>360	>600

3.9. Rize İli İçin Hava Kalitesi Değerleri

Rize ili için ortalama hava saatlik rüzgâr hızı 11,7 km/Saat'tir. Ortalama yıllık sıcaklık değeri 14.3 °C'dir. Yıllık güneşlenme gün süresi 5-6 saattir. Şekil 3.13 de panel 2006 yılından beri Avrupa'da kullanılan Genel Hava Kalite Endeksi (CAQI) için tahminleri gösterir. 1-100 arasında değişen bir sayıdır, düşük değer yeşil iyi hava kalitesi, yüksek değer (kırmızı) kötü hava kalitesini ifade eder. CAQI renk kodlaması hava tahmini için tüm hava kirliliği tahmin panellerinde kullanılır. İkinci panel Rize için partikül tahmini (PM ve çöl tozu) göstermektedir. PM havada asılı kalan mikroskobik katı ve sıvı maddelerdir. PM duman, is, toz, asitle ve metalleri içerebilen bir karışımdan oluşmaktadır. PM₁₀ tüm hava kirlleticileri arasında en zararlı olanlardan biridir. PM₁₀ astım krizlerinin sayısını ve şiddetini artırır. PM₁₀ vücudun enfeksiyonlara karşı mücadele gücünü azaltır. Çöl tozu; çöllerde çıkan 62 µm'dan küçük maddelerden oluşmaktadır. Genellikle, toz partikülleri küçük olup yüksek yoğunlukta PM₁₀ oluşmasına ve tüm sağlık etkilerine yol açar.



Şekil 3.12. Rize ili için hava kalitesi ve polen tahmini (URL 5)

3.10. Havalandırma Sistemleri Hakkında Genel Tanımlar

Büyük çaptaki tünel yangınlarında duman kontrolü, duman tahliyesi, yangınla mücadele ve kurtarma için kaçış bölgeleri oluşturabilen özel olarak havalandırma sistemlerine ihtiyaç bulunmaktadır. Tünel içerisinde havalandırma sisteminin seçilmesinde; ekonomik performans ,normal çalışma sırasında güvenlik analizi ve yangında devreye giren operasyon modeli etki eder:

Bunlar dışında uygun ekonomik ekonomik havalandırma seçimlerinde ki öteki unsurlar:

- ❖ Tünel kesit alanı, tünel uzunluğu, tünel şerit sayısı, tünel kullanım nedeni, tünel nedeni, konumu, tünel trafik yönü
- ❖ Maksimum trafik yoğunluğu, bulunduğu alanda meteorolojik veriler, izin verilen hız değerleri
- ❖ Tünel işletme maliyeti, yük taşımacılığına izin verilip verilmemesi, tünelden geçmesi düşünülen trafiğin kompozisyonu vd.

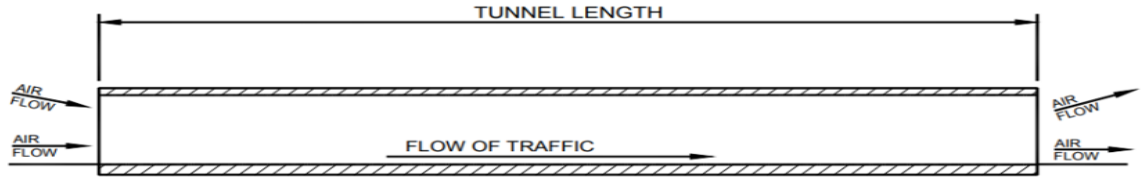
Kırık tüneli yapım aşamasında olduğu için detaylı veri toplamak imkânsızdır. Fakat yapılan tünellerden referans alınarak veya Ulusal tünel hesaplama standartlara bakılarak havalandırma sistemi tasarlamak ve hesaplamak mümkündür.

3.10.1. Doğal Havalandırma

Tünellerin giriş ve çıkış portalleri arasındaki meteorolojik etkilerin (sıcaklık, basınç, rüzgâr, tünel eğimleri, hızları vb.) farklı olmasından dolayı ortaya çıkan havalandırma biçimidir. Araçların hareketinden kaynaklanan piston efekti de doğal havalandırmanın bir parçası kabul edilmektedir. Trafiğin tek taraflı devam ettiği tüneller verimlidir. Çünkü sistem pozitif yönde hava akımı meydana getirmektedir. NO_x, CO ve dumanı seyreltilebilmektedir. Tünellerde doğal havalandırma seçimi ülkeden ülkeye değişmektedir. Örneğin;

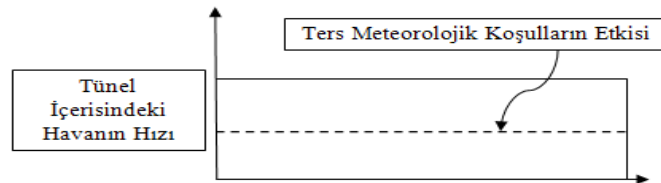
- ❖ Almanya: RABT standartları 1994'göre, 350-700 m
- ❖ Fransa: Şehir içi 300 m; Şehir dışı 500- 100 m'ye kadar (*trafik yoğunluğu 2000 araç/gün 'den az ise); Amerika: NFPA 502'ye göre 240 m'ye kadar

Türkiye'de ise kesin olmamakla birlikte 800-900 m'ye kadar doğal havalandırma uygun bulunuyor. Şekil 3.13 de doğal havalandırma yapılan bir tünelde hava akımı tünele girişten çıkışa doğru ilerlemektedir.



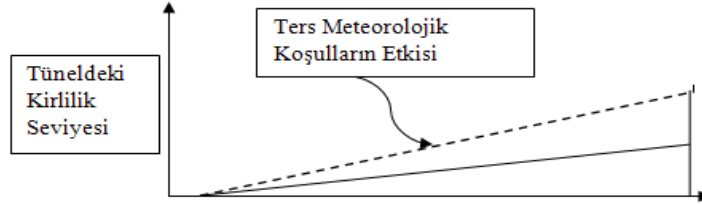
Şekil 3.13. Doğal havalandırma (Bickel vd., 1995)

Şekil 3.13 de doğal havalandırma yapılan tünelde hava akım hızı üniform olup hava şartlarının değişmesi sonucu havanın hızı da doğru orantılı olarak azalmaktadır.



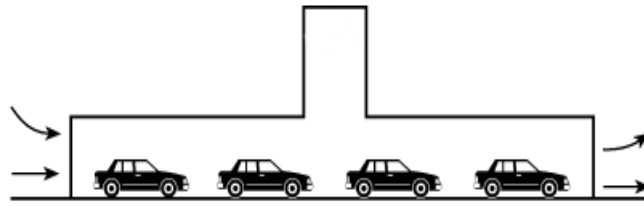
Şekil 3.14. Tüneldeki hava hızının dağılımı (Bickel vd., 1995)

Tünel çıkışına doğru ilerledikçe tüneldeki kirlilik seviyesi artış meydana gelmektedir. Şekil 3.15 de verilen grafiğe göre ters meteorolojik koşullar oluştuğunda CO miktarında artış görülmektedir.



Şekil 3.15. Tüneldeki kirlilik seviyesinin dağılımı (Bickel vd., 1995)

Baca tarafından meydana gelen baca etkisi; sıcaklık, rüzgâr yönüne, rüzgâr hızına ve baca yüksekliğine bağlıdır. Fazla baca kullanılması bacalar arasında sıkışan havanın kirlilik seviyesinin artmasına neden olur. Doğal havalandırma tünel içinde ciddi basınç ve yüksek hava akımı meydana getirmektedir. Şekil 3.16 da doğal havalandırmayla baca sistemi kullanılması görülmektedir. Doğal havalandırma kısa tünellerde tercih edilmesi nedeniyle tünel kullanıcıları ortamı dumandan ve sıcaklıktan etkilenmeden terk edebilmektedir. Tünel içinde sıkışık trafik akışı bekleniyorsa ve standartlarda belirtilen şartları sağlayamıyorsa mekanik havalandırma kurulması gerekir.



Şekil 3.16. Doğal havalandırmanın baca sistemi ile kullanılması (Bickel vd., 1995)

3.10.2. Mekanik Havalandırma (Boylamasına) Havalandırma

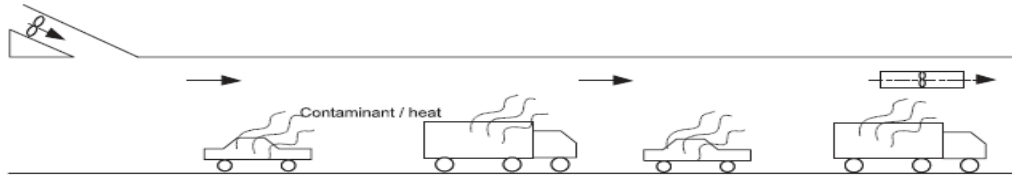
Doğal havalandırmanın yetersiz olduğu uzun karayolu tünellerinde mekanik havalandırma kullanılmalıdır. Boylamasına (eksenel) havalandırma temel özelliği, tüm tünel boyunca jet fanlar kullanarak üniform bir hava akımı oluşturmaktır. Söz konusu tünellerin uzunluğundan kaynaklı temiz havanın sağlanma hali, jet fanların kullanılmasında zaruridir. Doğal havalandırma kirleticilerinde seyreltilmesi adına etkin olabilir ancak güvenilir alan

güvenilmemelidir. Bazı ülkeler doğal havalandırmayı sınırlamaktadır ve mekanik havalandırma için ölçüt belirlenmektedirler. Boyuna havalandırma limitleri:

- Avusturya: Limit yok. Risk analizi yapılır.
- Amerika: 900 m
- Almanya: Çift yönlü trafikte 2 km; Tek yönlü trafikte ise 4 km
- Fransa: Şehir dışı tünellerde 800-1000 metre (eğer trafik < 2000 araç/gün); Şehir içi tünellerde çift yönlü trafikte kullanılmaz. Tek yönlü trafikte ise 4000 m

3.10.2.1. Merkezi Jet Fan ve Saccardo Nozul'un Birlikte Kullanıldığı Sistem

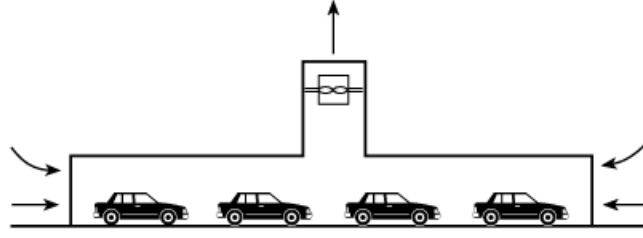
Boylamasına havalandırma sisteminin bir çeşidi demiryolu ve karayolu tünellerinde kullanılmaktadır. Tek yönlü tünellerde Jet fan ve Saccardo nozullu boyuna havalandırmanın şematik gösterimi Şekil 3.17 de gösterilmektedir.



Şekil 3.17. Jet fan ve Saccardo nozullu boyuna havalandırmanın şematik gösterimi (Ingason vd., 2014)

3.10.2.2. Merkezi Jet Fan ve Baca Sisteminin Birlikte Kullanıldığı Sistem

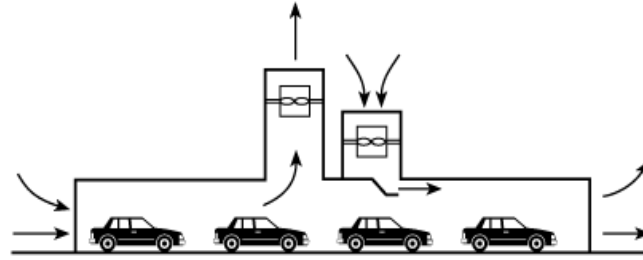
Tünelin havalandırılması tünelin orta kısmında jet fan ve baca sistemi ile sağlanmaktadır. İki taraftan tünel içerisine giren hava, baca sisteminin yaratmış olduğu pozitif baca etkisiyle kirlenmiş olan havayı dışarı atılmasını sağlar. Yaratmış olduğu baca etkisi nedeniyle, havanın dışarıya doğru atılması, hava hızının negatif değerler alınmasını sağlar. Tek yönlü tünellerde kirlilik seviyesi düzensiz bir dağılım göstermektedir. Şekil 3.18 de tünelin her iki tarafından hava girmektedir. Pozitif baca etkisiyle zehirli gazlar tünel dışına atılmaktadır. Hava hızı sabit iken baca bölgesinde negatif değerler almaktadır.



Şekil 3.18. Merkezi Jet fan ve baca sisteminin birlikte kullanıldığı sistem (Bickel vd., 1995)

3.10.2.3. Fan ve Baca Şaftının Birlikte Kullanıldığı Sistem

Tünel boyunca, hem üfleme hem de emiş kanalları vasıtasıyla kirli havanın dışarı atılmasını sağlar. Bu tünelin dezavantajı, meteoroloji şartların değişmesi sonucu ters yönde esen rüzgârdan dolayı hava akışı kesilmekte ve üfleyici fan ile egzoz fanı arasında kısa devre oluşturarak kirlilik seviyesini artırmaktadır. Çift baca sistemi ve fanın kullanıldığı sistem Şekil 3.19 da görülmektedir.

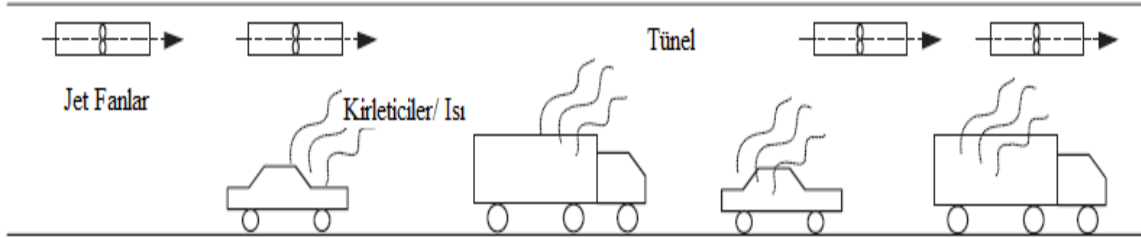


Şekil 3.19. Fan ve baca şaftının birlikte kullanıldığı sistem (Bickel vd., 1995)

3.10.2.4. Jet Fanların Kullanıldığı Boylamasına Havalandırma Sistemi

Tünellerde fan kullanımı diğer havalandırma sistemlerine göre düşük maliyetli ve kurulumu kolay olduğundan hava bacası veya diğer havalandırma tiplerine göre en çok tercih eden havalandırma sistemidir. Bu sistemin dezavantajı; tünelin giriş ve çıkışı hassas alanlar içerisinde bulunuyorsa, emisyon gazlar çevreye olumsuz bir durum meydana getirmektedirler. Fanlar tünelin geometrisine ve fanların özelliklerine göre belirli aralıklarla yerleştirilmektedir. Fanlar, tünel içerisinde fan serileri arasında en az $10 \cdot D_h$ (hidrolik çap) mesafede giriş-çıkış portallardan da en az $12 \cdot D_h$ (hidrolik çap) mesafede konumlandırılmalıdır. Şekil 3.20 gibi havalandırma sistemleri içerisinde en çok kullanılan

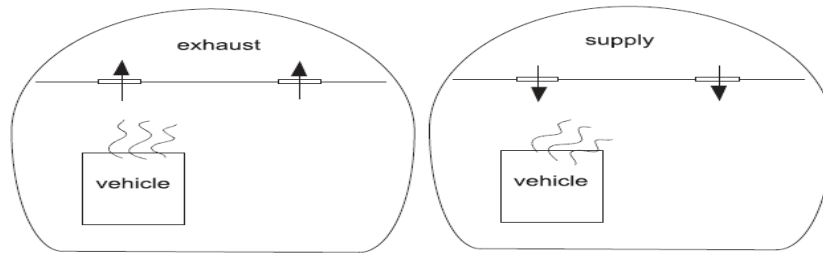
yöntemlerden biridir. Tünel içerisindeki hava hızı sabit bir şekilde ilerlemektedir burada direnç yüksektir. Tünel girişinde kirlilik seviyesi düşükken çıkışa doğru artış gösterir.



Şekil 3.20. Jet fanların kullanıldığı boylamasına havalandırma sistemi (Ingason vd., 2014)

3.10.3. Yarı Enine Havalandırma Sistemi

Temiz hava fan yardımı ile üflenir. Kirli hava tünel giriş ve çıkışlarından tahliye edilir. Bu sistemin karakteristik özelliği; havayı homojen dağıtabilmek ve emilebilmesini sağlamaktır. Yarı enine havalandırma taze hava ya da egzoz amaçlı olabilir. Yarı enine havalandırma sisteminin sınırı tünel içindeki boyuna hızın 10-12 m/s'ye ulaşması durumunda söz konusu olur. Şekil 3.21 de yarı enine havalandırma sistemi görülmekte olup bu sistemler havanın homejen bir şekilde emilmesini ve dağıtabilmektedir.

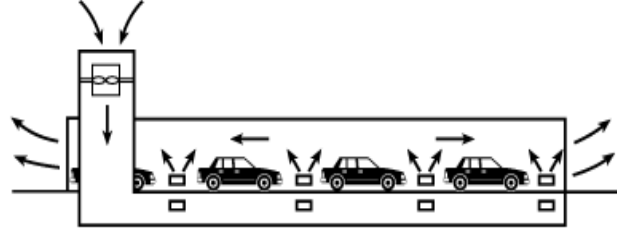


Şekil 3.21. Yarı enine havalandırma sistemi (Ingason vd., 2014)

3.10.3.1. Hava Enjeksiyonu Yapılan Yarı Enine Havalandırma Sistemi

Şekil 3.22 deki sistemde temiz hava, bir fan yardımıyla hava besleme kanalı ile tünel içerisine aktarılır. Trafik durumunun bir taraflı olarak işletilmiş olduğu tüneller için serbest şekilde akan trafik boylamasına hava akımı için piston etkisi meydana getirmektedir. Trafik tek yönlü olduğu tünellerde kirlilik seviyesi tünel girişinden çıkışına doğru

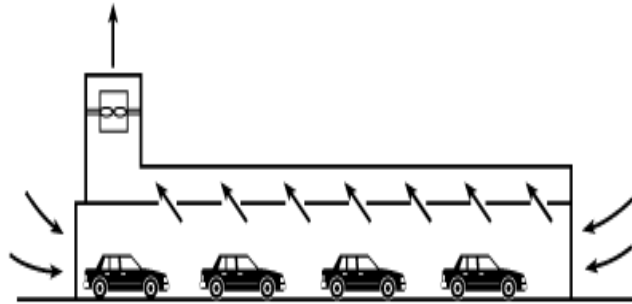
artmaktadır. Piston etkisi meydana gelen bir tünelde girişten çıkışa doğru doğru bir lineer artış göstermektedir. Trafiğin iki yönlü olduğu tünellerde hava hızı yapının içinde azalma göstermektedir.



Şekil 3.22. Hava enjeksiyonu yapılan yarı enine havalandırma sistemi (Bickel vd., 1995)

3.10.3.2. Hava Emilimi Yapılan Yarı Enine Havalandırma Sistemi

Duman egzoz şaftına bağlanmış kanal vasıtasıyla tünel içinde belli aralıklarla duman tahliye yapılması ve tünel giriş çıkışlarından taze hava temin edilmesi metoduna göre havalandırma yapılmasıdır. Tünel içerisinde tek yönlü akan trafikte araçlardan meydana gelen hava akımı ile birleştiğinde yüksek hava hızlarını meydana getirmektedir. Çift yönlü akan trafikte ise ters bir etki oluşur ve bu da tünel giriş kısmında hava hızını azaltmaktadır. Şekil 3.23. de hava emilimi yapan yarı enine havalandırma sistemi görünmektedir.

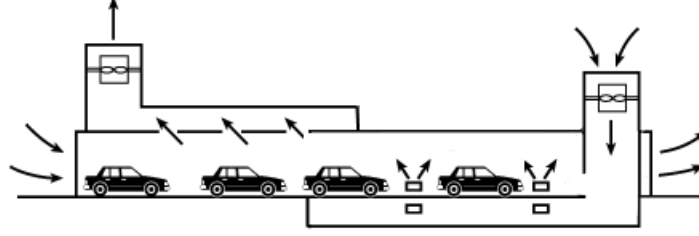


Şekil 3.23. Hava emilimi yapan yarı enine havalandırma sistemi (Bickel vd., 1995)

3.10.3.3. Hava Emilimli ve Enjeksiyonlu Yarı Enine Havalandırma Sistemi

Şekil 3.24. de görüldüğü üzere tünelin bir bölümünden taze hava alınıp egzoz şaftına bağlı kanallar vasıtasıyla duman tahliye yapılması, diğer tarafından taze hava şaftına bağlı

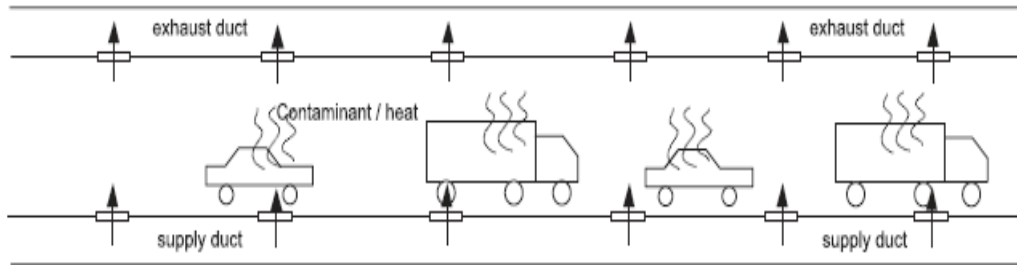
kanallar vasıta ile temiz hava verilmesiyle tünelin diğer ağzından duman tahliye edilmesi metoduna göre havalandırma yapılması prensibine dayanır.



Şekil 3.24. Hava emilimli ve enjeksiyonlu yarı enine havalandırma sistemi (Bickel vd., 1995)

3.10.4. Enine Havalandırma Sistemi

Yarı enine olan havalandırma mekanizmalarına göre iki havalandırma kanalının ve iki ayrı hava akışını doğurmaktadır. İlk havalandırma taze hava sunarken, diğer hava kanalı aynı zamanda kirli havayı tünelin dışına itmekte Şekil 3.25 de görülmektedir. Söz konusu sistem avantajlı fakat imalat ve işletme maliyetine odaklanıldığında oldukça pahalı olduğu görülmektedir. İki kanal ve buna bağlı geniş kazı alanı da gerekmektedir (Karakaş, 2011).



Şekil 3.25. Enine havalandırma sistemi (Ingason vd., 2014)

3.10.5. Karma Havalandırma Sistemi

Özel uygulamalara uygun bir tasarımıdır. Doğal, enine, yarı enine ve boyuna havalandırma sistemlerinin bir arada kullanılması prensibine dayanır.

3.11. Kritik Hız

Kritik hız yangın sırasında açığa çıkan sıcak ve zehirli gazları tünel içerisinde sadece bir yöne doğru yönlendirmek için, dolayısıyla diğer yönde yolcular için güvenli bir kaçış yolu sağlamak için, gerekli olan en düşük hava hızı değeridir. Bir tünelde belirlenen yangın yükü, tünel geometri özellikleri, hava koşul değerleri vb. değerleri kullanılarak bir kritik hız hesabı yapılmaktadır. Belirlenen kritik hız kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu ihtiyaç duyulan fan kapasiteleri belirlenmektedir. CETU ve PIARC dahil olmak üzere bir çok uygulamada, boyuna havalandırmanın, yangın süresince tünel içerisinde bu kritik değerden daha az olmayan bir hızı sağlayıp koruyacak bir kapasiteye sahip olması istenmektedir. Kritik hızın belirlenmesinin amacı, tünel içerisinde yangın çıkması durumunda dumanın hava akış yönün tersine hareket etmesinin (Geri katmanlaşmanın) engellenmek istenmesidir. Tünel kesit hızının kritik hızdan küçük olması durumunda geri katmanlaşma görülmektedir. Ters katmanlaşmanın olmaması için hız 2,5 m/sn'den büyük olmalıdır. Kritik hız değeri, kritik hız ve yangın bölgesindeki duman sıcaklığı denklemlerinin eş zamanlı olarak çözülmesi sonucunda elde edilir.

$$V_c = K_1 K_g \left(\frac{gHQ}{\rho C_p A T_f} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.1)$$

$$T_f = \left(\frac{Q}{\rho C_p A V_c} \right) + T \quad (3.2)$$

$$K_g = 1 + 0.0374(G)^{0.8} \quad (3.3)$$

V_c : Kritik hızı (m/s) ; Q : Yangın yükünü (W) ;

T_f : Yangın bölgesi duman sıcaklığını (K) ; T : Ortam sıcaklığını (K) ;

A : Tünel kesit alanını (m²) ; ρ : Havanın yoğunluğunu (kg/m³) ;

C_p : Sabit basınçlı havanın özgül ısı katsayısını (J/kg.K) ;

H :Tünel yüksekliği (m) ; K_1 :Birimsiz sabit ; K_g : Eğim düzeltme katsayısı

Bazı standartlarda yangın yüküne ve eğime bağlı olarak kritik hız ile ilgili tablolarda bulunmaktadır. Kritik hız hesaplanmasında temel faktörlerden biri yangın yüküdür, denklemden de anlaşılacağı gibi yangın yükünün değişmesi ile doğru orantılı olarak kritik

hız da değişmektedir. Bu işlemler için özel olarak bu amaç için yazılmış bir Visual Basic programı ile yapılmış ve sonuçları aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Table D.1 A Range of K_1 Values That Apply for Various HRRs

Q (MW)	K_1
>100	0.606
90	0.62
70	0.64
50	0.68
30	0.74
<10	0.87

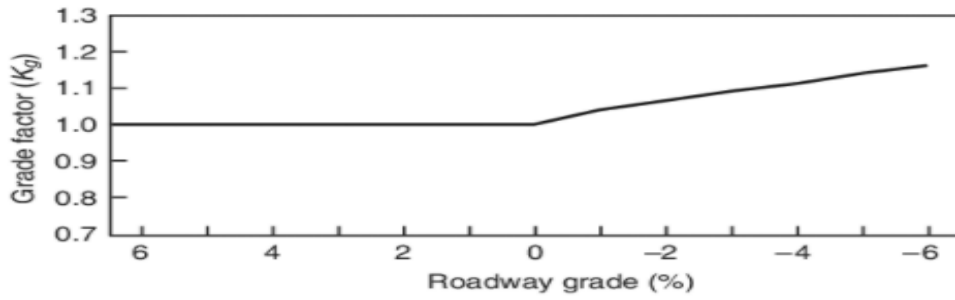


FIGURE D.1 Grade Factor for Determining Critical Velocity.

Şekil 3.26. Yangın yükü ve eğime bağlı olarak K_1 ve K_g değişim grafiği (NFPA, 2017)

Yukarıdaki açıklamalardan anlaşılacağı üzere, kritik hızın hesaplamasında tasarım yangın gücüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu değişken aynı zamanda, yangın durumundaki bütün hesaplamalarında temelini oluşturmaktadır. CETU ve PIARC, yüksekliği 3,5 metreden fazla olan ve tehlikeli maddelerin tünelden taşınmasına müsaade edilmeyen tek yönlü kırsal tünellerde, yangın gücü 30 MW olarak önermektedir. Tehlikeli maddelerin taşınması durumunda tasarım yangın gücü 200 MW'dir. Bu durum Kırık Tüneli için, bulunduğu otoyolun seyahat mesafelerini önemli ölçüde düşürmekte oluşu nedeniyle kritik bir karar konusu teşkil etmektedir. Bu tünel yapım aşamasında olduğu için tehlikeli madde taşınmasına izin verilip verilmediği bilinmediği için ilerdeki dönemler, söz konusu türden taşımalara izin verilebilir. Eğimin %-4,750 olduğu kısımda 30 MW'lık bir yangında durumunda V_c (kritik hız) 3,082 m/s bulunmuştur. Tünelde havalandırma için tasarım hızı kritik hız değeri aşacak şekilde 3,25 seçilmiştir. 100 MW yangın için kritik hız 3,326 m/sn'dir. 3,5 m/s hızında tasarım hızı seçilmiştir. İlerde ki bölümlerde ise bu yangınların basınç hesapları ve yangın yüklerine göre jet fan kapasiteleri ve konumu belirlenmiştir.

Tablo 3.8. Bazı ülkelerin yangın tasarım yükleri (PIARC, 2017)

ÜLKE	YANGIN TASARIM YÜKÜ (MW)	AÇIKLAMALAR
AVUSTURYA	30	Yüksek risk kategorisinde 50 MW
FRANSA	30-200	Tehlikeli madde taşımacılığı varsa 200 MW.
ALMANYA	30-100	Tünel uzunluğu ve ağır yük taşıt sayısına göre değişiyor.
İTALYA	20-200	Tehlikeli madde taşımacılığı varsa 200 MW
JAPONYA	30	Su sisi sistemiyle birlikte, havalandırma amaçlı
NORVEÇ	20-100	Risk sınıfına göre değişiyor
PORTEKİZ	10-100	Trafik yoğunluğu ve özelliklerine göre değişiyor.
SİNGAPUR	30-200	İzin verilen araç göre değişiyor.
İSVİÇRE	30	Duman atım hızı 3,3-4 m/s arasında olacak şekilde
AMERİKA	30-300	Tehlikeli madde taşımacılığı varsa

Tablo 3.9. 30 MW-100 MW ve eğimin %-4,750, %4,750 olduğu kısımlar için kritik hız hesabında kullanılan değerler

	Negatif Eğimli Tüp	Pozitif Eğimli Tüp	
Uzunluk	7091	7091	m
Eğim	-4,750	4,750	%
En Kesit Alanı	66,720	66,720	m²
Yaş Çevre Uzunluğu	31,15	31,15	m
Hidrolik Çap	8,57	8,57	m
Yükseklik	7,47	7,47	m
Isıl Konveksiyon Oranı	2/3	2/3	
Ortam Sıcaklığı	15	15	C°
Tünel Duvar Pürüzlülük Katsayısı	0,02	0,02	
Tünel Girişi Basınç Kaybı Kat Sayısı	0,5	0,5	

Tablo 3.9. (Devam): 30 MW-100 MW ve eğimin %-4,750, %4,750 olduğu kısımlar için kritik hız hesabında kullanılan değerler

Tünel Çıkışı Basınç Kaybı Katsayısı	1	1	
Tünel Çıkışındaki Sıcaklık	15	15	C°
Rüzgâr hızı	4	4	m/sn
Şerit Başına Km Araç Yüzdesi	92	92	%
Binek Araç yüzdesi	75	75	%
Hafif Ticari Araç Yüzdesi	10	10	%
Ağır Ticari Araç Yüzdesi	15	15	%
Binek Araç Aerodinamik Katsayısı	0,4	0,4	
Hafif Ticari Aerodinamik Katsayısı	0,4	0,4	
Ağır Ticari Aerodinamik Katsayısı	1	1	
Binek Araç Kesit Alanı	2	2	
Hafif Ticari Araç Kesit Alanı	4	4	
Ağır Ticari Araç Kesit Alanı	7	7	
Yer Çekim İvmesi	9,81	9,81	m/sn²
Yoğunluk	1,204	1,204	kg/m³
Özgül Isı Katsayısı	1005	1,005	j/kg

Tablo 3.10. 30 MW ve eğimin %-4,750, %4,750 olduğu kısımlar için kritik hız hesap sonuçları

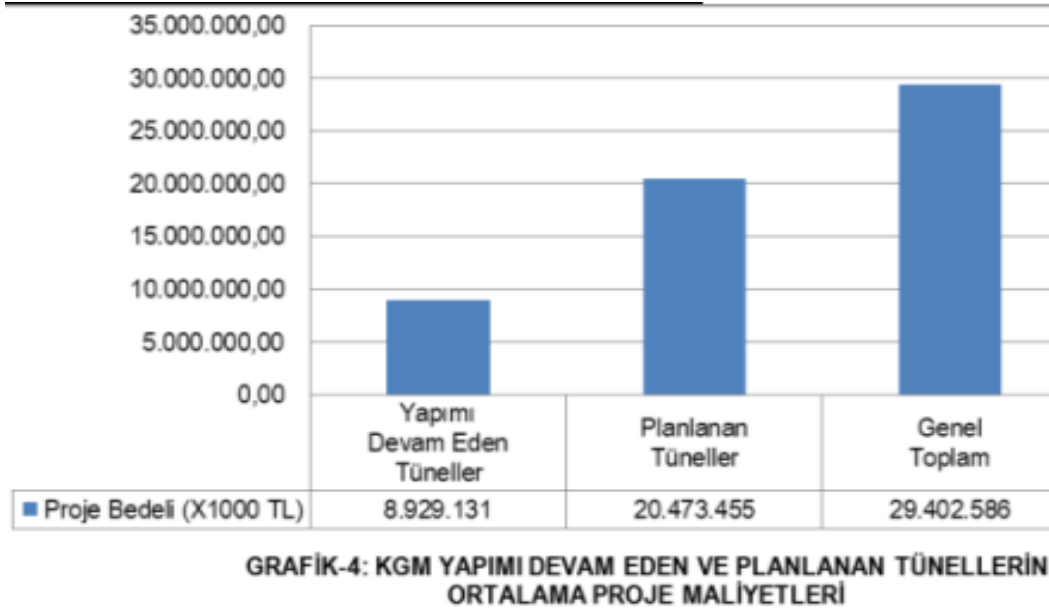
Kritik Hız Hesaplama NFPA 2017		
	Hesaplanan Hız (m/sn)	Kabul Edilen Hız (m/sn)
Negatif Eğim Tüp	3,082	3,25
Pozitif Eğim Tüp	2,687	3

Tablo 3.11. 100 MW ve eğimin %-4,750, %4,750 olduğu kısımlar için kritik hız hesap sonuçları

Kritik Hız Hesaplama NFPA 2017		
	Hesaplanan Hız (m/sn)	Kabul Edilen Hız (m/sn)
Negatif Eğim Tüp	3,326	3,5
Pozitif Eğim Tüp	2,860	3

3.12. Tünel Havalandırma Hesap Yöntemleri

Tüneller karayolu ağlarının küçük bir kısmını oluşturulmasına rağmen en pahalıya mal olan kısımdır. Materyal kısmında bir tünelin maliyeti belirtilmiştir. Bu maliyetin sadece havalandırma sistemi, yapım ve tesisat için toplam bedelin %20'sine denk gelmektedir. İşletme masraflarındaki en önemli faktörlerden biri seçilen havalandırma türüdür. Şekil 3.26. da devam eden tünellerin sayısı ve proje bedelleri göstermektedir. Tablo 1.1 de 2022 yılındaki tünellerin sayısı ve bölgelere göre dağılımını gösterilmiştir. Tünelin düzgün bir şekilde tasarlanması ve işletilebilmesi tünel içerisindeki emisyon gazlarının uygun bir şekilde dağıtılmasına çevrenin iyileşmesine katkısı bulunur. Tünel içerisinde ihtiyaç duyulan temiz hava miktarı belirlenmektedir.



Şekil 3.27. KGM tarafından devam eden tünellerin ortalama proje maliyetleri (KGM, 2022)

Benzinli araçlardan açığa çıkan CO ve NO_x insanlar için tehlike, dizelden çıkan parçacık ve duman tehlike oluşturmaktadır Araçlar tarafından yayılan kirleticiler; benzin, ozon, kurşun, amonyum nitrat, kükürt dioksittir. Amonyum nitrat fotokimyasal kirletici oluşmasına neden olur. Tünelin ihtiyaç duyduğu temiz havanın belirlenmesinde NO_x, CO, partiküller ve duman araçların yoğunluk durumuna göre tayin edilen limit değerleri geçebilmektedir. Böyle bir durumda tünelde bulunan havalandırma mekanizmasının aktif olması, kirletim seviyesi bulunan nesneler seyreltilmeli ve konfor şartın sağlanması için kaliteli havayı sağlanması gerekir.

3.12.1. PIARC Hesaplama Yöntemi ve Havalandırma Performans Gereksinimi

Tünellerin dizaynı adına PIARC araçlardan çıkmakta olan emisyon değerlerinin ve beraberinde ki hesaplama yaklaşımının 1990- 1995 yıllarında yayımlanmıştır (PIARC, 2004). Düşük emisyon seviyesinde bulunan motorlar ışığında açığa çıkan CO₂ oranları da hızla düşmüştür. HGV (kamyon, kamyonet) olarak bilinen araçlar dizel (mazot)'lu araç olarak bilinmektedir. Mazottan çıkan egzoz dumanı tünel içerisinde görüş mesafesini düşürmektedir. Emisyon gazları yeni standartlar sayesinde azalmış ve daha azaltmak için çalışmalar devam etmektedir. PIARC, LPG araçlara ait hesaplama yöntemi bulunmadığından ortama duman yaymayacağından göz önüne alınmalıdır. Havalandırma

tesisatının performans gereksinimleri normal çalışma sırasında ve yangın çıkması durumuna göre belirlenmektedir. İzin verilebilir kirlilik ve bina ölçümlerinin fizibilitesine göre çevresel korunma sağlanmalıdır. Trafik anında havanın boyuna hızı sınırlandırılır (Bilgin, 2014)

3.12.2. Temiz Hava Talebinin Hesaplanma Yöntemi

Temiz hava talebinin hesaplanmak için bir takım bilgi ve değerlere ihtiyaç duyulmaktadır. PIARC ve RVS 9.621'deki veriler tüm tünellerin temiz hava gereksinim taleplerinin hesaplanması için kullanılmaktadır. Baz değerler ve özetlenen bilgiler tablo ve grafiklerden yararlanılmalıdır. Aradaki değerler ise enterpolasyon yapılmalıdır. Tüm hesaplamalar tünelin açılış yılı ve sonraki 10 yıl için yapılması gerekmektedir.

3.12.2.1. Trafik Hacmi

Tünelden geçmesi düşünülen araçların trafik hacminin iyi belirlenmeli, tünel içerisindeki şerit sayısına bağlı olarak her bir trafik şeridinin tam kapasitenin tam dolu olarak kullanıp kullanılmayacağı, sıkışık trafiğin nadir olarak görülüp görülmeyeceği belirlenmesi gerekir.

Tablo 3.12. Trafik durumuna ve araç hızlarına göre trafik hacmi (Kayadan, 2013)

		Ortalama Trafik Yoğunlukları (pcu/km) Tek Bir Şerit İçin Trafik Akışı (pcu/saat)			
		Kırsal Bölgede Bulunan Tünel			
		Tek Yönlü Trafik		Çift Yönlü Trafik	
Trafik Durumu	Hız km/saat	pcu/km	pcu/saat	pcu/km	pcu/saat
Akıcı Trafik	60	30	1800	23	1400
Sıkışık Trafik	10	70	700-850	60	600
Duraksamalı Trafik	0	150	-	150	-

Tablo 3.12. (Devam): Trafik durumuna ve araç hızlarına göre trafik hacmi (Kayadan, 2013)

		Şehir İçinde Bulunan Tünel			
		Tek Yönlü Trafik		Çift Yönlü Trafik	
Trafik Durumu	Hız km/saat	pcu/km	pcu/saat	pcu/km	pcu/saat
Akıcı Trafik	60	33	2000	25	1500
Duraksamalı Trafik	10	100	1000	85	850

3.12.2.2. Araçların Trafik İçerik Karışımı

Emisyon gazı miktarının hesaplanmadan önce tünelden geçmesi düşünülen araçları sınıflandırılması gerekir. Binek araç(PC) ve ağır vasıta araç (HGV) diye sınıflandırılmaktadır. Binek araçlar; dizel binek araçlar ve benzinli binek olmak üzere sınıflandırılır. Ayrıca bunlarda araç yaşına, modeline ve sahip olduğu emisyon standardına göre ayrı sınıflandırılmaktadır.

3.12.2.3. Binek Otomobil Birimi, Binek Araçlar, Kamyon ve Otobüsler

Benzinli araçlar dizel veya benzinli olabilmektedir. 3.5 tonun üzerimde olan araçlar binek araç sınıfında yer almaktadır. Emisyon gazları için kamyon ve otobüs sayıları, trafiğin toplamının belli bir yüzdesi alınarak hesap yapılmalı ve bu yüzde için emisyon değerleri oldukça yüksek çıkmaktadır. HGV sınıfına römork kombinasyonları da dahil edilmesi gerekmektedir. Bir otobüs veya kamyon, akıcı trafik koşullarında bir binek aracın 2 katı yavaş ilerlediği durumlarda ise 3 katı yer kaplamaktadır. Binek araç sayısı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır (PIARC, 2004).

$$D_{pcu} \left(\frac{pcu}{km} \right) = D_{veh} \left(\frac{veh}{km} \right) x \left[\left(1 - \frac{a}{100} + \frac{a}{100} * f_{HGV} \right) \right] \quad (3.4)$$

D_{pcu} : Tünel içerisindeki trafik hacmini

a: Otobüs/kamyon yüzdesini ; f_{HGV} : Trafik hızına göre değer alır.

Eğer Trafik hızı ≤ 10 km/h ise $f_{HGV} = 3$; Trafik hızı > 10 km/h ise $f_{HGV} = 2$ değer almaktadır.

3.12.3. Tüneldeki Hız Limiti, Konumu ve Tasarım Yılı

Araçların tünel içerisindeki hız değerlerini belirlemek gerekir. Trafik durumuna (konumuna)ve araç hızına göre Tablo 3.7. de görülmektedir. Şekilden de anlaşılabacağı gibi beklenen trafik hacmi şehir dışında ve şehir içinde olmasına göre değişmektedir. Tasarım hesabı yapılırken trafik hacmi ve ortalama emisyon miktarı tahmin edilmeli, maksimum hava ihtiyacına göre yapılmalıdır.

3.12.4. Duman ve Emisyon Gazları İçin Kabul Edilen Sınır Değerler

Temiz hava ihtiyacı belirlerken tüneldeki NO₂, CO ve duman belirleyici özellik taşımaktadır. NO₂ tünel içinde için verilen sınır değer 25 ppm'dir. CO gazı için sınır değerler ve sönümleme katsayı değerleri aşağıdaki tablodan alınmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) kısa süreli (15 dk) maruz kalma süresi 90 ppm önermektedir.

Tablo 3.13. Trafik durumuna göre CO ve K değerleri (PIARC, 2004)

Trafik Durumu	CO Konsantrasyonu	Sönümleme Katsayısı (K)
Akıcı Trafik (50-100 km/sa)	70 ppm	0.005.m ⁻¹
Rutin sıkışık trafikte ve duraklamaların yaşandığı hal	70 ppm	0.007 m ⁻¹
Beklenilmeyen sıkışık trafik ve duraksamaların yaşandığı hal	70 ppm	0.009 m ⁻¹
Trafik akarken tüneldeki çalışmalar	20 ppm	0.003 m ⁻¹
Tünelin kapatılması hali	200 ppm	0 m ⁻¹

Tünel dışında yer alan hava için kabul edilebilir konsantrasyon değeri; CO için 9 ppm ve NO₂ için 1ppm'dir. Duman için sınır değerler ışık şiddeti, dumanlı havadan geçerken düşmektedir.

$$E=E^0 * E^{-K*L} \quad (3.5)$$

Tünelde görüş mesafelerini ifade etmek için K ifadesi kullanılmaktadır. Sönümleme için yoğunluk kaybı $E-E^0$ şeklinde ifade edilmektedir. Kaynağına göre E^0 tünel havası içerisinde metre biriminden L uzunluğundan bir mesafeyi kat etmektedir. Aşağıdaki denklemde sönümleme katsayısını ifade etmektedir. İletim 's', Işık yoğunluğu 'ln' kaynağına bağlı olarak ' E^0 ', tünel havasında kat etmesi gereken uzunluk (L) olarak tanımlanmaktadır.

$$K = \frac{-1}{L} * \ln * \frac{E}{E^0} \quad (3.6)$$

Görüş mesafesini başka bir ifadeyle tanımlı;

$$s(\%) = 100 * e^{-K*L} \quad (3.7)$$

PIARC (World Road Association) raporlarında verilen emisyon faktörleri ECE ve EURO için standartları için oluşturulmuş yönetmeliklerle ilgilidir. ECE standartları Asya kıtasındaki birçok ülkede, Arap ülkeleri ve Afrika'da uygulanmaktadır. Hesaplamalar için PIARC ta yer alan standartlar aşağıda verilmektedir.

Tablo 3.14. Araç motorlarının emisyon standartları (PIARC, 2004)

Binek Araçlar (PC)		Ağır Vasıta Araçlar
Benzinli Araçlar	Dizel Araçlar	ECE R49
ECE 15/04	EURO 1	PRE EURO
EURO 1	EURO 2	ECE R49/02 (EURO 1)
EURO 2	EURO 3	EURO 2
EURO 3	EURO 4	EURO 3
EURO 4		EURO 4- EURO 5

Hesaplamalarda kullanılan standartlar emisyon gazlarının miktarına ve araç motorlarına göre değişme göstermektedir. Havalandırma projesi Türkiye için yapılacaksa ağır vasıtaların ve binek araçların sahip olduğu emisyon standartları aşağıdaki gibi kabul edilmelidir.

- Binek araçlar (PC) için kullanılan emisyon standardı ECE 15/04

- Ağır vasıta araçlar (HGV) için kullanılan emisyon standardı EURO 2
- Dizel binek araçlar için kullanılan emisyon standardı EURO 1

Gram g cinsinden verilen emisyonu hacimsel bir emisyonla dönüştürmek için, emisyon değerlerinin belirli bir gazın özgül ağırlığına bölünmesi gerekir. Ortalama değerler şunlardır; $\rho_{CO} = 1200 \text{ g CO/m}^3$, $\rho_{NO_2} = 2000 \text{ g NO}_2/\text{m}^3$ 'tür.

3.12.5. Ağır Vasıta Araçlar (HGV) İçin Emisyon Hesaplama Yöntemi

Ağır vasıta araçlar için emisyon hesaplama yöntemleri aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$Q = q_{ex}(v, i) * f_m * f_h * f_e + q_{ne}(v) \quad (3.8)$$

Q: Dizel partikül [m^2/h , araç], CO ve NO_x için emisyon değeri

$q_{ex}(v, i)$: Ortalama araç hızı ve tünel eğimine bağlı emisyon faktörü [m^2/h , araç], [g/h , araç]

$q_{ne}(v)$: Egzoz gazı dışındaki partiküller için emisyon değeri

f_m : Kütle etkisi faktörü; f_h : Yükseklik faktörü; f_e : EURO'ya göre emisyon standart faktörü

3.12.5.1. Kütle Etkisi (F_M)

Tünelde bulunan ağır vasıta aracın toplam ağırlığının ortalaması (araç yükü ve tipinden bağımsız) olarak adlandırılır. 10 ton, 20 ton ve 30 ton için verilir. Aradaki değerler ise lineer olarak enterpolasyon yapılır. Şehir tünelleri için hafif ağırlıktaki kamyon, kamyonetler ve otobüsler bulunmaktadır. ($m=10-15$ ton) Ulusal yasal yük taşımaya göre kamyon yük ağırlığı ($m=25-35$ ton) ve normal şehir içi karayolu tünellerinde ($m=15-25$ ton)'dur (PIARC, 2004).

3.12.6. Binek Araçlar (PC) İçin Emisyon Hesaplama Yöntemi

Benzinli binek araçlar ve dizel araçlar için emisyon hesaplama aşağıdaki denklem ile yapılmaktadır.

$$Q = q_{ex}(v, i) * f_h * f_a + q_{ne}(v) \quad (3.9)$$

Q: Dizel partikül [m^2/h , araç], CO ve NO_x için emisyon değeri

$q_{ex}(v, i)$: Ortalama araç hızı ve tünel eğimine bağlı emisyon faktörü [m^2/h , araç], [g/h , araç]

$q_{ne}(v)$:Egzoz gazı dışındaki partiküller için emisyon değeri

f_h : Yükseklik faktörü; f_a : Katalizörlü araçlar için yaşlanma faktörü

3.12.6.1. Yükseklik Faktörü ve Yaşlanma Faktörünün Açıklanması

Yaşlanma faktörü uygulama yılı olarak geçerli emisyon standartları göz önüne alınmalıdır. Dizel motorlarla çalışan binek otomobillerdeki oksidasyon katalizörleri için yaşlanma etkisi dikkate alınmamaktadır ve veri bulunmamaktadır Buna ek olarak binek araçlara etki eden partikül madde etkisinin yaşlanmaya etki ettiğinin ile alakalı bir veri bulunmamaktadır. Bu standartlar sadece EURO 4 ve EURO 5 için geçerlidir (PIARC, 2004). Yükseklik faktörü (f_h) deniz seviyesinde, her bileşen için her zaman 1'dir. Farklı egzoz bileşenleri üzerindeki irtifa etkisi, motorun türüne göre değişir. Havalandırma tasarımında yükseklik katsayısı artırıcıdır, 2000m yükseklik için temel emisyon değerlerinin çarpılması gerekir. 700 m yüksekliğe kadar, üç yollu katalizörlü benzinli araçların emisyon davranışında bir değişiklik olmadığı varsayılmaktadır (PIARC, 2004).

3.12.6.2. Benzinli Araçlar (PC) İçin Emisyon Hesaplama Yöntemi

Gerekli olan taze hava miktarı pek çok faktöre bağlı olup aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$V = n_{veh} * Q * \frac{1}{C_{adm} - C_{amb}} \quad (3.10)$$

V: Tünel için gerekli olan temiz hava miktarı (m^3)

n_{veh} : Tünelden geçmesi tahmin edilen araç sayısı

Q: Araçlardan açığa çıkan emisyon değerini (g/h , vehicle)

C_{adm} : Tünelde kabul edilen limit emisyon gazı değeri (g/m^3)

C_{amb} : Dış ortam havası içerisindeki limit emisyon gazı değeri (g/m^3)

$V > 0$ km/h saat için araç sayısı: $n_{veh} = M \cdot L / v$; $v = 0$ km/h için araç sayısı: $n_{veh} = D \cdot L$

M şeritlerdeki trafik yoğunluğu, L Tünel uzunluğunu, V: araç hızını, D: trafik hacmini ifade edilmektedir. Dizel araçlardan açığa çıkan parçacık yoğunluğu ve partikülleri dışındaki parçacıklar (PM) için C_{adm} değeri K_{adm} olarak değiştirilmelidir.

3.13. Yangın Durumunda Basınç Kaybı Hesapları

Bir tünel de havalandırma yapılırken farklı sebeplerle basınç kaybı oluşmaktadır. Tünel havalandırılması yapılırken mutlaka basınç kaybının hesabı yapılması gerekir. Basınç kayıpları yangın durumunda ortaya çıkan ısıнын tünel hacmindeki havanın sıcaklığını, dolayısı ile yoğunluğunu değiştirmektedir. Tünel jet fan seçimleri iki şekilde yapılmaktadır ya tünel için gerekli olan temiz hava ihtiyacına ya da basınç kaybına bağlı oluşturduğu itki kuvvetine göre yapılır. Kırık tüneli içinde basınç kaybından yola çıkarak AİRONN firmasının katalog değerlerini ele alarak Jet fan seçimi yapılmıştır. Tünel içerisindeki hava hızının 10-12 m/s'den büyük olması durumunda tünel içerisinde boylamasına havalandırma yapılamamaktadır. Tünel içerisindeki hava hızı (m), temiz hava miktarı (m³) ile tünelin kesit alanının oranı ile elde edilmektedir.

3.13.1. Duvar Sürtünmesi Nedeniyle Tünel Boyunca Basınç Kaybı Hesaplamaları

Sürtünme nedeniyle tünelin belirli bir dx uzunluğundaki basınç kaybı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$dHx = \lambda * \left(\frac{Vo^2}{2} \right) * \left(\frac{dx}{dH} \right) * \left(\frac{T(x)}{To} \right) \quad (3.11)$$

D_H : Tünelin hidrolik çapı (m)

ρ_0 : Ortamdaki havanın yoğunluğu (kg/m³)

V_0 : Havanın doğrusal hızı (m/s)

T_x : x konumundaki hava sıcaklığı (K); T değeri hesaplanmış sıcaklık sıcaklık profilindeki değerdir.

T_0 : Ortamdaki hava sıcaklığını

λ : Başka engel olup olmadığına bakılmaksızın sadece tünel pürüzlülüğüne bağlı ampirik sürtünme katsayısıdır. Değeri genellikle 0.02 veya 0.04 arasındaki değerler alınmaktadır

3.13.2. Giriş ve Çıkış Yapılarında Tekil Basınç Kaybı Hesaplamaları

$$H = k * \xi * \frac{\rho_0 * V_o^2}{2} * \left(\frac{T_p}{T_o}\right) \quad (3.12)$$

ξ : Tünel girişinde 0.5, çıkışında 1.0 değerini alan tekil basınç katsayısı

T_p : Tünel girişinde veya çıkışında egemen olan yangın sıcaklığı

Burada k ilgili tekil kaybının uygulanmasını ya da uygulanmamasını belirlemek için 0 veya 1.0 değeri alan bir katsayıdır. Böyle bir katsayı uygulanması sadece programlama kolaylığı anlamına gelmekte olup her hangi bir fiziksel anlamı yoktur.

3.13.3. Atmosferik Kaybı Nedeniyle Tekil Basınç Kaybı Hesaplamaları

Bir önceki denkleme benzer olarak, fakat sıcaklık etkisinden yoksun bir şekilde:

$$H = k * \xi * \frac{\rho_0 * V_w^2}{2} \quad (3.13)$$

W_w : Giriş ve ya çıkış yapısı dışında 10 m yükseklikteki rüzgâr hızıdır. ξ katsayısı için ilk tahmini değer $(3/10)^{2/7}$ 'dir

3.13.4. Yangın Mahalindeki Basınç Kaybı Hesaplamaları

Yangın sebebi ile oluşan sıcak dumanın genişlemesinden dolayı oluşan basınç kaybını ifade etmektedir. Yangın, dumanların genişlemesiyle, hava akımına engel olmaktadır.

$$H = \frac{c * Q}{V_o * D h^2} \quad (3.14)$$

Q yangını Watt cinsinden ısı yayma gücü olup genellikle yangın gücünün 2/3 kadar alınmaktadır, c ise değeri $9 * 10^{-5}$ olan bir katsayıdır.

3.13.5. Baca Etkisi Sebebiyle Basınç Kaybı Hesaplamaları

Baca etkisi sebebiyle tünel boyunca oluşan basınç kaybını teşkil etmektedir. Burada tünel eğimi pozitifse baca etkisi dumanın tahliyesine yardımcı olmakta, negatif ise dumanın tahliye olmasını zorlaştırmaktadır ve böylelikle basınç kaybını artırmaktadır.

$$DH(x) = -m * \rho_0 * \left(1 - \frac{T_x}{T_o}\right) * g * L \quad (3.15)$$

DH(x) tünel kesimini m ise tünelin yukarı aşağı olması durumuna göre değer alan eğimdir.

3.13.6. Araçların Durması Sebebiyle Basınç Kaybı Hesaplamaları

$$DH(x) = n * c_v * \frac{A_v}{A} * \rho_0 * (V_o - V_v)^2 * L * T_x/T_o \quad (3.16)$$

V_v : Taşıtların ortalama hızı, yangın durumunda hız sıfırdır.

c_v : Aerodinamik katsayısı

A_v : Taşıtların rüzgâra maruz ve akım doğrultusundaki dik ortalama değeri (m^2)

3.14. Basınç Kaybına Göre Jet Fan Seçimi ve Hesabı

Tünel havalandırılırken farklı nedenlerle basınç kayıpları meydana gelmektedir. Tünelin havalandırılması yapılmadan önce basınç kayıplarının hesaplanması gerekmektedir. Önceki bölümlerde temiz hava miktarının hesaplanmaları dile getirmiştir. Dünya da sürekli emisyon değerleri sürekli değişmektedir. Hesaplama yapılırken PIARC vb. kuruluşların emisyon hesaplama için güncel grafik ve tablolarında yararlanılmalıdır. Tünel içerisinde hava hızı 10- 12 m/s'den büyük olması durumunda boylamasına havalandırma yapılamamaktadır (Karakaş, 2011). Jet fanlardan beklenen beklenti tünelde meydana gelen basınç kayıplarını yenecek seviyede olmalıdır.

$$(K_{giriş} + f * \frac{uzunluk}{g} + K_{çıkış}) * V^2 + (N_{PC} * A_{PC} * CD_{PC} + N_{tr} * A_{tr} * CD_{tr}) + ABS * (V_{tün} - Trafikhızı * \frac{1}{36})^2 * \frac{1}{Alan} \quad (3.17)$$

$$f = 0.0055 \left[\left(1 + \sqrt[2]{3} * 10^4 * \frac{K}{D_h} \right) + \left(\frac{10^6}{Re} * 1 \right) \right] \quad (3.18)$$

Sms (hava yoğunluğu); $K_{giriş}$ (tünel giriş kayıp faktörü); $K_{çıkış}$ (tünel çıkış kayıp faktörü)
 K (tünel yüzey katsayısı); Re (reynold sayısı); CD_{pc} (oto aerodinamik katsayısı); CD_{tr} (ağır
 vasıta aerodin. Katsayısı); A_{pc} (otomobil kesit alanı); A_{tr} (ağır vasıta kesit alanı); D_h (hidrolik
 çap); F_d (dinamik itki kuvveti)

Jet fan sayısını belirlemek için toplam itki kuvvetinin belirlenmesi gerekir. Bunun için
 üretici firmaların kataloglarına bakılarak bilgilere ulaşılmaktadır. Dinamik itki kuvveti ile
 montaj verimliliği çarpılması ile montaj itki kuvveti bulunmaktadır. Yangın gücüne bağlı
 olarak jet fan sayıları ve basınç kayıpları Excelde hesapladığımız veriler diğer bölümlerde
 verilmiştir. Gerekli Jet fan Sayısı= Toplam İtki Kuvveti / Montaj İtki Kuvveti oranıdır.

$$F_s = S_m * A_{f*} \left(\frac{Debi^2}{A_f} \right) * \text{itme verimi} \quad (3.19)$$

$$F_d = F_s * \left(1 - \frac{V_{tün}}{A_f} \right) \quad (3.20)$$

Tablo 3.15. Negatif eğimli tüpün 30 MW yangın gücüne göre basınç kaybı

YANGIN POZİSYONU									
Basınç Kayıpları	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	6100	7091
Duvar Sürtünmesi	107,08	107,08	107,08	107,08	107,029	107,026	106,76	106,70	104,9053
Giriş-Çıkış	9,51	9,51	9,51	9,51	9,51	9,54936	9,75	9,79	11,1892
Rüzgar Etkisi	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,6	9,60	9,60	9,6
Yangın Mahali Tekillliği	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55	7,54524	7,55	7,55	7,545242
Baca Etkisi	73,23	73,23	73,22	73,16	72,83	71,011	61,16	58,94	0

Tablo 3.15. (Devam): Negatif eğimli tüpün 30 MW yangın gücüne göre basınç kaybı

Araçların Engelleme	0	31,806	63,612	95,419	127,23	159,03	190,84	194,018	225,538
Toplam	206,97	238,77	270,57	302,31	333,79	363,76	385,64	386,60	358,78
Toplam İtki	13809,03	15931	18052,4	20170	22270	24270	25730	25793	23937,7
Jet Fan İtki Kuvveti (N)	26447,576	26462,	26235	26260	26284	26284	26409	26342,4	26800,3
Jet Fan Basınç Kaybı (Pa)	396,39655	396,62	393,224	393,58	393,95	394,46	395,84	394,82	401,683
Çalışan Jet Fan Sayısı	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Fark	12638,545	10531,3	8183,52	6088,98	4013,73	2048,	679,730	548,627	2862,64

Tablo 3.15. ve Tablo 3.17.de negatif eğimli bir tünelin yangın pozisyonuna göre basınç kaybı, itki kuvvetleri görülmektedir. Tablolardaki sarı renk kritik yangın konumudur. Ayrıca itki kuvvetine ve basınç kaybına göre AIRONN havalandırma şirketinin jet fan seçim katologuna bakılarak jet fan tipi seçilmiştir. Tablo 3.16. negatif eğimli tünelin yangın konumlarına göre jet fan konumu ve adedi görülmektedir. Diğer havalandırma şirketlerinin katologlarına bakılarak da seçim yapılabilir. Hesaplanan tünel hesaplarımızda ve analizlerinde AIRONN fan katologundan elde edilen verilerle analiz gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.16. Negatif eğimli tüpe göre 30 MW ve 100 MW yangına göre jet fanların konumu ve adedi

30 MW Yangın		100 MW Yangın		30 MW Jet Fan Özellikleri	
JF Konumu	Adet	JF Konumu	Adet		
120	2	120	2	Çap	1000 mm
462	2	364	2	İtki Kuvveti	950 N
804	2	608	2	Debi	24,935

Tablo 3.16. (Devam): Negatif eğimli tüpe göre 30 MW ve 100 MW yangına göre jet fanların konumu ve adedi

1146	2	852	2	Hız	31,749 m/sn
1488	2	1096	2		
1830	2	1340	2		
2172	2	1584	2	100 MW Jet Fan Özellikleri	
2514	2	1828	2		
2856	2	2072	2	Çap	1000 mm
3198	2	2316	2	İtke Kuvveti	950 N
3540	2	2560	2	Debi	24,935
3882	2	2804	2	Hız	31,749 m/sn
4224	2	3048	2		
4566	2	3292	2		
4908	2	3536	2		
5250	2	3780	2		
5592	2	4024	2		
5934	2	4268	2		
6276	2	4512	2		
6618	2	4756	2		
6960	2	5000	2		
		5244	2		
		5488	2		
		5732	2		
		5976	2		
		6220	2		
		6464	2		
		6708	2		
		6952	2		

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

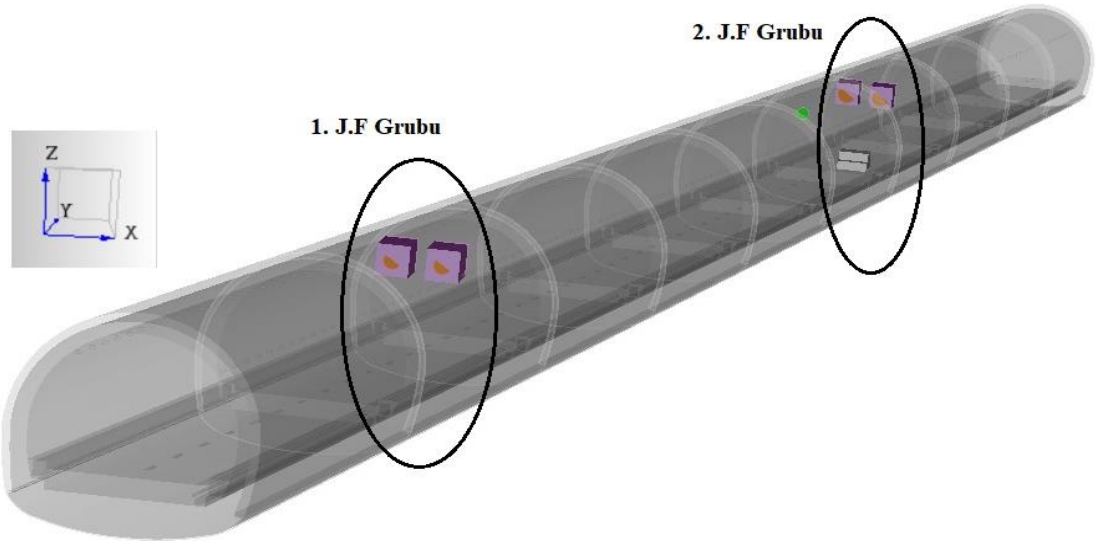
Bu tez çalışmasında 30 MW ve 100 MW yangın yükü için jet fan kapasite ve fan konumu negatif eğimli tünel için hesabı yapılmıştır. Hesap sonucunda seçilen jet fanların debileri %50 ve %75 oranında azaltıp ve artırması üzerine senaryolar geliştirilip analiz edilmiştir. Analiz sonuçları incelerken insan sağlığı ve çevre güvenliğini sağlamak için havalandırma çözüm senaryoları belirli durumlarda eksik kaldığı bilakis durumun daha kötüleştirmeye yol açıldığı görülmüştür. Yeni çözüm yolları geliştirerek en uygun duman tahliye çalışması yapılmış olup en uygun çözüme ulaşılmıştır.

4.1. 30 MW Yangın Gücü İçin Simülasyon Analizi ve Sonuçları

Belirlenen konuma göre yerleştirilen 1.J.F ve 2.J.F grubundaki fanlar, 30 MW için yapılan bütün senaryolarda aktif edilmiştir. Fanlar 1000 mm çapında, 2775 mm uzunluğunda, itme kuvveti 950 N (Newton) ve çıkış hızları 31,7 m³/s'dir. Fanlar EN 12101-3 Standardına göre 400 C° sıcaklık ve 120 dk ise dayanım gösterecek şekilde seçim yapılmalıdır. Tünelde çıkan yüzey alanı 2.5 m² bir yangın yüzeyi olduğu için buraya HRRPUA (Heat Release Rate Per Area) değeri 1,2x10⁴ kW/m²' ye denk gelmektedir. Tablo 4.1. de seçilen fanların debilerini %50 ve %75 azaltılıp, artırılması yapılarak 5 senaryo durumuna göre analizler yapılmıştır. Şekil 4.1 de ise fan konum tablosuna göre fanların konumu şekildeki gibi tünele konumlandırılmıştır. T Burada senaryo ifadeleri simülasyonlarda S olarak kullanılacaktır. Örneğin Senaryo A yerine S-A gibi kısaltmalar kullanılacaktır.

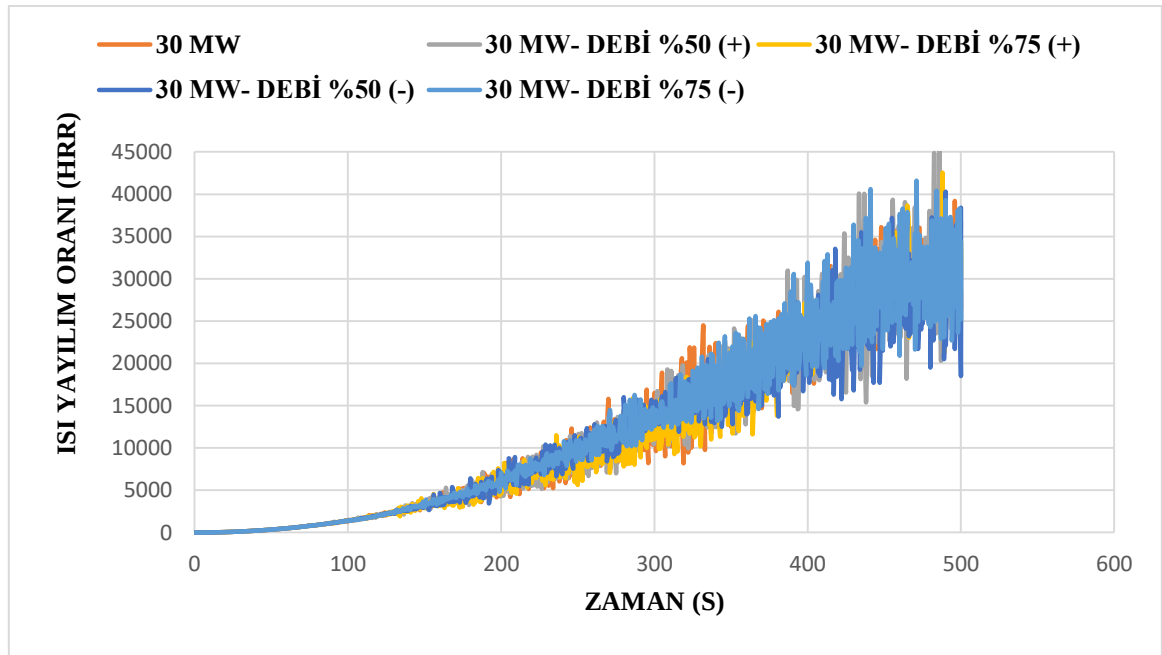
Tablo 4.1. 30 MW yangın gücü için havalandırma senaryoları

	1.J.F Grubu			2.J.F Grubu	
%	Senaryo	Konum (m)	Q(m ³ /s)	Konum (m)	Q(m ³ /s)
	A	120	24,935	462	24,935
%50	B	120	37,4025	462	37,4025
%75	C	120	43,63625	462	43,63625
%50 (-)	D	120	12,4675	462	12,4675
%75(-)	E	120	6,23375	462	6,23375



Şekil 4.1. 30 MW yangın gücü için jet fanların tünel içindeki konumu

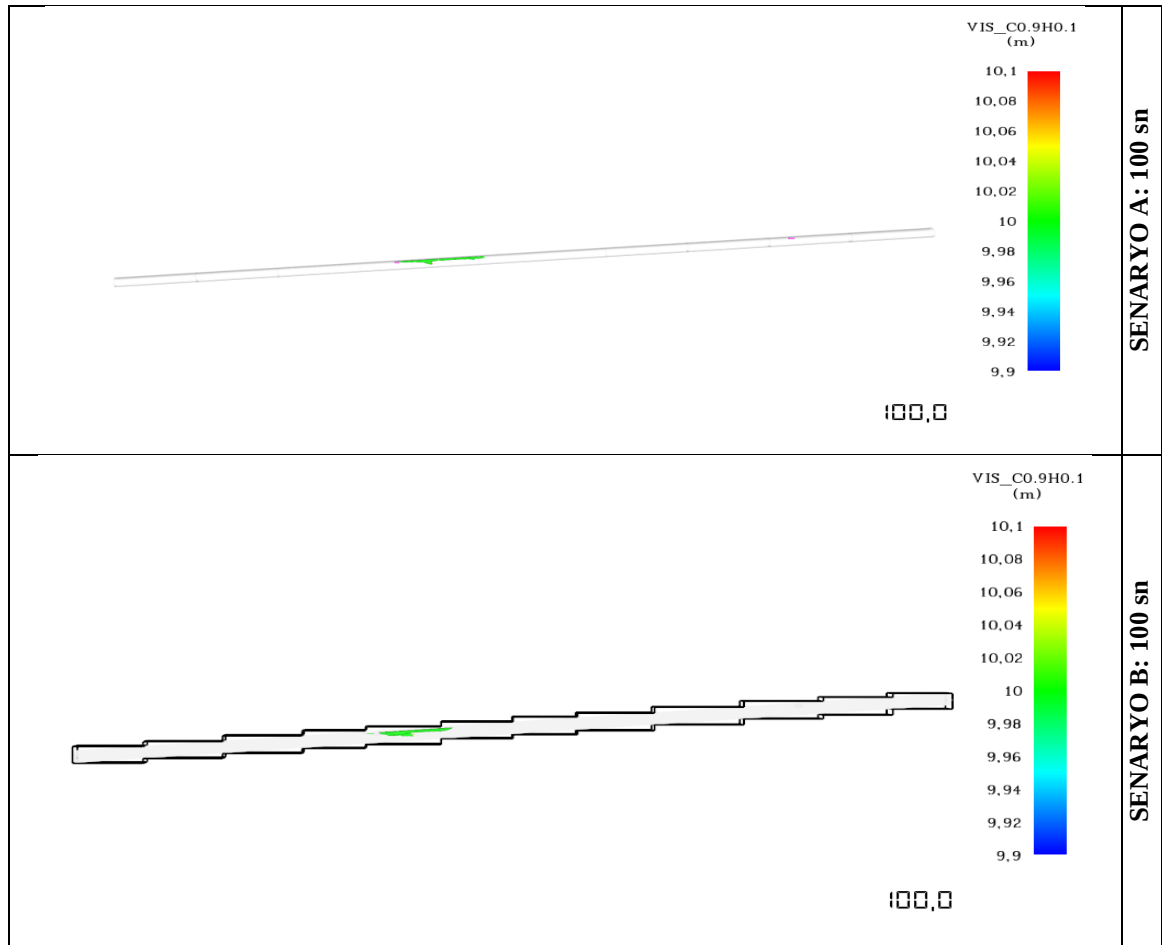
Şekil 4.2. de gerçekleştirilen senaryoların zamana göre ısı yayılım oranının(hızı) grafiği görülmektedir. Grafiğe baktığımızda 400-450 saniye aralığında Senaryo B ve Senaryo E'nin 40 MW seviyelerine yükselmiştir. Yaklaşık olarak 480-500 saniyelerde ise S-B ve S-C de 45 MW gibi bir ısı yayılım oranı ortaya çıkmaktadır.



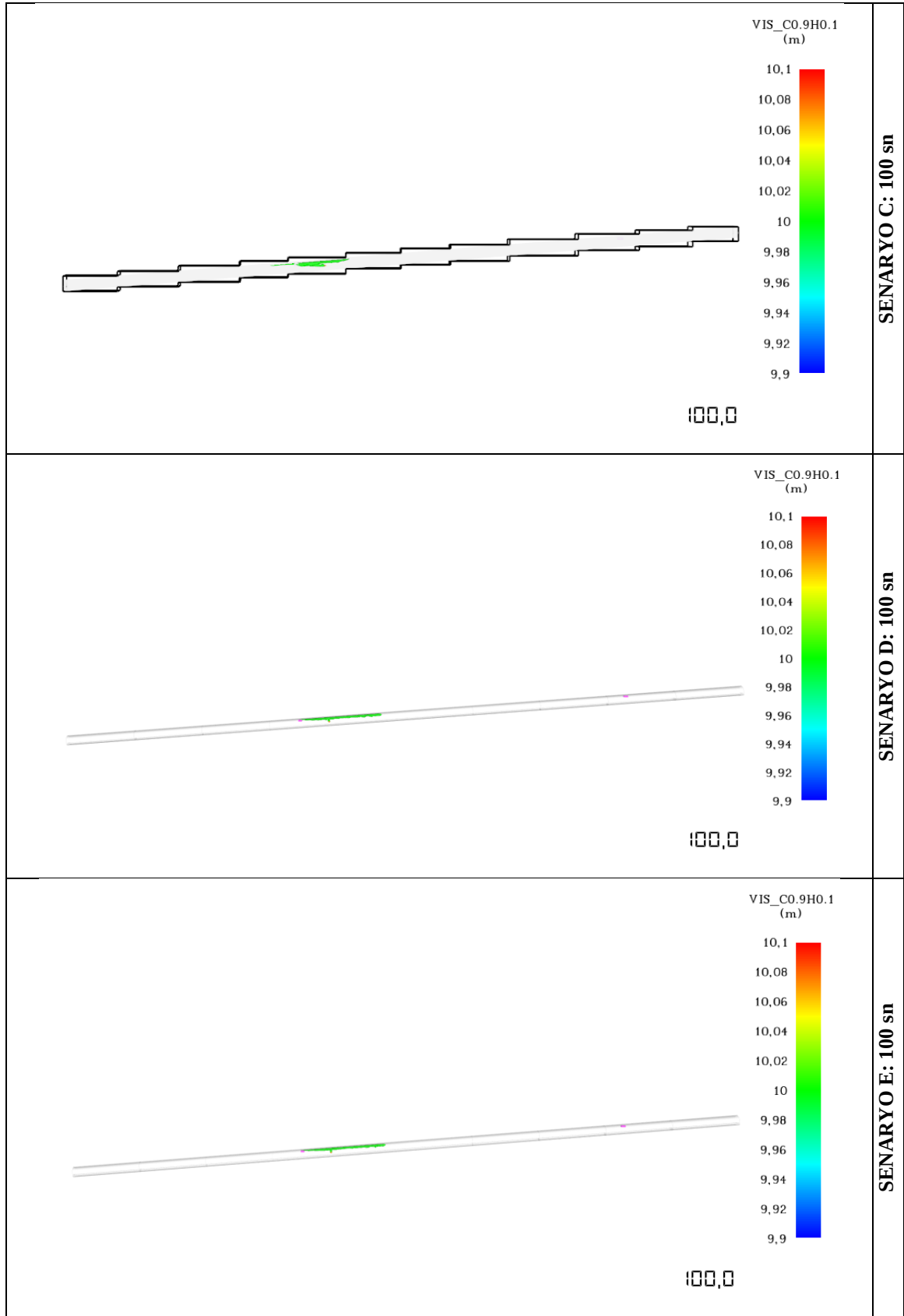
Şekil 4.2. 30 MW yangının %50 - %75 debi artış ve azalış sonucu zamana bağlı ısı yayılım oranı

4.1.1 30 MW Yangın Gücündeki Senaryoların 100-200-300-400-500 Saniyeki Duman Görünürlüklerinin Analizi

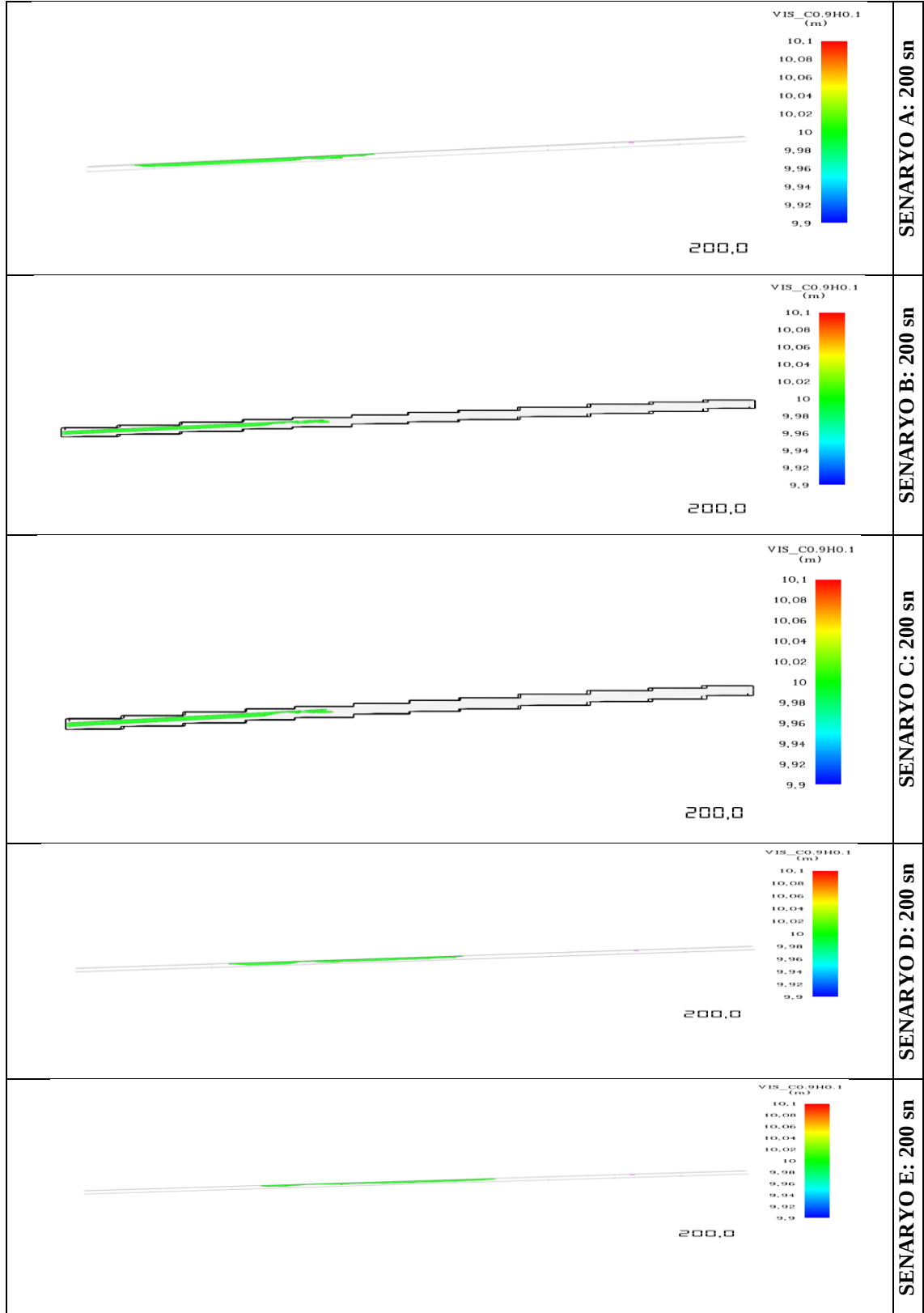
30 MW yangın gücü için yapılan bu simülasyon da S-A, S-B, S-C, S-D, S-E senaryoların görünürlükleri incelenmiştir. S-A'da yangın bölgesinden çıkan dumanlı gazlar görüş mesafesini azaltılmıştır. Duman görünürlüğün tabandan 2 yüksekte baktığımızda bir insanın görünürlüğü 10 m olacak şekilde durum analizi yapılmıştır. S-D, S-E'de fan üfleme hızının yetersizliğinden dolayı dumanı akışı tahliye yönünün tersine gönderdiği görülmüştür. S-D ve S-E tüneldeki jet fanların üfleme hızlarının azaltılması tünelin pozitif eğime doğru yönelmesine neden olmuştur. Senaryolara baktığımızda soot visibility 9,96 m ile 10,4 m arasında kaldığı sonucunu çıkartabiliriz. Dumanın bir noktada toplanması görünürlüğü azaltılmıştır. Fan debilerinin yeterli olduğu durumlarda tünel çıkışında görünürlükte artış meydana gelmektedir.



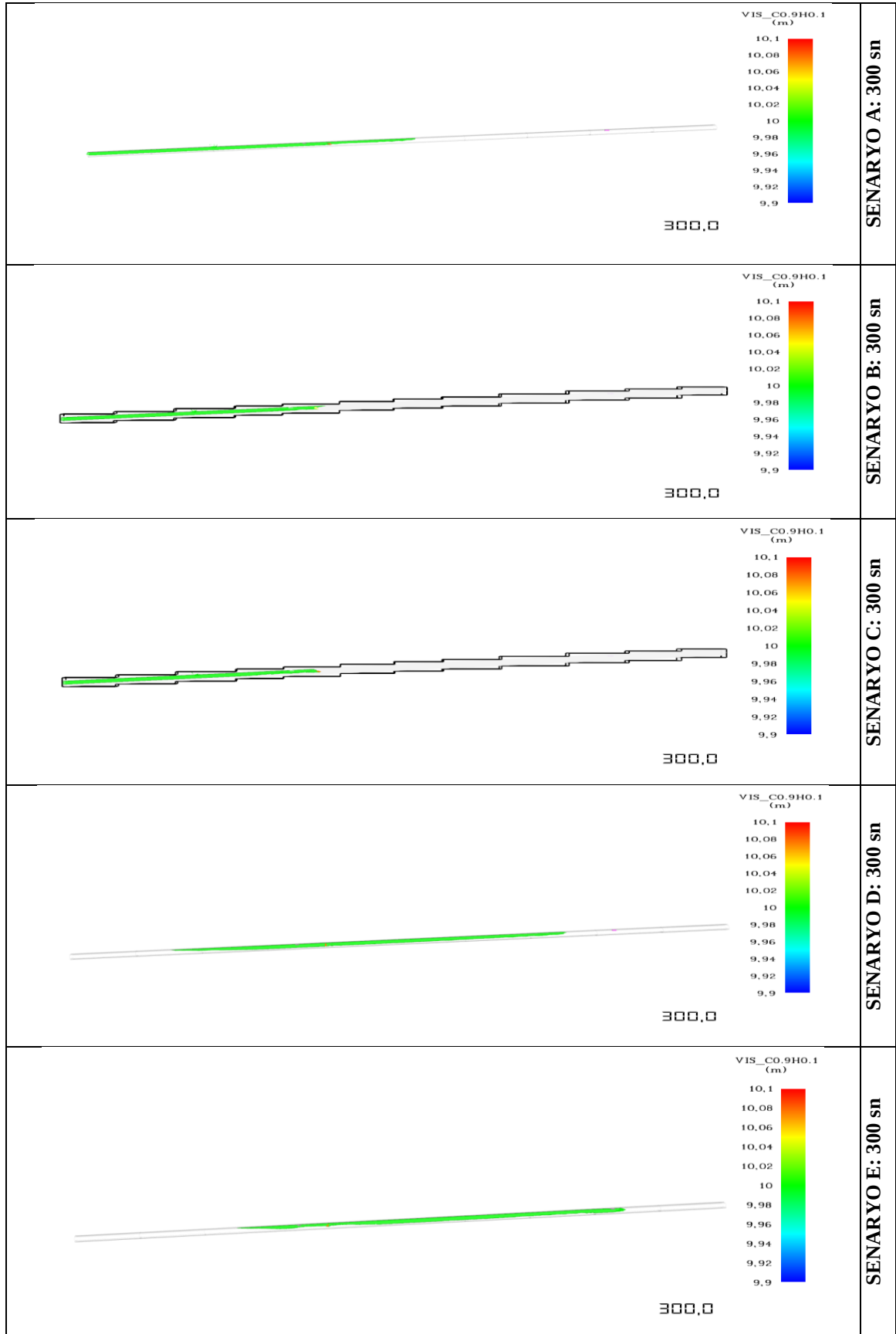
Şekil 4.3. 30 MW yangın gücünün 100. saniyedeki senaryoların tünel boyunca duman görünürlükleri



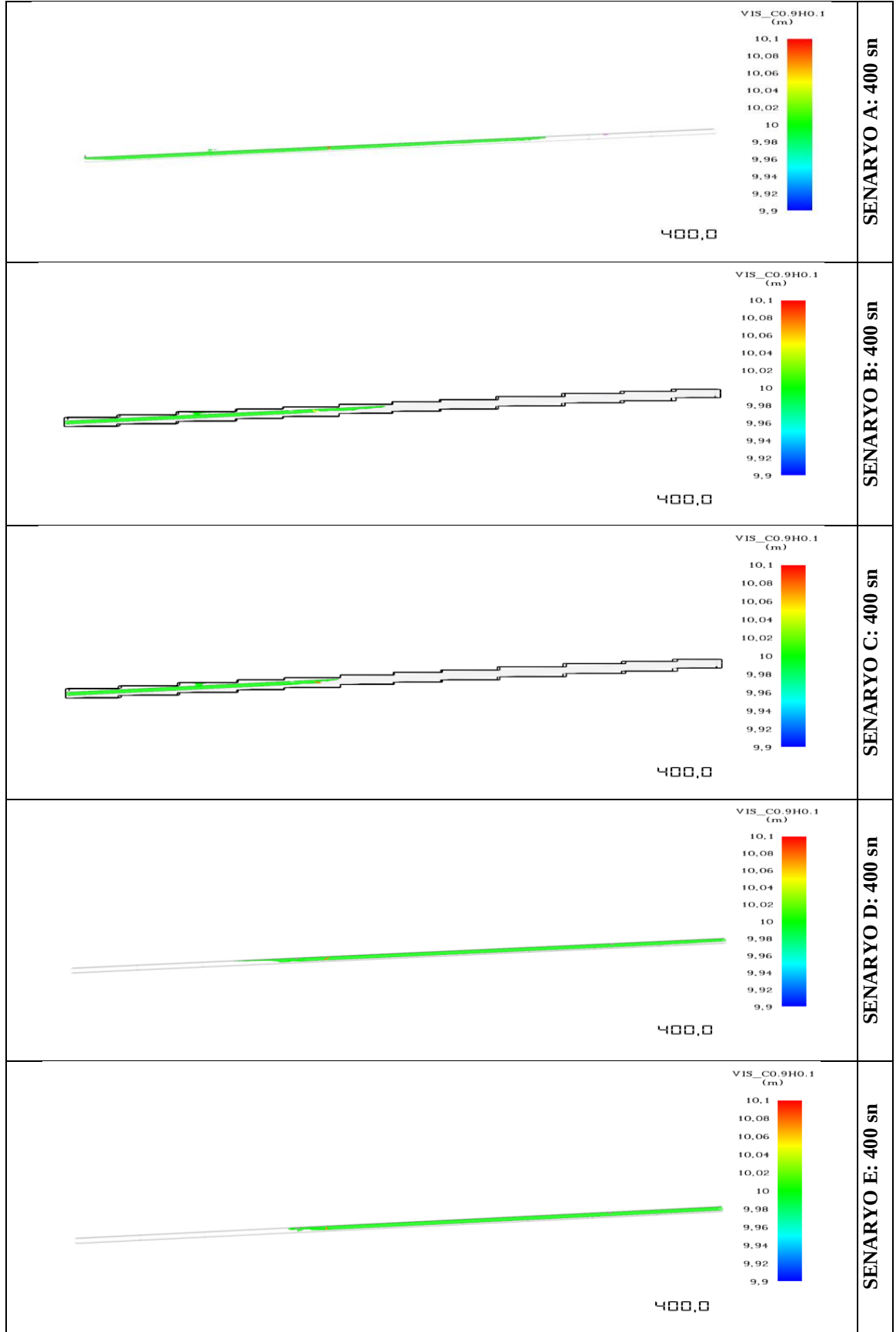
Şekil 4.3. (Devam): 30 MW yangın gücünün 100. saniyedeki senaryoların tünel boyunca duman görünürlükleri



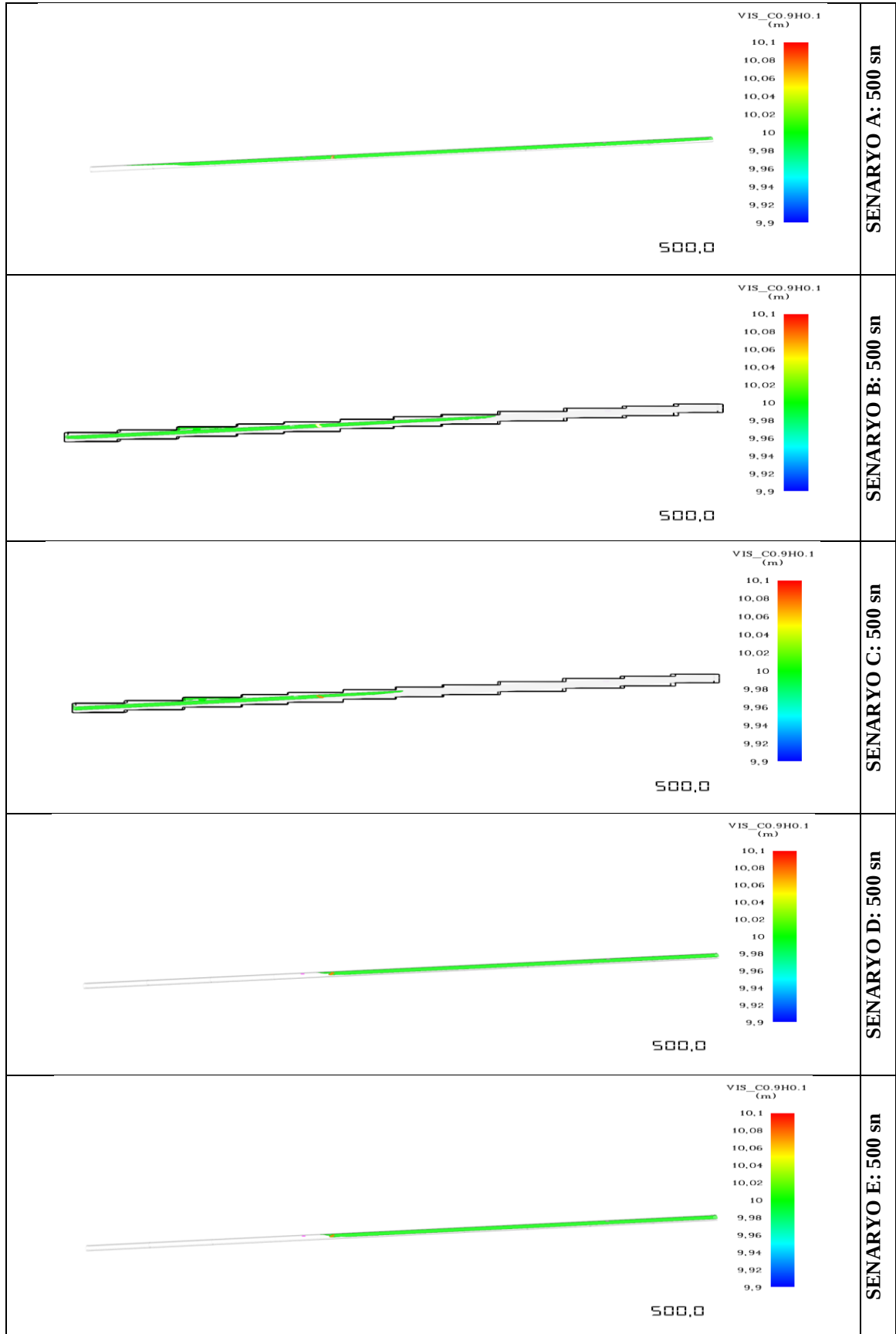
Şekil 4.4. 30 MW yangın gücünün 200. saniyedeki senaryoların tünel boyunca duman görünürlükleri



Şekil 4.5. 30 MW yangın gücünün 300. saniyedeki senaryoların tünel boyunca duman görünürlükleri



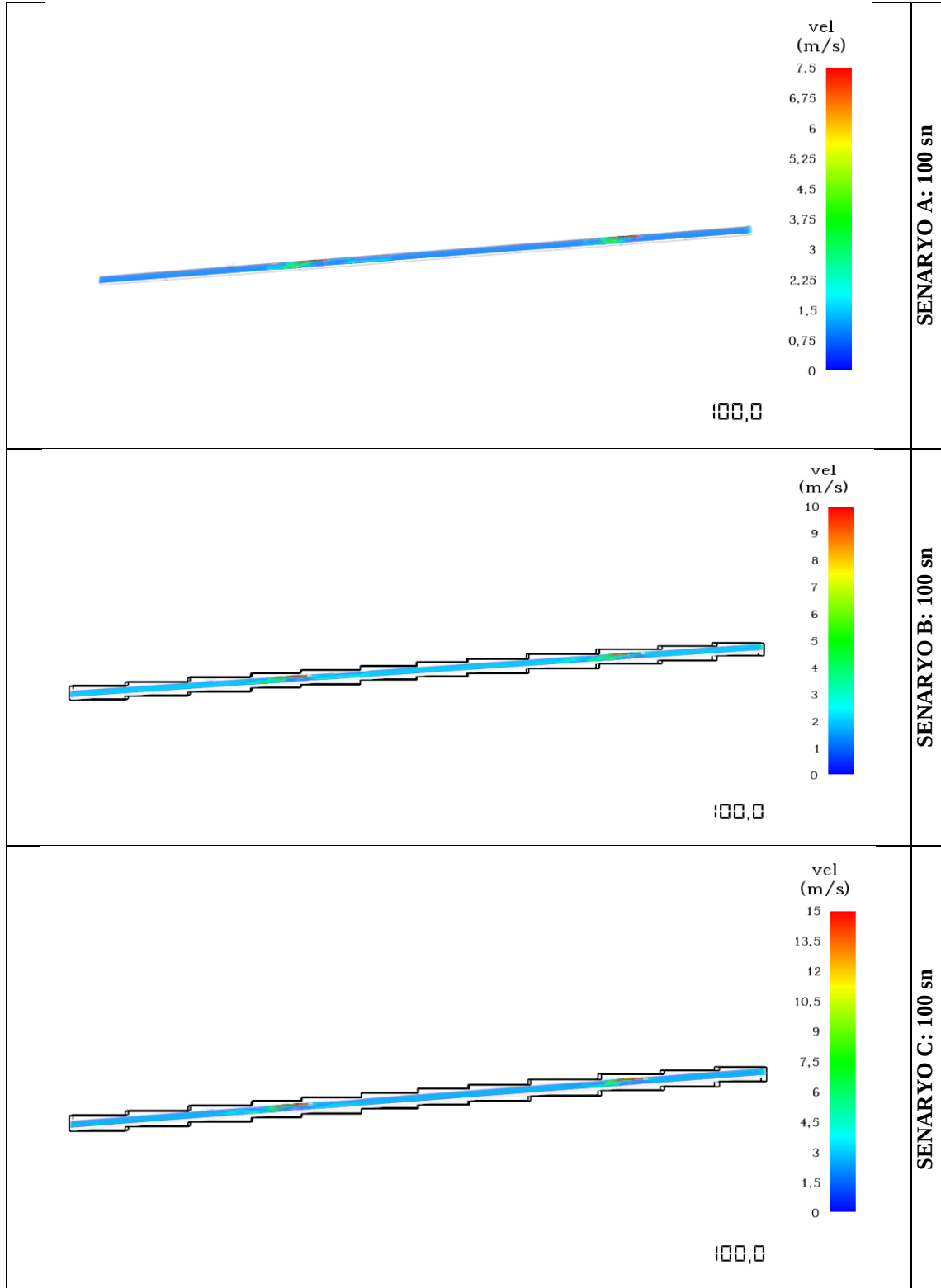
Şekil 4.6. 30 MW yangın gücünün 400. saniyedeki senaryoların tünel boyunca duman görünürlükleri



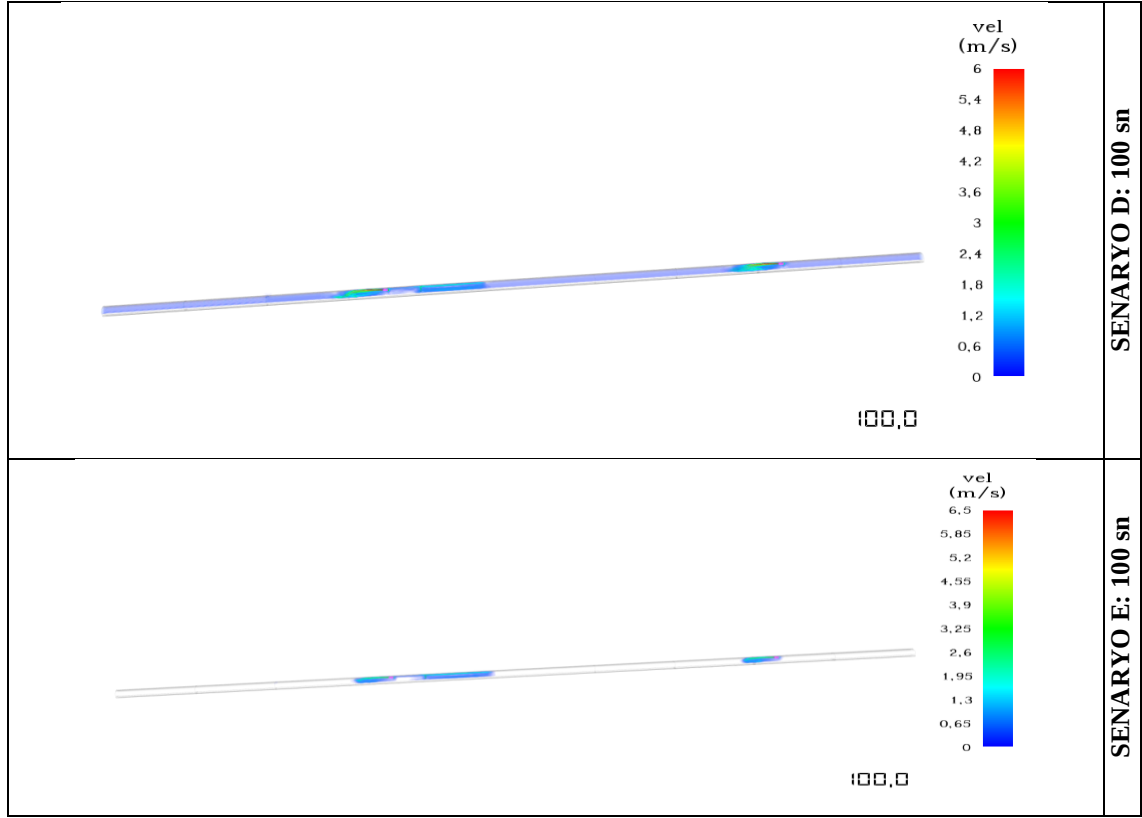
Şekil 4.7. 30 MW yangın gücünün 500. saniyedeki senaryoların tünel boyunca duman görünürlükleri

4.1.2. 30 MW Yangın Gücündeki Senaryoların 100-200-300-400-500 Saniye Duman Hızlarının Analizi

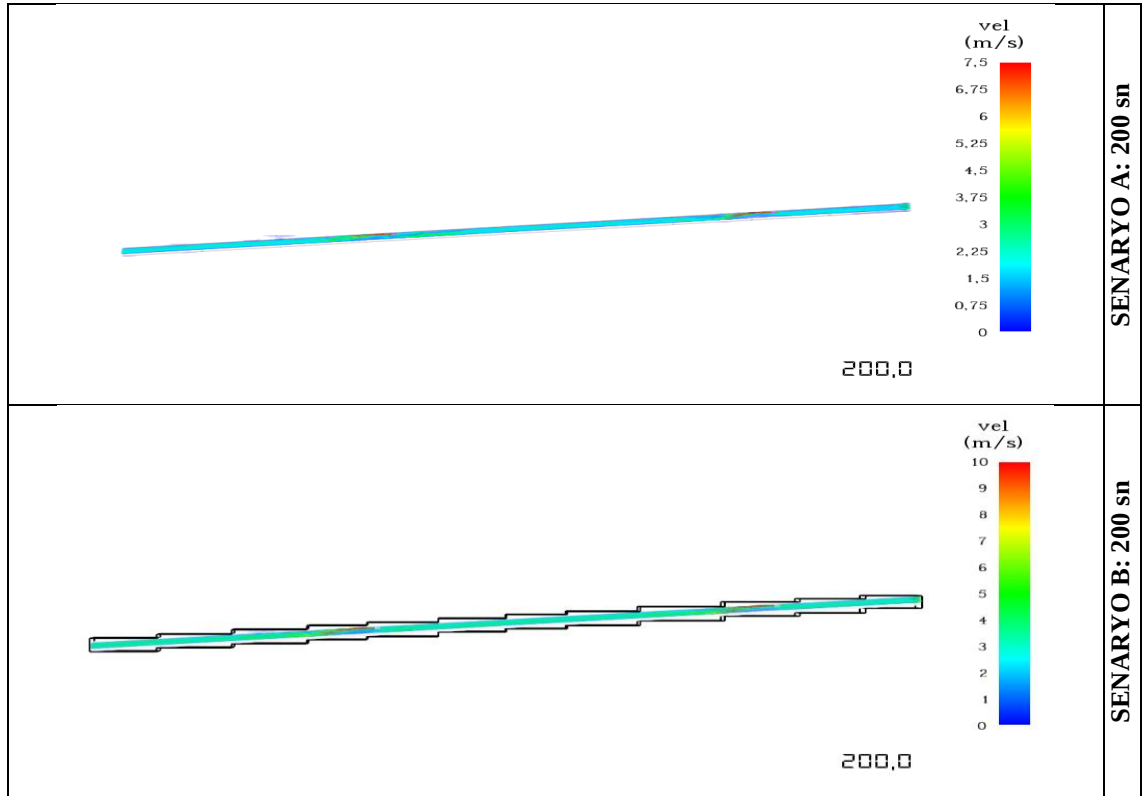
Duman hızlarını incelediğimizde S-A için ilk 100 sn'de jet fanın devrede olduğu anda hava hızı 7,75 m/s-6,75 m/sn gibi değere ulaşmaktadır. Tavanda biriken gaz jet fanın üfleme hızı ile tabana doğru ilerlediğini görmekteyiz ve buradaki hava gazının 4 m/s ile 3,75 m/sn arasında olduğu görülmektedir. S-B de ise fanların üfleyeceği debi miktarı %50 artış yapılmıştır. Burada ilk 100 sn jet fanların devreye girdiği alanda hava hızının 10 m/sn görülmektedir. S-C de ilk 100 sn de jet fanların devreye girdiği alanda akış hızı 15 m/sn, 200 sn fanların olduğu kısım haricinde 3-4,5 m/sn olduğu fakat girişten çıkışa 10 metre yakın bir alanda 4,5-6 m/sn olmuştur. S-D ve S-E de fan debilerinin düşük kalması sonucunda yeterli duman tahliyesi yapılmadığı ve tünelin akış istikametinin tersine bir akış meydana gelmiştir. S-A 200 sn yangın bölgesinde tavanda hız 3m/sn ve tünel girişinde 3-3,75 m/sn arasında hız görülmektedir. S-B de 200 sn de aynı hızla üflediği ve tünelin geriye kalan kısmında akış hızının 2-3 m/s olduğu görülmektedir. S-C de 200 sn fanların olduğu kısım haricinde 3-4,5 m/sn olduğu fakat girişten çıkışa 10 metre yakın bir alanda 4,5-6 m/sn olduğu görülmektedir. S-D ve S-E de 300 sn de Fanların altında kalan bölgede ise hızın 1-3 m/sn hava hızı olduğu sonucunu çıkartabiliriz. S-D ve S-E de fan debilerinin düşük kalması sonucunda yeterli duman tahliyesi yapılmadığı ve tünelin akış istikametinin tersine bir akış meydana gelmiştir. S-C 300 sn fanların olduğu kısım haricinde 3-4,5 m/sn olduğu fakat girişten çıkışa 10 metre yakın bir alanda 4,5-6 m/sn olmuş ve diğer saniyelerde aynı hızla devam edildiği görülmektedir. Fanların altında kalan bölgede ise hızın 1-3 m/sn hava hızı olduğu sonucunu çıkartabiliriz. S-D ve S-E de fan debilerinin düşük kalması sonucunda yeterli duman tahliyesi yapılmadığı ve tünelin akış istikametinin tersine bir akış meydana gelmiştir. S-D üfleme hızının 6 m/sn, S-E de ise 1,95-1,3 m/sn olduğu görülmektedir. 400 sn ile 500 sn baktığımızda iki fan arasında kalan bölgede sırasıyla tavanda S-D 5-4-6 m/s ve S-E ise 5,85 -6,5 m/sn akış hızı oluşmuştur. Bunun sebebi ise fanların debilerin yetersiz kaldığında dolayı doğal havalandırmanın devreye girmesi sonucu çıkarmak mümkündür. PIARC (Dünya Yol Birliği)'ne göre bir yangın olduğu zaman bunun tahliyesi için olması gereken hız 1-8 m/sn'dir. Otomobil ve diğer küçük araçlar için 1-2 m/sn, truck(kamyon) ve otobüs için meydana bir yangında 2-3 m/sn, ağır yük ve tehlikeli madde taşımacılığı yapan büyük güçlü yangınlarda 5-8 m/sn gibi bir hava hızı duman akışını kontrol altına alabilmektedir. Meteorolojik veriler ve trafiğin olmadığı bir havalandırma için hava hızı 10 m/sn'yi aşmamalıdır.



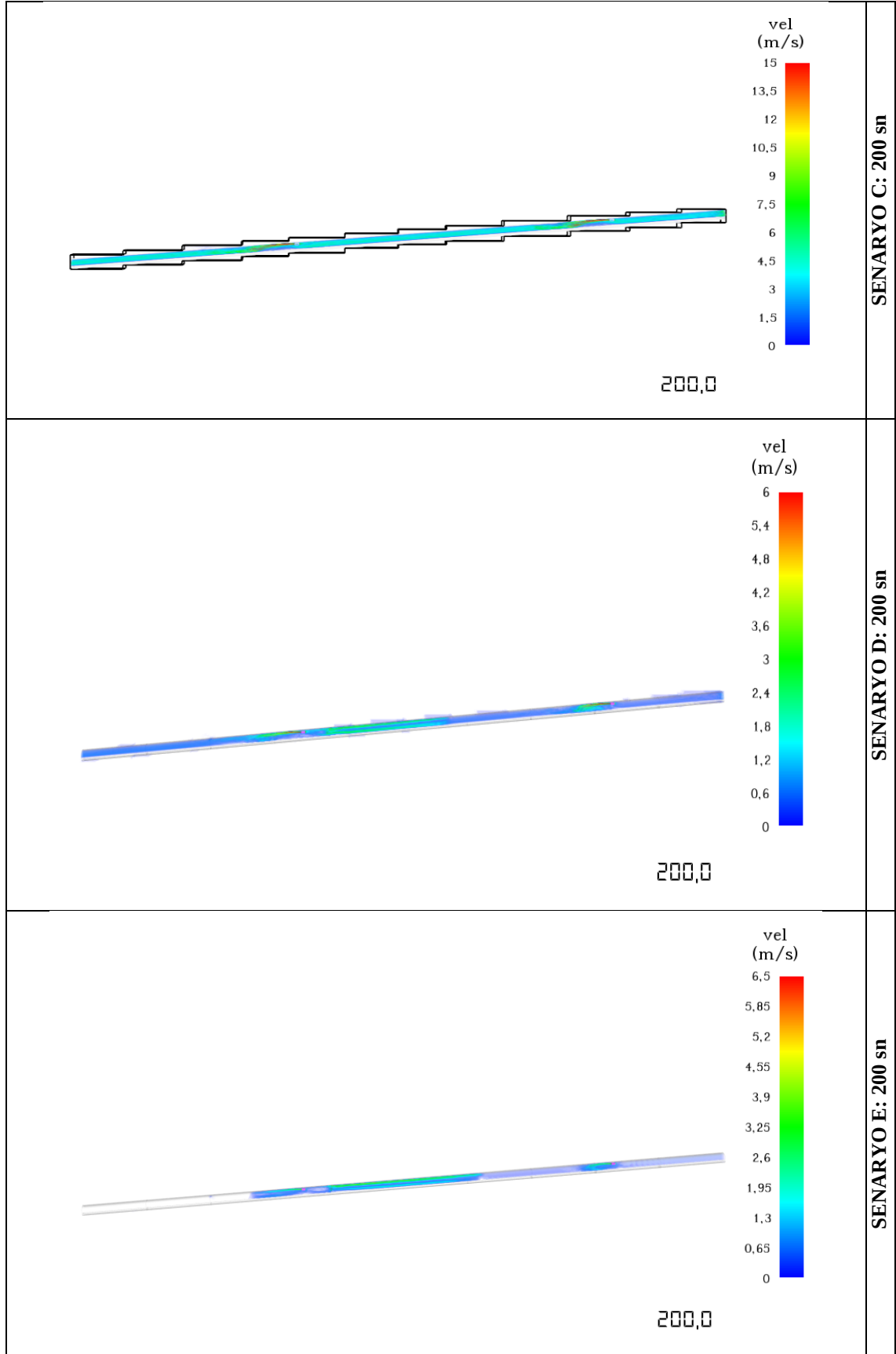
Şekil 4.8. 30 MW yangın gücünün 100. saniyedeki senaryoların tünel boyunca akış hız dağılımı



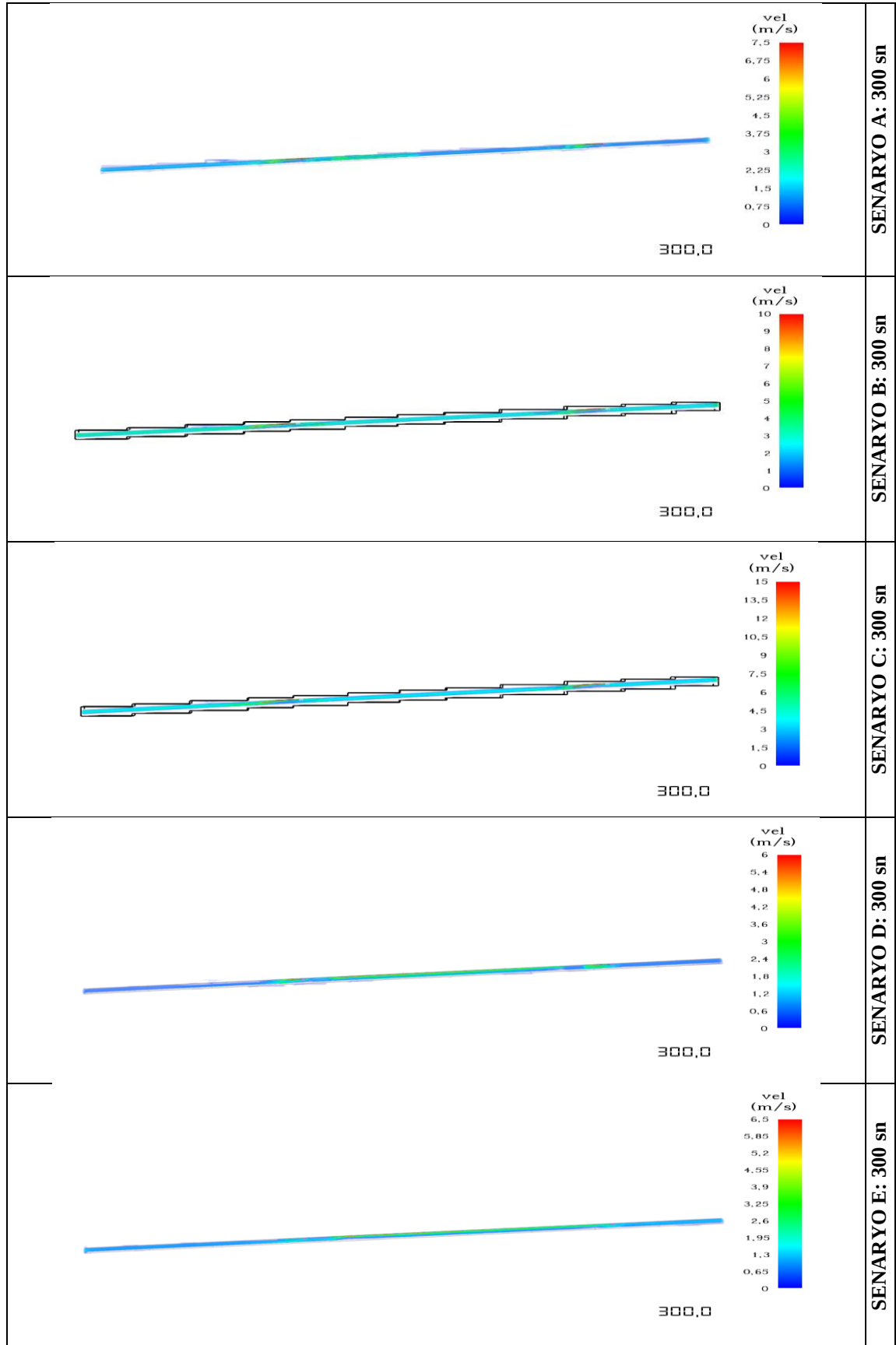
Şekil 4.8. (Devam):30 MW yangın gücünün 100. saniyedeki senaryoların tünel boyunca akış hız dağılımı



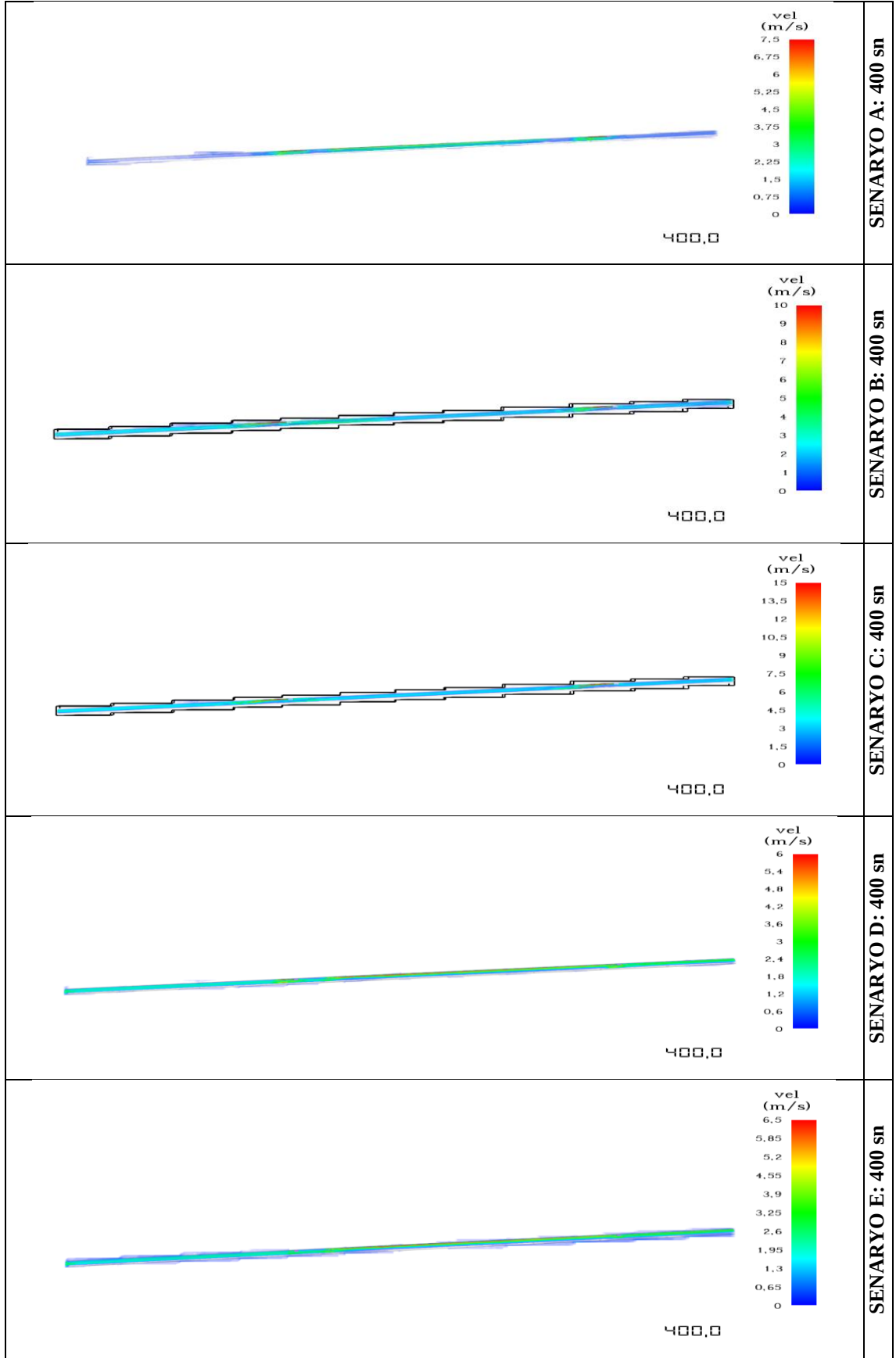
Şekil 4.9. 30 MW yangın gücünün 200. saniyedeki senaryoların tünel boyunca akış hız dağılımı



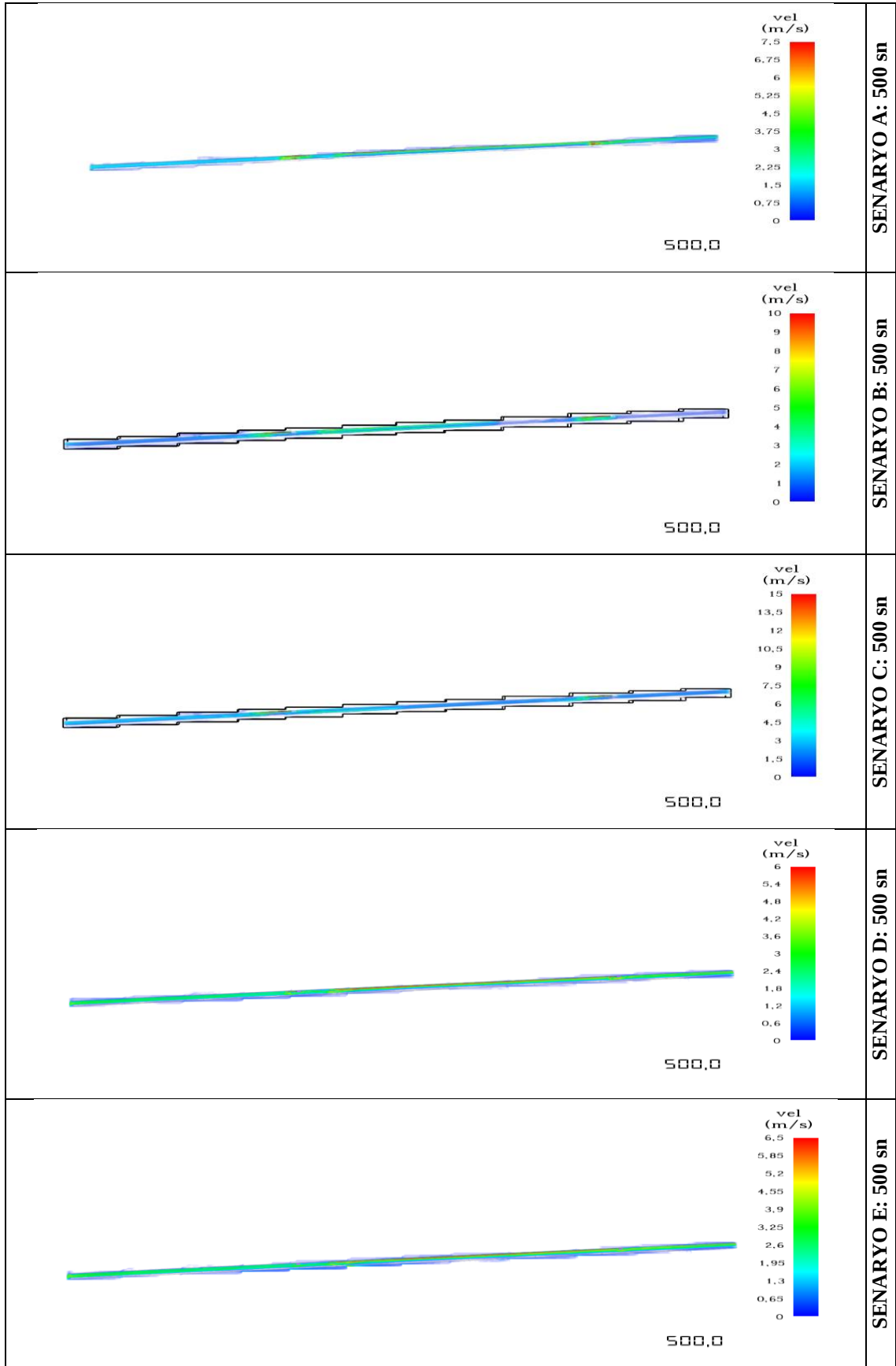
Şekil 4.9. (Devam) 30 MW yangın gücünün 200. saniyedeki senaryoların tünel boyunca akış hız dağılımı



Şekil 4.10. 30 MW yangın gücünün 300. saniyedeki senaryoların tünel boyunca akış hız dağılımı



Şekil 4.11. 30 MW yangın gücünün 400. saniyedeki senaryoların tünel boyunca akış hız dağılımı



Şekil 4.12. 30 MW yangın gücünün 500. saniyedeki senaryoların tünel boyunca akış hız dağılımı

4.1.3. 30 MW Yangın Gücündeki Senaryoların 100-200-300-400-500 Saniyeki Sıcaklık Analizi

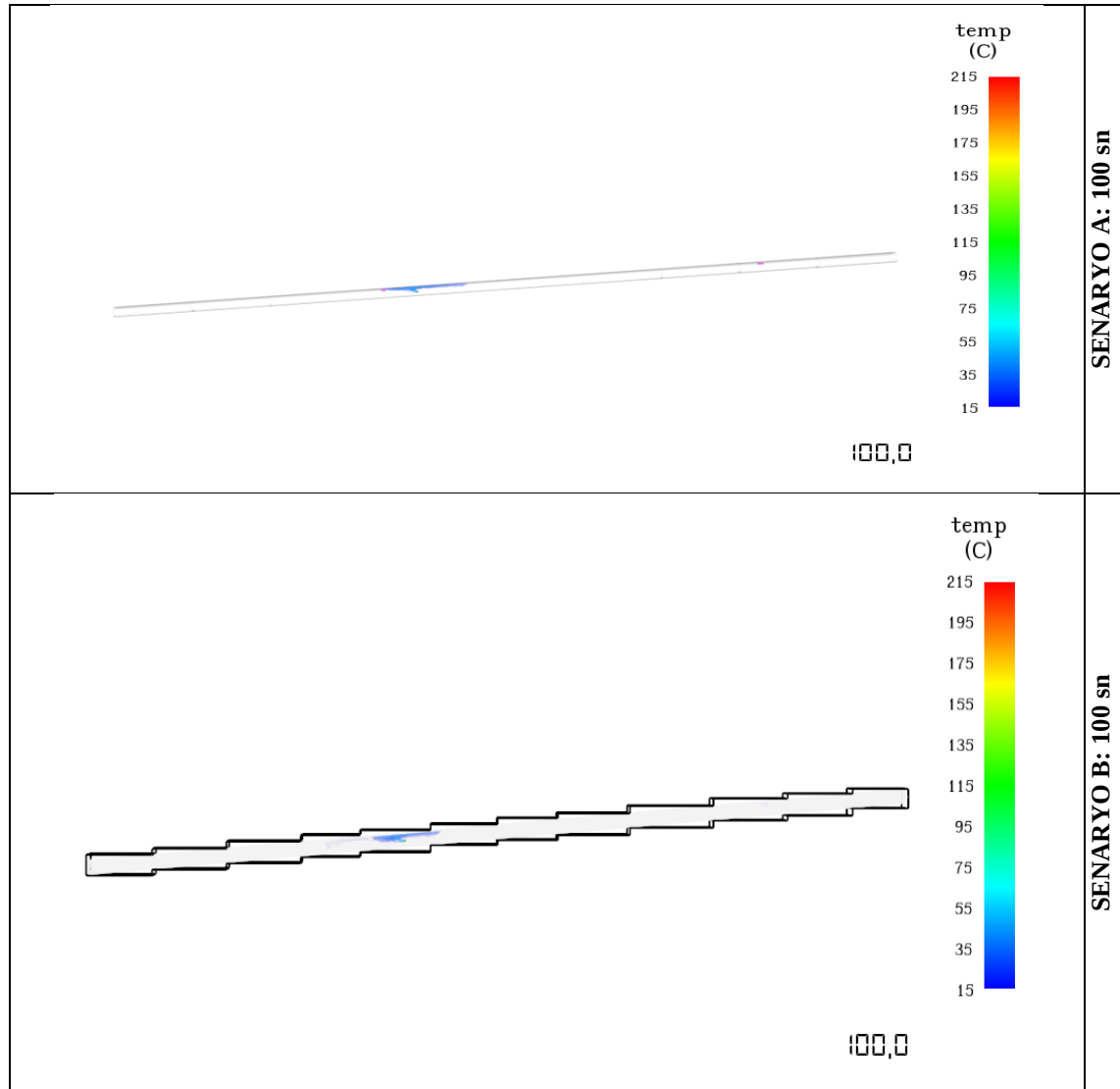
30 MW yangın gücü için sıcaklık analizi incelenmiştir. S-A 100 saniye için sıcaklık dağılım grafiklerini incelediğimizde yangın oluşma sürecinde 100 saniyeye kadar sıcak gazların olduğu bölgede yoğunlaştığı ve ters yöne yönelim göstermiştir. Burada ilk yangın aşamasında 55 C°-75 C° gibi bir sıcaklığa ulaşmıştır. 100 sn den sonra yangın bölgesi dışındaki alanda 55 C°- 35 C° arasında olduğu ve zamanla sıcaklığı artışı olmuştur. 400 sn ve 500 sn ısı yayılım oranının arttığı Şekil 4.2’de görülmektedir. Bu ısı yayılım oranının artması sıcaklığı 195 C°-215 C° arasındaki değere çıkmaktadır. Bunun sebebi şundandır yangının büyüme evresinde tavanda bir sıcak soot (duman) katmanı meydana gelmektedir. Bu katman duman ile temas halindeki tünel duvar kaplamasına ısı iletir. Aynı zamandaki katmanın altındaki cisimlere de radyant ısı verir. Her iki süreçte tünel içindeki cisimlerin ısınmasına neden olur. Bir süre sonra sıcaklık piroliz eşiğine ulaşır yani cisimlerin sıcaklığı pirolize başlayacak kadar yükselir. Bu olaya roll over denilmektedir. S-B 100 sn sıcaklık 55 C°- 75 C° arasında olmaktadır. S-C 100 saniyelerde akış sıcaklığı 45 C°-60 C° olmuştur. S-A 300 sn ye geldiğinde jet fanın üfleme yaptığı noktalarda sıcaklığın 35C°-55C° gibi bir akış sıcaklığı görünmektedir. S-C 100 saniyelerde akış sıcaklığı 45 C°-60 C° olduğu ve 200 sn’den sonra sıcaklığın artışı devam edilmektedir. Yangın bölgesi ile J.F 1 grubu arasında 105 C°-90 C° ve 400 sn’den sonra sıcaklık artışı 165 C° tavanda olduğu görülmektedir. Yangın bölgesinde S-D ve S-E ilk 100 sn’den 200 sn’ye kadar duman sıcaklığı 55 C°-75 C°’dir. 300 saniyeden 500 saniyeye kadar belli noktalarda 195 C°- 215 C° yükseldiği görülmektedir. PIARC raporlarına baktığımızda bir tahliyeyi gerçekleştirmek için yangın durumunda tünel içerisindeki sıcaklığın 80 C° yi geçmemelidir.

Belli noktalarda sıcaklık artışının olması roll over olayı meydana gelmiştir. Duman katmanının içinde bir alev yüzeyinin hareket etmesine roll over denir. Bu aşamada tünelde piroliz başlamamışsa yakın zaman içinde başlayacaktır. Piroliz ürünlerinin tutuşmasından sonra alev tünel kalır. Flashover sırasında sıcaklık aşırı şekilde artar ve zamanla 600 C°’ye kadar ulaşır. Isı akısı artar ve böylelikle hayatta kalmak imkânsız hale gelmektedir. Yangın kontrollüdür. Belirli olan bir yüzey alanı ile sınırlıdır. Yangın sürecinde yanan materyaller flashovera ulaşıp ulaşmayacağını belirleyecektir. Yeteri kadar ısı yayım oranı ve alev yayılım ile yangın büyür ve yapıdaki sıcaklık artışı olur. Yapı içinde ısı birikecek yeterli

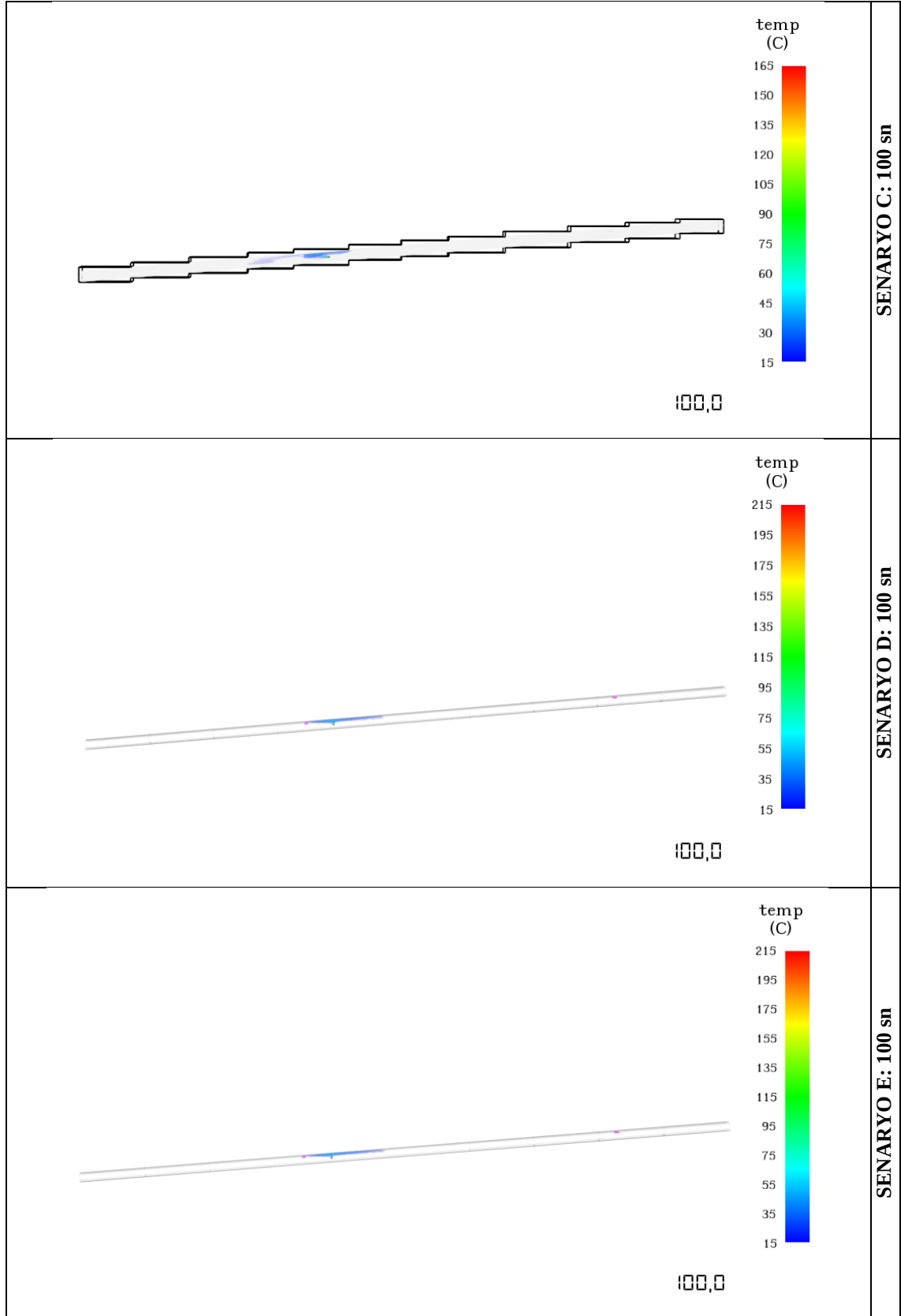
miktarda enerji çıktığında flashover oluşacaktır. Flashover olmadan önce birkaç saniye içinde yapıyı terk edilmesi gerekir. Flashoverin oluşacağını gösteren bazı işaretler vardır:

- Zemine hızla azalan bir duman katmanı
- Kara bir duman ya da griden koyu bir duman dönüşmekteyse
- Aşırı bir türbülans halindeki bir duman katmanı
- Katmanlardan yayan dumanın ısının yoğun ve dayanılmaz hale geliyorsa
- Cisimlerin (objelerin) hızla pirolize olmaya başlaması

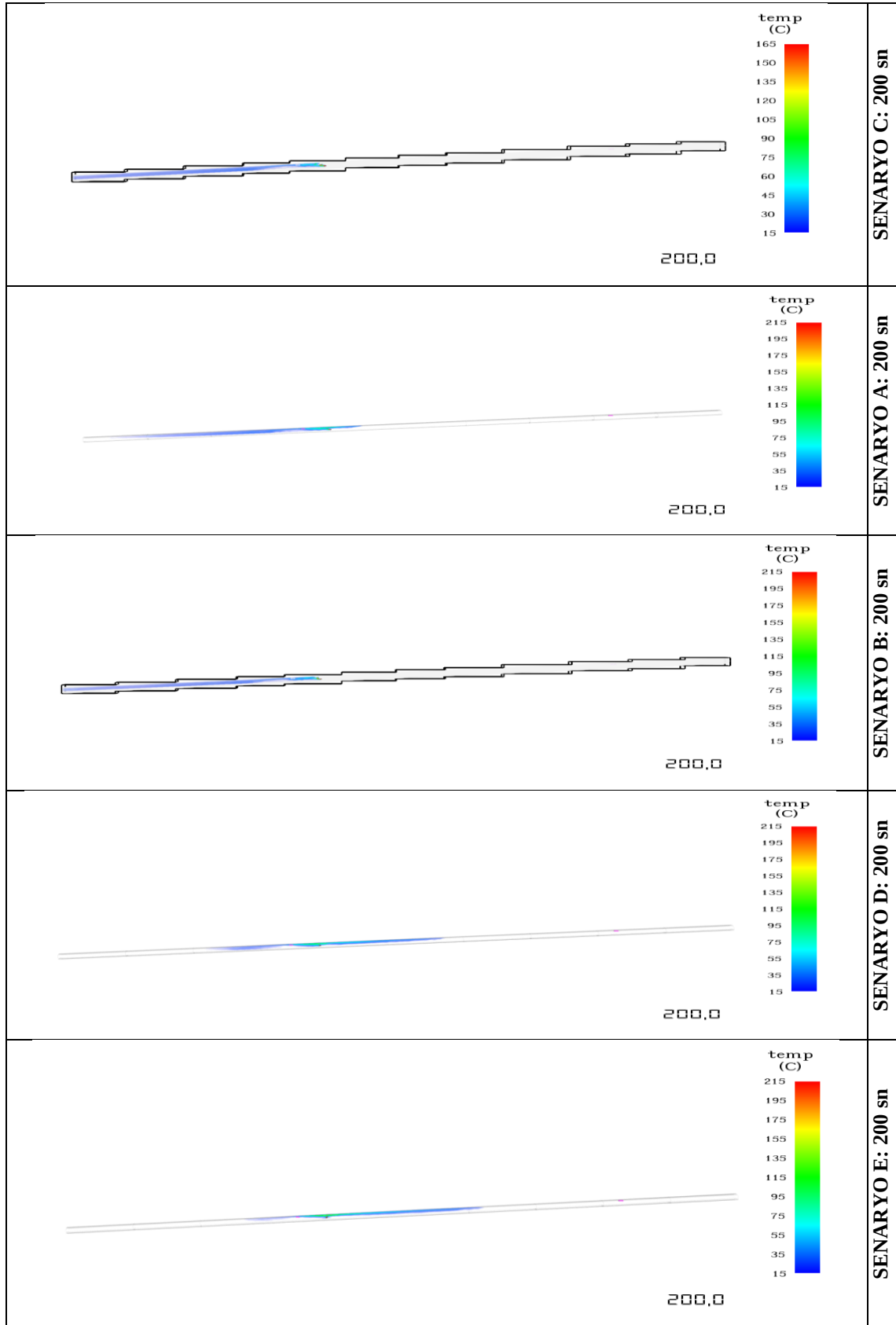
PIARC raporlarına baktığımızda bir tahliyeyi gerçekleştirmek için yangın durumunda tünel içerisindeki sıcaklığın 80 C° yi geçmemelidir.



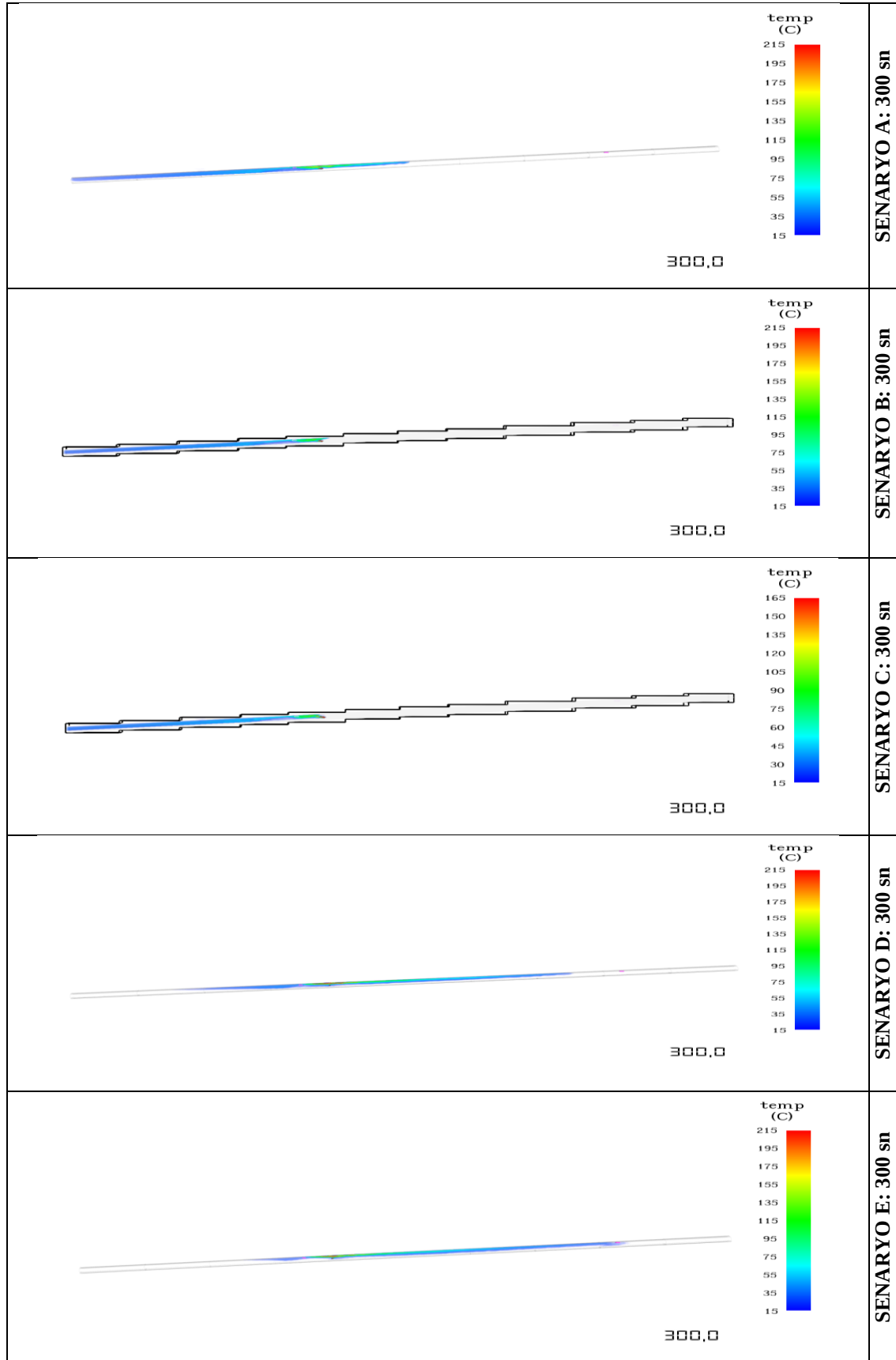
Şekil 4.13. 30 MW yangın gücünün 100. saniyedeki senaryoların sıcaklık dağılımları



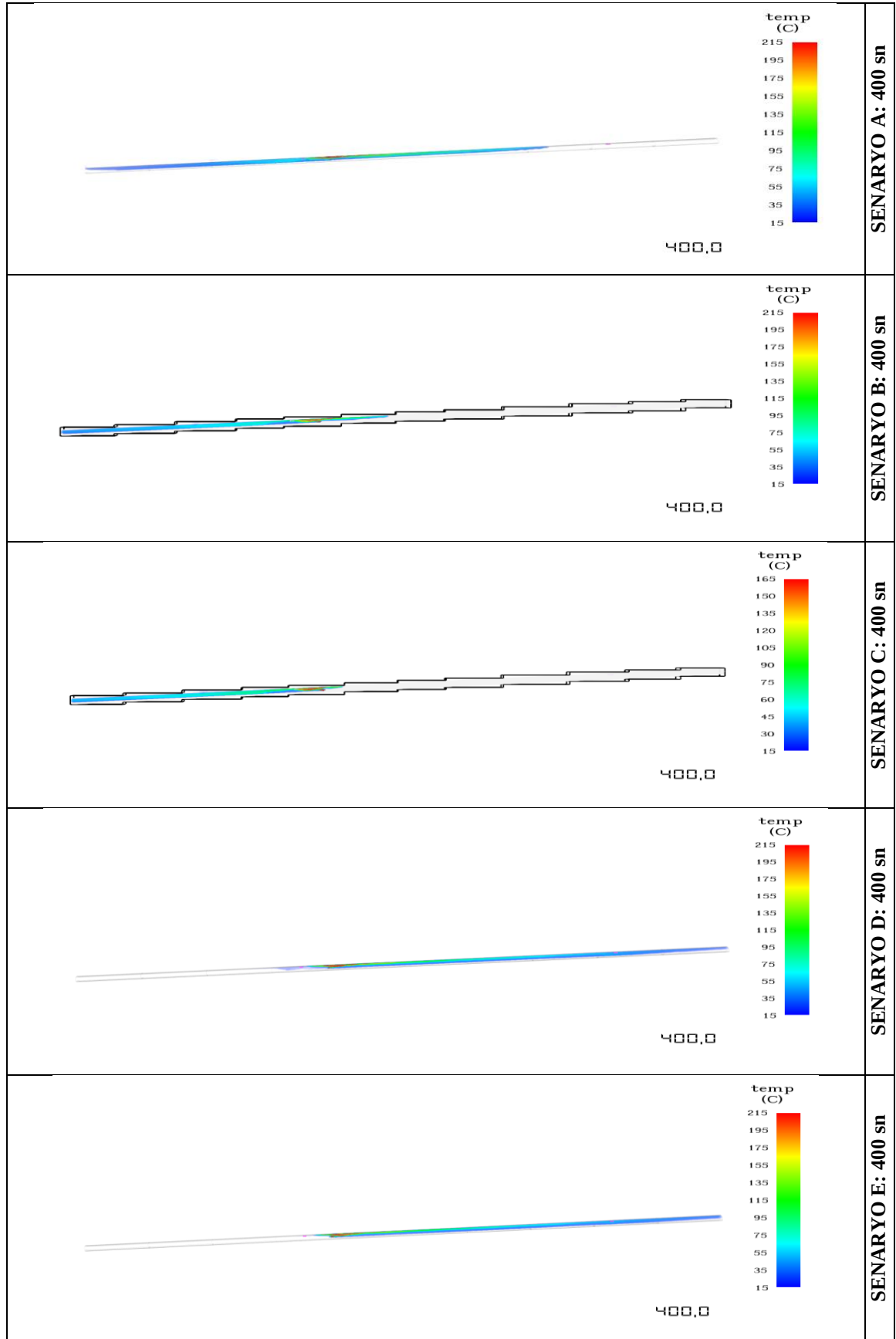
Şekil 4.13. (Devam): 30 MW yangın gücünün 100. saniyedeki senaryoların sıcaklık dağılımları



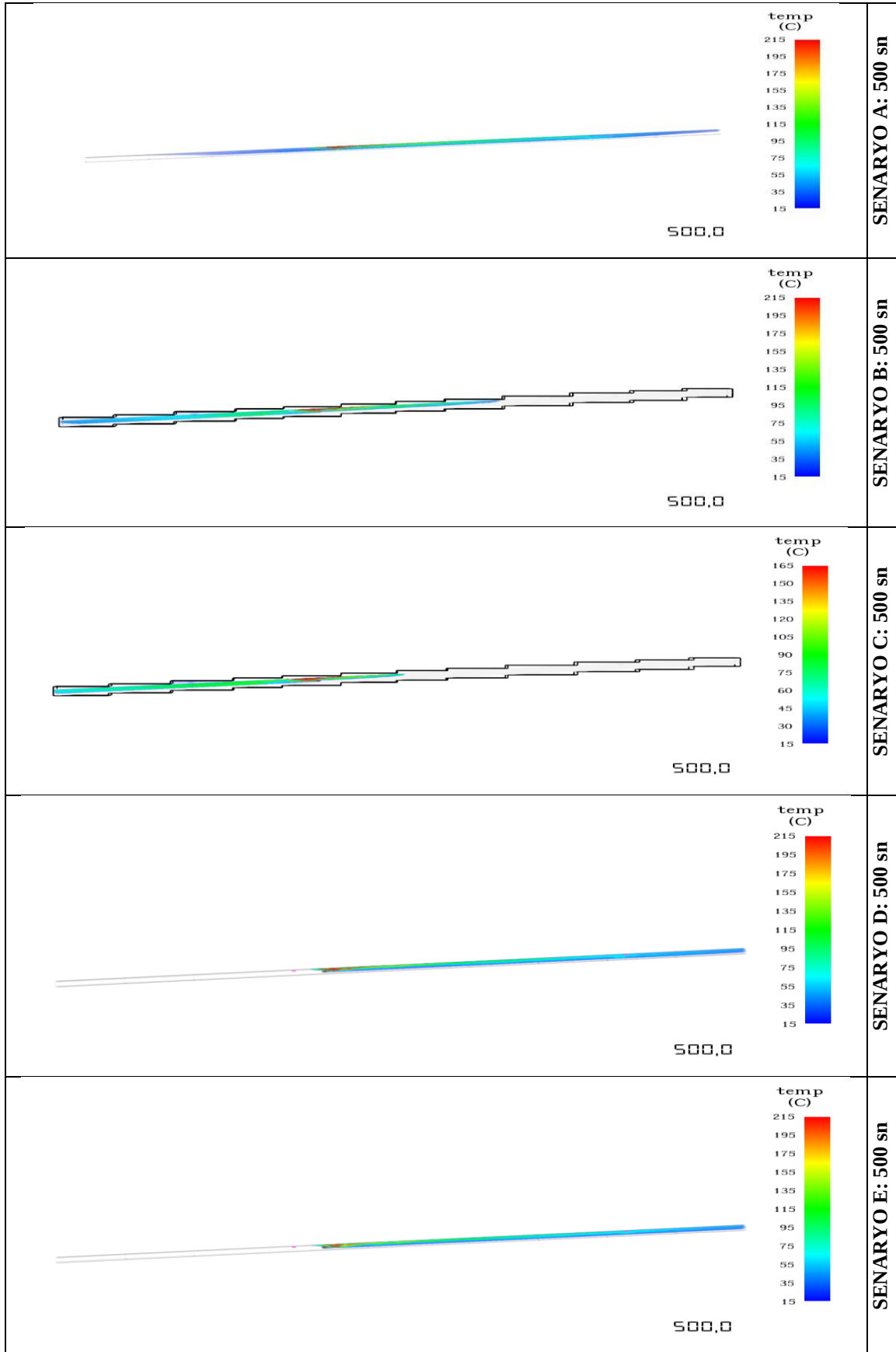
Şekil 4.14. 30 MW yangın gücünün 200. saniyedeki senaryoların sıcaklık dağılımları



Şekil 4.15. 30 MW yangın gücünün 300. saniyedeki senaryoların sıcaklık dağılımları



Şekil 4.16. 30 MW yangın gücünün 400. saniyedeki senaryoların sıcaklık dağılımları



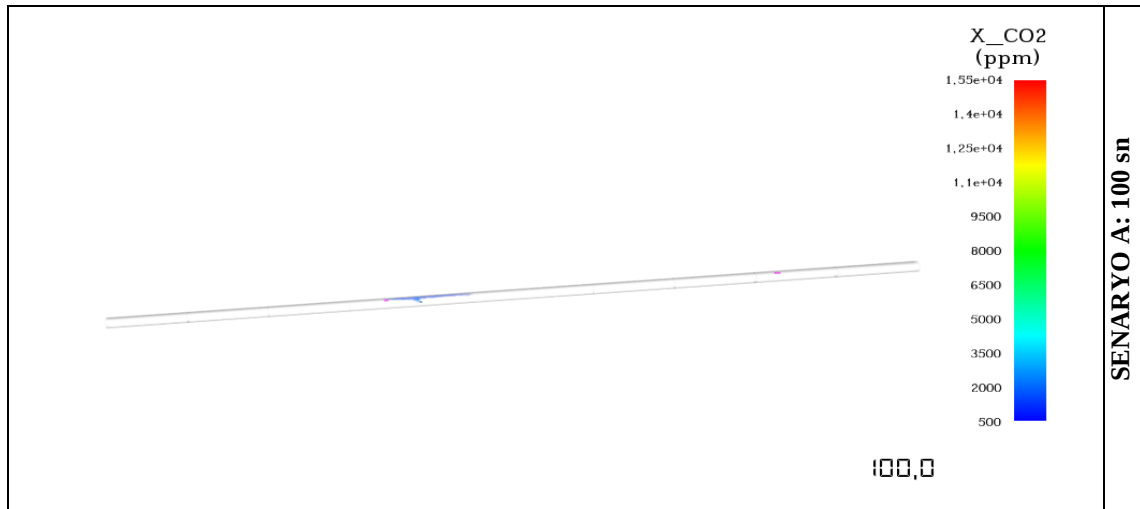
Şekil 4.17. 30 MW yangın gücünün 500. saniyedeki senaryoların sıcaklık dağılımları

4.1.4. 30 MW Yangın Gücündeki Senaryoların 100-200-300-400-500 Saniyeki CO₂ Dağılımı

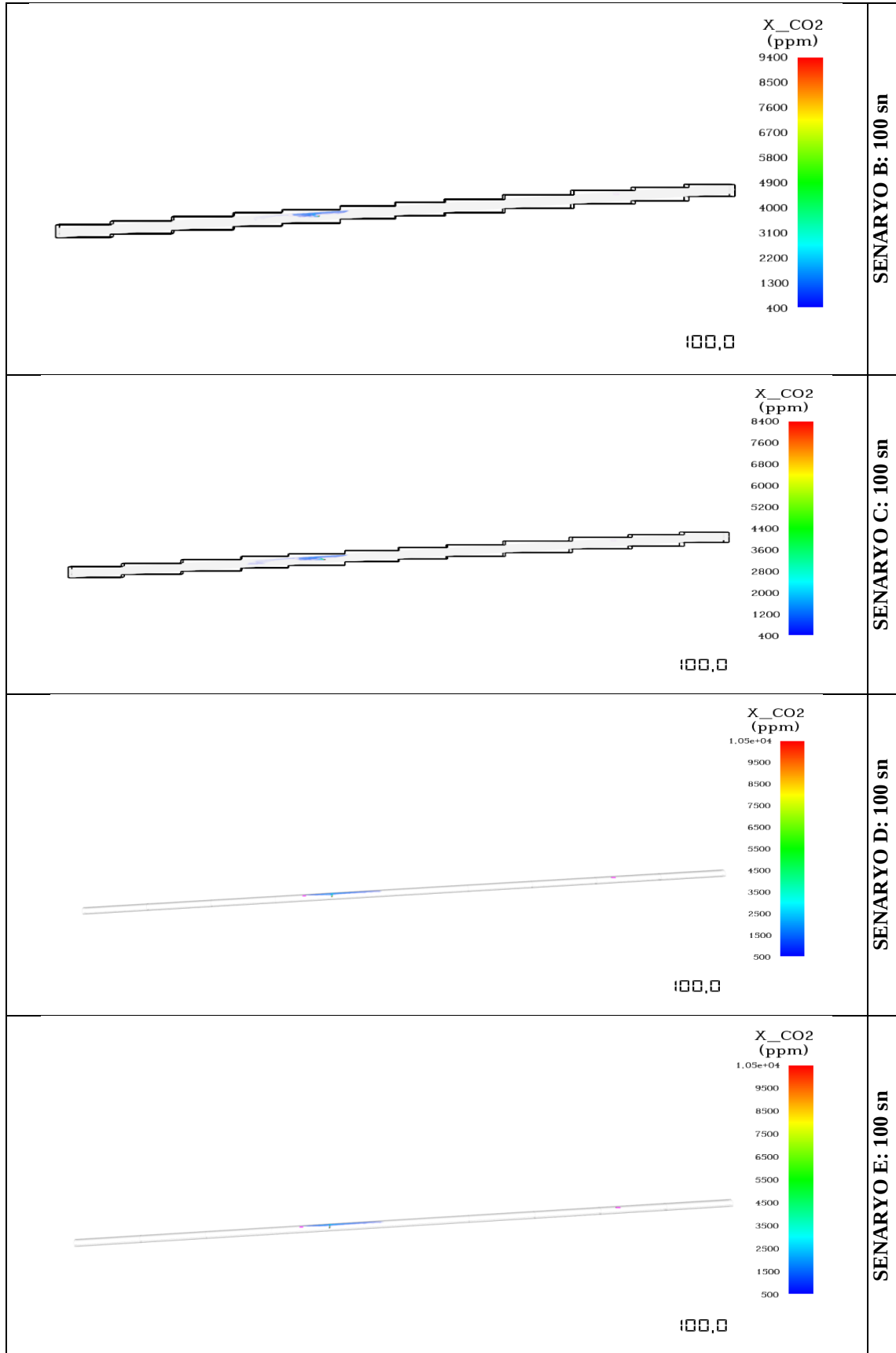
CO₂ bir havanın iç kalitesini kontrol etmede önemli bir kirleticidir. Atmosferde hacimsel hava %0.03'ünü oluşturmaktadır. Ortam havasına göre 330 ppm (milyondaki parçacık sayısı) ve 500 ppm arasında değişim göstermektedir. CO₂ zehirli değildir fakat oksijenin olmaması boğma tehlikesi ortaya çıkarabilir (Bulut, 2011).

100 sn analiz sonuçlarına baktığımızda S-A da 500 ppm-3500 ppm, S-B 2200-3100 ppm ve tünel çıkışında 400 ppm'dir. S-C 2000-2800 ppm, S-D 2500-3500 ppm ve S-E de 2500-3500 ppm görülmektedir. 200 saniyelerde S-A 300 sn 5600-6000 ppm, S-B 3100-4000, S-C 3600-4400 ppm ve S-D ile S-E 9500 ppm seviyelerini aştığı görülmektedir. S-D ve S-E baktığımızda duman birikmesi ve rollover meydana geldiği noktalarda 400 sn ve 500 sn aralığında 10500 ppm analizlerde görülmektedir.

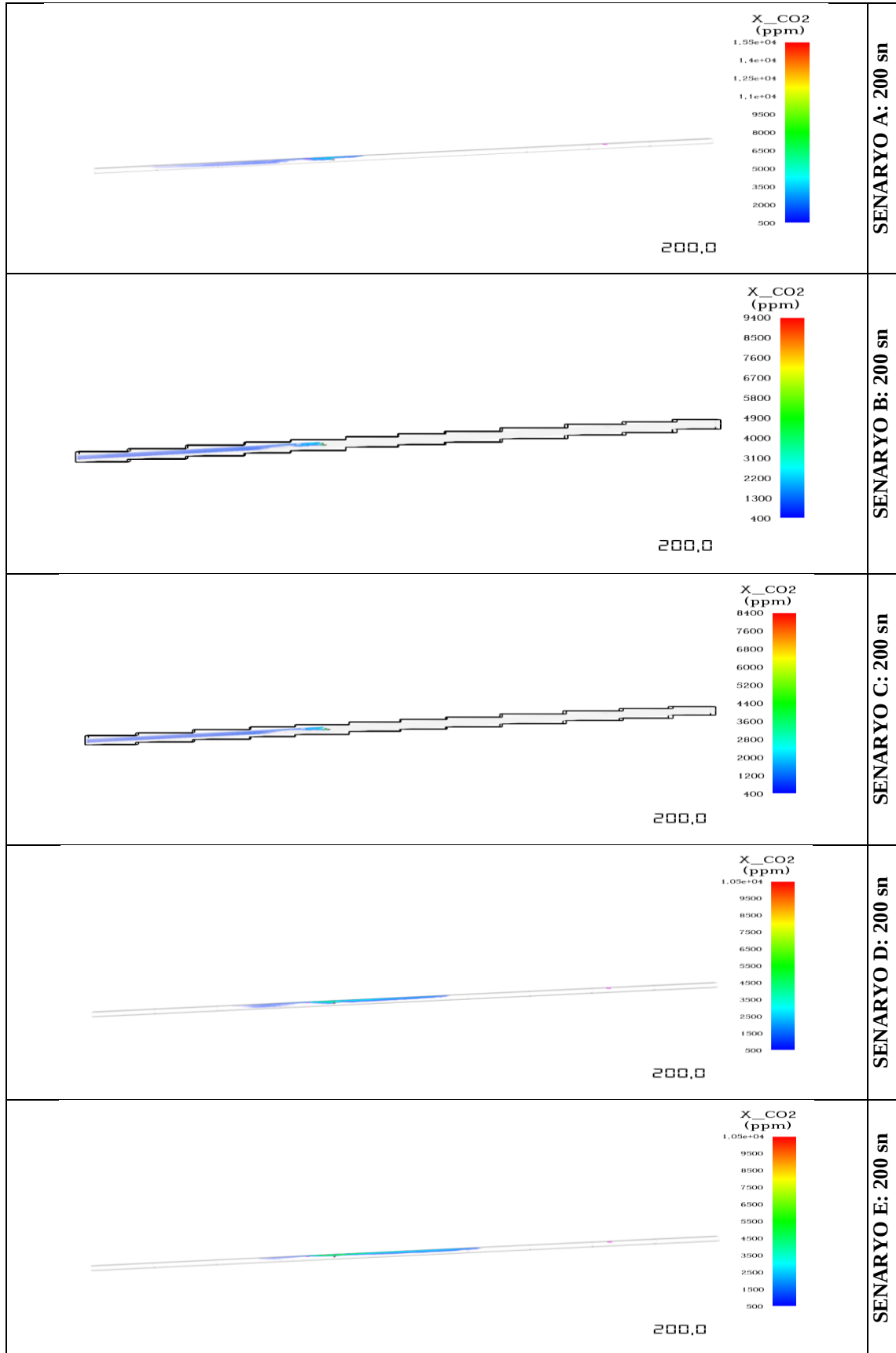
İç ortam havasında CO₂ 1200-2600 ppm arasında ise havalandırma miktarının artırılması gerekir. 400- 1000 ppm arasında ise havalandırma miktarının düşürülmesi gerekir. CO₂ zehirli bir gaz değildir ama miktarı arttığında oksijenin yerini alacağından boğulma meydana gelir. 1000 ppm ile 5000 ppm arasındaysa hijyenik limit değerdir. 15000 ppm de artık insanda kalpteki frekans sayısında artış ve nefes darlığı görülmektedir. 30000 ppm'den sonraki her artış bir bayılma, ölüm vb. durumlar ortaya çıkmaktadır.



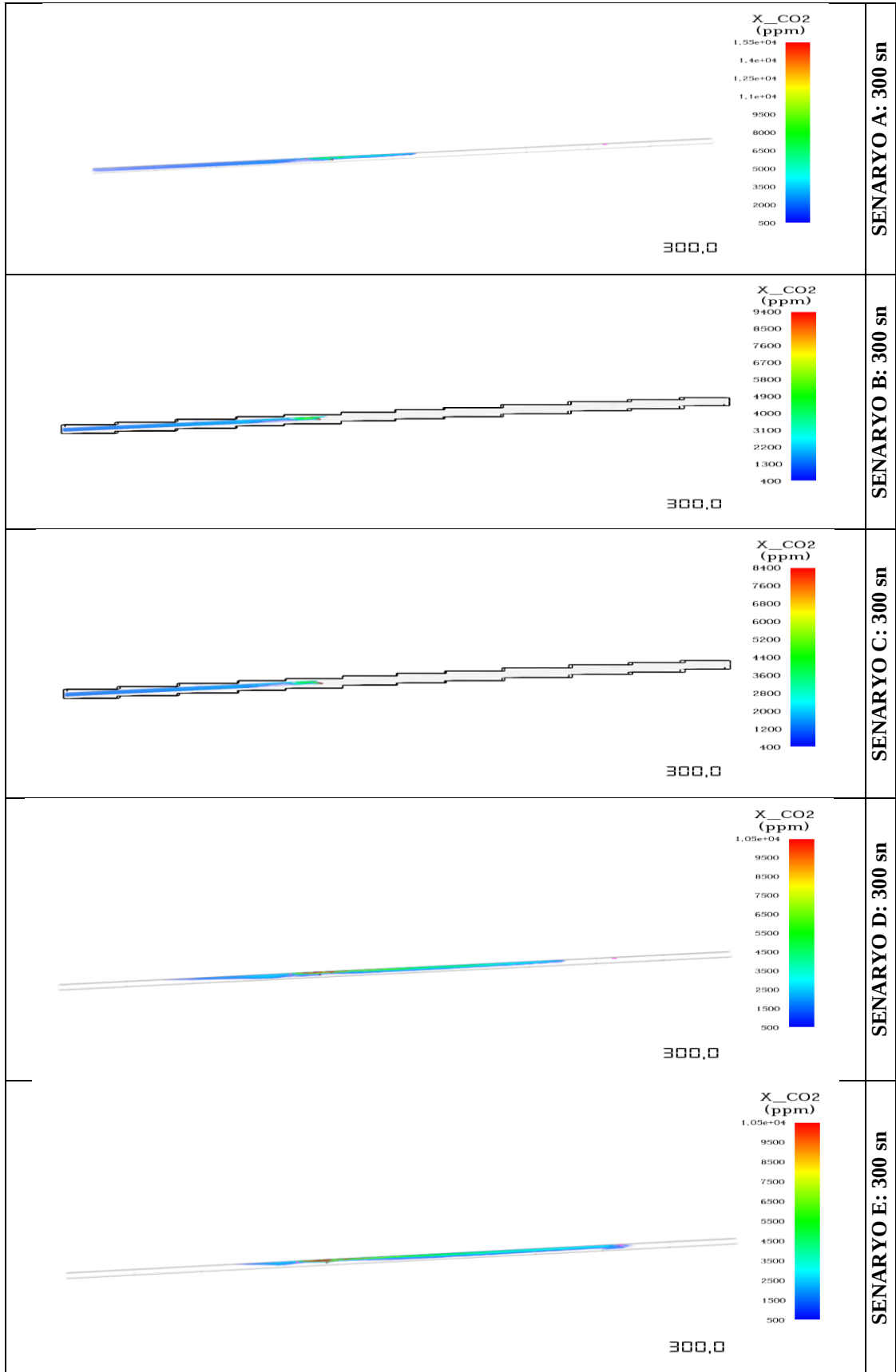
Şekil 4.18. 30 MW yangın gücünün 100. saniyedeki senaryoların CO₂ dağılımları



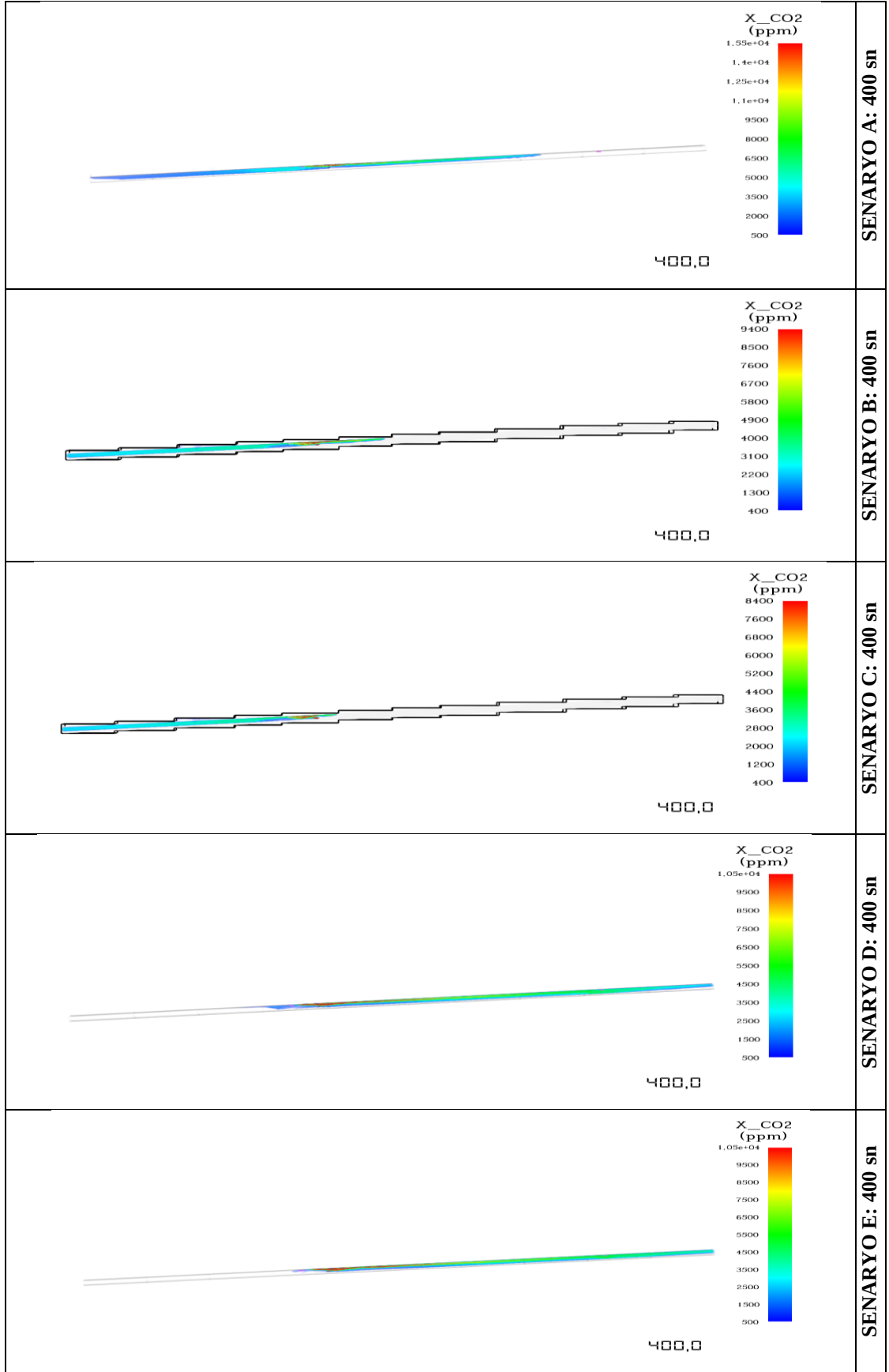
Şekil 4.18. (Devam) 30 MW yangın gücünün 100. saniyedeki senaryoların CO2 dağılımları



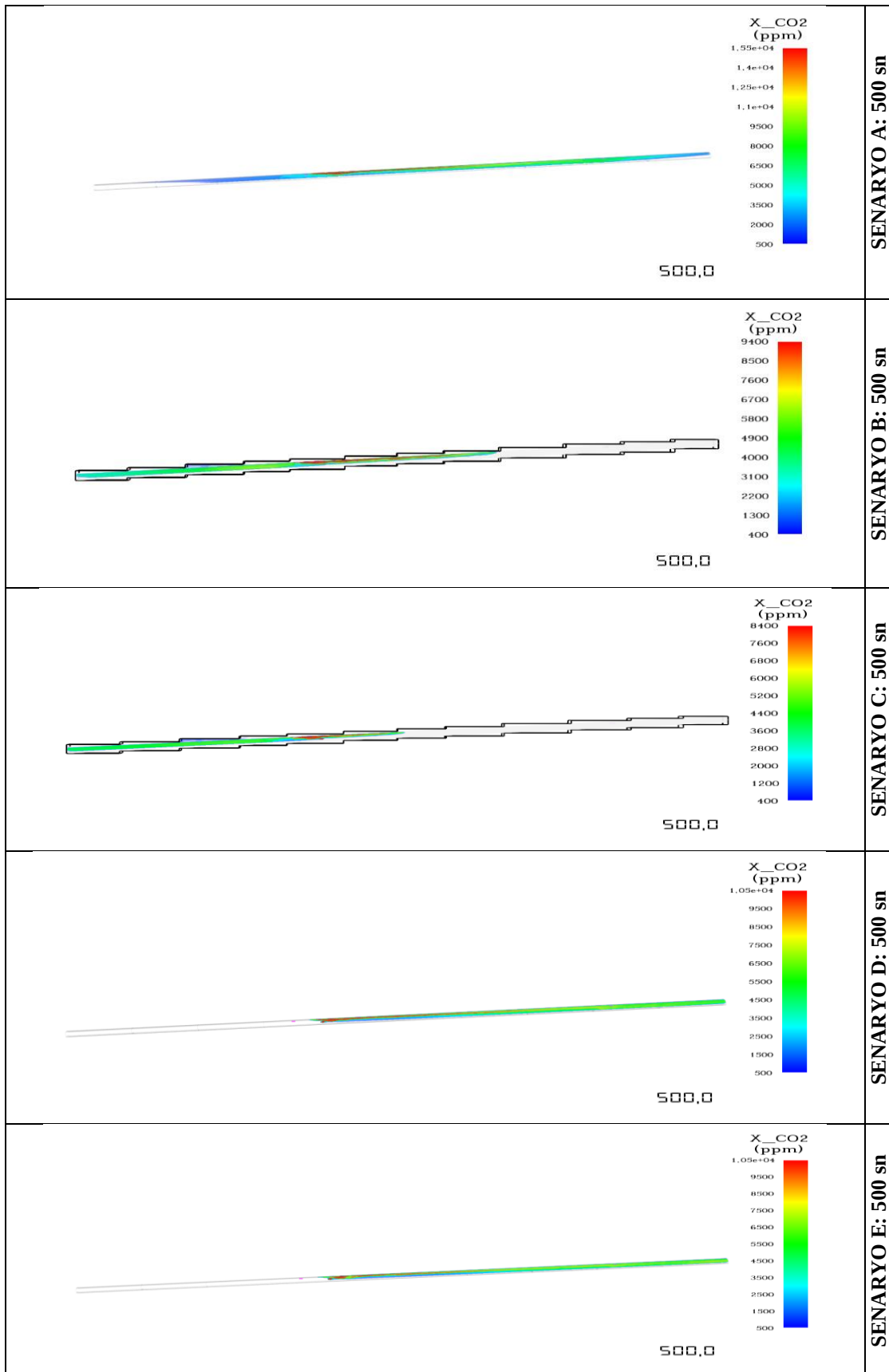
Şekil 4.19. 30 MW yangın gücünün 200. saniyedeki senaryoların CO2 dağılımları



Şekil 4.20. 30 MW yangın gücünün 300. saniyedeki senaryoların CO2 dağılımları



Şekil 4.21. 30 MW yangın gücünün 400. saniyedeki senaryoların CO2 dağılımları

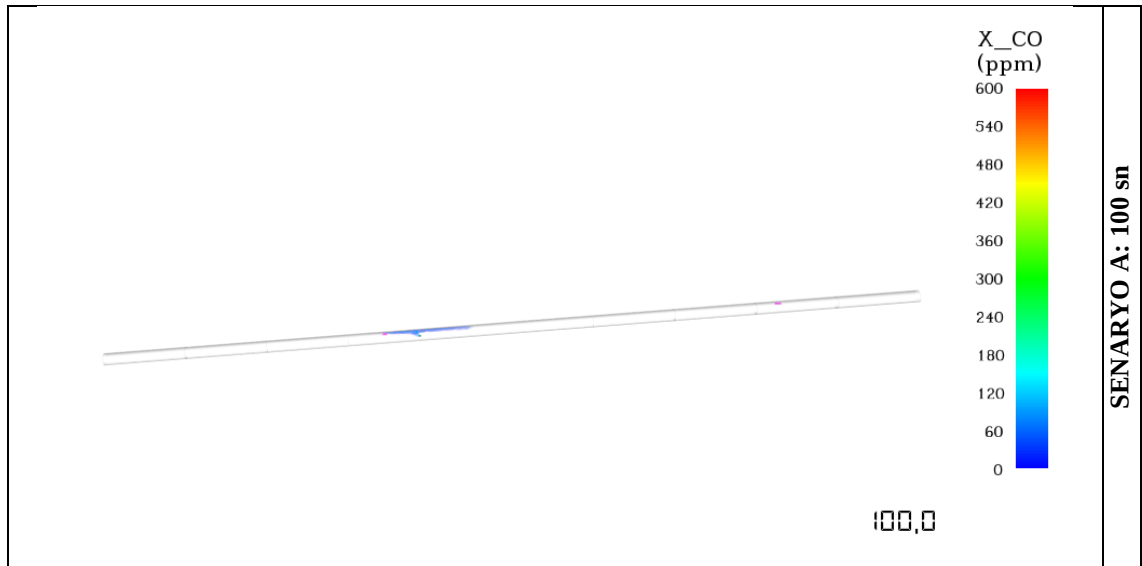


Şekil 4.22. 30 MW yangın gücünün 500. saniyedeki senaryoların CO2 dağılımları

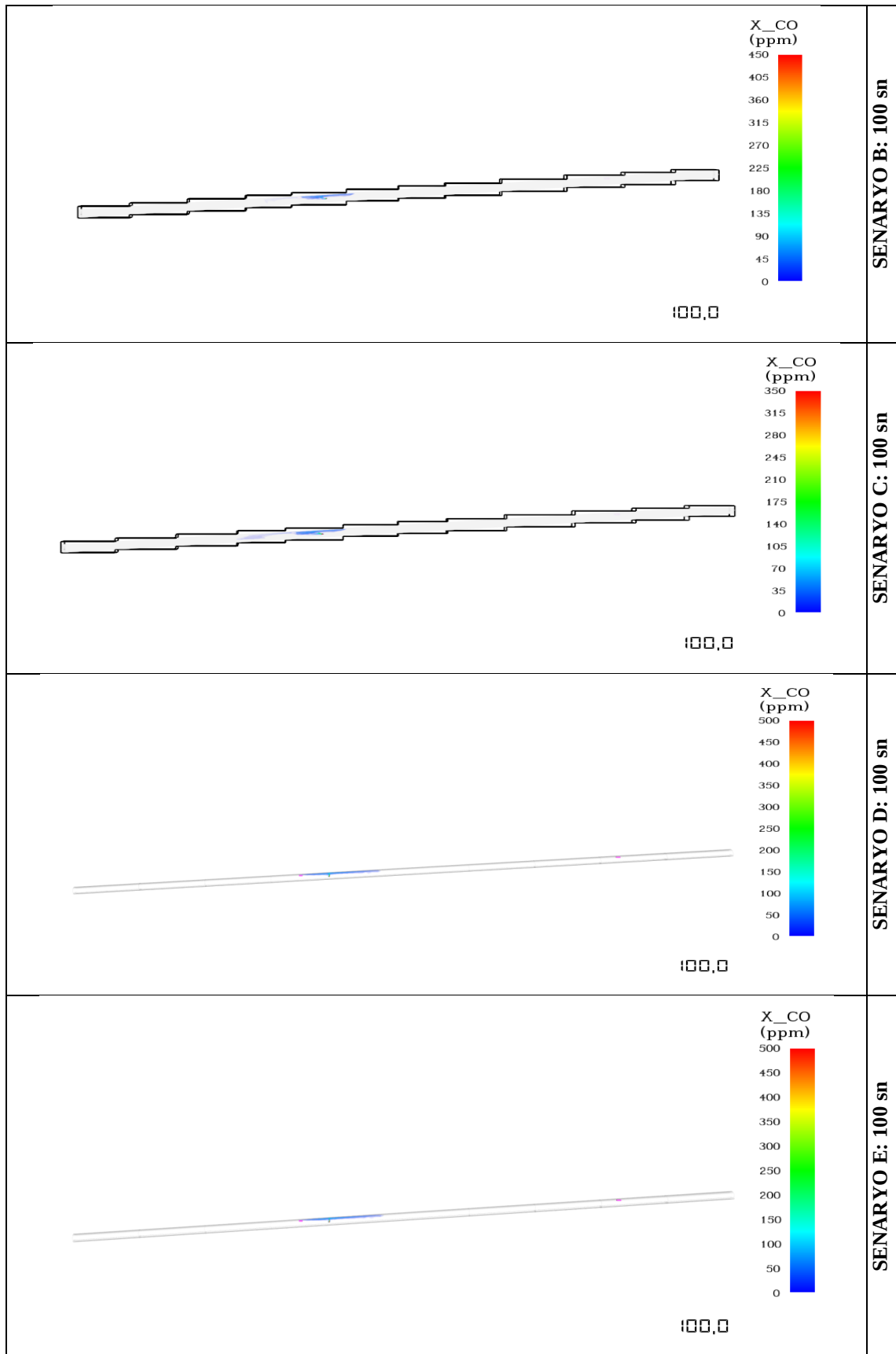
4.1.5. 30 MW Yangın Gücündeki Senaryoların 100-200-300-400-500 Saniyeki CO Dağılımı

CO dağılımı incelediğimizde S-A 100 sn de yangın bölgesinde 120-180 ppm, S-B de 90-135 ppm, S-C de 70-135 ppm, S-D ve S-E de ise yangın bölgesinde 100-150 ppm ters akış meydana gelen alanda ise 50-100 ppm seviyesine gelmiştir. 200 sn de ise S-A 60-120 ppm, S-B 45-90 ppm, S- C 35-70 pm olmuştur. S-C de ise yine aynı saniyelerde yangın bölgesi ile jet fan arasındaki alanda 105-140 ppm görünmektedir. 300 saniyelerde J.G.1 ile yangın bölgesinde karbonmonooksit miktarı giderek artarak 180-240 ppm ve tavandaki CO miktarı 540-600 ppm olmuştur. 400 sn ve 500 saniyelerde S-A 300-360 ppm, S-B tavanda 315-215 ppm ve S-C de ise tavanda 350-315 ppm görülmektedir. S-D ve S-E ters akış meydan geldiği tarafa doğru tünel boyunca 250-300 ppm devam ettiği görülmektedir.

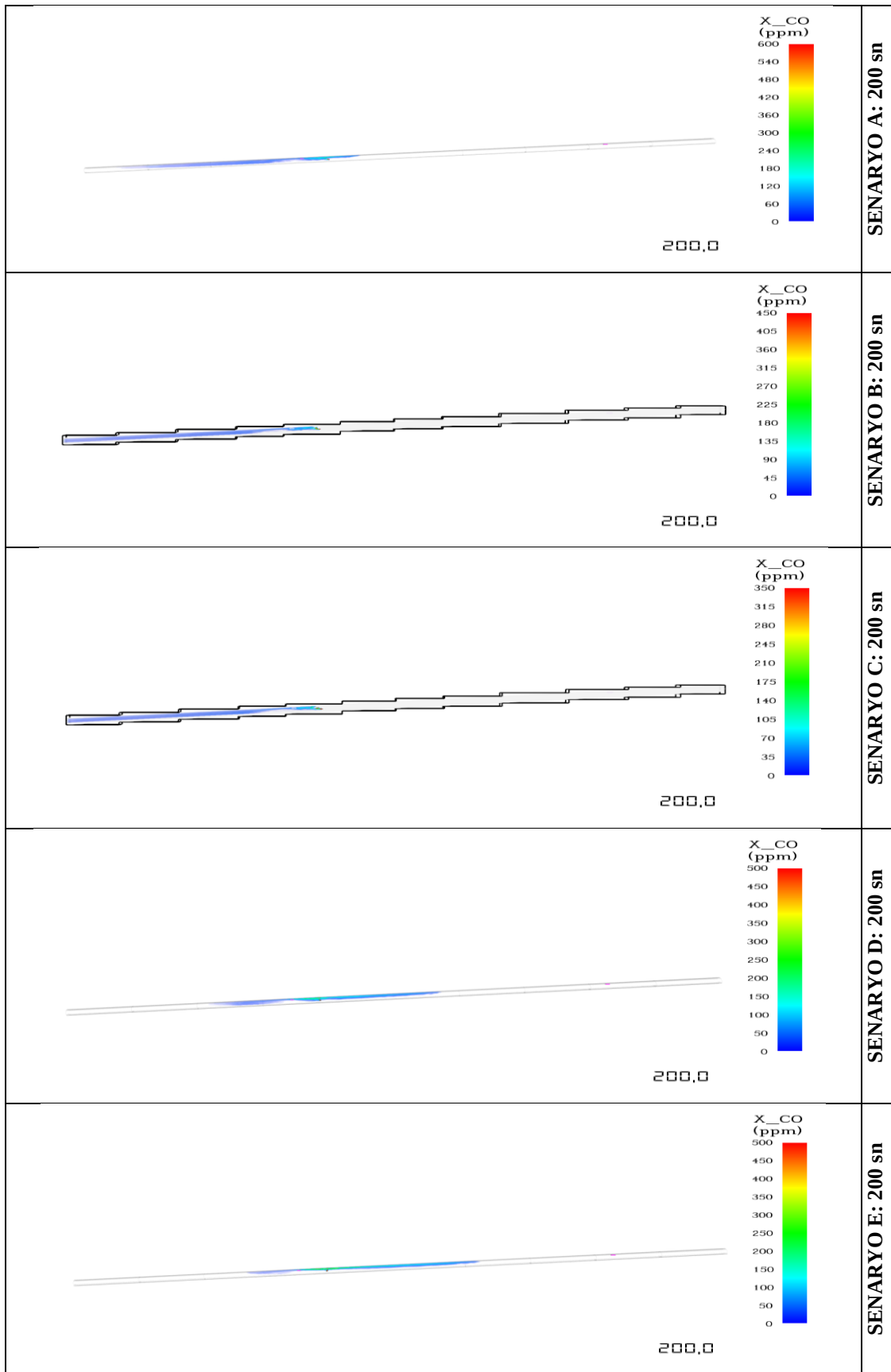
Bir hava ortamında CO miktarı 100 ppm altında olmalıdır. Havalandırmanın projelendirilmesinde normal şartlarda CO 150 ppm, seviyesi kısa süreli haller ve kaza anında 250 ppm olmasını Uluslararası Karayolu Birliğinin 1979 da yapmış olduğu kongrede tavsiye etmiştir. CO miktarının insan üzerindeki süreye bağlı etkisi incelediğinde konsantrasyon 0,01 ise birkaç saat maruz kalabilir. Konsantrasyon %0.07-0,12 arasında ise 1 saatten sonra rahatsız eder fakat tehlikeli olmayan bir etki göstermektedir. Konsantrasyon % 0,40 büyük ise 1 saatten sonra ölüm meydana gelmektedir.



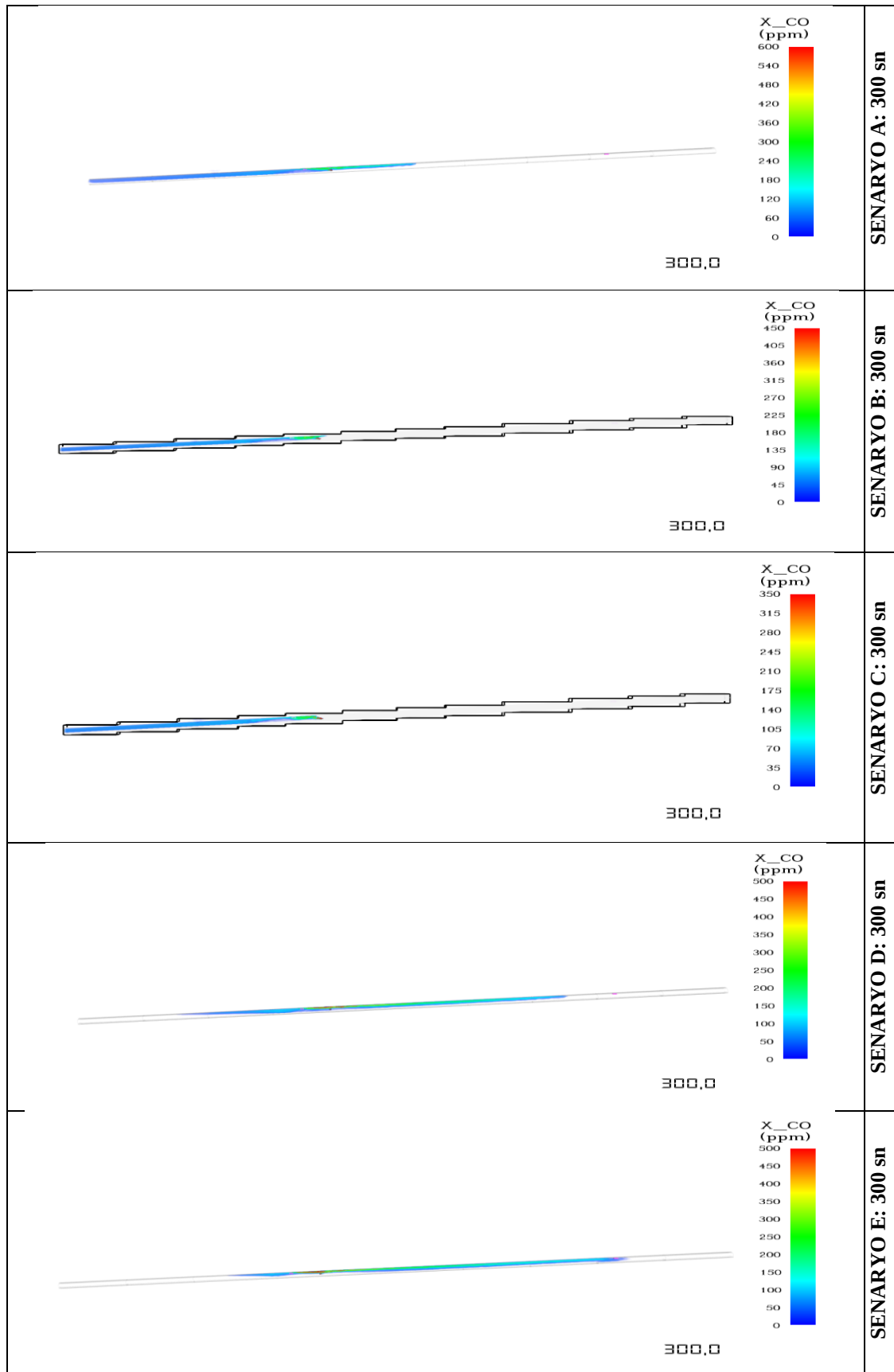
Şekil 4.23. 30 MW yangın gücünün 100. saniyedeki CO dağılımları



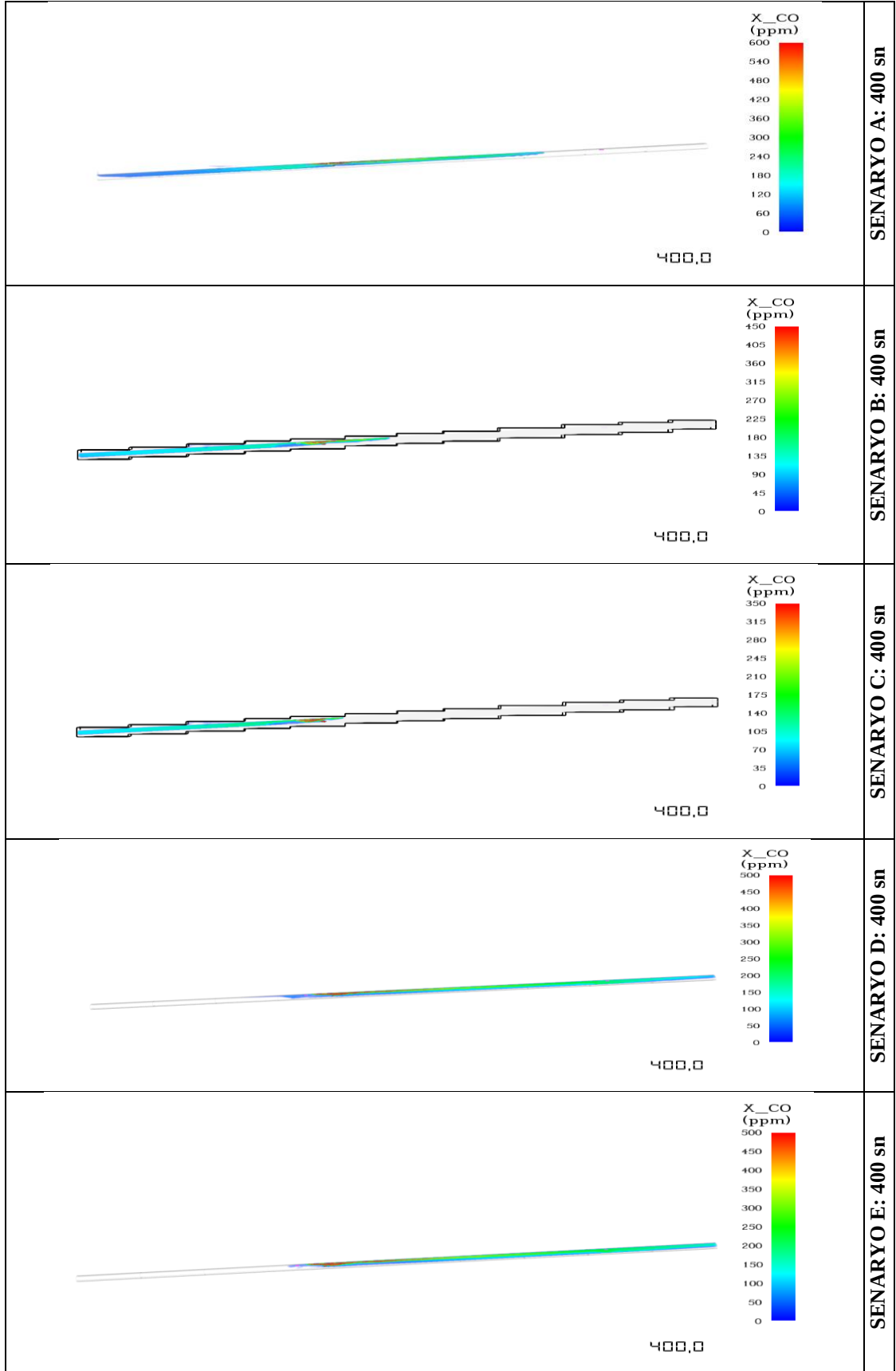
Şekil 4.23. (Devam) 30 MW yangın gücünün 100. saniyedeki CO dağılımları



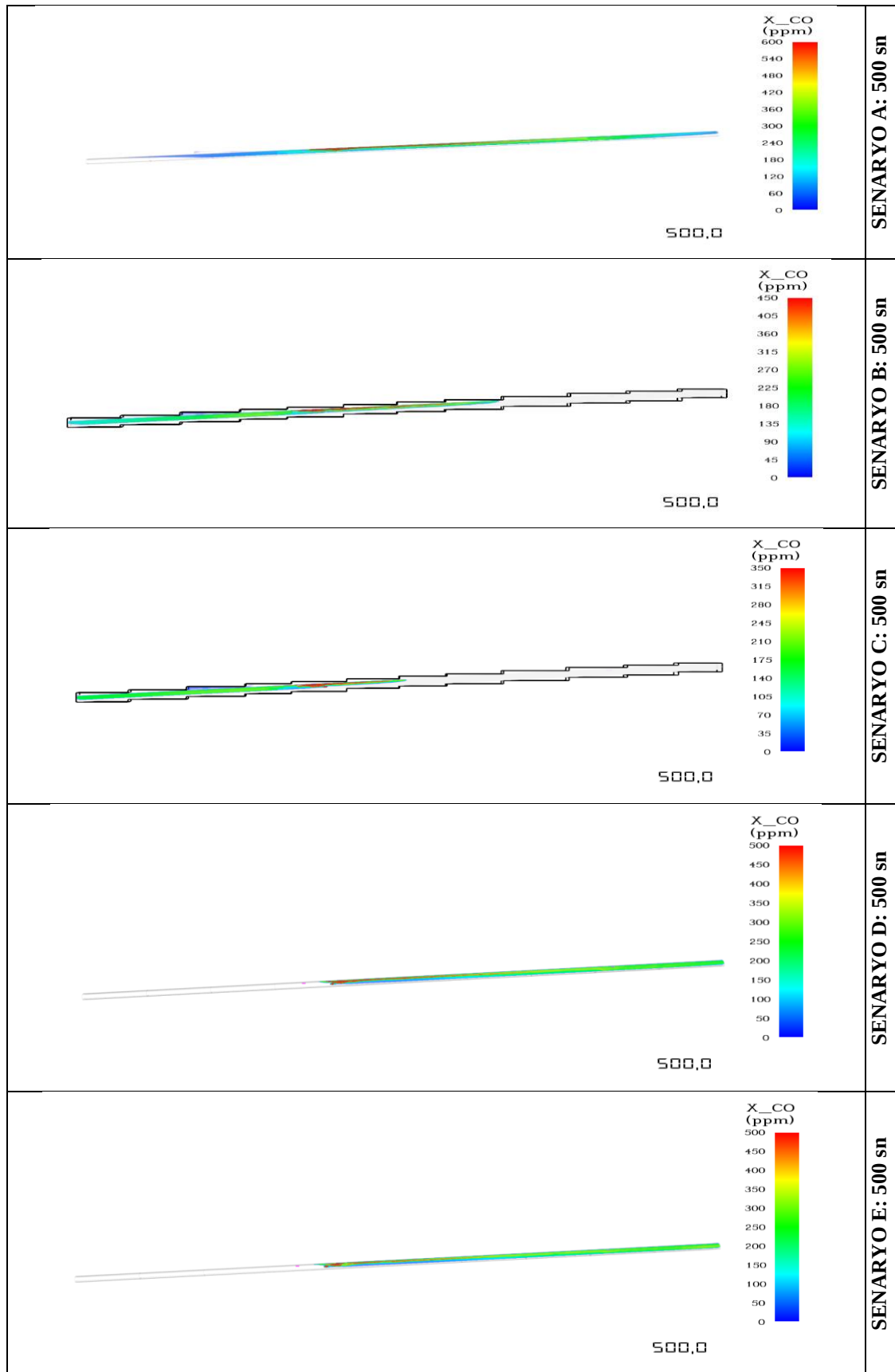
Şekil 4.24. 30 MW yangın gücünün 200. saniyedeki CO dağılımları



Şekil 4.25. 30 MW yangın gücünün 300. saniyedeki CO dağılımları



Şekil 4.26. 30 MW yangın gücünün 400. saniyedeki CO dağılımları



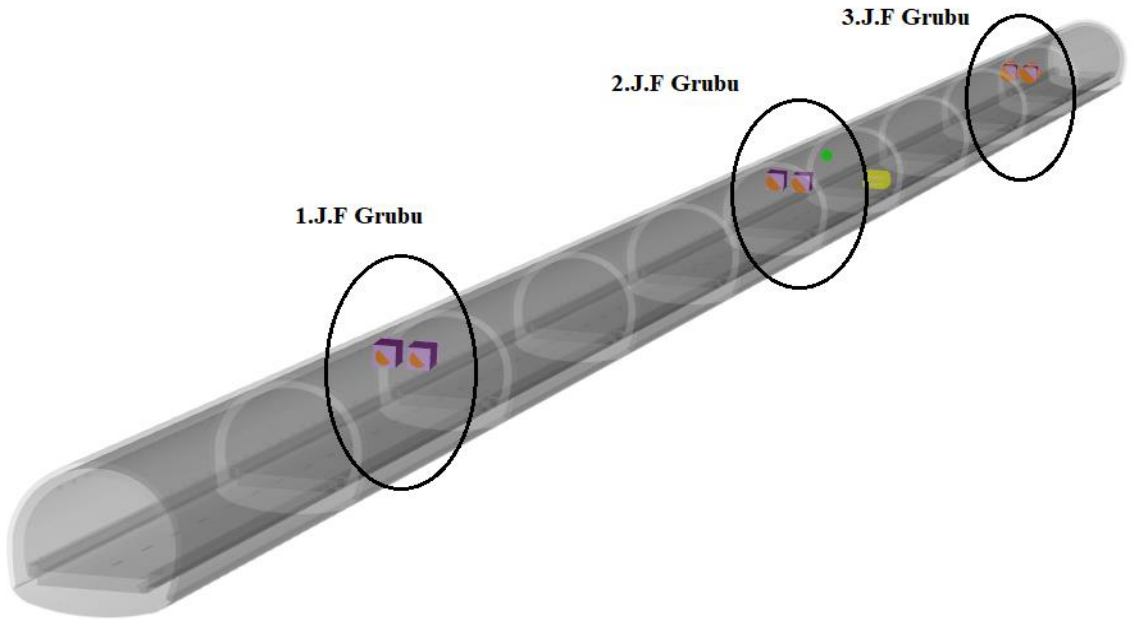
Şekil 4.27. 30 MW yangın gücünün 500. saniyedeki CO dağılımları

4.2. 100 MW Yangın Gücü İçin Simülasyon Analizi ve Sonuçları

Belirlenen konuma göre yerleştirilen 1.J.F, 2.J.F ve 3.J.F grubundaki fanlar, 100 MW için yapılan bütün senaryolarda aktif edilmiştir. Fanlar 1000 mm çapında, 2775 mm uzunluğunda, itme kuvveti 950 N (Newton) ve çıkış hızları 31,7 m³/s'dir. Tünelde çıkan yüzey alanı 2.5 m² bir yangın yüzeyi olduğu için buraya HRRPUA (Heat Release Rate Per Area) değeri 4x10⁴ kW/m²' ye denk gelmektedir. Bu debilerin %50 ve %75 azaltılıp, artırılması yapılarak 5 senaryo durumuna göre analizler yapılmıştır.

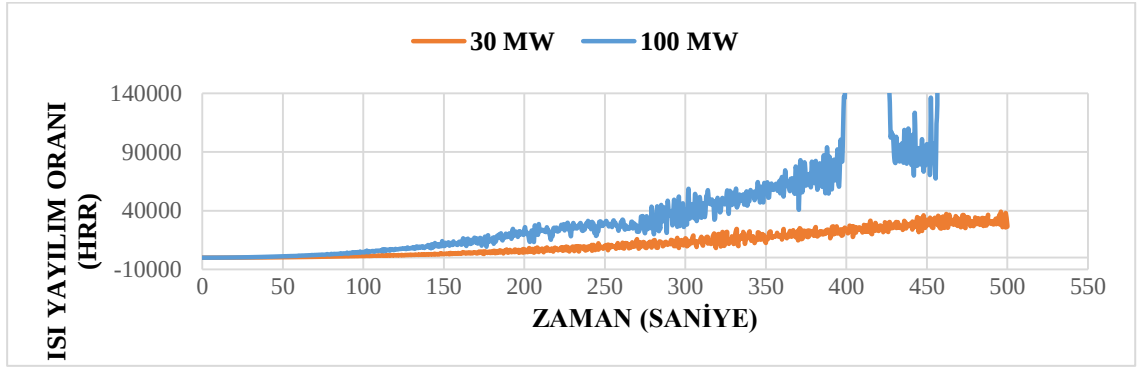
Tablo 4.2. 100 MW yangın gücü için havalandırma senaryoları

	1.J.F Grubu			2.J.F Grubu		3.J.F Grubu	
%	Senaryo	Konum (m)	Q(m ³ /s)	Konum (m)	Q(m ³ /s)	Konum (m)	Q(m ³ /s)
	F	120	24,935	364	24,935	608	24,935
%50	G	120	37,4025	364	37,4025	608	37,4025
%75	H	120	43,63625	364	43,63625	608	43,63625
%50 (-)	I	120	12,4675	364	12,4675	608	12,4675
%75(-)	J	120	6,23375	364	6,23375	608	6,23375



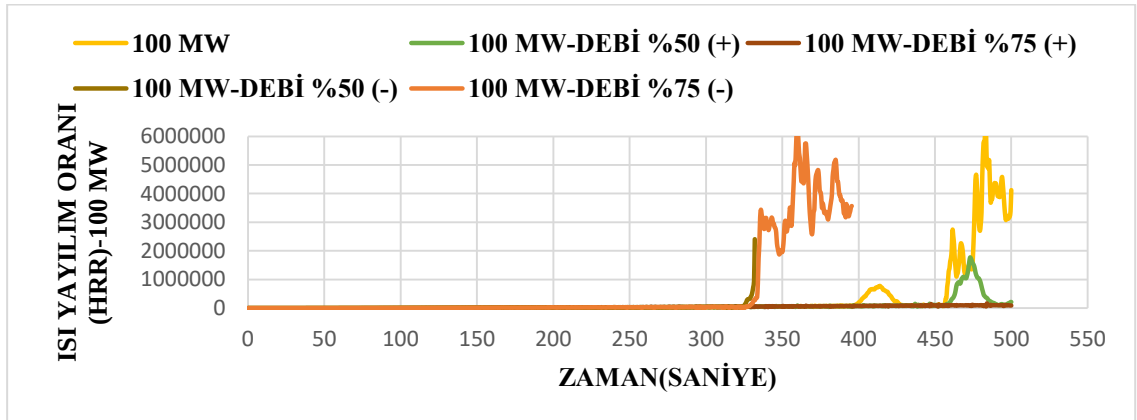
Şekil 4.28. 100 MW yangın gücü için jet fanların tünel içindeki konumu

Tablo 4.2 de 100 MW yangın için seçilen jet fan debisini beş senaryo yapılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.28 de şekilde de jet fanların konumu ve yangın aracının konumu görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre 100 MW ve 30 MW için 500 saniyelerde zamana bağlı ısı yayılım oranı Şekil 3.29 da görülmektedir. Grafiğe baktığımızda 100 MW yangın gücü 400 saniyeden sonra artık ısı yayılım oranını geçtiği görülmektedir. 30 MW da ise tavanlarda belli noktalarda ısı artışına neden olduğundan ilerdeki süreçte rollover görülebilmektedir.



Şekil 4.29. 100 MW ve 30 MW yangının zamana bağlı ısı yayılım oranı

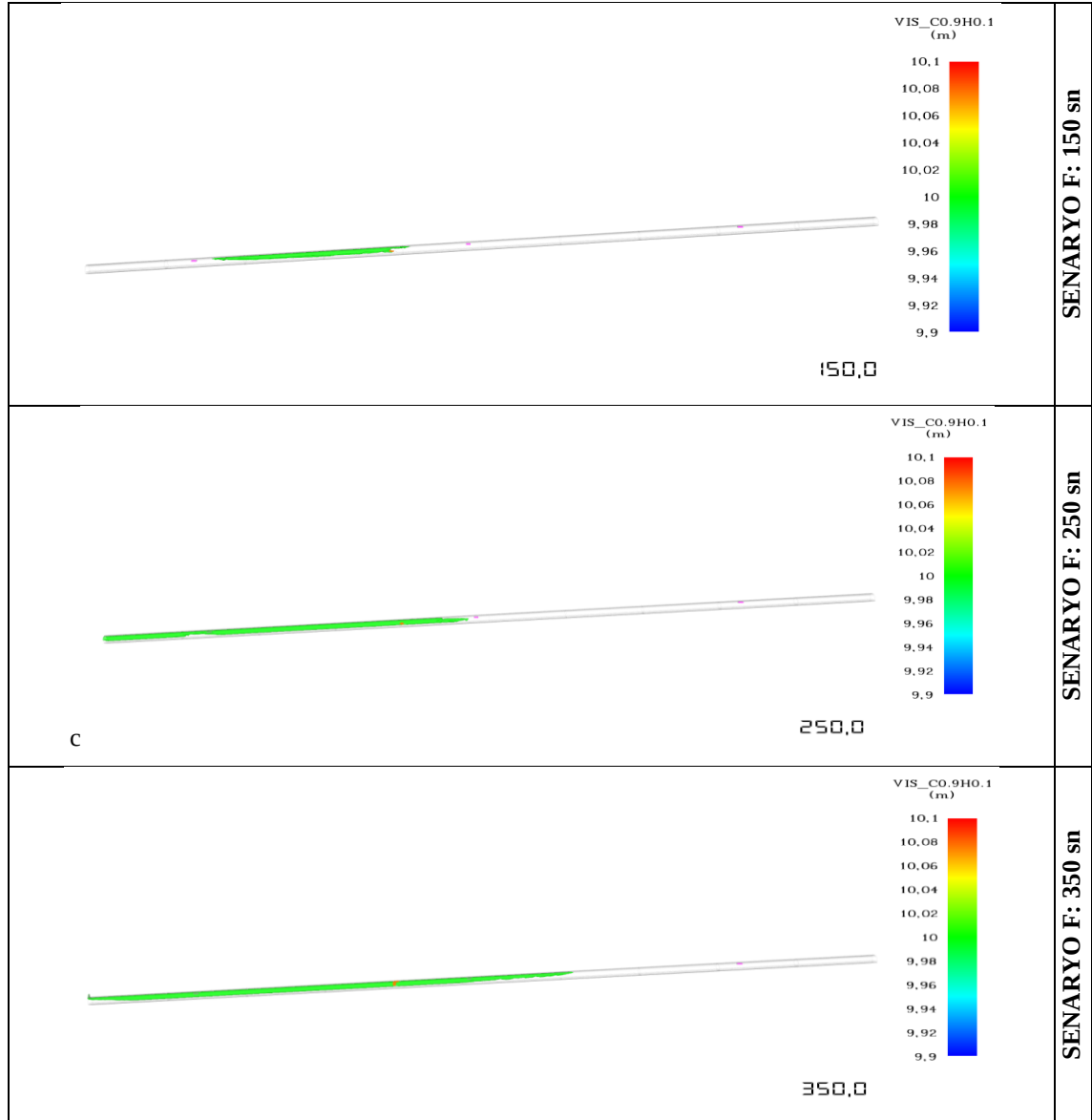
Şekil 4.30. grafiğine baktığımızda S-J 330 saniye, S-I 320 sn ve S-F de ise 465 saniyeden sonra ısı yayılım oranı geçince artık flashover meydana getirmiştir. Flashover meydana geldiği yerlerde Pyrosim programı hata vermiştir. Ortamda biriken sıcak duman gazlarını ortamdaki uzaklaştırılmayan yani debileri düşük kalan fanlar belli zamandan sonra ortam sıcaklığının artışına neden olmuştur. 600 C° geçince flashover olayı meydana gelmiştir.



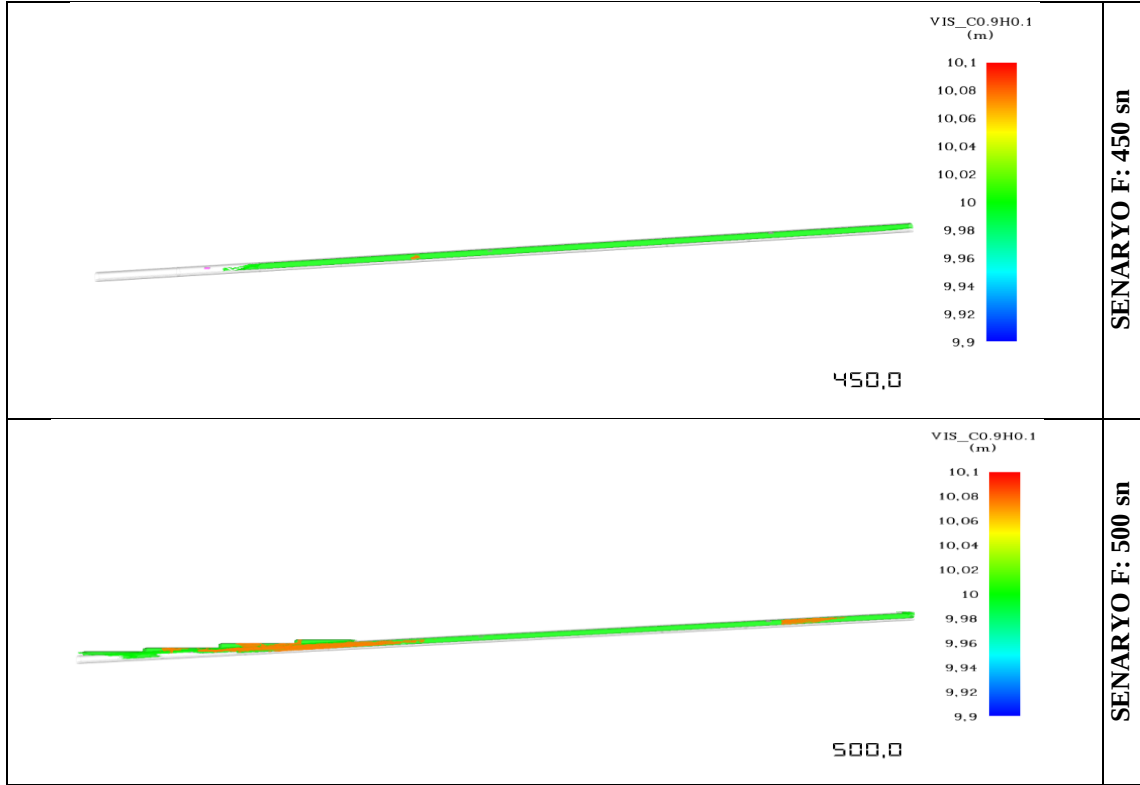
Şekil 4.30. 100 MW yangının %50 - %75 debi artış ve azalış sonucu zamana bağlı ısı yayılım oranı

4.2.1. Analizi Yapılan Senaryoların Duman Görünürlükleri

S-F 150 saniyede duman görünürlüğü 10 m olduğu ve 250 sn, 350 sn, 450 saniyelerde de 10 m altına inilmemiştir. 500 saniyeden sonra tünel çıkışına 200-250 metre kala 10.1 m olduğu görülmektedir. Şekil 4.32 de S-G belli saniyelerdeki analizine baktığında 10 m olduğu sadece 500 saniyede 10.06 m olmuştur. S-H deki analiz süresince bakınca 10 m de kalmıştır. S-I da 332 saniyelerde 10 m ve 332 sn’de ise 10.06-10.08 m olduğu Şekil 4.33.de görülmektedir. S-J analiz süresince duman görünürlüğü 10 m iken 390 saniyeye gelince 10.06 m olmuştur.



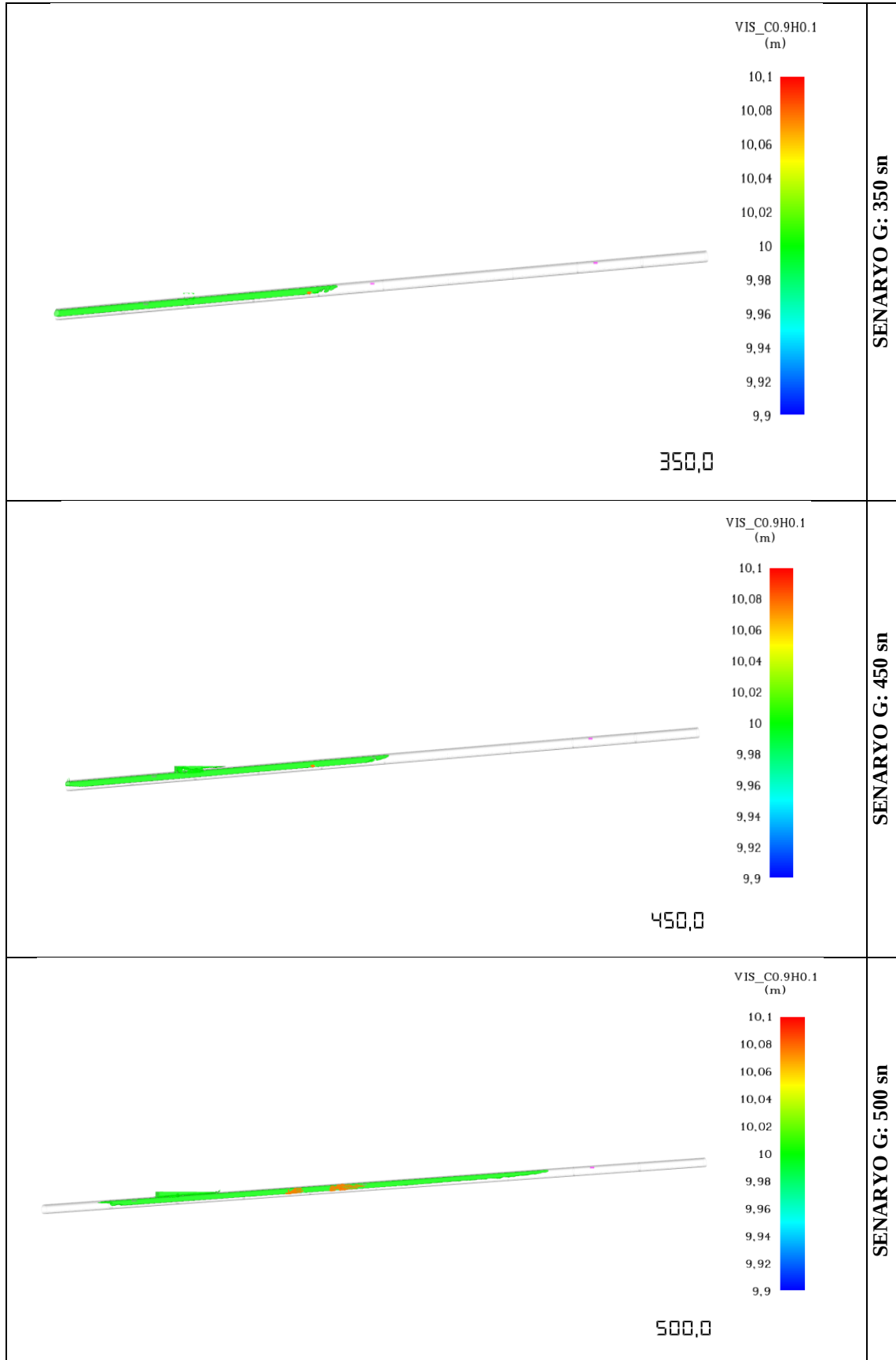
Şekil 4.31. S-F’nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman görünürlükleri



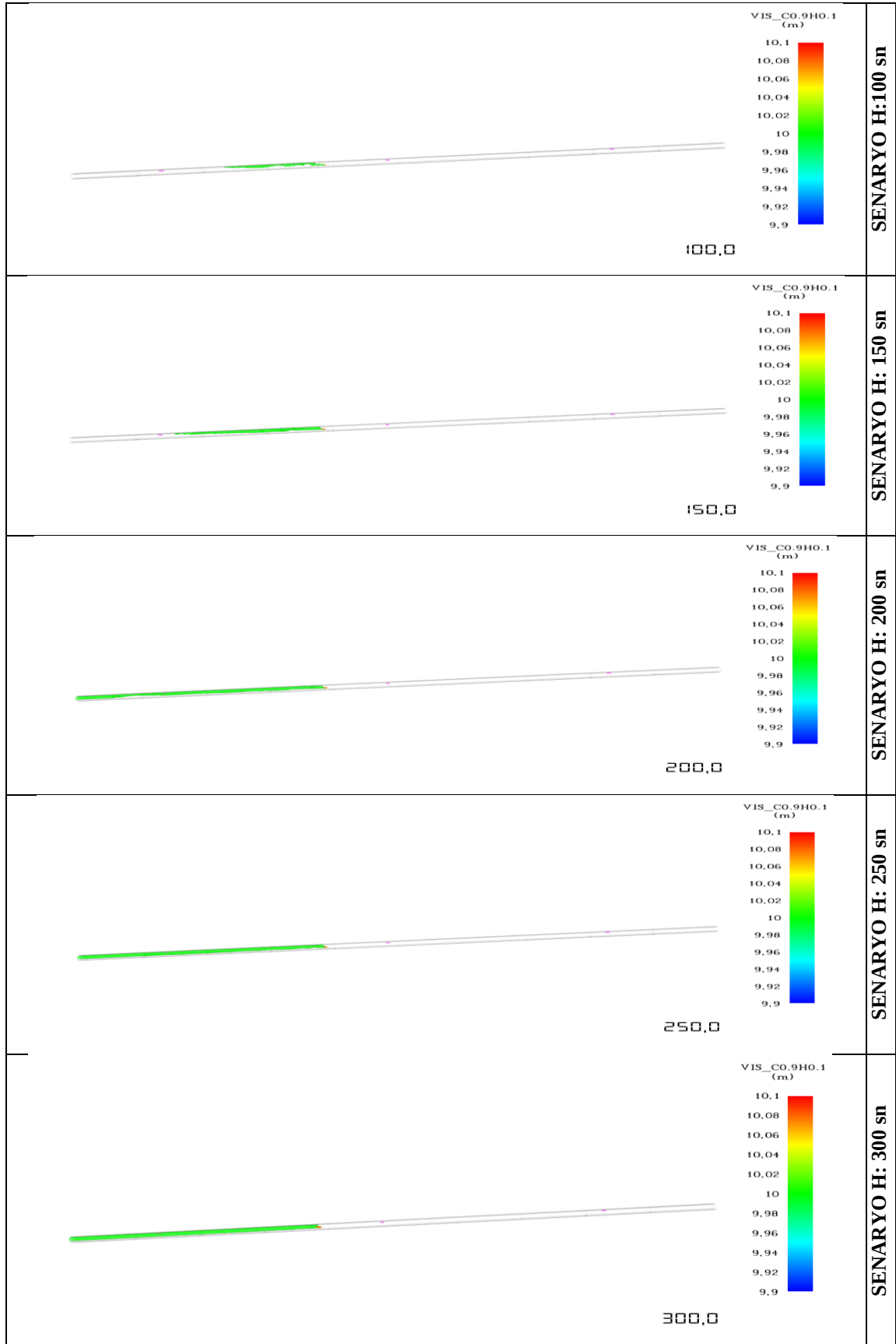
Şekil 4.31. (Devam) S-F'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman görünürlükleri



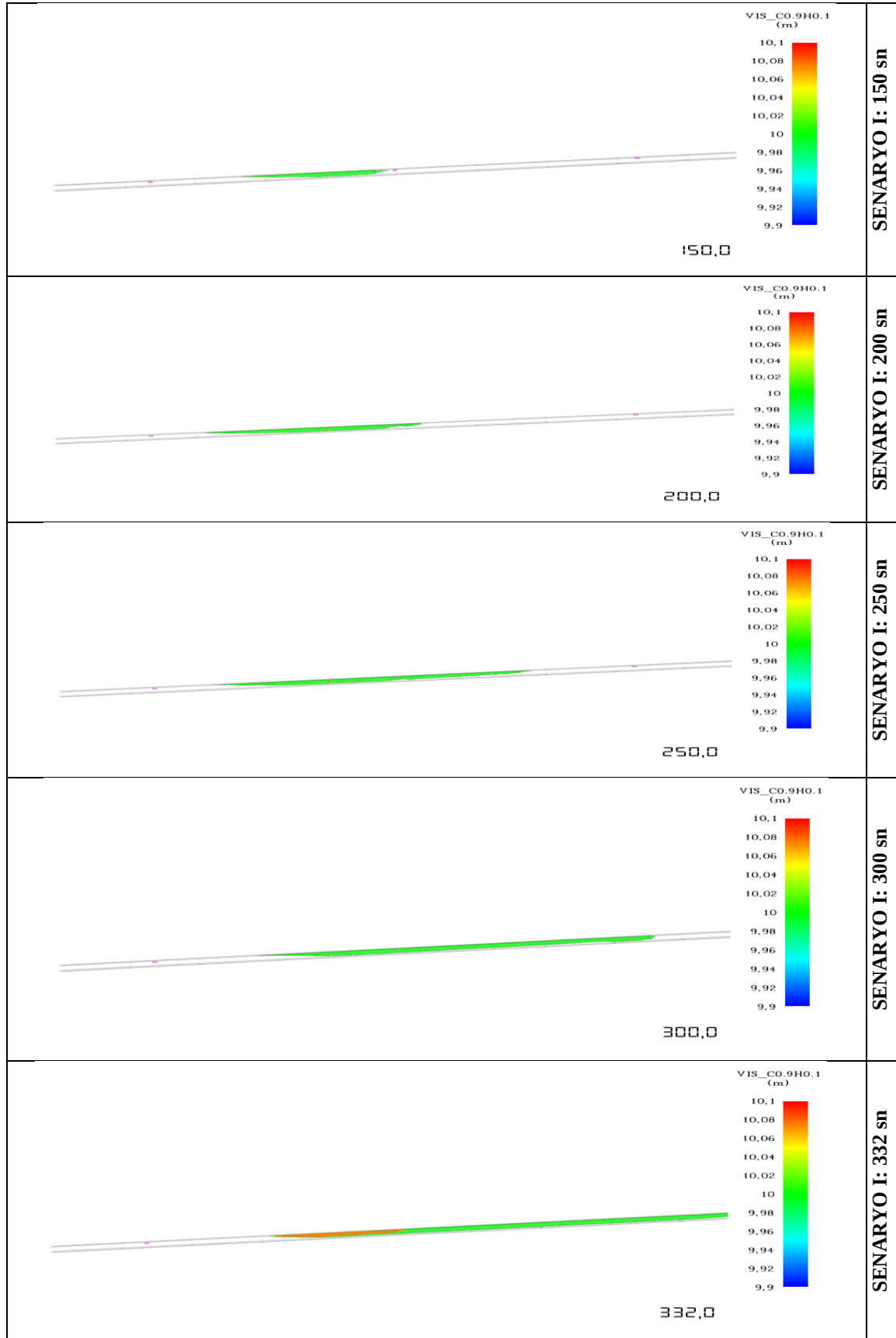
Şekil 4.32. S-G'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman görünürlükleri



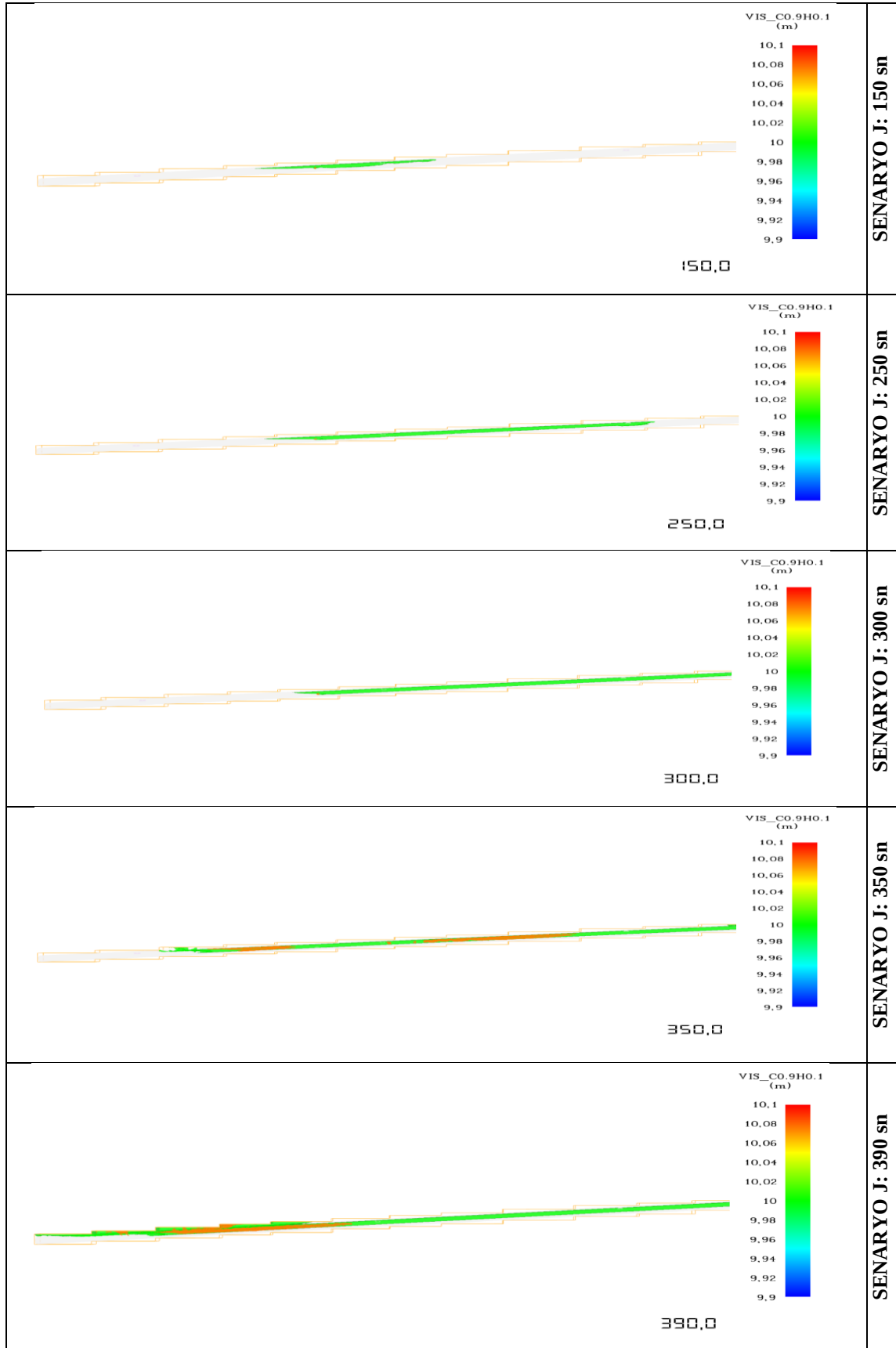
Şekil 4.32. (Devam): S-G'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman görünürlükleri



Şekil 4.33. S-H'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman görünürlükleri



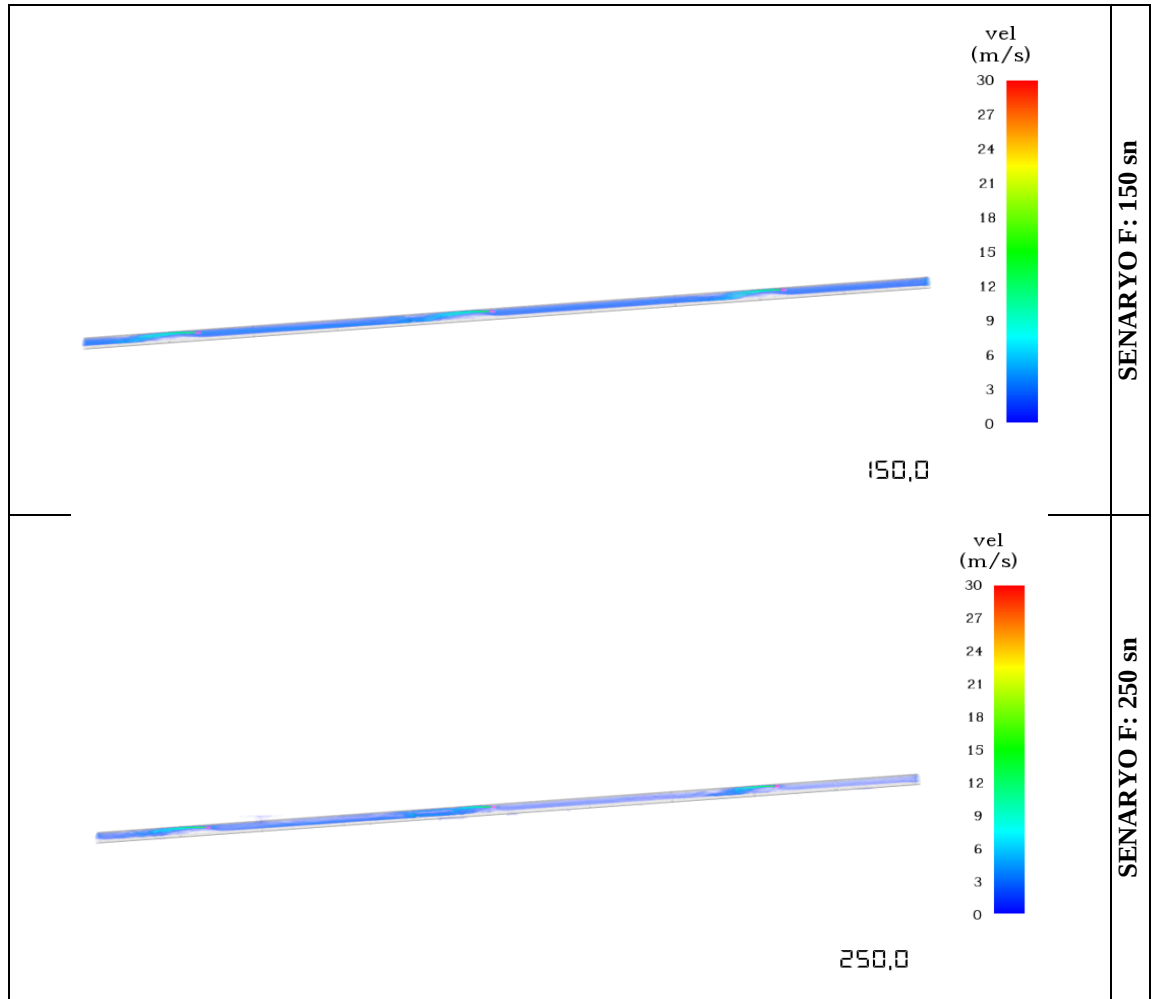
Şekil 4.34. S-I'nın belli saniyelerdeki tünel boyunca duman görünürlükleri



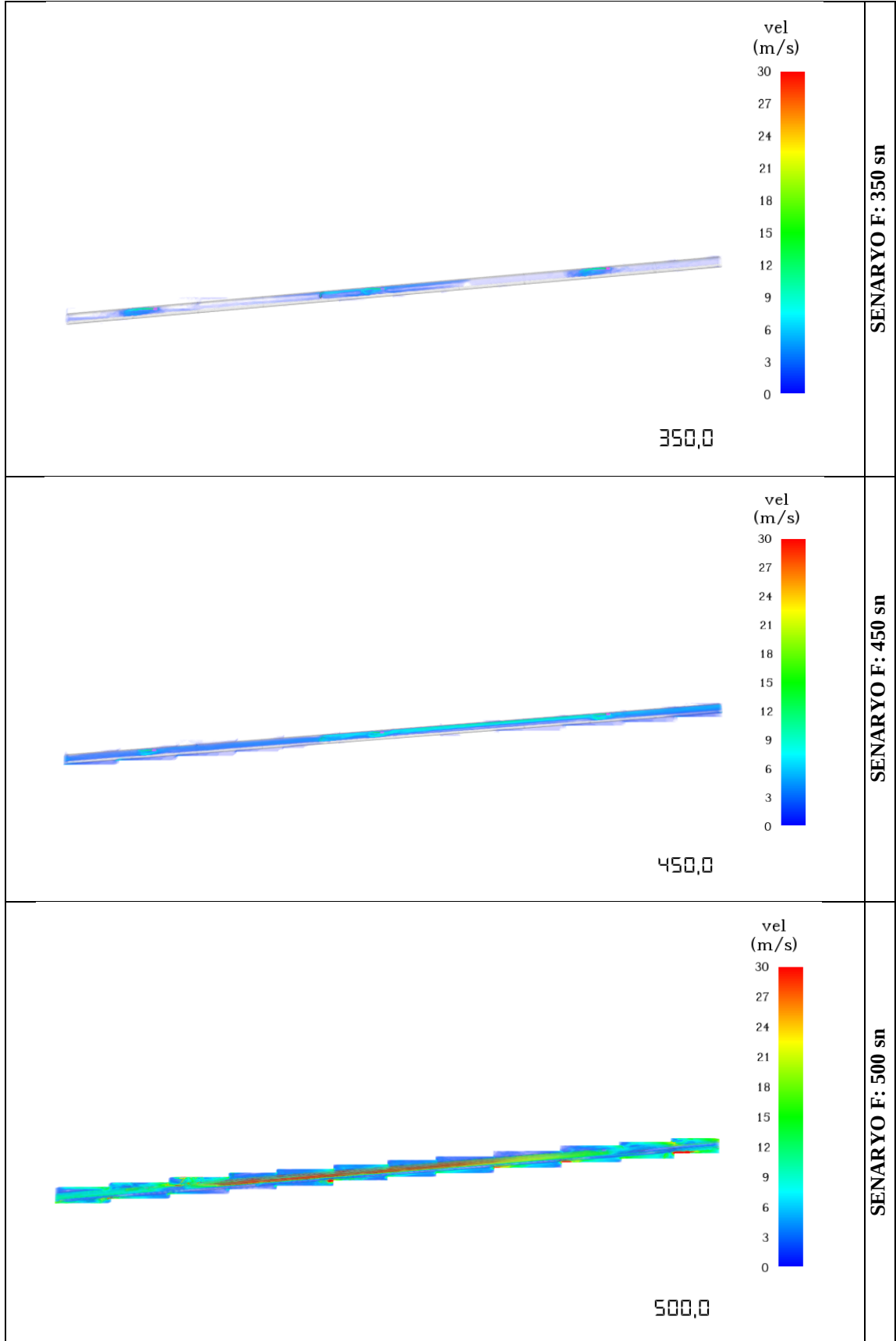
Şekil 4.35. S-J'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman görünürlükleri

4.2.2. Analizi Yapılan Senaryoların Duman Akış Hızları

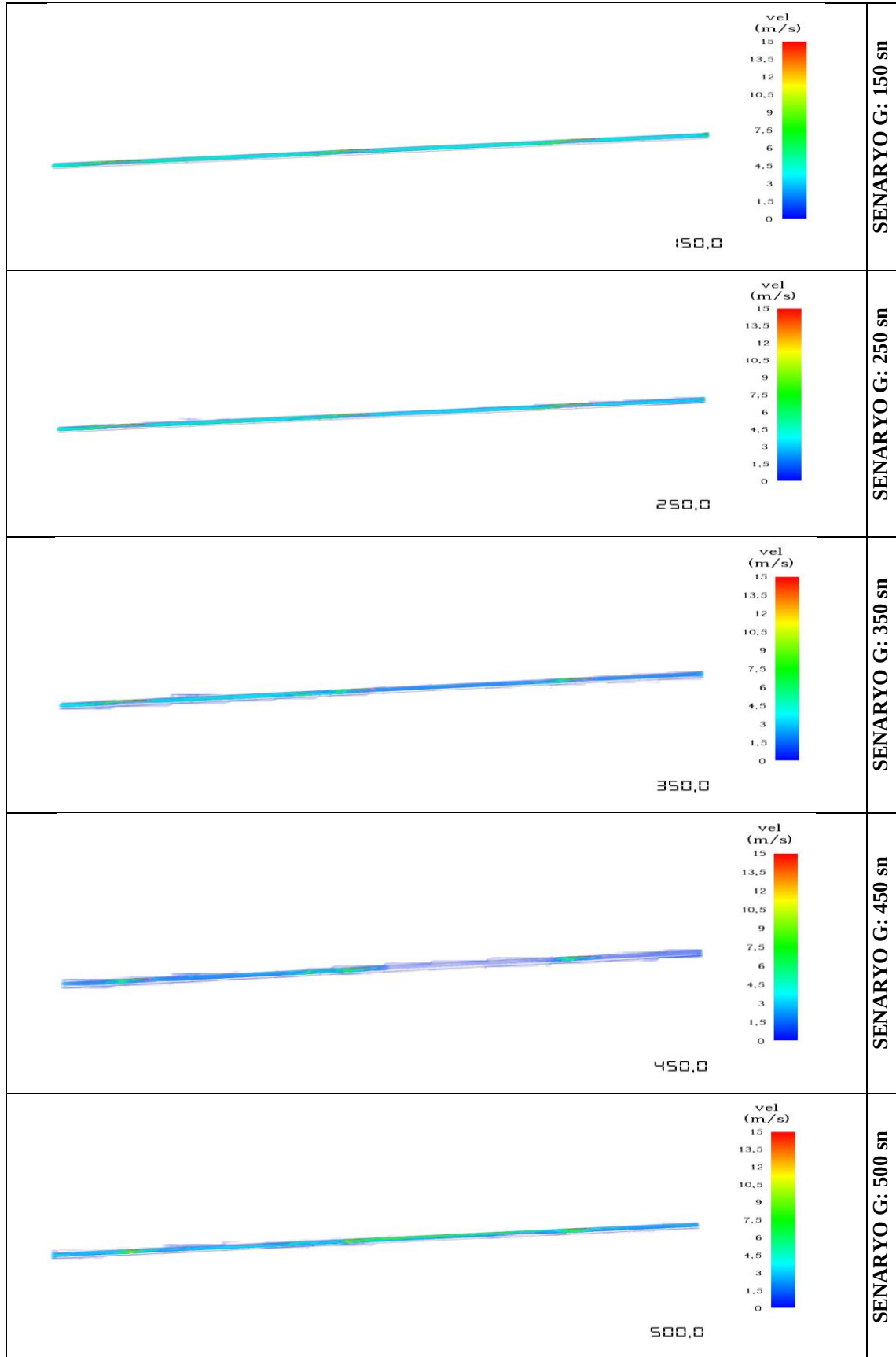
Şekil 4.36 da S-F de 150 sn 6-3 m/sn, 250 saniyelerde aynı duman akış hızı olduğu görülmektedir. 350 saniyeden sonra fanların itme kuvveti yaptığı alanda duman akış hızı 6-9 m/sn, tünel çıkışında ise 3-6 m/sn akış hızına geldiği görülmektedir. S-G ise 150 sn 4,5-4 m/sn, 250 sn 5-4,5 m/sn, 300 sn 1,5-3 m/sn'dir. Fanların üfleme yaptığı 450-500 saniye aralığında ise duman akış hızı 4,5-6 m/sn'dir. S-H de 100 sn 4,5-3 m/sn'dir. 150, 200, 250 saniyelere bakınca ortalama 4 m/s olmuştur. 300 saniyeden sonra tünel için duman akış hızının giderek azaldığı görülmektedir. S-I 150 saniyede jet fan üfleme yaptığı alanda akış hızı 2,25-1,5 m/sn ve 300 sn'den sonra ortalama 6-5,25 m/sn hızları görülmektedir. S-J de 250 saniyeden sonra 3,5 m/sn düşmüş ve 250 saniyeden sonra duman akış hızı 7-10,5 m/sn olmuştur.



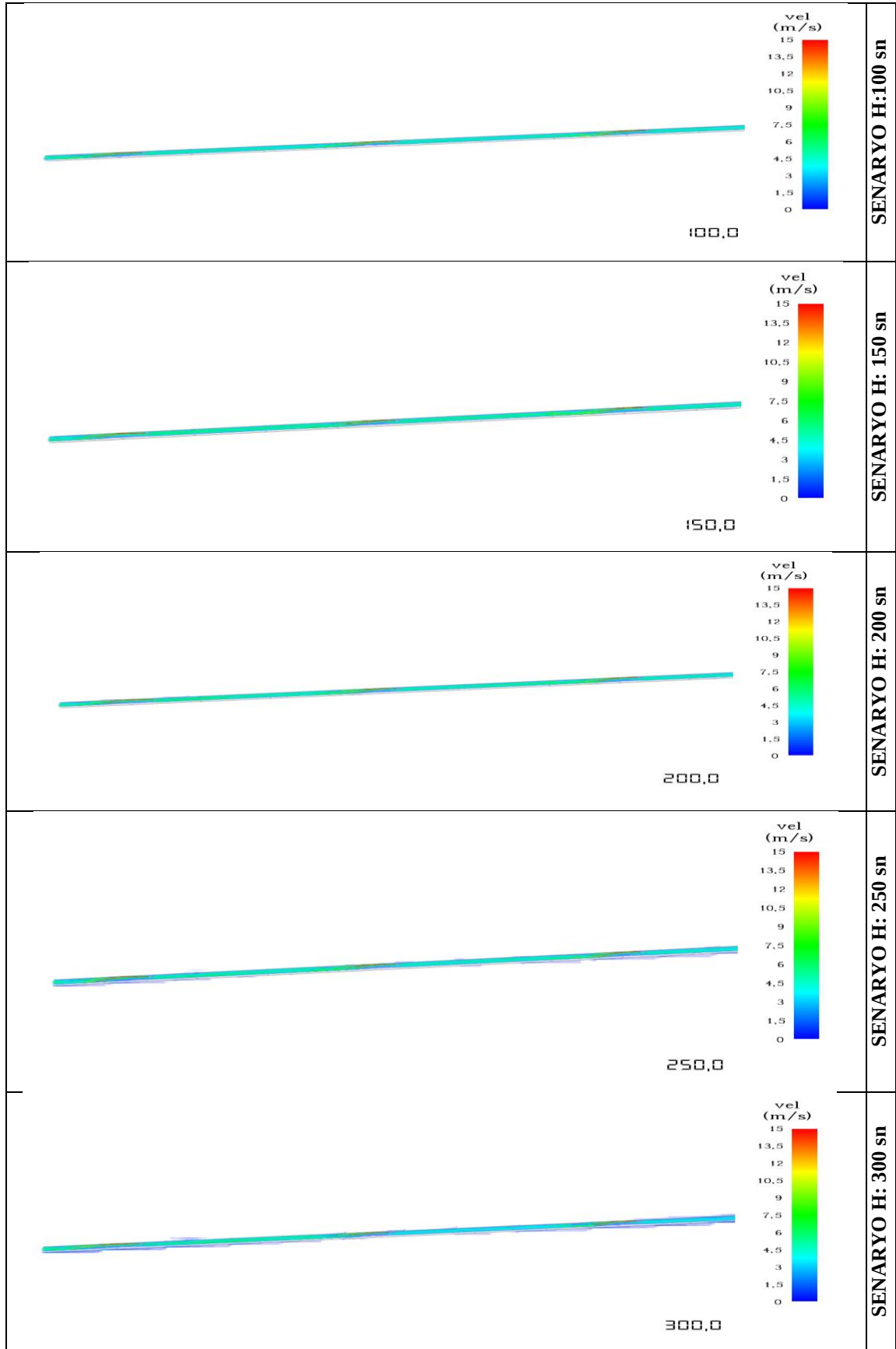
Şekil 4.36. S-F'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman akış hızları



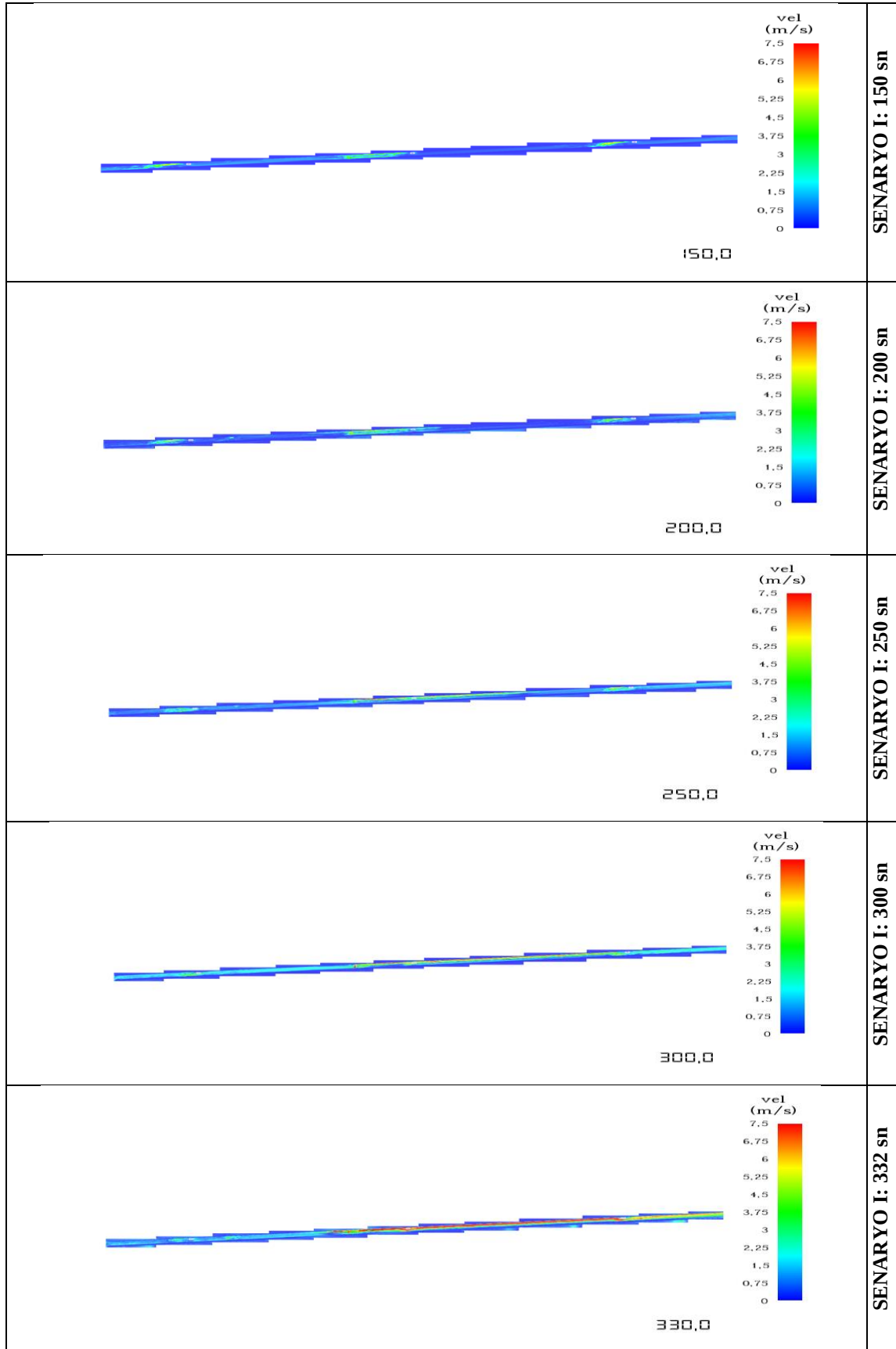
Şekil 4.36. (Devam): S-F'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman akış hızları



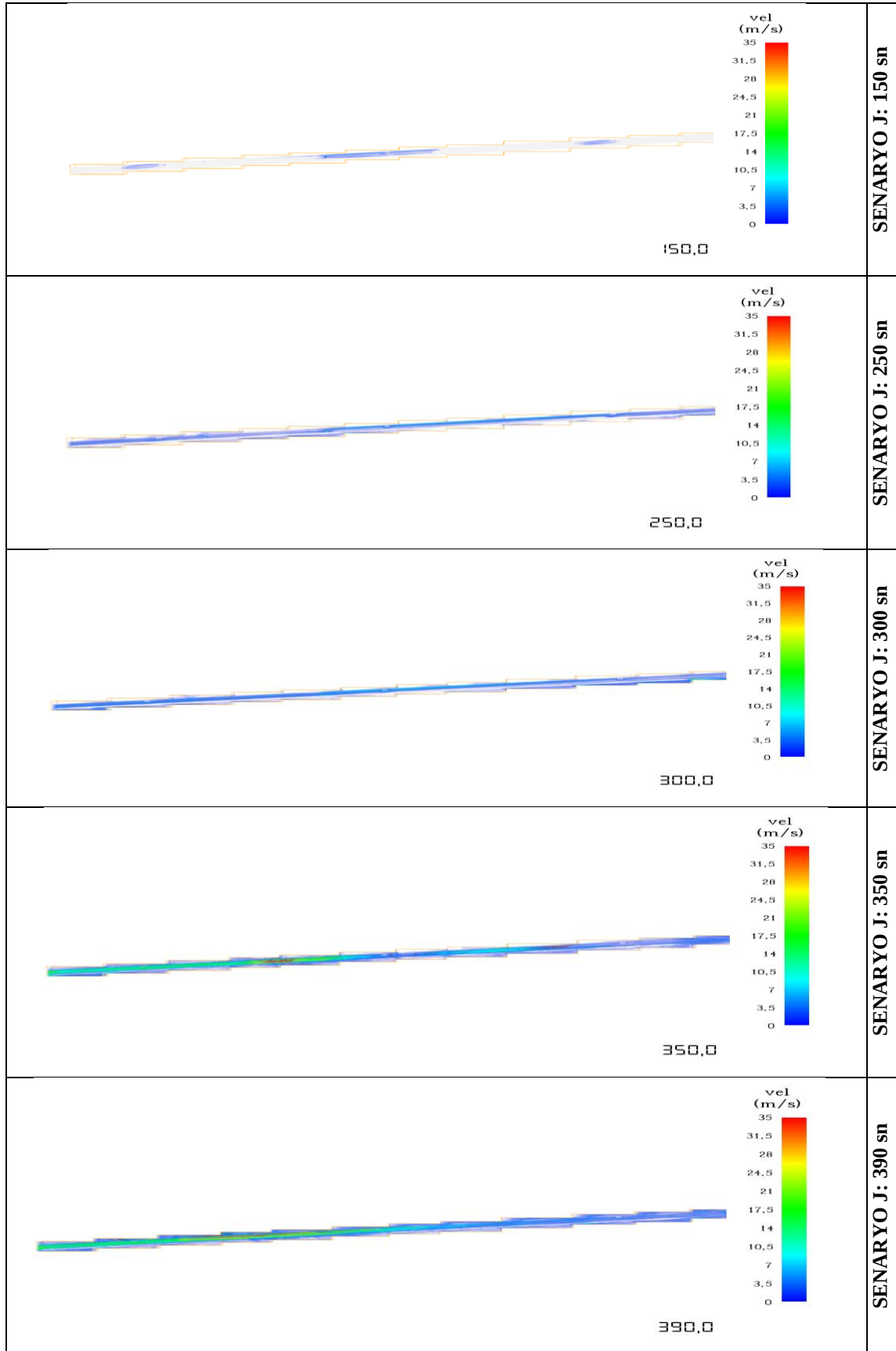
Şekil 4.37. S-G'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman akış hızları



Şekil 4.38. S-H'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman akış hızları



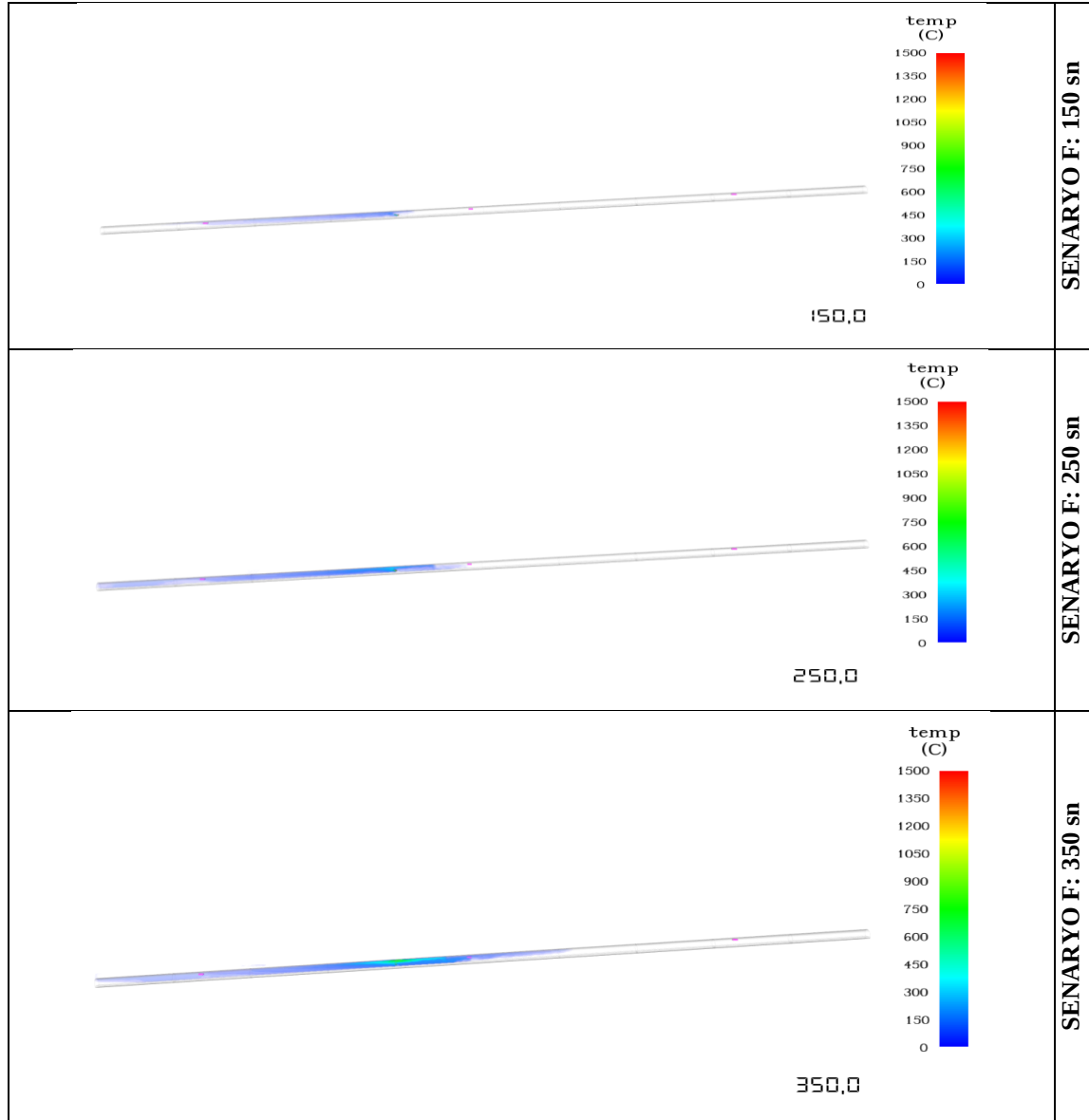
Şekil 4.39. S-I'nın belli saniyelerdeki tünel boyunca duman akış hızları



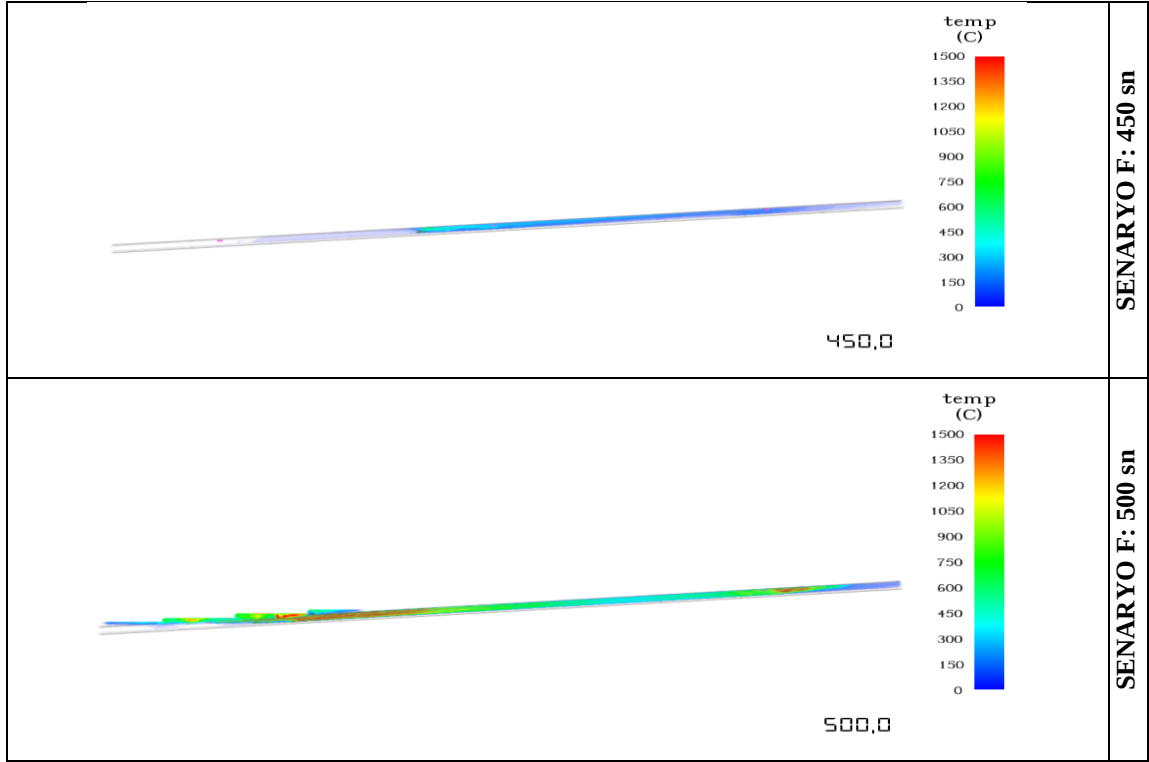
Şekil 4.40. S-J'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca duman akış hızları

4.2.3. Analizi Yapılan Senaryoların Sıcaklık Dağılımları

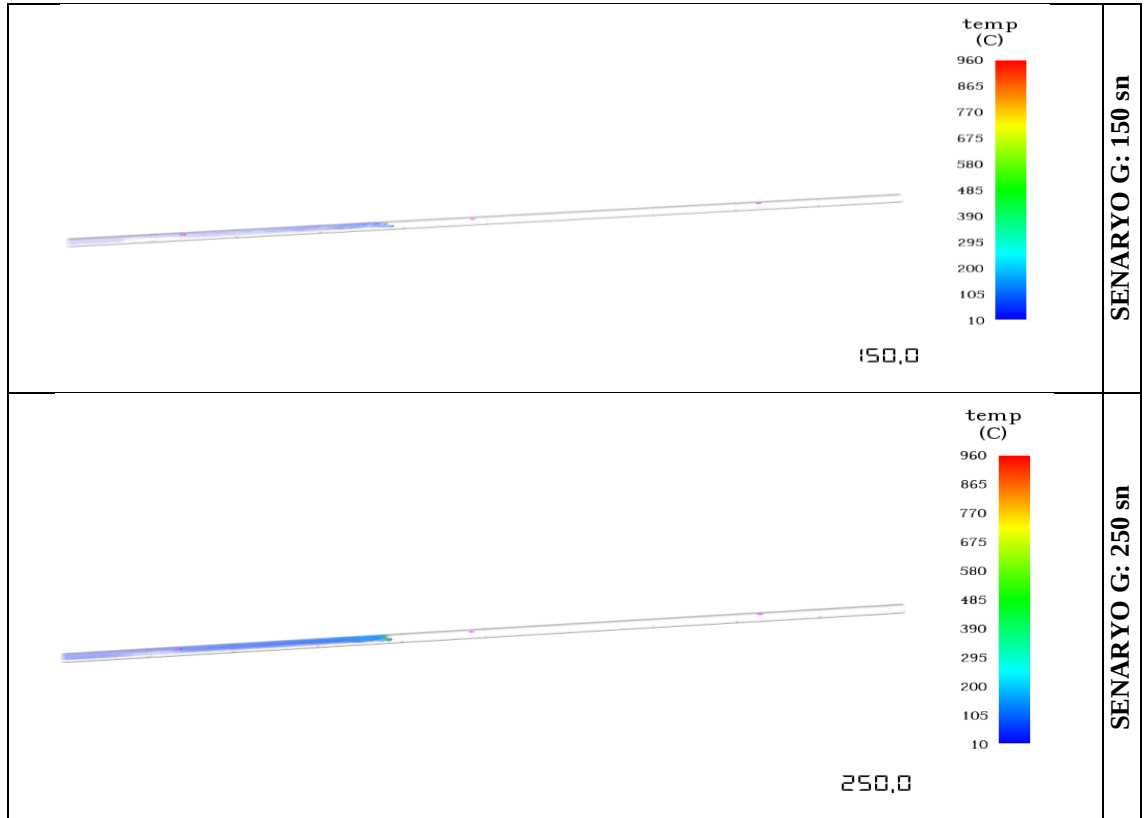
Senaryoların sıcaklık analiz sonuçlarına bakınca S-F 100 saniye ve 250 saniye aralığında 150- 300 C°'dir. Fan ve yangın bölgesinde kalan bölgede ise 300-450 C° sıcaklığın giderek artış göstermektedir. S-G de 150 saniyede 200-295 C° ve 250 saniyeden sonra giderek 200 C° altına düşmüştür. S-I da 150 saniye ve 250 saniyelerde ortalama sıcak gazların sıcaklığı 120 C° görünmektedir. 300 saniyeden sonra ani sıcaklık artışı meydana gelerek 365 C° seviyesine gelmiştir. S-J 350 saniyeden sonra ani bir sıcaklık patlaması sonucu tünelde hava sıcaklığı 1200-1400 C° olmuştur.



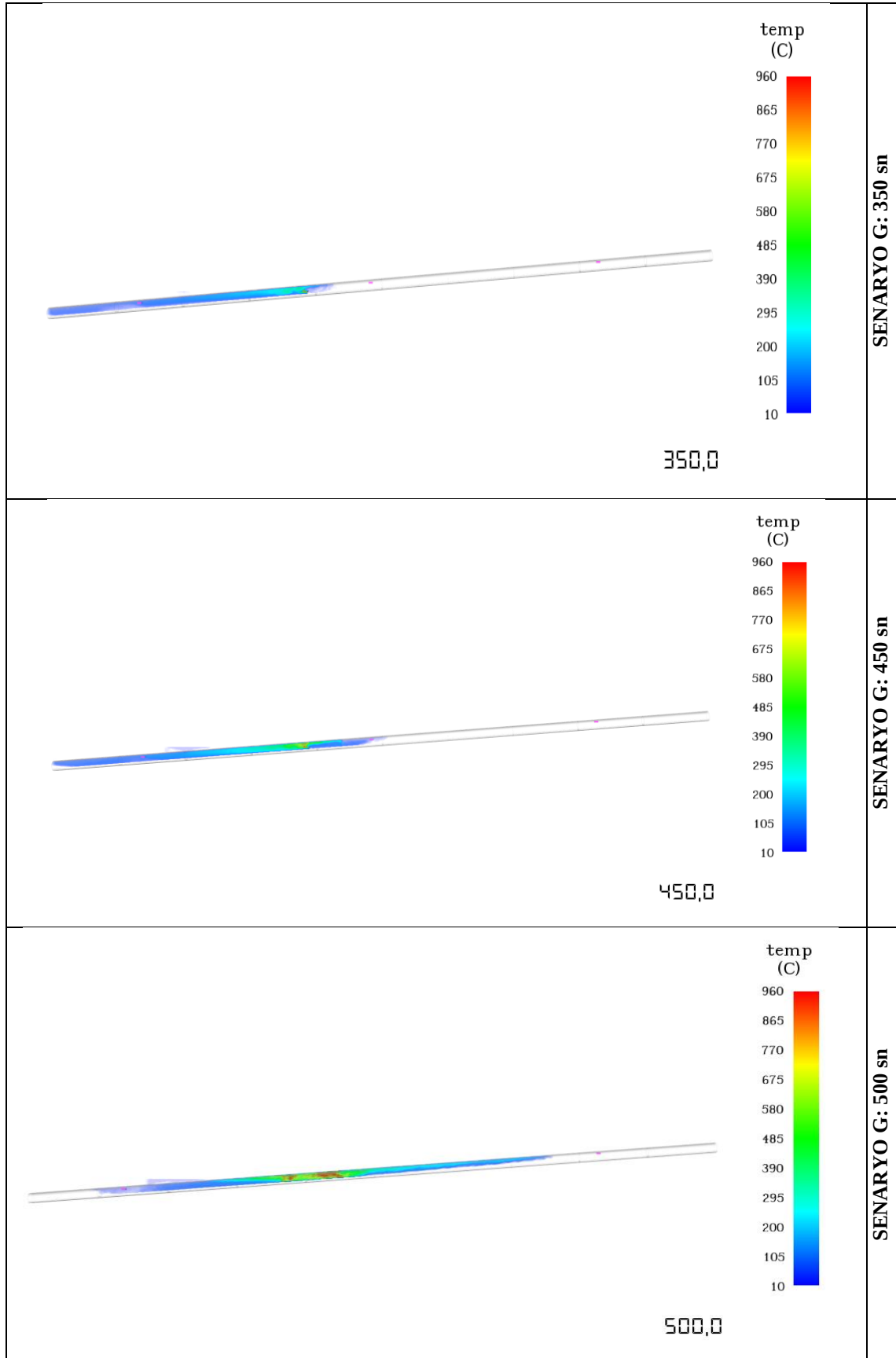
Şekil 4.41. S-F'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca sıcaklık dağılımları



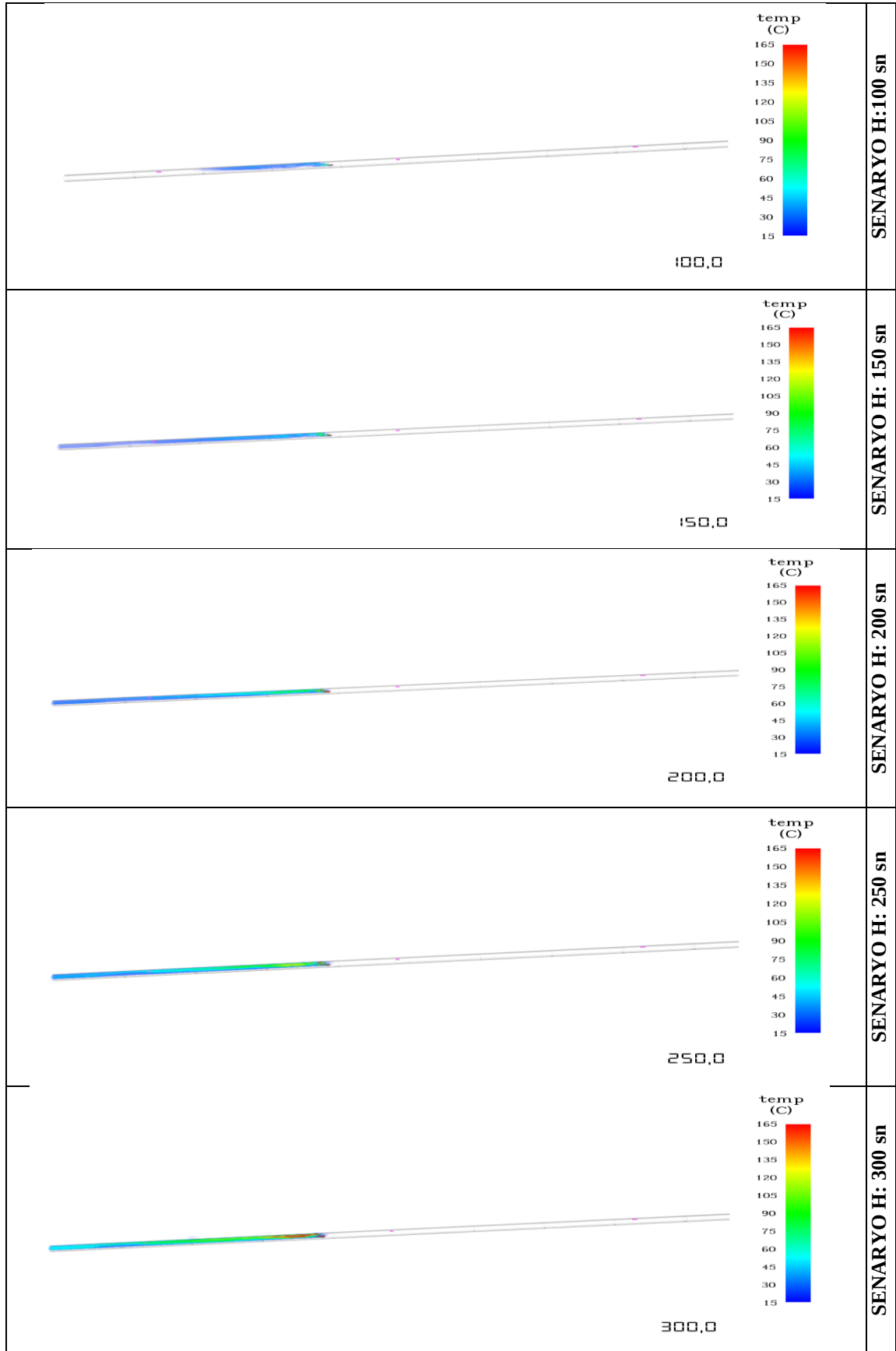
Şekil 4.41. (Devam): S-F'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca sıcaklık dağılımları



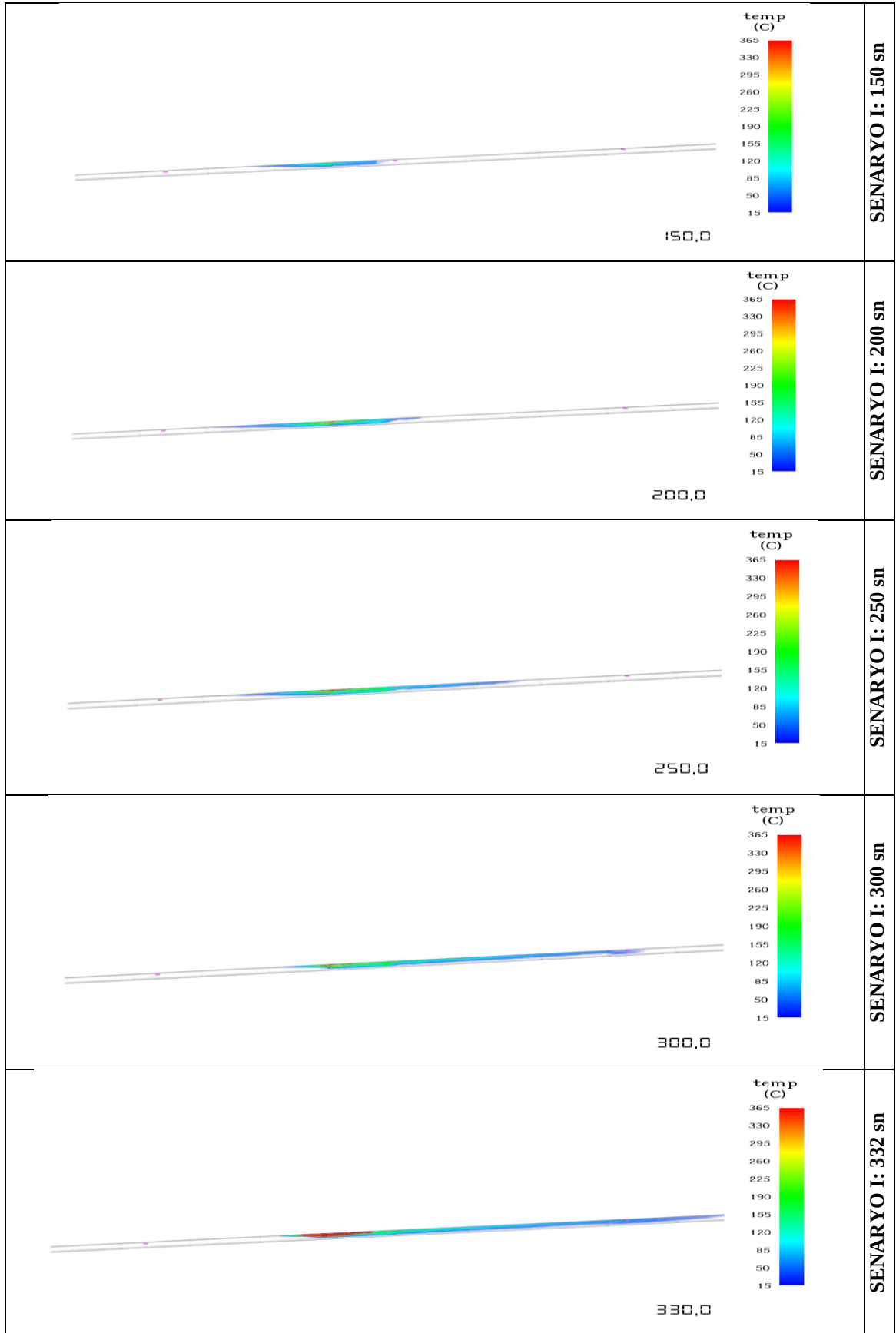
Şekil 4.42. S-G'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca sıcaklık dağılımları



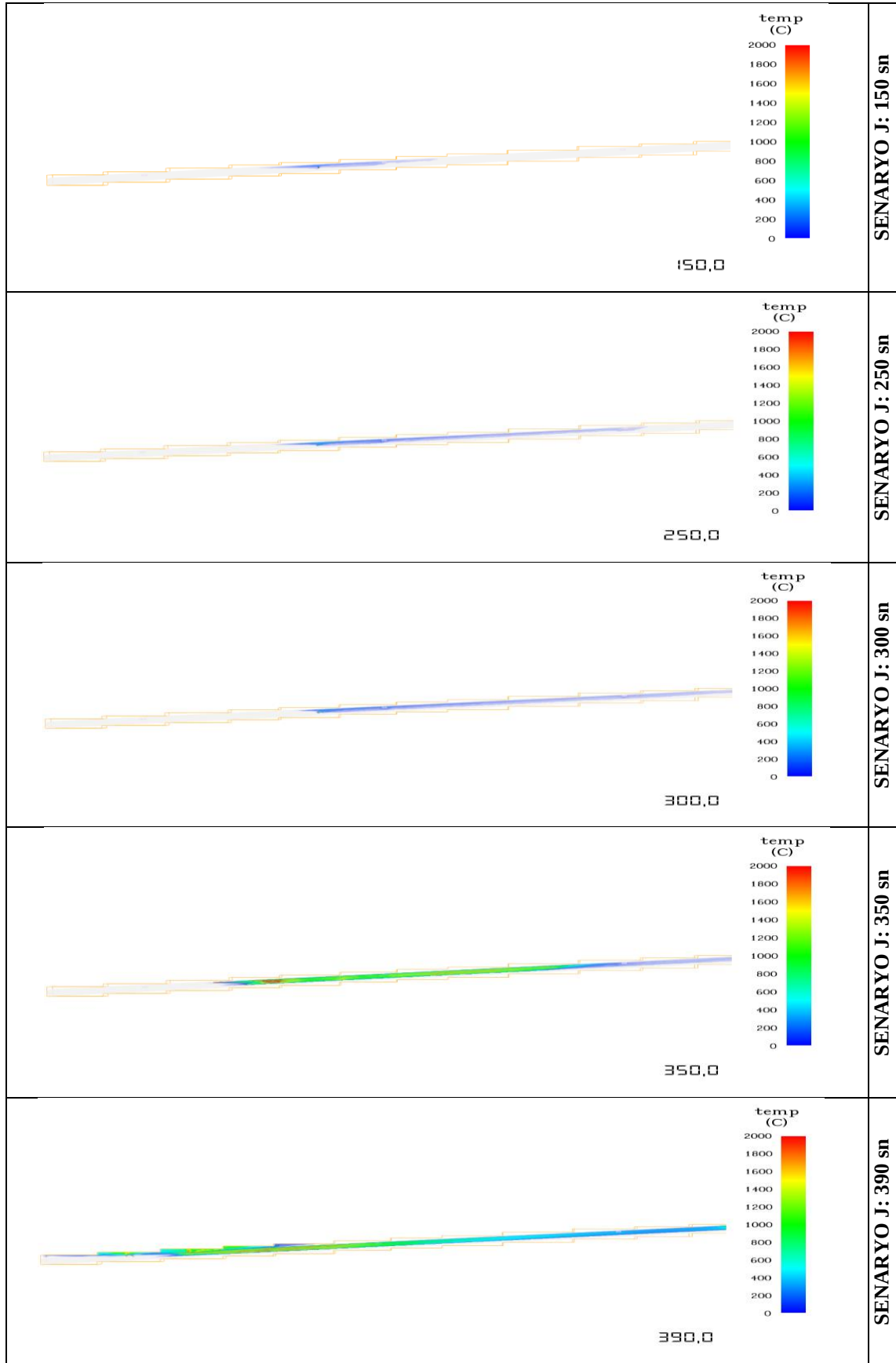
Şekil 4.42. (Devam): S-G'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca sıcaklık dağılımları



Şekil 4.43. S-H'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca sıcaklık dağılımları



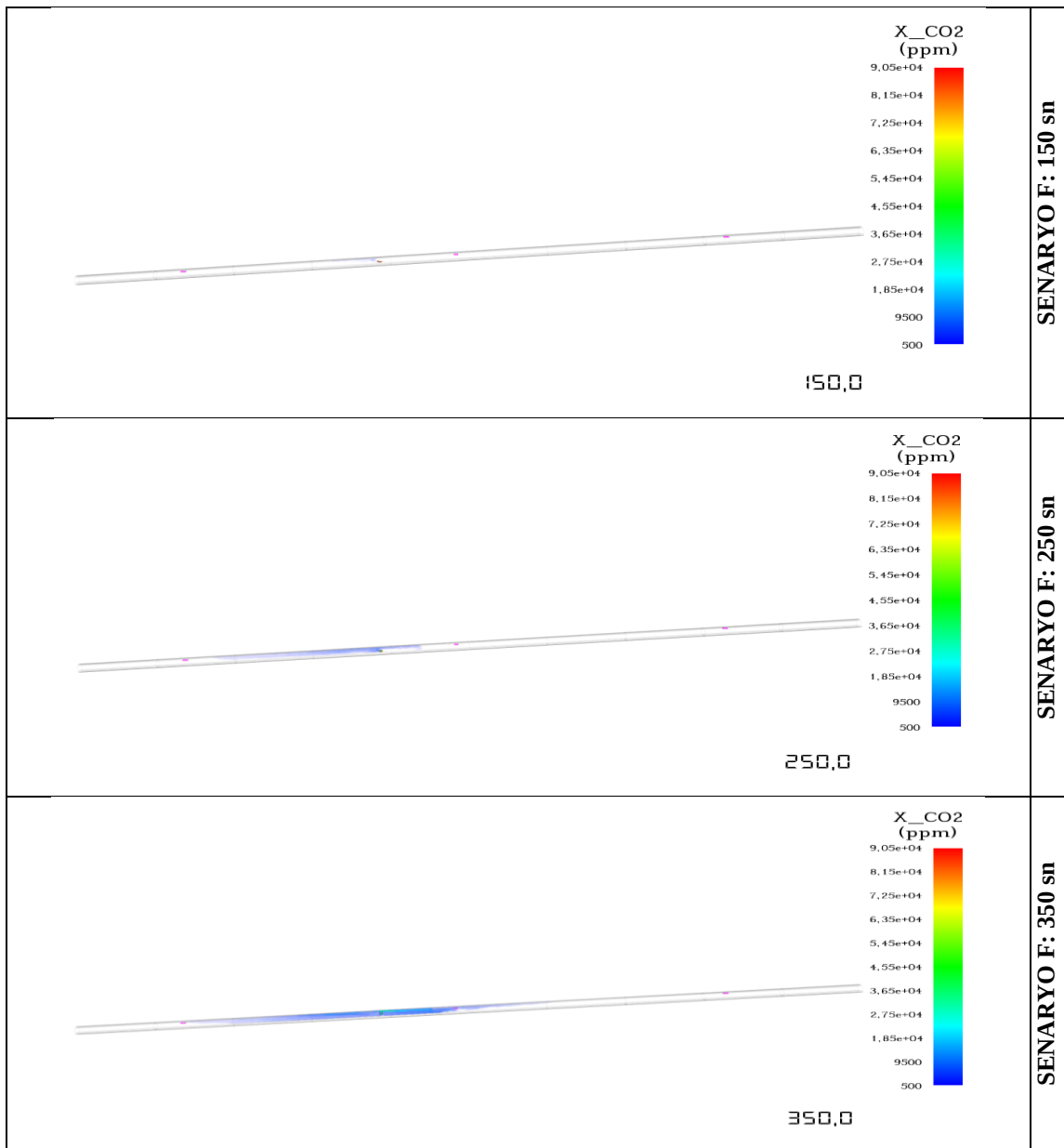
Şekil 4.44. S-I'nın belli saniyelerdeki tünel boyunca sıcaklık dağılımları



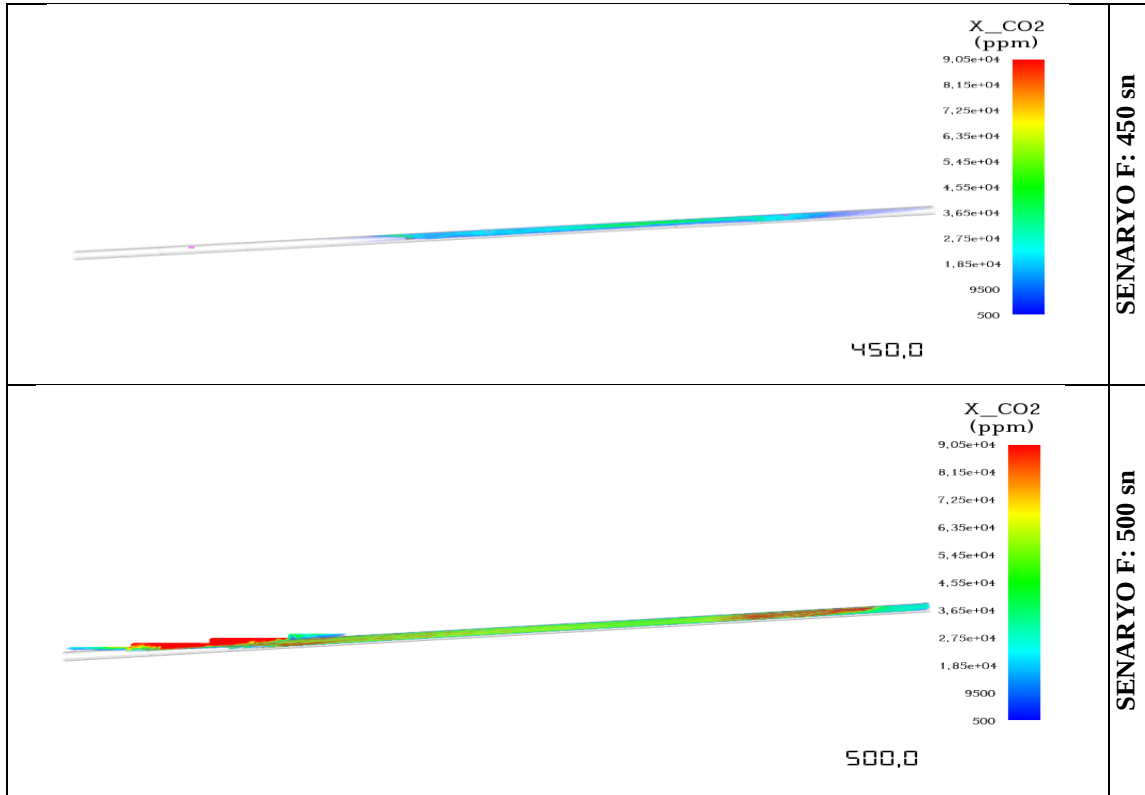
Şekil 4.45. S-J'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca sıcaklık dağılımları

4.2.4. Analizi Yapılan Senaryoların CO₂ Dağılımı

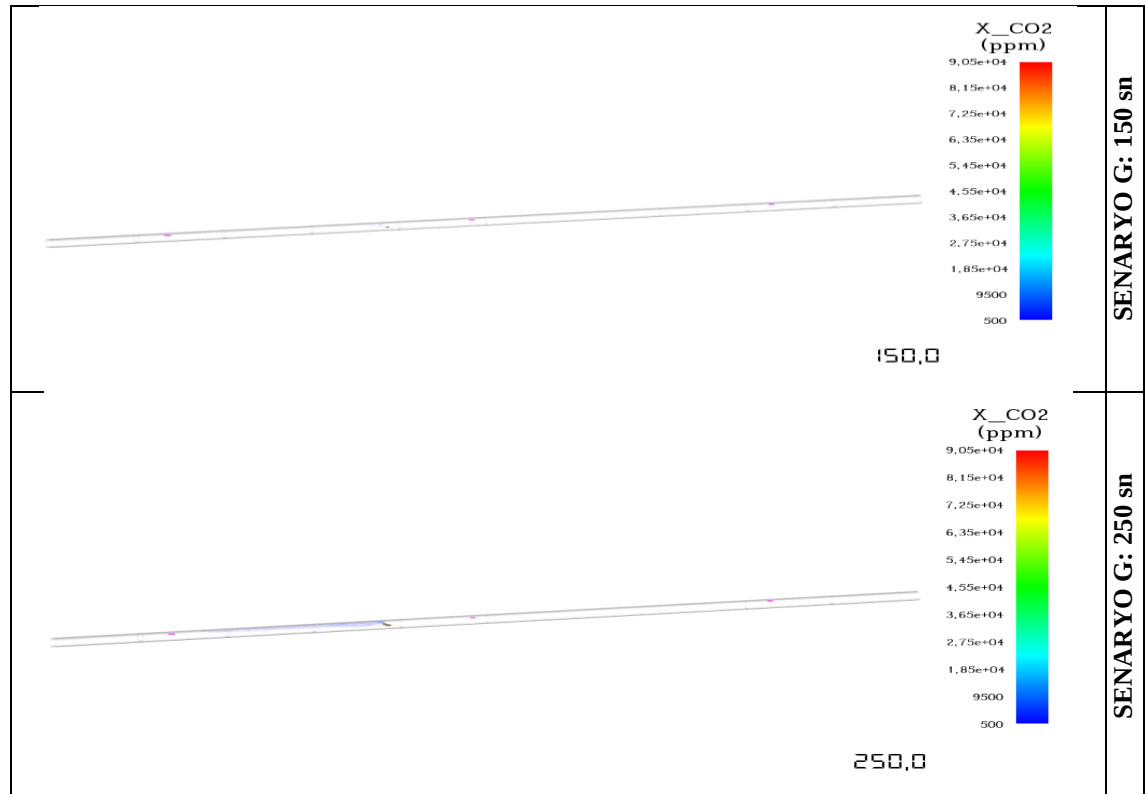
S-F de ortamda oluşan kabondioksit miktarına kınca 150-250 saniye aralığında 950 ppm'dir. 350 saniyeden sonra 500-9500 ppm olmuştur. Giderek ortamdaki CO₂ miktarı artış yaparak $2,75 \times 10^4$ ppm'i geçmiştir. S-G de fan ve yangın alanında sıcak gazlar ve duman CO₂ artırmıştır. S-H de 100 saniyede 800-1000 ppm'dir. 200 saniyede ise 1.J.F. grubundan çıkışa 250-200 metre mesafede 1200-1400 ppm olmuştur. S-I ve S-J de tahliyi gerçekleştirilmediğinden dolayı ortam da CO₂ artış meydana gelmiştir.



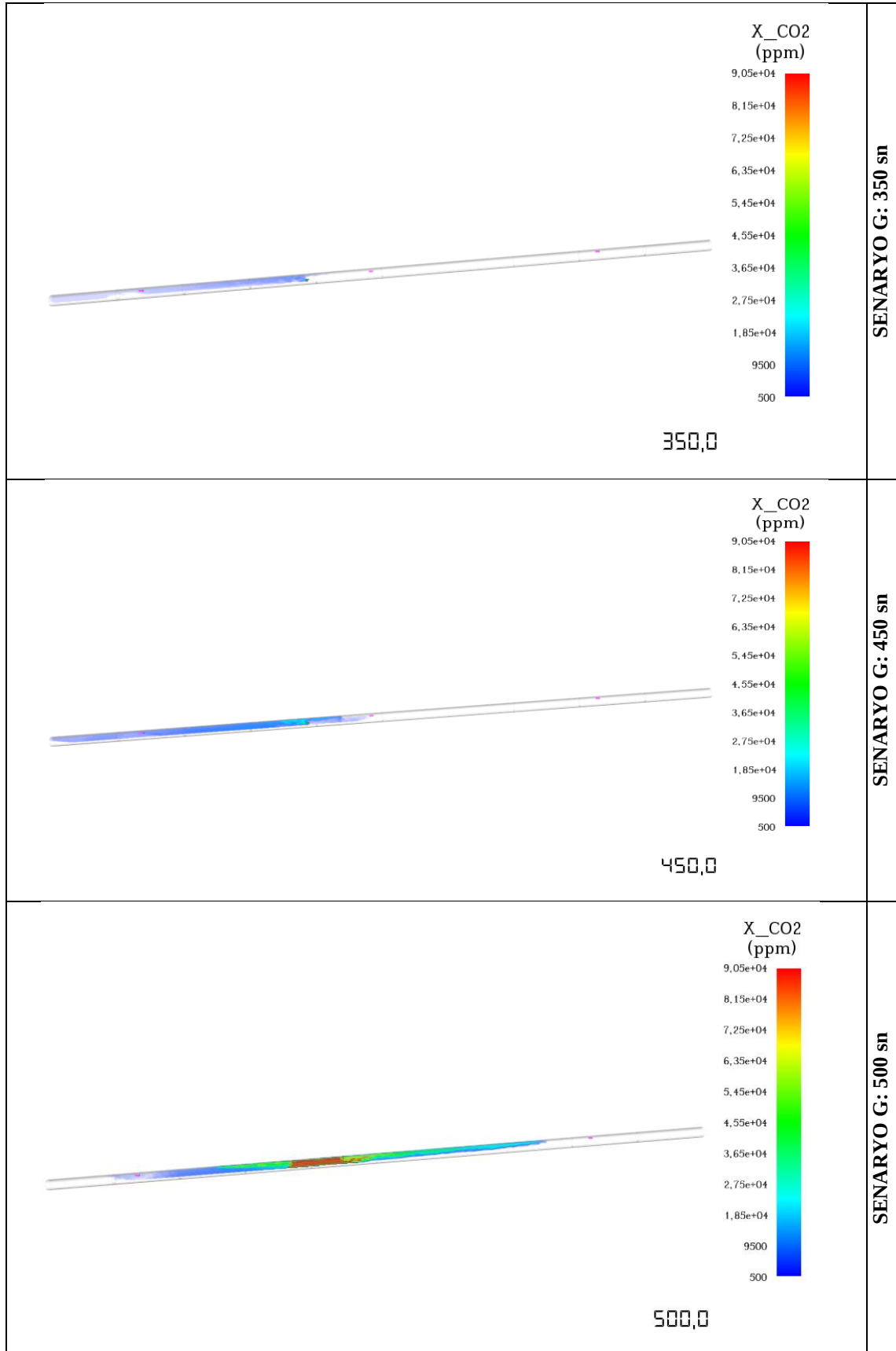
Şekil 4.46. S-F'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO₂ dağılımları



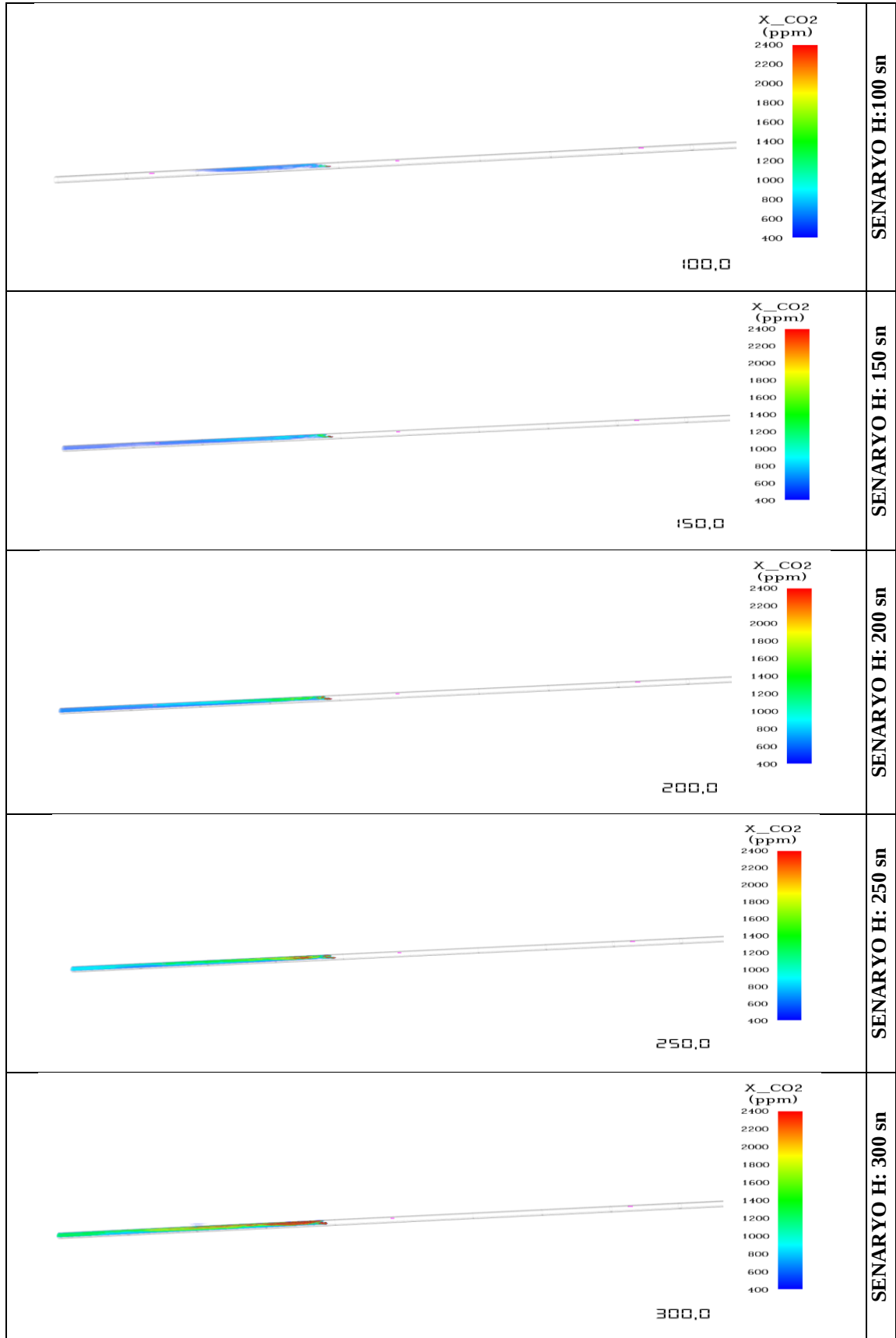
Şekil 4.46. (Devam): S-F'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO₂ dağılımları



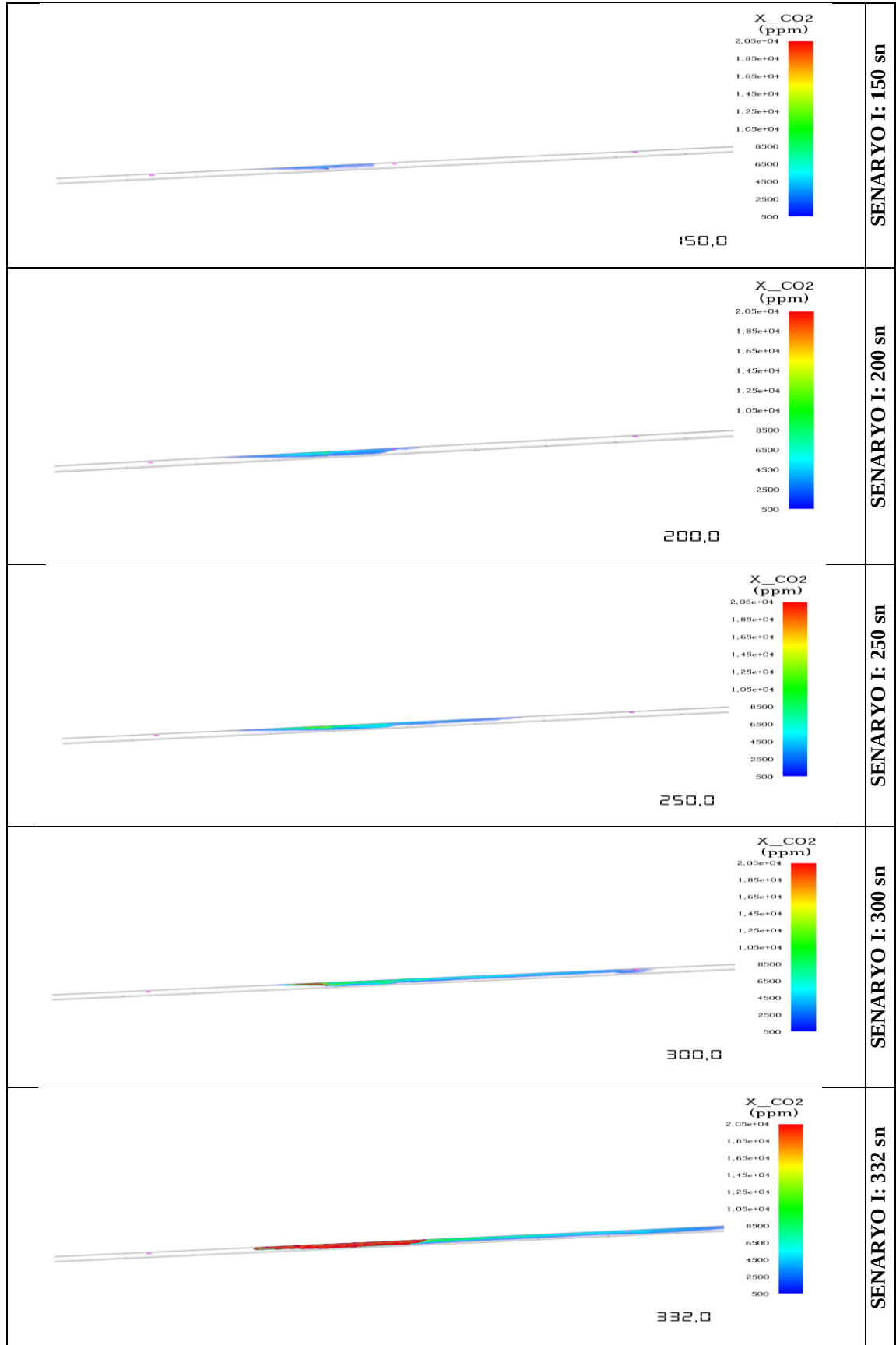
Şekil 4.47. S-G'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO₂ dağılımları



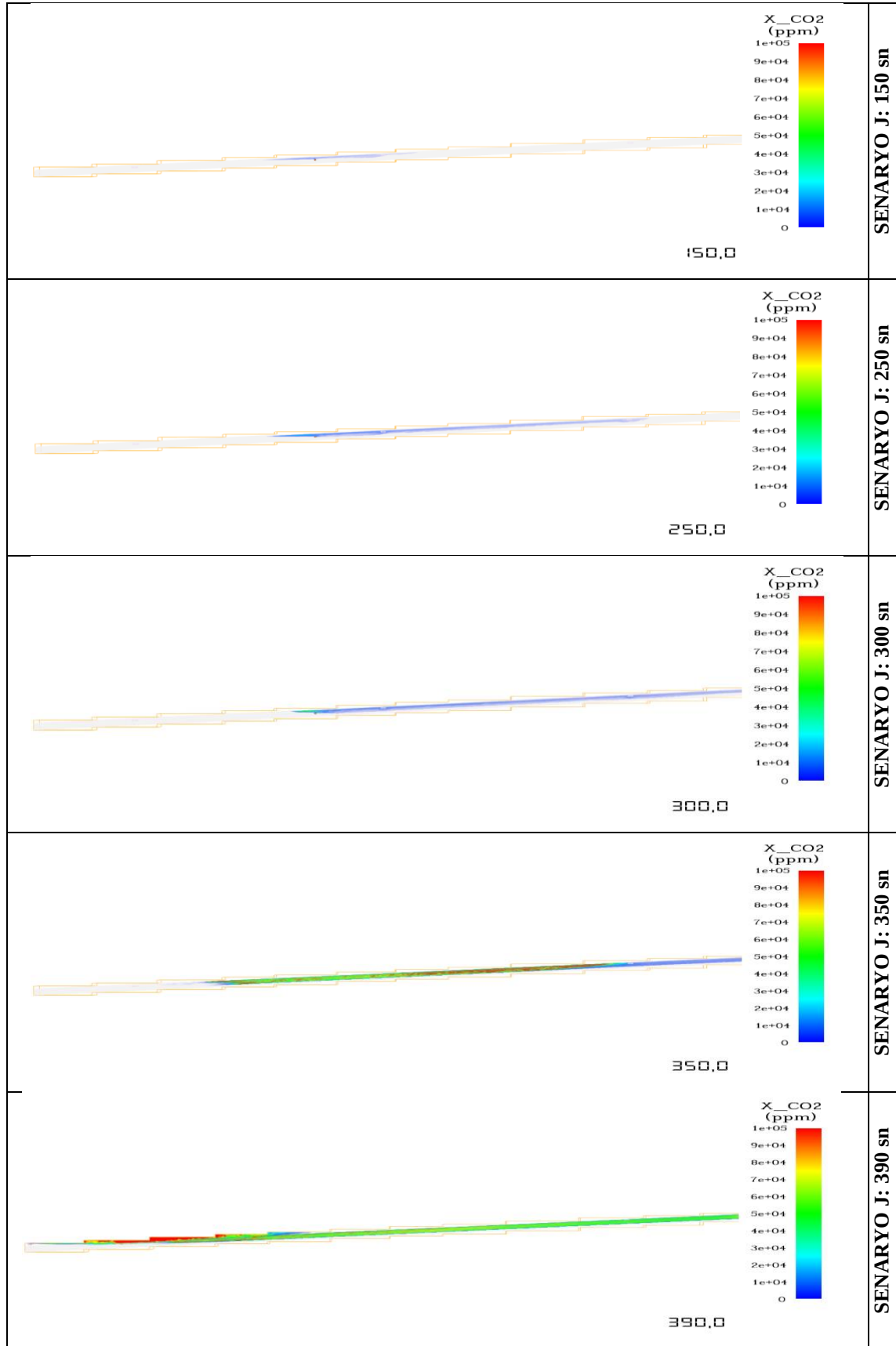
Şekil 4.47. (Devam): S-G'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO₂ dağılımları



Şekil 4.48. S-H'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO₂ dağılımları



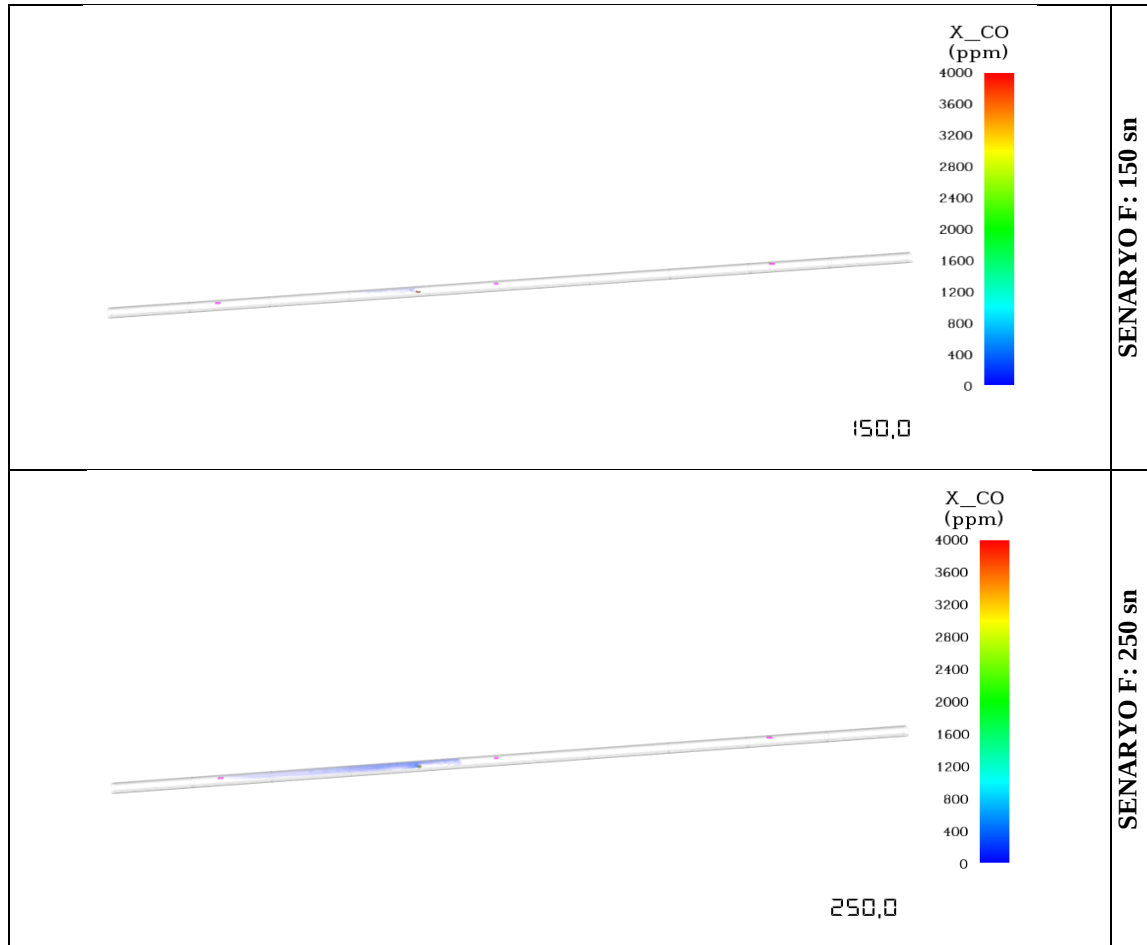
Şekil 4.49. S-I'nın belli saniyelerdeki tünel boyunca CO₂ dağılımları



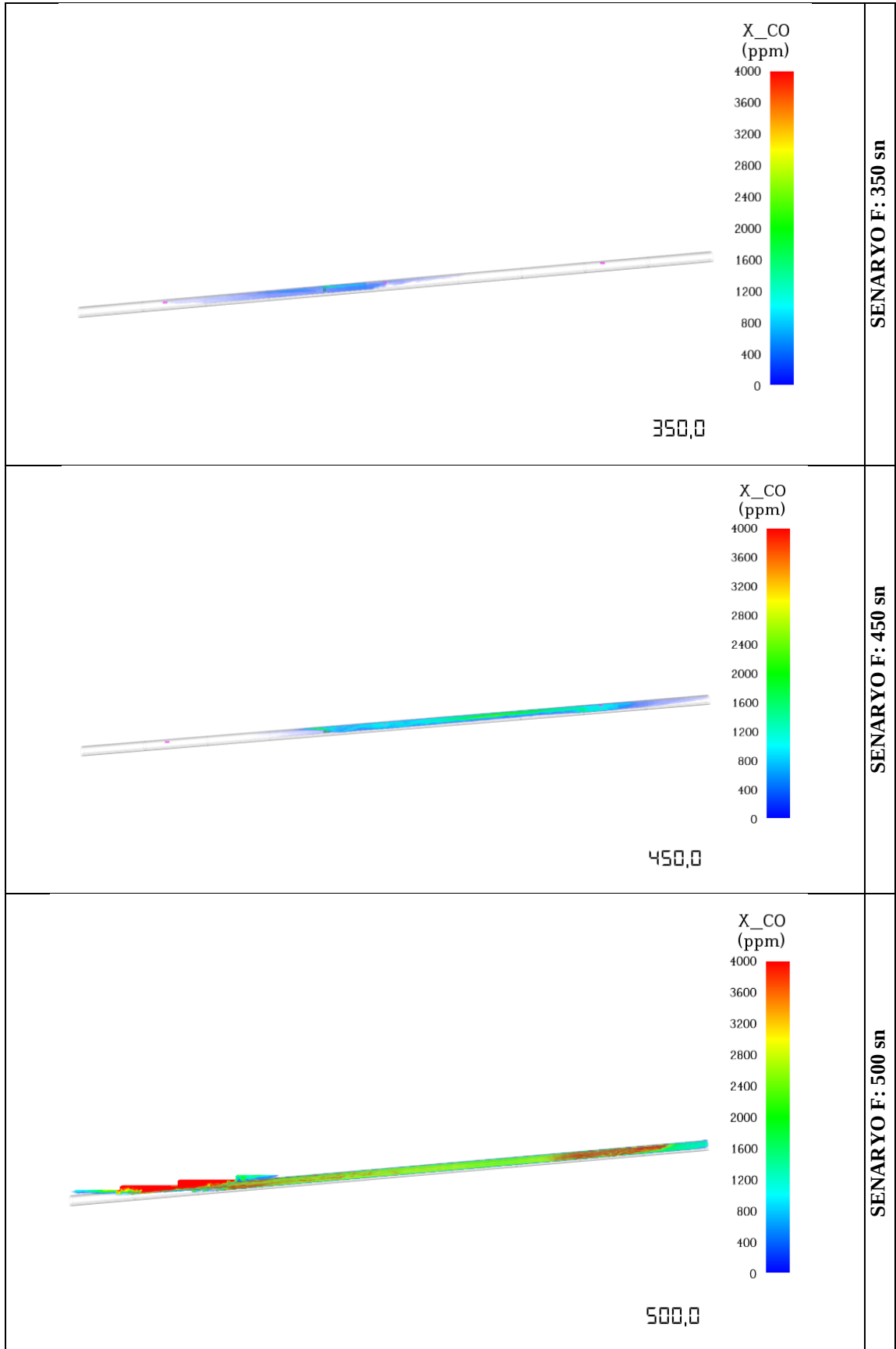
Şekil 4.50. S-J'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO₂ Dağılımları

4.2.5. Analizi Yapılan Senaryoların CO Dağılımı

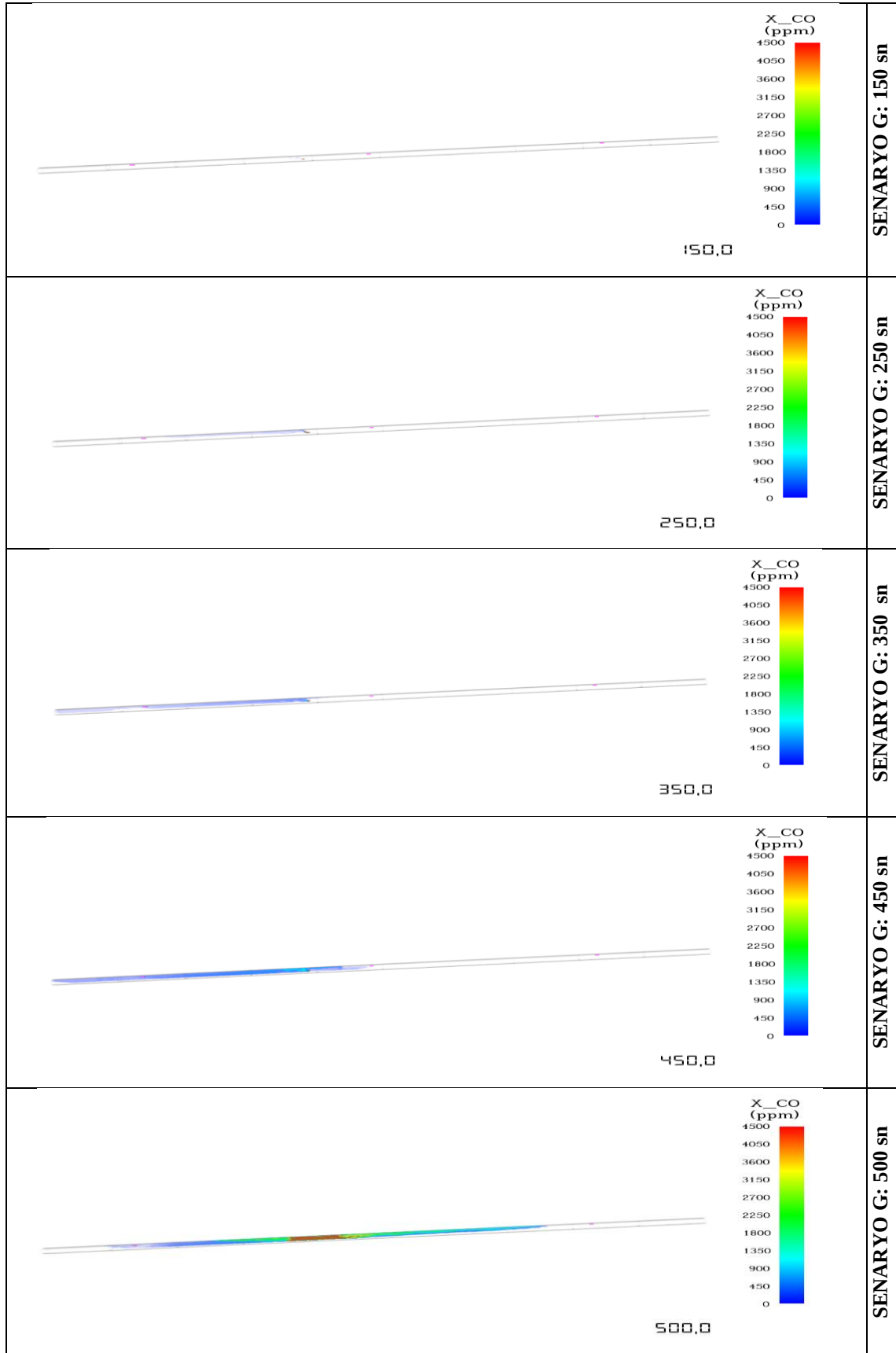
Gerçekleşen senaryoların CO için analiz sonuçlarına baktığımızda S-F 150 saniyeden 250 saniyeye kadar 400-800 ppm olmuştur. 400 saniyeden sonra 800 ppm'dir. Tünelin giriş ve çıkış ağzlarında CO miktarında artış görülmektedir. S-G de 150 saniyeden 350 saniye kadar kısımda CO miktarı 450-500 ppm ve 500 saniye geçince 4500 ppm seviyesine gelmiştir. S-H 100 saniyelerde 20-30 ppm, 150 saniyede ise yangının gerçekleştiği alanda 30-40 ppm. 300 saniyeden sonra ortamdaki ortalama CO miktarı 90-100 ppm olmuştur. S-I da 150 saniye ile 200 saniye zaman aralığında ortamda 170 ppm CO görülmektedir. 250 saniyeden sonra 255-340 ppm gelmiştir. 332 saniyelerde ise 850 ppm'e gelmiştir. S-J 150 saniyeden 300 saniye kadar zaman aralığında 1000-1500 ppm. 350 saniyeden sonra sonra flashover görüldükten sonra CO miktarı 10000 ppm olmuş ve patlama olduktan sonra CO miktarı tekrar düşüş göstererek 3000-3500 ppm olduğu Şekil 3.55 de görülmektedir.



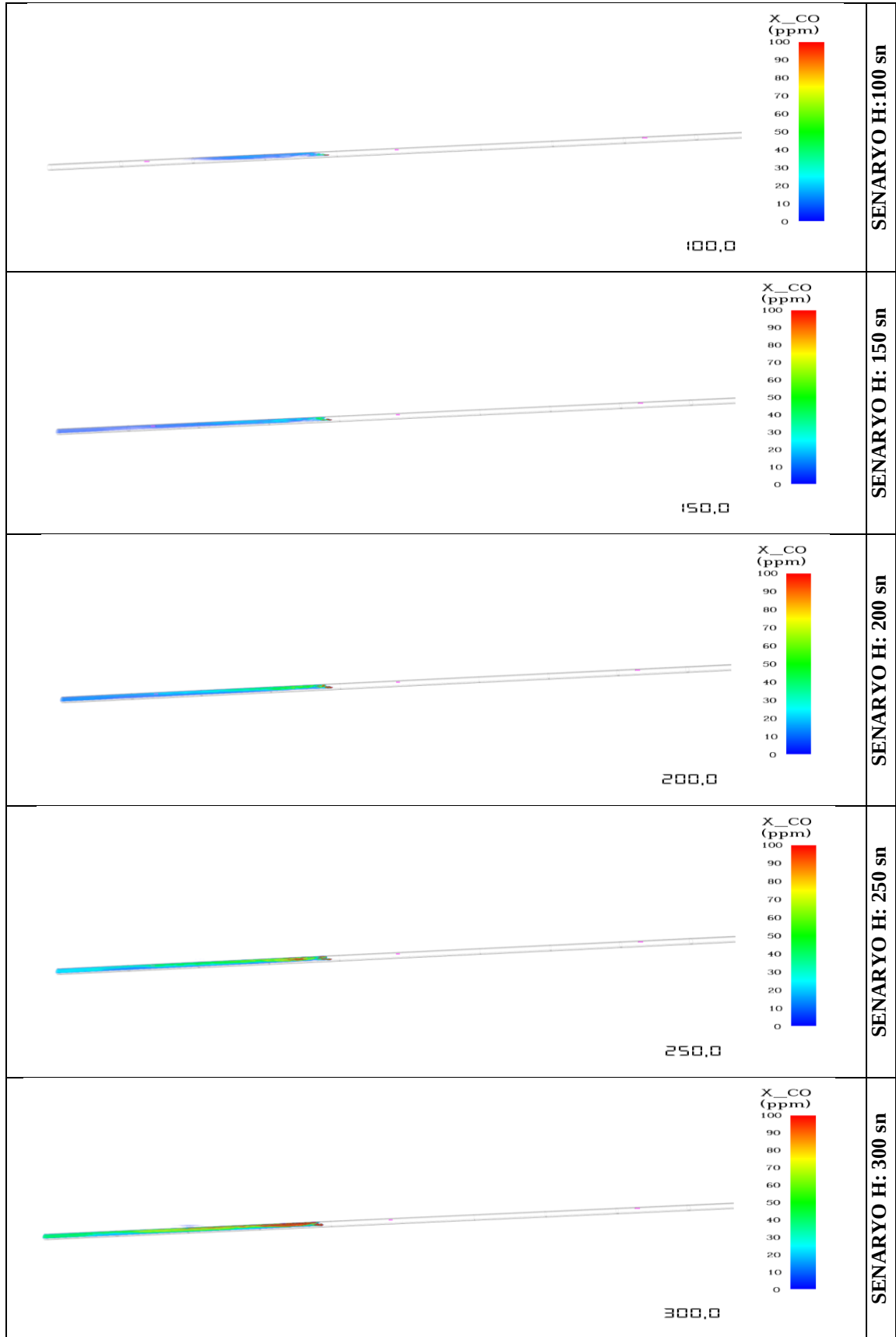
Şekil 4.51. S-F'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO dağılımları



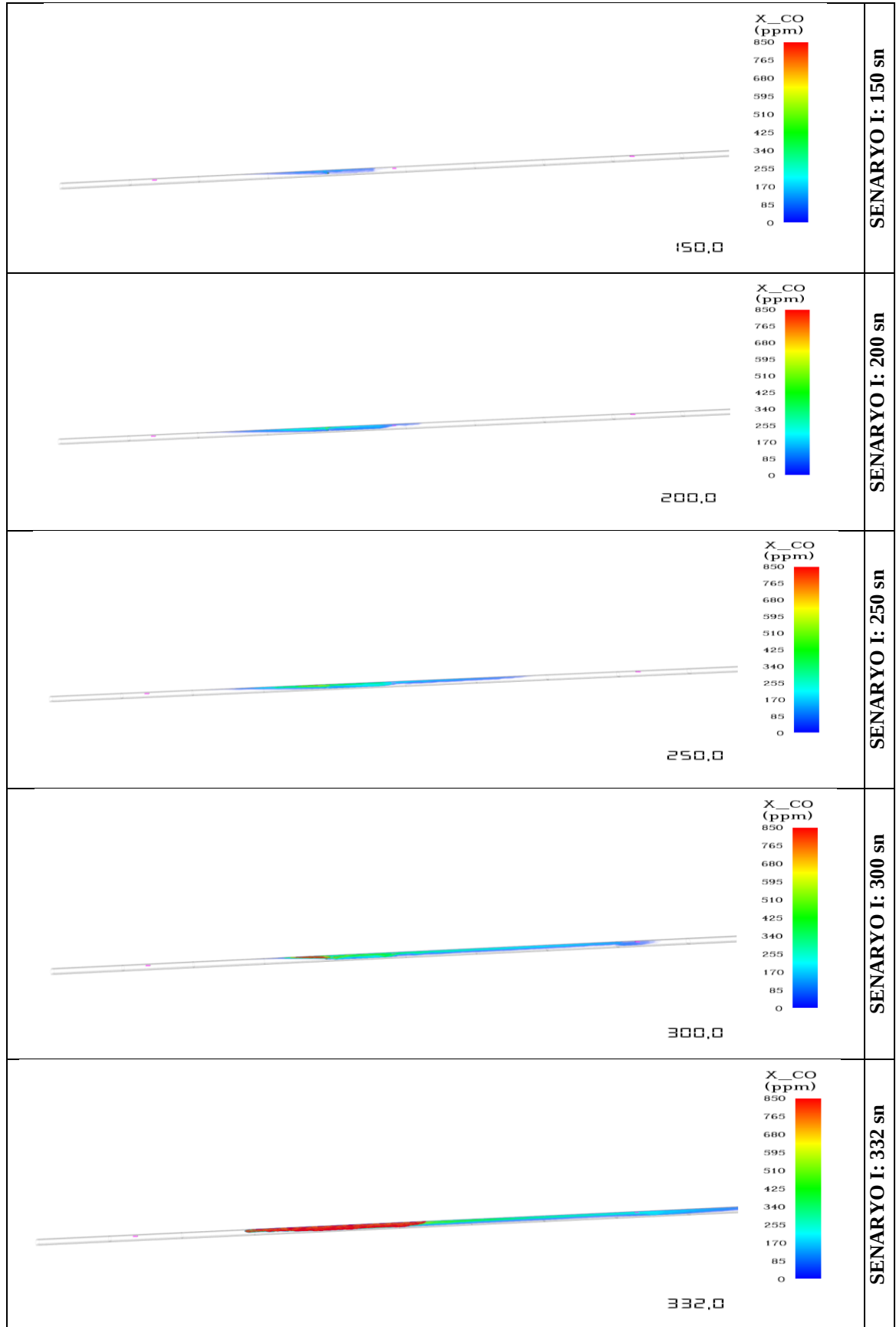
Şekil 4.51. (Devam): S-F'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO dağılımları



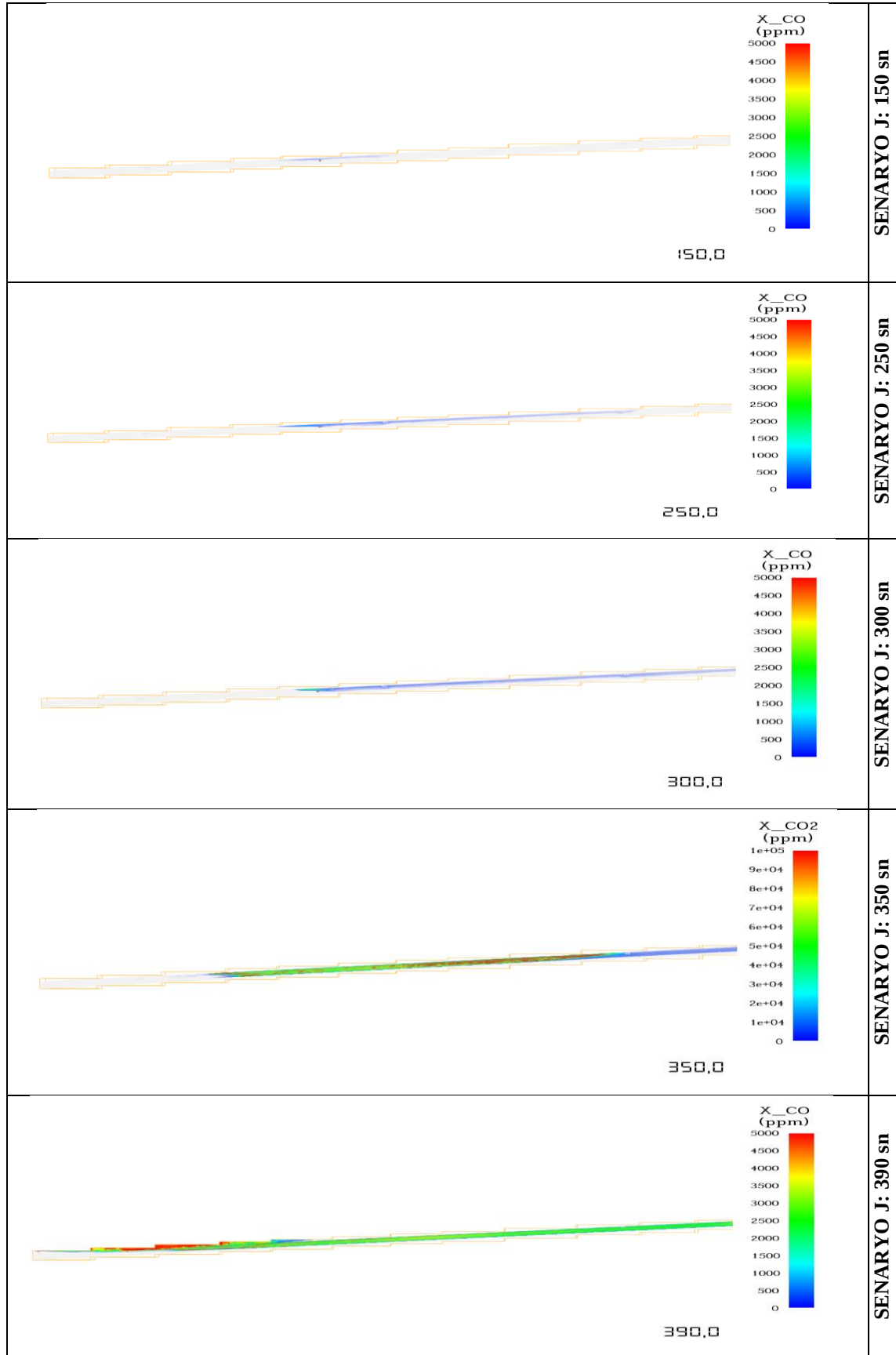
Şekil 4.52. S-G'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO dağılımları



Şekil 4.53. S-H'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO dağılımları



Şekil 4.54. S-I'nın belli saniyelerdeki tünel boyunca CO dağılımları



Şekil 4.55. S-J'nin belli saniyelerdeki tünel boyunca CO dağılımları

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tüneller yapım aşamasındayken konumunun fiziksel özellikleri tünel tekniklerini değiştirmektedir. AB standartlarını açıklayan kaynaklar bulunmasına rağmen bu bilgilerin derli toplu bir şekilde herhangi bir kaynak bulunmamaktadır. Bu çalışmada tünel için gerekli olan hesaplama yöntemlerine kolay bir şekilde ulaşabilmek için kaynak haline getirmiştir. AB standartlarına göre analiz ve hesaplama yöntemlerini referans olarak inşa edilen tüneller; tünelin güvenliği için faydalı olacaktır. Karayolları tünelleri genellikle büyük boyutlara sahiptir. Tünellerin giriş ve çıkışları atmosfere açık olduğundan meydana gelen bir yangın güvenliğini teorik ve deneysel yürütmek zordur.

Bu çalışmada inşaat halindeki Kırık Tüneli için PIARC hesaplama yöntemlerine göre 7091 m uzunluğunda, 8,57 hidrolik çapında, %-4,75 ve 66,72 m² en kesit alanına sahip çift tüplü bir tünelin havalandırması için gereken jet fan sayısı ve konumu belirlenmiştir. Ancak 709 m için tünel modellenmiştir. Ancak Tünelin çok uzun olması sebebiyle tünelin çıkış kısmında özellikle dumandan etkilenme oranı yüksek olacağından dolayı çıkış kısmının analizleri yapılmıştır. 30 MW ve 100 MW yangın durumunda oluşturacağı basınç kayıplarına göre itki kuvvetleri belirlenmiştir. Bu itki kuvvetlerine göre tüneldeki kritik hız, jet fan sayısı, konumu, debileri ve fan hızları seçilmiştir. Tünelin bir at nalı kesitinde olduğundan dolayı bir miktar basınç kaybı oluşmuştur. Seçim tablosundaki debileri %50 ve %75 azaltarak havalandırma sisteminin performansı incelenmiştir. CO, CO₂, hız, görünürlük ve sıcaklık için PyroSim yazılımı ile analiz yapılmış sonuçlar değerlendirilip yorumlamıştır. Tünel içerisinde hareket halinde araç olması piston etkisiyle dumanın tahliyesi için ek bir kaynak olmaktadır. Jet fanlardan dolayı da basınç kaybı meydana gelmektedir. Bu basınç kaybı tünelde montajı yapılacak jet fana göre değişiklik göstermektedir. İmalı yapılan fan tünel için gerekli temiz havayı sağlamalı ve basınç kayıplarını yenebilmelidir. Aksi olduğunda yangın durumunda güvenli bir ortam sağlanamaz ve duman tahliyesi gerçekleşmemektedir. Havalandırma sisteminin belirlenen performans kriterlerini sağlaması gerekir yoksa yangın gibi acil bir durumda tünel yapısına ve kullanıcı için tehlikeler oluşturmaktadır. Yangın analiz sonuçları için fan

debisinin yetersiz olması tünelde çıkan bir yangın sonucunda sıcak gazların bütün tüneli kapladığı, bu durumun kaçışı zorladığı ve müdahale şansı vermediği anlaşılmaktadır. Bu durum yangın kayıplarının ilk dakikalarda ve zehirlenmelerden meydana geldiği düşünülürse önlem alınması gereken bir durumdur. Fan debisi arttığında kaçış yollarında duman yoğunluğunun azaldığı ve can kaybı riskini azaltılmıştır. Çıkan yangın büyüklüğü ve duman miktarı farklı değişkene bağlıdır. Bu sebeple fan seçiminin oldukça spesifik bir konu durumuna geleceğinden her yapıda çıkabilecek yangında yangın gücüne, duman miktarına bağlı olarak analizler yapılmalı ve buna göre fan seçimi yapılması gerektiği anlaşılmaktadır. Böyle bir sistemin hesaplanması ve analizi meşakkatli ve zaman alıcı olarak görülebilir fakat tünelin büyük yangın güçlerine güvenli bir ortam oluşturulması var olan sistemlere entegre edilmesi gerekmektedir. Yukarıda bahsi ettiğimiz tüneli deneysel olarak hesaplamak için uzun bir süreç ve yüksek maliyetler ortaya çıkmaktadır. Buradaki çalışmada amaç bir tünelin hesabı değil sadece bir tünelin hesaplama yöntemlerini tek bir kaynak haline getirmek ve belirlediğimiz senaryolara göre analiz yapmaktır. Böyle bir çalışmada analiz değerlendirildiğinde %50 ve %75 debilerini azalttığımız analizler tahliye sağlamamaktadır ve piston baca etkisiyle tünelin pozitif eğimli tarafa doğru yönelmiştir. Sonuç olarak baktığımızda yangın ısı yayılım oranı arttığında ve jet fanın debisinin azaldığı senaryolarda yayılım ile tünel içindeki yangının büyür. Büyüyen yangın zamanla ortam sıcaklığının artışına neden olur ve ısı birikir yeterli enerji çıktığında flashover meydana getirdiği görülmüştür ve bu ortamdaki sıcaklık 600 C° üstüne çıkmaktadır. Senaryo I'da 332 saniyede, Senaryo J'de 330 saniyede ve Senaryo F'de ise 465 saniyelerde flashover oluştuğunu analiz ve grafiklere baktığımızda anlaşılmaktadır. Ayrıca flashover olduğu andaki saniyelerde Pyrosim yazılımı hata vermektedir. Flashover noktasına gelmeden önce tünel içinde biriken zehirli duman gazlarını ters yöne göndermek için tünel içindeki jet fanlar ters çalıştırılmalıdır. Buradaki taktiklerden bir diğeri de büyüme safhasındaki yangınları acil bir şekilde soğutmaktır.

Yapım aşamasında olan bir tüneli detaylı bir şekilde inceleyip ve yorumlamak biraz güvenli sonuçlar doğurduğu söylenemez. İlerdeki dönemlerde tünelin bitmiş verilerini elde ederek daha sağlıklı sonuçlar ve analizler yapılabilir. Bundan sonraki çalışmalarda, tünelin trafik durumu, araçların ortalama sayısı, tünelin tehlikeli madde taşımacılığına izin verilip verilmediği vb. diğer durumlar göz önüne alınarak çalışmalar yapılması faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

Alhazmy, M. ve Borat, O. (2003, Ağustos). A Mathematical Model For Monitoring Pollutants Levels Inside Road Tunnels. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Ankara, Türkiye.

Altay, M. (2016). Tünel yangınlarının modellenmesi ve etkin parametrelerin modellemedeki gerçekliğinin incelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi).

Atkinson, G.T. and Wu, Y. (1996). Smoke Control in Sloping Tunnels. Fire Safety Journal, 27, 335-341.

Aydın, M. M., Çoruh, E., ve Kalkan, H. (2020). Farklı Karayolu Tünellerinin Tünel Özellikleri ve Sürücü Davranışları Açısından İrdelenmesi. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 7(3), 1258-1274.

Bickel, O. J., Kuesel, R. T., King, H., and See, L. (1995). Tunnel Engineering Handbook Second Edition. Newyork, International Thomson Publishing Company, Chapman & Hall.

Bilgin, F. (2014). Karayolu Tünellerinde Araç Emisyonları Havalandırma ve Yangın Önleme Esasları. (Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi).

Bulut, H. (2011). Havalandırma ve iç hava kalitesi açısından CO2 miktarının analizi. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 13, 16.

Caliendo, C., Ciambelli, P., De Guglielmo, M. L., Meo, M. G. and Russo, P. (2012). Numerical simulation of different HGV fire scenarios in curved bi-directional road tunnels and safety evaluation. Tunnelling and Underground Space Technology, 31, 33-50.

Cheong, M. K., Spearpoint, M. J., and Fleischmann, C. M. (2009). Calibrating and FDS Simulation of Goods-vehicle Fire Growth in a Tunnel Using the Runehammar Experiment. Fire Safety Journal, 35(4), 363-390.

Coşkun, G., Demir, U., ve Soyhan, H. S. (2018). Sakarya Üniversitesi M-7 binası için yangın simülasyonu ve duman tahliye stratejilerinin incelenmesi. Sakarya University Journal of Science, 22(2), 135-149.

Çelik, A. (2011). Numerical And Experimental Study On Fire In Tunnels (Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi).

Dinler, N. ve Kaçan, Ö. (2020). Uzun Bir Karayolu Tünelinde Acil Durum Simülasyonu. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 40(2), 319-334.

- Eftekharian, E., Dastan, A., Abouali, O., Meigolinedjad, J., and Ahmadi, G. (2014). A numerical investigation into the performance of two types of jet fans in ventilation of an urban tunnel under traffic jam condition. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 44, 56-67.
- Fan, C. G., Ji, J., Gao, Z. H., and Sun, J. H. (2013). Experimental study on transverse smoke temperature distribution in road tunnel fires. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37, 89-95.
- Forney, G. P. and Smokeview, A. (2016). Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume I: User's Guide, Sixth Edition, NIST Special Publication 1017-1, USA.
- Gültek, A. S. (2017). Tünel Yangınlarında Sıcaklık Değişiminin Bir Model Üzerinde Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi. (Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi).
- He, L., Xu, Z., Markert, F., Zhao, J., Xie, E., Liu, Q., and Fan, C. (2021). Ceiling jet velocity during the whole process of fire development in a tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 212(2021), 104588.
- Hu, L. H., Huo, R., Wang, H. B., Li, Y. Z., and Yang, R. X. (2007). Experimental Studies On Fire-Induced Buoyant Smoke Temperature Distribution Along Tunnel Ceiling. *Building and Environment*, 42(11), 3905-3915.
- Ingason, H., Li, Y.Z., & Lönnemark, A. (2014). Tunnel fire Dynamics. Newyork, Springer
- Karaaslan, S., Hepkaya, E., ve Yücel, N. (2011). Ölçeklendirilmiş Bir Tünelde Eksenel Havalandırma Sisteminin CFD Simülasyonu. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 33(1), 63-77.
- Karaca, A., Şenol, A., Denizli, F., Çiçek, M., ve Derman, Y. (2013). Erzurum hava kalitesi değerlendirme raporu, Erzurum Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- Karakaş, T. (2011). Tünellerin Havalandırma Sistemleri Ve Bolu Tüneli Uygulaması (Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi).
- Karayolları Genel Müdürlüğü (2022, Temmuz). 2022 Yılı Kurumsal Mali Durum ve Beklentileri Raporu, Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı.
- Kashef, A., Saber, H. H., and Gao L. (2009). Optimization of Emergency Ventilation Strategies in a Curved Section of a Road Tunnel. *National Republican Congressional Committee (NRCC)*, 51289, 11.
- Kayadan, B. (2013). Karayolu Tünellerinde Havalandırma Planlaması Ve Performans Değerlendirmesi (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi).
- Kayılı, S., Köktürk, T., ve Eralp, O. C. (2010). Tünel yangınlarının ve yangın güvenliği için kullanılan havalandırma sistemlerini özellikleri. *Mühendis ve Makine*, 51(604), 3-8.

Khandoker, M. A. R., Mou, R. J., Muntaha, M. A., and Rahman, M. A. (2018). Numerical simulation of fire in a multistoried ready-made garments factory using Pyrosim. AIP Conference Proceeding of the International Conference on Mechanical Engineering, AIP Publishing LLC.

Kurioka, H., Oka, Y., Satoh, H., and Sugawa, O. (2003). Fire Properties in Near Field of Square Fire Source with Longitudinal Ventilation in Tunnels. *Fire Safety Journal*, 38(4), 319-340.

Lee, S. R. and Ryou, H. S. (2005). An Experimental Study of the Effect of the Aspect Ratio on the Critical Velocity in Longitudinal Ventilation Tunnel Fires. *Journal of Fire Sciences*, 23, 119-138.

Musto, M. and Rotondo, G. (2014). Numerical comparison of performance between traditional and alternative jet fans in tiled tunnel in emergency ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 42, 52-58.

NFPA, (2017). NFPA 502: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways. 2017 Edition, NFPA (National Fire Protection Association), Massachusetts, USA.

Oka, Y. and Atkinson, G. T. (1995). Control of smoke flow in tunnel fires. *Fire Safety Journal*, 25(4), 305-322.

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

PIARC World Road Association. (1999). Fire and Smoke Control in Road Tunnels 05.05.B, France. PIARC Committee on Road Tunnels (C5).

PIARC World Road Association. (2004). Road tunnels: Vehicle Emissions and air quality impact upon the environment. France. PIARC Technical Committee on Road Tunnel Operations (C5).

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

To, H. R. and Barker, M. M. (2001). White paper European transport policy for 2010: time to decide. Commission of the European Communities Brussels.

URL 1: <http://trafik.gov.tr/kurumlar/trafik.gov.tr/04-Istatistik/Aylik/aralik22.pdf> (erişim tarihi: 06.12.2022)

URL 2: <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Istatistikler/SanatYapilariBakimOnarimIsletmeBilgileri.aspx> (erişim tarihi: 05.03.2022)

URL 3: <https://www.sondakikarize.com/haber/2015de-delinmeye-baslanan-kirikta-is-2-senedir-durmus-2977> (erişim tarihi: 05.06.2022)

URL 4: https://www.meteoblue.com/tr/hava/outdoorsports/airquality/erzurum_t%c3%bcrkiye_315368 (erişim tarihi: 12.09.2022)

URL 5: https://www.meteoblue.com/tr/hava/outdoorsports/airquality/rize_t%c3%bcrkiye_740483 (erişim tarihi: 08.10.2022)

Vauquelin, O. and Wu, Y. (2006) Influence of Tunnel Width on Longitudinal Smoke Control. *Fire Safety Journal*, 41(6), 420-426.

Wang, F., Wang, M., He, S., Zhang, J., and Deng, Y. (2010). Computational study of effects of jet fans on the ventilation of a highway curved tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 382–390.

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

Yu, Y., Chu, Y. Y., Zhang, Q. X., and Liang, D. (2014). Numerical Study on Smoke Exhaust in Large-Scale Underground Public. *7th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, IEEE.