



**UZUN BİR KARAYOLU TÜNELİNDE HAVALANDIRMA SİSTEMİ
TASARIMI VE YANGIN SİMÜLASYONU**

Özkan KAÇAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2019

Özkan Kaçan tarafından hazırlanan “UZUN BİR KARAYOLU TÜNELİNDE HAVALANDIRMA SİSTEMİ TASARIMI VE YANGIN SİMÜLASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nureddin DİNLER

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Başkan: Prof. Dr. Haşmet TÜRKOĞLU

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Çankaya Üniversitesi

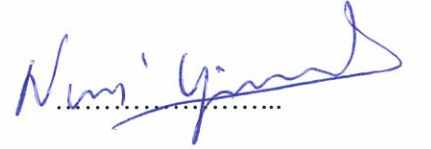
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Prof. Dr. Nuri YÜCEL

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 06/08/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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



Özkan KAÇAN

06/08/2019

UZUN BİR KARAYOLU TÜNELİNDE HAVALANDIRMA SİSTEMİ TASARIMI VE
YANGIN SİMÜLASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)

Özkan KAÇAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2019

ÖZET

Ülkemizde karayolu taşımacılığında tüneller önemini her geçen gün arttırmaktadır. Karayolu tünel yangınlarıyla ilgili; kritik hız kavramı, geri katmanlaşma, maksimum duman sıcaklığı, tünel içerisindeki araçların blokaj etkileri, tünel kesitinin etkileri (en, boy, hidrolik çap, kavis vb.), yanan araç türünün etkileri, atmosferik koşulların etkisi ve son zamanlarda da yangın önleme sistemlerinin etkinliği (su sisi ve sulu yangın önleme sistemleri vb.) üzerine bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, literatür çalışmalarından faydalanılarak, karma havalandırma sisteminin uygulandığı 14,5 km uzunluğunda, çift tüpten oluşan, 3 adet tahliye shaftı bulunan, eğimli gerçek bir karayolu tünelinin havalandırma sistemi tasarımı yapılmıştır. Havalandırma sisteminin seçiminde etkili olan tüm parametreler kullanılarak normal ve acil durum işletme koşulları tasarlanmıştır. Yangın durumuna göre en kritik bölge seçilerek Ansys/Fluent yazılımıyla analiz edilmiştir. Yangın düzeneği kurarak tünel içerisindeki duman gelişimine bağlı fiziksel ve kimyasal süreçleri (türbülans, yanma, radyasyon vb.) incelemek ve analiz etmek hem çok uzun süre hem de oldukça yüksek maliyetler getirmektedir. Ansys/Fluent yazılımı ile temel enerji denklemleri (enerji, momentum, kütle, tür) çözülerek türbülans, yüzdürme, yanma gibi karmaşık süreçler tanımlanmıştır. Yangın durumunda kararlı ve kararsız analizler yapılarak gaz sıcaklıkları, hava akış hızı, görüş mesafesi, zehirli gaz konsantrasyonları ve insanların tahliye işlemleri gibi süreçleri etkin bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu çalışma ile gerçek bir karayolu tüneline; havalandırma sistemi nasıl tasarlanır, etkili parametreler nelerdir, normal ve acil durum havalandırma hesapları nasıl yapılır, fan yerleşimi nasıl olur, yangın yükü nasıl tespit edilir, tünel içerisindeki en kritik bölgenin tespiti nasıl yapılır, sıcak gazların yayılması ve tünel boyunca duman tahliyesi ne şekilde olur, havalandırma sistemi ekipmanları nasıl seçilmelidir, tünel yangını analiz programlarında nasıl modellenmelidir ve sınır değerler nasıl seçilmelidir sorularına yanıt verebilecek bir kaynak oluşturulması hedeflenmiştir. Bulunan analitik ve nümerik sonuçların birbirine uyumlu olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 91411

Anahtar Kelimeler : CFD, Fluent, Karayolu tüneli, Tünel yangını

Sayfa Adedi : 246

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Nureddin DİNLER

VENTILATION SYSTEM DESIGN AND FIRE SIMULATION
IN A LONG ROADWAY TUNNEL

(M. Sc. Thesis)

Özkan KAÇAN

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2019

ABSTRACT

The importance of tunnels in roadway transport increases day by day in our country. Related to highway tunnel fires; critical speed concept, back-layering, maximum smoke temperature, blockages effects of vehicles in tunnel, effects of tunnel cross section, effects of burning vehicle type, effects of atmospheric conditions and, more recently, the effectiveness of fire prevention systems have been carried out. In this study, based on the literature studies, the results of the fire ventilation system was designed and numerically one dimensional in case of a tilted real road tunnel with 3 ventilation shafts of 14.5 km long, double tubes, in which mixed ventilation system is applied, were compared with the three dimensional results obtained by using Ansys/Fluent software. Surveying and analyzing physical and chemical processes (turbulence, combustion, radiation etc.) depending the development of smoke in tunnel within the by establishing a real-sized fire mechanism can provide the most accurate data. However, the installation of these mechanisms requires both a very long time and a very high cost. On a small scale, experimental setups may generally not reproduce full-scale features. Today, computer simulations are more widely applied to demonstrate fluid behavior and to measure its effects. With the help of computational fluid dynamics (CFD) programs, results are evaluated more effectively by using many detailed data that can not be accessed with any of the other two approaches, compared to full-scale and small-scale studies. In this study, basic energy equations (energy, momentum, mass, species) were solved with Ansys/Fluent software and complex processes such as turbulence, flotation, combustion were defined. The relationship between the gas temperatures of the smoke resulting from the fire, air flow rate, visibility distance in the tunnel, toxic gas concentrations and evacuation procedures of people were evaluated. In a real highway tunnel; it is aimed to establish a resource on fire load detection, selection of critical zone, dissemination of hot gases and smoke evacuation through tunnel and use of scale model in CFD software. The analytical and numerical results were found to be compatible with each other.

Science Code : 91411

Key Words : CFD, Fluent, Roadway tunnel, Tunnel fires

Page Number : 246

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Nureddin DİNLER

TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanma sürecimde benden yardımlarını ve değerli fikirlerini esirgemeyen kıymetli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Nureddin DİNLER'e, bu aşamaya ulaşmamda desteğini esirgemeyen eşim Mehtap KAÇAN'a ve çalışmalarımın envanterinden ve tecrübelerinden faydalandığım kurumum, Karayolları Genel Müdürlüğüne çok teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ	1
2. KARAYOLU TÜNELLERİNDE HAVALANDIRMA SİSTEMLERİ VE TASARIM KRİTERLERİ	13
2.1. Karayolu Tünellerinde Uygulanan Havalandırma Sistemleri	13
2.1.1. Doğal havalandırma	13
2.1.2. Mekanik havalandırma	14
2.2. Karayolu Tünellerinde Havalandırma Sisteminin Belirlenmesi.....	17
2.2.1. Karayolu tünellerinde emisyon hesapları ve taze hava gereksiniminin belirlenmesi.....	18
2.2.2. Karayolu tünellerinde yangın tasarımı özelliklerinin belirlenmesi.....	24
3. TÜNEL HAVALANDIRMA SİSTEMİ HESAPLAMALARI	33
3.1. Tünelin Teknik Özellikleri	33
3.2. Emisyon ve Görüşe Göre Taze Hava Gereksiniminin Belirlenmesi	36
3.3. Acil Durum Havalandırma Sistemi (Yangın).....	52
3.3.1. Yangın yükünün seçilmesi.....	52
3.3.2. Kritik hız ve sıcaklığın bulunması	53
3.3.3. Acil durum senaryoları	56

	Sayfa
4. ACİL DURUM SENARYOLARI 3D SAYISAL ANALİZLERİ	81
4.1. Tünel Geometrisi Ve Ölçek Model Kullanımı	81
4.2. Temel Sınır Koşullarının Belirlenmesi Ve Mesh Yapısı Seçimi.....	83
4.3. Zamandan Bağımsız Analizler ve Sonuçları	90
4.4. Zamana Bağlı Analizler ve Sonuçları	107
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	135
KAYNAKLAR	137
EKLER	143
EK-1. KGM'den alınan 2045 yılı tahmini YOGT verileri	144
EK-2. Jet fanların yerleşimi	145
EK-3. Batı tüpü 1 (BT_1) bölümü emisyon hesapları.....	146
EK-4. Batı tüpü 2 (BT_2) bölümü emisyon hesapları.....	156
EK-5. Batı tüpü 3, pozitif eğim (BT_2.1) bölümü emisyon hesapları.....	166
EK-6. Batı tüpü 3, negatif eğim (BT_2.2) bölümü emisyon hesapları	176
EK-7. Batı tüpü 4, (BT_4) bölümü emisyon hesapları.....	186
EK-8. Doğu tüpü 1, (DT_1) bölümü emisyon hesapları	196
EK-9. Doğu tüpü 2, pozitif eğim (DT_2.1) bölümü emisyon hesapları	206
EK-10. Doğu tüpü 2, negatif eğim (DT_2.2) bölümü emisyon hesapları.....	216
EK-11. Doğu tüpü 3, (DT_3) bölümü emisyon hesapları	226
EK-12. Doğu tüpü 4, (DT_4) bölümü emisyon hesapları	236
ÖZGEÇMİŞ	246

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. AB direktifine göre altyapı için getirilen asgari gereksinimlerin özeti	3
Çizelge 2.1. Yarı-enine, enine ve karma havalandırma kullanılan bazı tüneller	17
Çizelge 2.2. Hıza ve yol tipine bağlı pik trafik verileri.....	20
Çizelge 2.3. CO ve görüş mesafesi için tasarım eşik değerleri	21
Çizelge 2.4. Yangın testleri sonuçları özeti.....	26
Çizelge 3.1. Tünele ait fiziksel özellikler	35
Çizelge 3.2. Trafik verileri	36
Çizelge 3.3. Otomobiller için zaman faktörü seçim tablosu.....	38
Çizelge 3.4. Hafif yük taşıyan araçlar için zaman faktörü seçim tablosu	38
Çizelge 3.5. Ağır yük taşıyan araçlar için zaman faktörü seçim tablosu	38
Çizelge 3.6. Otomobiller ve hafif yük taşıtları için yükseklik faktörü seçim tablosu....	39
Çizelge 3.7. Araç ağırlığına bağlı faktör seçim tablosu	39
Çizelge 3.8. Araç türü ve kullandığı yakıta göre seçilen zaman faktörü sayıları	40
Çizelge 3.9. Birim araç başına, hıza göre egzoz kaynaklı olmayan partikül madde emisy on miktarları seçim tablosu	40
Çizelge 3.10. %3,3 eğimde ve 20 km/h trafik hızında BT_1 bölümünde araç türüne göre birim egzoz kaynaklı emisyon miktarları ($G_{cat} \cdot f_a \cdot f_t \cdot f_m$) özet tablosu.....	41
Çizelge 3.11. %3,3 eğimde ve 20 km/h trafik hızında BT_1 bölümünde araç türüne göre birim emisyon miktarları (G_e) özet tablosu.....	42
Çizelge 3.12. %3,3 eğimde ve 20 km/h trafik hızında BT_1 bölümünde araç türüne göre toplam emisyon miktarları (G_{tun}) özet tablosu	42
Çizelge 3.13. Batı tüpü kritik emisyon miktarları hesabı (M^*) özet tablosu	44
Çizelge 3.14. Doğu tüpü kritik emisyon miktarları hesabı (M^*) özet tablosu	44
Çizelge 3.15. Jet fan özellikleri	45
Çizelge 3.16. Batı tüpü fan sayısı belirleme	46

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.17. Doğu tüpü fan sayısı belirleme	46
Çizelge 3.18. Farklı ülkelerin yangın tasarım yük ve kriterleri özeti.....	52
Çizelge 3.19. Pozitif eğim kritik hız hesabında kullanılan değerler	54
Çizelge 3.20. Pozitif eğim kritik hız ve sıcaklık değerleri iterasyonları	54
Çizelge 3.21. Eğimin -0,85% olduğu kısımda kritik hız hesabında kullanılan değerler	54
Çizelge 3.22. Eğimin -0,85% olduğu kısımda kritik hız ve sıcaklık değerleri iterasyonları	55
Çizelge 3.23. Eğimin -3,3 % olduğu kısımda kritik hız hesabında kullanılan değerler	55
Çizelge 3.24. Eğimin -3,3% olduğu kısımda kritik hız ve sıcaklık değerleri iterasyonları.....	55
Çizelge 3.25. Basınç kayıpları hesaplarında kullanılan değerler	58
Çizelge 3.26. Pozitif eğimde kritik hız ve sıcaklığa bağlı özelliklerin mesafeye göre değişimi.....	60
Çizelge 3.27. % -0,85 eğimde, kritik hız ve sıcaklığa bağlı özelliklerin mesafeye göre değişimi	60
Çizelge 3.28. % -3,3 eğimde, kritik hız ve sıcaklığa bağlı özelliklerin mesafeye göre değişimi	60
Çizelge 3.29. BT_1 bölümünde 500 m’de yangın durumunda şafta kadar çalıştırılan fanlar (u=3 m/s).....	64
Çizelge 3.30. BT_1 bölümünde 500 m’de yangın durumunda şaft-çıkış portalı arasında çalıştırılan fanlar (u=1 m/s).....	64
Çizelge 3.31. BT_1 lokasyonunda yangın durumu hesap özeti.....	65
Çizelge 3.32. BT_2 lokasyonunda yangın durumu hesap özeti.....	66
Çizelge 3.33. BT_3 lokasyonunda yangın durumu hesap özeti.....	67
Çizelge 3.34. BT_4 lokasyonunda yangın durumu hesap özeti.....	68
Çizelge 3.35. DT_1 lokasyonunda yangın durumu hesap özeti	69
Çizelge 3.36. DT_2 lokasyonunda yangın durumu hesap özeti	70

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.37. DT_3 lokasyonunda yangın durumu hesap özeti	71
Çizelge 3.38. DT_4 lokasyonunda yangın durumu hesap özeti	72
Çizelge 4.1. Froude ölçek model sisteminde kullanılan korelasyonlara örnekler	82
Çizelge 4.2. Tünelin ve kullanılan ekipmanların 1/100 ölçek model boyutları.....	82
Çizelge 4.3. Zamandan bağımsız durumda sınır koşullarının ölçek model karşılığı.....	87
Çizelge 4.4. Program “name selections ve mesh control” özeti	89
Çizelge 4.5. Programda kullanılan “mesh” yapısı özeti.....	90
Çizelge 4.6. Genel denklem için değişkenler ve bunlara karşılık gelen difüzyon katsayıları ve kaynak terimleri	92
Çizelge 4.7. Zamandan bağımsız analizde kullanılan model ve sınır şartları	93
Çizelge 4.8. Yangın bölgesinden 40 m geride ve 360 m ileride (trafik yönüne) sıcaklık değişimi	97
Çizelge 4.9. Yangın bölgesinden kirli hava şaftına kadar sıcaklık değişimi.....	98
Çizelge 4.10. Bazı yapı malzemelerinin termal etkiler nedeniyle özellik kayıplarının özeti	98
Çizelge 4.11. Bazı tünel mekanik ve elektrik sistemi yardımcı elemanlarının termal etkiler nedeniyle özellik kayıplarının özeti.....	99
Çizelge 4.12. Yangın bölgesinden 40 m geride ve 360 m ileride (trafik yönüne) CO değişimi	101
Çizelge 4.13. Yangın bölgesinden kirli hava şaftına kadar CO değişimi	101
Çizelge 4.14. Yangın durumunda tünel kullanıcıları için kabul edilebilir güvenlik kıstasları özeti.....	102
Çizelge 4.15. Yangın bölgesinden kirli hava şaftına kadar CO ₂ değişimi	103
Çizelge 4.16. Zamana bağlı sınır şartları özet tablosu	108
Çizelge 4.17. Yangın mahaline uzaklık ve zamana göre tünel kesitindeki ortalama sıcaklık değerleri	112
Çizelge 4.18. Yangın mahaline uzaklık ve zamana göre tünel kesitindeki en yüksek sıcaklık değerleri.....	113

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.19. Yangın mahalinden 50 m uzaklığa kadar, zamana bağlı tünel kesitindeki görüş mesafeleri çizelgesi.....	130



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Boyuna havalandırma	14
Şekil 2.2. Yarı enine havalandırma	15
Şekil 2.3. Enine havalandırma	16
Şekil 2.4. Karma havalandırma sistemi.....	16
Şekil 2.5. İki şeritli, çatı eğimli basit bir tünel.....	22
Şekil 2.6. Yangının evreleri.....	25
Şekil 3.1. Havalandırma sistemi şematik gösterimi	33
Şekil 3.2. Şaftların şematik gösterimi	34
Şekil 3.3. Tünel kesiti	34
Şekil 3.4. Hesap yapılan bölümlerin şematik gösterimi	35
Şekil 3.5. Emisyon durumuna göre senaryo 1 havalandırma sistemi çalışma şeması ...	48
Şekil 3.6. Emisyon durumuna göre senaryo 2 havalandırma sistemi çalışma şeması ...	49
Şekil 3.7. Emisyon durumuna göre senaryo 3 havalandırma sistemi çalışma şeması ...	50
Şekil 3.8. Emisyon durumuna göre senaryo 4 havalandırma sistemi çalışma şeması ...	51
Şekil 3.9. Şaftlar öncesi yangın durumu (Durum 1)	56
Şekil 3.10. Şaftlar sonrası yangın durumu (Durum 2)	56
Şekil 3.11. BT_1 lokasyonlarında yangın durumunda havalandırma sistemi çalışma şeması	73
Şekil 3.12. BT_2 lokasyonlarında yangın durumunda havalandırma sistemi çalışma şeması	74
Şekil 3.13. BT_3 lokasyonlarında yangın durumunda havalandırma sistemi çalışma şeması	75
Şekil 3.14. BT_4 lokasyonlarında yangın durumunda havalandırma sistemi çalışma şeması	76
Şekil 3.15. DT_1 lokasyonlarında yangın durumunda havalandırma sistemi çalışma şeması	77

Şekil	Sayfa
Şekil 3.16. DT_2 lokasyonlarında yangın durumunda havalandırma sistemi çalışma şeması	78
Şekil 3.17. DT_3 lokasyonlarında yangın durumunda havalandırma sistemi çalışma şeması	79
Şekil 3.18. DT_4 lokasyonlarında yangın durumunda havalandırma sistemi çalışma şeması	80
Şekil 4.1. Geometrik model şematik gösterimi.....	83
Şekil 4.2. Yangın yüzeyinin şematik gösterimi	83
Şekil 4.3. Yangın durumunda karakteristik zaman/sıcaklık eğrileri.....	84
Şekil 4.4. Zamandan bağımsız analizde kullanılan sınır koşullarının şematik gösterimi.....	87
Şekil 4.5. Mesh yapısı	89
Şekil 4.6. Boyuna kesitte yangın bölgesinde sıcaklık dağılımı	94
Şekil 4.7. Boyuna kesitte 200 m’lik bölümde 293-600 K aralığında sıcaklık dağılımı .	95
Şekil 4.8. Zeminden 6 m yükseklikte, 200 m’lik kısımda tavan bölgesi sıcaklık dağılımı	95
Şekil 4.9. Zeminden 1.7 m yükseklikte, 400 m’lik kısımda sıcaklık dağılımı	96
Şekil 4.10. XY ekseninde yangın bölgesinden 10 m ileride sıcaklık dağılımı	96
Şekil 4.11. Boyuna kesitte 400 m’de zamandan bağımsız CO dağılımı	100
Şekil 4.12. Boyuna kesitte, zeminden 1,7 m mesafede CO ve duman dağılımı	100
Şekil 4.13. Boyuna kesitte 400 m’de zamandan bağımsız CO ₂ dağılımı	102
Şekil 4. 14. Boyuna kesitte, zeminden 1,7 m yükseklikte CO ₂ ve duman dağılımı.....	103
Şekil 4.15. Boyuna kesitte 1000 m’de 0-3 m/s aralığında hız dağılımı	104
Şekil 4.16. Boyuna kesitte atış fanlarına yakın 150 m’lik kısımda lokal hız dağılımı ..	105
Şekil 4.17. Boyuna kesitte jet fan gruplarının çalıştığı 150 m’lik kesimde lokal hız dağılımı	105
Şekil 4.18. Kirli hava atış fanında (egzoz) lokal hız vektörleri	106
Şekil 4.19. Temiz hava şaftında (atış olarak çalışmakta) lokal hız vektörleri.....	106

Şekil	Sayfa
Şekil 4.20. Yerden 1,7 m mesafede 400 m'lik mesafede lokal hız dağılımı	107
Şekil 4.21. Boyuna kesitte, 1. dakika 273K–473K aralığında sıcaklık dağılımı	109
Şekil 4.22. Boyuna kesitte, 2. dakika 273K–473K sıcaklık dağılımı	110
Şekil 4.23. Boyuna kesitte, 3. dakika 273K–473K sıcaklık dağılımı	110
Şekil 4.24. Boyuna kesitte, 4. dakika 273K–473K sıcaklık dağılımı	110
Şekil 4.25. Boyuna kesitte, 5. dakika 273K–473K sıcaklık dağılımı	111
Şekil 4.26. Boyuna kesitte, 10. dakika 273K–473K sıcaklık dağılımı	111
Şekil 4.27. Boyuna kesitte, 15. dakika 273K–473K sıcaklık dağılımı	111
Şekil 4.28. Boyuna kesitte, 20. dakika 273K–473K sıcaklık dağılımı	112
Şekil 4.29. Zeminden 6,5 m yükseklikte, 100 m'lik kısımda, 2. dakika 273K–473K tavan bölgesi sıcaklık dağılımı	113
Şekil 4.30. Zeminden 6,5 m yükseklikte, 100 m'lik kısımda, 4. dakika 273K–473K tavan bölgesi sıcaklık dağılımı	114
Şekil 4.31. Zeminden 6,5 m yükseklikte, 100 m'lik kısımda, 5. dakika 273K–473K tavan bölgesi sıcaklık dağılımı	114
Şekil 4.32. Zeminden 6,5 m yükseklikte, 100 m'lik kısımda, 10. dakika 273K–473K tavan bölgesi sıcaklık dağılımı	115
Şekil 4.33. Zeminden 6,5 m yükseklikte, 100 m'lik kısımda, 20. dakika 273K–473K tavan bölgesi sıcaklık dağılımı	115
Şekil 4.34. XY ekseninde, yangın bölgesinden 10 m ileride 1. dakika sıcaklık dağılımı.....	116
Şekil 4.35. XY ekseninde, yangın bölgesinden 10 m ileride 2. dakika sıcaklık dağılımı.....	116
Şekil 4.36. XY ekseninde, yangın bölgesinden 10 m ileride 3. dakika sıcaklık dağılımı.....	117
Şekil 4.37. XY ekseninde, yangın bölgesinden 10 m ileride 4. dakika sıcaklık dağılımı.....	117
Şekil 4.38. XY ekseninde, yangın bölgesinden 10 m ileride 5. dakika sıcaklık dağılımı.....	118

Şekil	Sayfa
Şekil 4.39. XY ekseninde, yangın bölgesinden 10 m ileride 10. dakika sıcaklık dağılımı.....	118
Şekil 4.40. XY ekseninde, yangın bölgesinden 10 m ileride 15. dakika sıcaklık dağılımı.....	119
Şekil 4.41. XY ekseninde, yangın bölgesinden 10 m ileride 20. dakika sıcaklık dağılımı.....	119
Şekil 4.42. Boyuna kesitte, 1. dakika 0-1000 ppm aralığında CO dağılımı.....	120
Şekil 4.43. Boyuna kesitte, 2. dakika 0-1000 ppm aralığında CO dağılımı.....	120
Şekil 4.44. Boyuna kesitte, 3. dakika 0-1000 ppm aralığında CO dağılımı.....	121
Şekil 4.45. Boyuna kesitte, 4. dakika 0-1000 ppm aralığında CO dağılımı.....	121
Şekil 4.46. Boyuna kesitte, 5. dakika 0-1000 ppm aralığında CO dağılımı.....	121
Şekil 4.47. Boyuna kesitte, 10. dakika 0-1000 ppm aralığında CO dağılımı.....	122
Şekil 4.48. Boyuna kesitte, 15. dakika 0-1000 ppm aralığında CO dağılımı.....	122
Şekil 4.49. Boyuna kesitte, 20. dakika 0-1000 ppm aralığında CO dağılımı.....	122
Şekil 4.50. Boyuna kesitte, 1. dakika 0-40000 ppm aralığında CO ₂ dağılımı.....	123
Şekil 4.51. Boyuna kesitte, 2. dakika 0-40000 ppm aralığında CO ₂ dağılımı.....	123
Şekil 4.52. Boyuna kesitte, 3. dakika 0-40000 ppm aralığında CO ₂ dağılımı.....	124
Şekil 4.53. Boyuna kesitte, 4. dakika 0-40000 ppm aralığında CO ₂ dağılımı.....	124
Şekil 4.54. Boyuna kesitte, 5. dakika 0-40000 ppm aralığında CO ₂ dağılımı.....	124
Şekil 4.55. Boyuna kesitte, 10. dakika 0-40000 ppm aralığında CO ₂ dağılımı.....	125
Şekil 4.56. Boyuna kesitte, 15. dakika 0-40000 ppm aralığında CO ₂ dağılımı.....	125
Şekil 4.57. Boyuna kesitte, 20. dakika 0-40000 ppm aralığında CO ₂ dağılımı.....	125
Şekil 4.58. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 2. dakika duman dağılımı.....	126
Şekil 4.59. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 3. dakika duman dağılımı.....	127
Şekil 4.60. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 4. dakika duman dağılımı.....	127
Şekil 4.61. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 5. dakika duman dağılımı.....	127

Şekil	Sayfa
Şekil 4.62. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 10. dakika duman dağılımı	128
Şekil 4.63. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 15. dakika duman dağılımı	128
Şekil 4.64. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 20. dakika duman dağılımı	129
Şekil 4.65. Boyuna kesitte, 1. dakika 0-5 m/s aralığında hız dağılımı.....	131
Şekil 4.66. Boyuna kesitte, 2. dakika 0-5 m/s aralığında hız dağılımı.....	131
Şekil 4.67. Boyuna kesitte, 3. dakika 0-5 m/s aralığında hız dağılımı.....	131
Şekil 4.68. Boyuna kesitte, 4. dakika 0-5 m/s aralığında hız dağılımı.....	132
Şekil 4.69. Boyuna kesitte, 5. dakika 0-5 m/s aralığında hız dağılımı.....	132
Şekil 4.70. Boyuna kesitte, 20. dakika 0-5 m/s aralığında hız dağılımı.....	132
Şekil 4.71. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 1. dakika hız dağılımı.....	133
Şekil 4.72. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 2. dakika hız dağılımı.....	133
Şekil 4.73. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 3. dakika hız dağılımı.....	133
Şekil 4.74. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 4. dakika hız dağılımı.....	134
Şekil 4.75. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 5. dakika hız dağılımı.....	134
Şekil 4.76. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 20. dakika hız dağılımı.....	134

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Mont Blanc tüneline oluşan hasar	1
Resim 1.2. Gotthard tüneli yangını	2



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
a_{cat}	Araç türüne göre, toplam araç içindeki yüzdesi (-)
a_{PC}	Otomobil yüzdesi (-)
a_{LCV}	Hafif yük taşıtı yüzdesi (-)
a_{HGV}	Ağır yük taşıtı yüzdesi (-)
A_T	Tünel kesit alanı (m^2)
A_v	Araç yüzey alanı (m^2)
C_{adm}	İzin verilen konsantrasyonu (g/m^3)
C_{amb}	Ortamdaki konsantrasyonu (g/m^3)
C_p	Karışımın öz ısısı (kJ/kgK)
C_w	Araç yüzey direnç katsayısı (-)
D_h	Tünel hidrolik çapı (m)
D_{mass}	Kütleye özgü sönme katsayısı (m^2/kg)
D_{pcu}	km'deki otomobil (binek araç) sayısı (pcu/km)
D_{tra}	Hıza bağlı trafik yoğunluğu (veh/km)
D_{veh}	km'deki araç sayısı (veh/km)
D^*	Yangın karakteristik çapı (m)
F_J	Jet fan itme kuvveti (N)
Fr	Froude sayısı (-)
Fr_c	Kritik Froude sayısı (-)
f_a	Yükseklik faktörü (-)
f_m	Araç ağırlığından kaynaklanan faktör (-)
f_t	Zaman faktörü (-)
f_{HGV}	Birim pcu sayısına karşılık HGV sayısı (-)
G_e	Birim araç başına emisyon miktarı (g/s veya m^2/s)
G_{cat}	Araç türüne göre birim emisyon miktarı (g/s veya m^2/s)
G_{lane}	Şerit başına toplam emisyon miktarı (g/s veya m^2/s)
G_{sec}	Bölümdeki toplam emisyon miktarı (g/s veya m^2/s)

Simgeler**Açıklamalar**

G_{tun}	Tüneldeki toplam emisyon miktarı (g/s veya m^2/s)
g	Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
H	Tünel yüksekliği (m)
h_c	Isı taşınım katsayısı (kW/m^2K)
h_r	Işınımına bağlı ısı transfer katsayısı (kW/m^2K)
i	Giriş portalı basınç kayıp katsayısı
j	Çıkış portalı basınç kayıp katsayısı
K	Yansıtıcı sabiti (-)
K_{adm}	Kabul edilebilir duman yok olma seviyesi (m^{-1})
K_{amb}	Ortamdaki duman yok olma seviyesi (m^{-1})
K_g	Eğim faktörü (-)
K_v	Kritik Fr sayısına bağlı katsayı ($Fr_c^{-1/3}$) (-)
L	Karakteristik uzunluk (m)
L^*	Boyutsuz uzunluk (-)
L_{sec}	Bölüm uzunluğu (m)
M^*	Taze hava debisi (m^3/s)
$m^*_{CO_2}$	CO_2 debisi (kg/s)
m^*_{hava}	Hava debisi (kg/s)
m^*_{gas}	Karışım debisi (kg/s)
$m^*_{yakıt}$	Yakıt debisi (kg/s)
n_{cat}	İlgili kategorideki araç sayısı (-)
n_j	Jet fan sayısı (-)
n_{pcu}	Otomobil (binek araç) sayısı (-)
n_{PC}	Otomobil sayısı (-)
n_{LCV}	Hafif yük taşıtı sayısı (-)
n_{HGV}	Ağır yük taşıtı sayısı (-)
N_{lane}	Şerit sayısı (-)
N_{sec}	Bölüm sayısı (-)
n_{veh}	Toplam araç sayısı (-)
P	Tünel kesitinin çevre uzunluğu (m)
p	Basınç (Pa)
Pr	Prandtl sayısı (-)

Simgeler	Açıklamalar
Ri_c	Kritik Richardson sayısı (-)
Q	Yangın yükü (MW)
Q_c	Taşınıma bağlı yangın yükü (MW)
Q^*	Boyutsuz yangın yükü (-)
Q_{conv}	Taşınım yangın yükü (kW)
q_{non-ex}	Egzoz dışı partikül madde emisyon miktarı (m^2/h)
Q_{rad}	Işınım yangın yükü (kW)
T	Sıcaklık (K)
T_f	Yangın sıcaklığı (K)
T_0	Ortam başlangıç sıcaklığı (K)
T_{wall}	Duvar sıcaklığı (K)
t	Zaman (s)
u	Tünel içi hava hızı (m/s)
u_j	Jet fan çıkış hızı (m/s)
V_c	Kritik hız (m/s)
V_c^*	Boyutsuz kritik hız (-)
v_r	Rüzgar hızı (m/s)
V_{tra}	Trafik hızı (km/h)
W	Tünel genişliği (m)
Y	Gaz konsantrasyonu (gr/kg)
Δ	Bir özelliğin iki değeri arası fark
δ	Bir özelliğin iki değeri arası fark
ε	Duvar ısı emisyonu (-)
η	Verimliliğe bağlı katsayı (-)
θ	Eğim gradyanı (-)
λ	Duvar kayıp katsayısı (-)
λ_r	Rüzgar akış kayıp katsayısı (-)
ξ	Tünel portalı kayıp katsayısı (-)
ρ_c	Tünel çıkışı hava yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_f	Yangın bölgesindeki ortalama karışım yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_g	Tünel girişi hava yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_0	Ortam havası başlangıç yoğunluğu (kg/m^3)

Simgeler**Açıklamalar**

σ_0	Stefan Boltzman sabiti (W/m^2K^4)
Φ_{conv}	Taşınmımdan kaynaklı ısı akısı (kW/m^2)
Φ_{rad}	Işınımından kaynaklı ısı akısı (kW/m^2)
τ	Lokal gerçek zaman (s)

Kısaltmalar**Açıklamalar**

CETU	Centre D'etudes Des Tunnels
HAD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
HGV	Heavy Good Vehicles (Ağır Yük Taşıtı)
HRR	Heat Release Rate
EPC	European Parliament and of the Council
EU	European Union
FLUENT	Akış Modelleme Yazılımı
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
KTk	Karayolları Teknik Şartnamesi
LCV	Light Commercial Vehicles (Ticari Hafif Yük Taşıtı)
NFPA	National Fire Protection Association
PC	Passenger Cars (Binek Otomobiller)
PM	Particulate Matter (Partikül Maddeler)
PIARC	Permanent International Association of Road Congress
RVS	Austria Guidelines And Rules For Road Traffic
RWS	Rijkswaterstaat Bouwdienst
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SP	Swedish National Testing and Research Institute
WHO	World Health Organization
YOGT	Yıllık Ortama Günlük Trafik

1. GİRİŞ

Karayolu tünelleri, güç coğrafi engellerin aşılmasına bağlı olarak mesafelerin kısalmasıyla, yaşamımızın bir parçası olan ulaşımı kolaylaştırmaktadır. Tüneller hem ulusal hem de uluslararası taşımacılıkta bölgeler arası ilişkileri geliştirmek ve izole gözüken bölgelerin ekonomik gelişimi için bir katalizör olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu önemli sanat yapılarının artan sayısı, ortaya çıkabilecek kazaların olası ciddi sonuçlarıyla ilgili sorunları gündeme getirmiştir. Bu kazaların açık yoldaki benzer kazalara göre sıklığı az olmakla birlikte sahip oldukları etki, medya ve halkın ilgisini daha çok çekmektedir.

Özellikle 1990'lı yılların sonu ve 2000'li yılların başında meydana gelen Mont Blanc (Fransa-İtalya) ve Tauern (Avusturya-İtalya) tünel felaketleri (1999) ve Gotthard (İsviçre-İtalya) tüneli yangını (2001) bu ilgiyi daha da artmıştır.

Şu ana kadarki en ciddi karayolu tüneli kazası 1999 yılında meydana gelen Mont Blanc (Fransa) Tünel felaketidir. 11,6 km uzunluğundaki tünelde margarin ve un taşıyan bir kamyonunda başlayan yangın, 23 tır ve 10 arabaya yayıldı ve 39 kişinin ölümüne neden oldu. Bu felaketle ilgili, tünel uzun yıllar önce tasarlandığından, tünel güvenlik ekipmanlarının ve acil durum senaryolarının yetersizliğinden kaynaklı tespitler uzun süre dile getirilmiştir (Permanent International Association of Road Congress [PIARC], 2017: 60, 61).



Resim 1.1. Mont Blanc tüneline oluşan hasar (Ingason, 2003)

Aynı yıl gerçekleşen Tauern Tünel felaketinde ise, bakım nedeniyle tünel trafiği tek şeritten sağlanırken, bir kamyon bekleme kuyruğuna hızla çarpmış, zincirleme kazalar meydana gelmiş, yangın saç spreyi de içeren çeşitli malları taşıyan başka bir kamyonun da alev

almasıyla yayılmıştır. Yangını söndürmek yaklaşık 16 saat sürmüştür (PIARC, 2017: 61, 62).

2 yıl sonra gerçekleşen (2001) Gotthard Tünel kazasında ise, alkollü bir kamyon şoförü aracının kontrolünü kaybederek karşı şeride geçmiş, tehlikeli madde taşıyan bir başka kamyonu çarpmış ve 7 ağır yük taşıtına yayılan bir tünel yangınına sebep olmuştur. Yangın sonucunda çok büyük bir enerji açığa çıkmış 11 kişi hayatını kaybetmiştir (PIARC, 2017: 62, 63).



Resim 1.2. Gotthard tüneli yangını (Ingason, 2003)

Tüm bu kazaların ortak özellikleri; tünellerin uzun (> 6 km) ve tek tüp olmasıdır. Söz konusu kazalar doğrudan etkilerinin yanı sıra, uzun süre tünellerin kapalı kalmaları sebebiyle, alternatif güzergâhlarda trafik sıkışıklığına yol açmış, buna bağlı kaza oranları yükselmiştir. Sadece Gotthard Tünelinin kapanması nedeniyle İtalya ekonomisi 2,5 milyar Euro zarara uğramıştır. Tüm Avrupa ekonomisine zararın 15 milyar Euro'yu bulduğu tahmin edilmektedir (European Union [EU] Report, 2003: 1, 7).

Yıllar süren istişarelerden sonra, Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin yayınladığı 29.04.2004 tarih ve 2004/54/EC sayılı "Trans-Avrupa Karayolu Ağı Tünelleri İçin Minimum Güvenlik Gereksinimleri" direktifi, dünyada tünel uygulamaları için yapısal, teknik ve işletmeye yönelik bir dizi uyumlaştırılmış asgari güvenlik standartlarını ortaya koymuştur (Sinoplu, 2007).

Çizelge 1.1. AB direktifine göre altyapı için getirilen asgari gereksinimlerin özeti (European Parliament and of the Council [EPC], 2004: 56,76)

2004/54/EC ÖZET ÇİZELGE		Bölüm 3.3.4'te belirtilen maddeler	Trafik ≤ 2 000 araç/şerit		Trafik > 2 000 araç/şerit			AÇIKLAMALAR
			50 0m - 10 00 m	>1000m	500 m-1000 m	1000 m-3000 m	>3000m	
Yapısal Önlemler	Tüp Sayısı ≥ 2	1						15 yıllık trafik tahmini 10000 araç/şerit' i aşıldığını öngörürse zorunludur.
	Eğim ≤ % 5	2	*	*	*	*	*	Coğrafi koşullar uygunsa zorunludur.
	Yaya Yolları	3_1 ; 3_2	*	*	*	*	*	Acil şeritler yoksa, 2.3.1 maddesinde açıklanan koşul sağlanmadıkça zorunludur.
	En fazla her 500 m' de Acil Çıkışlar	3_3 ; 3_9	○	○	*	*	*	Mevcut tünellerde yapılması her bir duruma göre değerlendirilecektir.
	En fazla her 1500 m' de acil servisler için Enine Geçişler	4_1	○	○ / ●	○	○ / ●	●	Tünel 1500 m' den uzun ve ikiz tüplü ise zorunludur.
	Her bir portal çıkışında Orta Refüj Geçişi	4_2	●	●	●	●	●	Coğrafi imkanın olduğu ikiz veya çok tüplü tünel çıkışlarında zorunludur.
	En fazla her 1000 m' de Cepler	5	○	○	○	○ / ●	○ / ●	1500 m' den uzun ,acil şeritleri olmayan, yeni iki yönlü tüneller için zorunludur. 1500 m' den uzun bağlıdır.
	Yanıcı ve Toksik Madde Drenajı	6	*	*	*	*	*	Tehlikeli madde taşınmasına izin verilen tünellerde zorunludur.
	Yapının Yangına Dayanıklılığı	7	●	●	●	●	●	Lokal bir çökmenin afette 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 kontrol merkezi olan tünellerde zorunludur.
Acil Durum İstasyonları	En fazla her 150 m' de	10	*	*	*	*	*	İçerisinde telefon ve iki söndürücü bulunur. Yeni tünellerde en fazla 150 m de bir, mevcut tünellerde en fazla 250 m aralıklarla bulunur.
Su Temini	En fazla her 250 m' de	11	●	●	●	●	●	Yoksa, başka bir şekilde yeterli su kaynağı sağlanması zorunludur.
İşaretlemeler		12	●	●	●	●	●	Acil haberleşme telefonu, yangın tüpü, cep, acil çıkışlar gibi kullanıcılara sunulan tüm tesisler de dahil olmak üzere gerekli yatay ve düşey işaretlemeler yapılacaktır.
Kontrol Merkezi		13	○	○	○	○	●	Birkaç tünelin izlenmesi tek bir kontrol ünitesinde merkezileştirilebilir.
İzleme Sistemi	Görüntü	14	○	○	○	○	●	Kontrol merkezi varsa zorunludur.
	Otomatik Olay Algılama ve/veya Yangın Algılama	14	●	●	●	●	●	Bu iki sistemden en az biri kontrol merkezi olan tünellerde zorunludur.
Tünel Kapatma Ekipmanı	Girişlerden önce trafik sinyalleri	15_1	○	●	○	●	●	
	Tünel içerisinde en fazla her 1000 m' de trafik sinyalleri	15_2	○	○	○	○	◇	Kontrol merkezi varsa ve uzunluk 3000 m' yi aşıyorsa önerilir.
Haberleşme Sistemleri	Acil servisler için Tekrarlı Radyo Yayını	16_1	○	○	○	●	●	
	Tünel kullanıcıları için Acil Radyo Mesajları	16_2	●	●	●	●	●	Tünel kullanıcıları için tekrarlı radyo yayını ve kontrol merkezinin olduğu yerlerde zorunludur.
	Sığınaklar ve çıkışlarda Anons Sistemi (Hoparlörler)	16_3	●	●	●	●	●	Tahliye durumundaki tünel kullanıcılarının dışarıya çıkmadan önce beklemeleri gereken yerlerde örneğin sığınaklarda zorunludur. Ayrıca tünel boyunca girişim oluşturmamak ve işitilebilir 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		17	●	●	●	●	●	Gerekli güvenlik fonksiyonlarını sürdürmeyi amaçlayacaktır.

● : Zorunlu

○ : Zorunlu değil

* : İstisnalar ile birlikte zorunlu

◇ : Tavsiye edilir

Komisyon kararının havalandırma başlığı altında havalandırma sisteminin tasarımı, yapımı ve işletilmesinde dikkate alınacak hususlar;

- Normal ve pik trafik akışlarında araçlardan yayılan kirleticilerin kontrolü,
- Bir olay veya kaza nedeniyle duran trafikteki araçlardan yayılan kirleticilerin kontrolü,
- Bir yangın durumunda sıcaklık ve duman kontrolüdür.

Aynı komisyon kararına göre; şerit başına 2000 araçtan yüksek trafik hacmine sahip 1000 m'den uzun tüm tünellerde mekanik havalandırma sistemi tesis edilmesi gerekmektedir. Trafik hacmi şerit başına 2000 araçtan yüksek, 3000 m'den uzun ve bir kontrol merkezi olan enine ve/veya yarı-enine havalandırmalı tüm çift trafik yönlü tünellerde havalandırma ile ilgili olarak aşağıdaki asgari önlemler alınacaktır (EPC, 2004: 65).

- Hava ve duman deşarj kapakları ayrı ayrı veya gruplar halinde çalıştırılabilecek şekilde tesis edilecektir,
- Boyuna hava hızı sürekli izlenecek ve havalandırma sisteminin (kapaklar, fanlar, vb.) yönlendirme süreci uyumlu olarak ayarlanacaktır.

Tünellerin havalandırması ile ilgili birçok akademik çalışma yapılmış olup, bu bölümde kısaca bahsedilmiştir.

Literatür çalışmaları

Karayolu tünel yangını; yangının dinamik süreci (Türbülans, yanma, radyasyon, vb.) ve tünelin geometrik düzeni (Tünel geometrisi, araç geometrisi ve bunların düzeni gibi) arasındaki karşılıklı etkileşimler nedeniyle çok karmaşık bir olgudur. Meydana gelen tünel yangınlarının nedenleri; aracın kendiliğinden tutuşmasına (yük, yakıt ve araç dâhil), araç çarpışmasına ve aşırı yüklü çarpışmalara (örneğin, ön arka çarpışma ve yan duvarla çarpışma) göre sınıflandırılabilir. Bu nedenlere bağlı yangınlar, tünel duvarının yanında, sağ / sol şeritte ya da yolun ortasında rastgele ateş dağılımını mümkün kılar. Yangının gelişimi, duman dağılımı ve tünel kaplamasındaki hasar, tüneldeki yangının yerine büyük ölçüde bağlıdır. Bu sebeplere bağlı olarak karayolu tüneli yangınlarında, duman hareketi ve tünel yangın güvenliği yönetiminin anlaşılmasına açık bir ihtiyaç doğmuştur (Wang, 2017) .

Karayolu tünellerinde, belirli bir yönde duman akışını sağlamak için havalandırma sistemleri kullanılmaktadır. Hava hızı çok düşük olduğunda, yangın dumanı iki yönlü olarak yayılır. Hava hızı yüksek olduğunda ise atım yönünde yangın dumanı hızla yayılır ve tünelin içini doldurur. Her iki durumda, yangın kaynağına yaklaşan itfaiyeciler için tehlikeli olabilir.

Trafik yönüne ters olarak arka kısma doğru yayılan duman tabakasını engellemek için gerekli en düşük havalandırma hızı, kritik hız olarak kabul edilmektedir (Wu ve Bakar, 2000). Kritik hız, tünel yangın güvenliği yönetiminde en kritik parametrelerden biridir. Havalandırma hızı, kritik hızdan daha düşük olduğunda yangının geri kısmına doğru duman uzunluğu artar. Geri tepme uzunluğu sıfır olduğunda, kritik hız uzunlamasına havalandırma hızıdır. Tüneldeki boyuna hız, kritik hızdan daha büyük olduğunda, yangın kaynağından çıkan duman durdurulan araçlara ve akışın tersi yönündeki tünel kullanıcıları ile itfaiye personeline engel oluşturmaz ve güvenli geçiş sağlayabilir.

Thomas (1958, 1968), atalet ve kaldırma kuvvetlerinin oranı olan Froude sayısı teorisine dayanarak, boyuna havalandırmada duman uzunluğu (L) ve dumana bağlı kritik hız için öngörülen bir model önermiştir (Denklem 1.1 ve 1.2).

$$L^* = \frac{L}{H} \propto \frac{gHQ}{\rho_0 T_f c_p V c^3 A} \quad (1.1)$$

$$V_c = \left(\frac{g Q_c H}{\rho_0 c_p T_f A} \right)^{1/3} \quad (1.2)$$

Kennedy (1996), benzer bir teoriye dayanan kritik hız ve sıcaklık formülünü türetmiştir (Denklem 1.3 ve 1.4).

$$V_c = K_g \left(\frac{g Q_c H}{\rho_0 c_p T_f A F r_c} \right)^{1/3} \quad (1.3)$$

Burada;

$$T_f = \frac{Q_c}{\rho_0 c_p A V_c} + T_0 \quad (1.4)$$

Lee ve diğerlerinin (1979) yaptıkları deneylerde kritik Froude Sayısının (Frc) 4,5 ile 6,7

arasında değiştiği gösterilmiştir. Kennedy (1996) ise kritik Froude Sayısını 4,5 olarak önermiştir.

Danziger ve Kennedy (1982), tüneldeki kritik hızı tahmin etmek için, kritik Froude sayısının yanı sıra kritik Richardson sayısını tanımlamıştır (Denklem 1.5).

$$Ri_c = \frac{\Delta \rho g H}{\rho_f V_c^2} \quad (1.5)$$

Deberteix ve diğerleri (2001), Paris metrosunun modeli üzerinde yaptıkları deneylerde kritik hızın yanında geri tepme uzunluğunun da detaylı ölçümlerini yapmış ve kritik Richardson Sayısının 1'in altına düştüğü durumlarında geri katmanlaşmanın olmadığını ne sürmüşlerdir.

Oka ve Atkinson (1995), bir dizi küçük ölçekli deney yaparak farklı geometrilerdeki yangın kaynakları için ısı salınım oranı ve kritik hız arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Bu incelemeler sonucu kritik hız ve ısı salınım oranı arasındaki ilişkiyi açıklayan boyutsuz denklemler önerilmiştir (Denklem 1.6 ve 1.7).

$$V_c^* = K_v [0,12]^{-1/3} [Q^*]^{1/3}, \quad Q^* \leq 0,12 \quad (1.6)$$

$$8V_c^* = K_v, \quad Q^* > 0,12 \quad (1.7)$$

Burada;

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 g^{1/2} H^{5/2}} \quad (1.8)$$

$$V_c^* = \frac{V_c}{\sqrt{(gH)}} \quad (1.9)$$

Deneyler sonucunda yangın kaynağının geometrisine ve yerine bağlı olarak K_v değerinin 0,22 ve 0,38 arasında değiştiği gösterilmiştir.

Wu ve Bakar (2000), bir başka küçük ölçekli deney çalışmasında değişen tünel kesitlerinin etkisini incelemiş ve çalışma sonunda denklemde kullanılan tünel yüksekliği yerine tünelin

hidrolik çapının kullanıldığı formül önerilmiştir (Denklem 1.10 ve 1.11).

$$V_c^* = 0,40[0,20]^{-1/3} [Q^*]^{1/3}, \quad Q^* \leq 0,20 \quad (1.10)$$

$$V_c^* = 0,40, \quad Q^* > 0,20 \quad (1.11)$$

Burada;

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 g^{1/2} D_h^{5/2}} \quad (1.12)$$

$$V_c^* = \frac{V_c}{\sqrt{(g D_h)}} \quad (1.13)$$

Boyuna havalandırma yapılan tünellerde, havalandırma hızının kritik hızdan çok yüksek olduğu durumlarda hava akımının alt kısmında katmanlaşma sorunu baş gösterebilir. Bu sebeple geri akışın engellenmesini sağlayacak en düşük hızı belirlemek amacıyla sınırlandırma hızı kavramı geliştirilmiştir. Li ve arkadaşlarının (2010) gerçekleştirdiği model deneylerde sınırlandırma hızı, Denklem 1.14 ve 1.15 ile tanımlanmıştır.

$$V_c^* = 0,810[Q^*]^{-1/3}, \quad Q^* \leq 0,15 \quad (1.14)$$

$$V_c^* = 0,43, \quad Q^* > 0,15 \quad (1.15)$$

Weng ve arkadaşları (2015), 1/10 ölçekli deneysel ve HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) çalışmalarında sınırlandırma hızını Denklem 1.16 ile tanımlamıştır.

$$V_c^* = 0,82[Q^*]^{1/3} \quad (1.16)$$

Tünellerin çoğu, duman hareketini önemli ölçüde etkileyebilecek bir eğime sahiptir. Atkinson ve Wu (1996), tünel eğimi ile kritik hız arasındaki etkileşimi incelemek için 0 ile 100 derece eğimli tünel modellerinde deneysel çalışmalar yürüttüler. Bu çalışmalar sonunda, düz bir tünelle eğimli bir tünel arasındaki kritik hızlar arasında Denklem 1.17'deki ilişkiyi buldular. Burada θ eğimi ifade etmektedir.

$$\frac{V_{c,\theta}}{V_{c,0}} = 1 + (0,014\theta) \quad (1.17)$$

Hyun ve diğerlerinin (2009), yaptığı benzer bir çalışmada eğim ve kritik hız arasındaki ilişki Denklem 1.18 ifade edilmiştir.

$$\frac{V_{c,\theta}}{V_{c,0}} = 1 + (0,033\theta) \quad (1.18)$$

Chow ve diğerleri (2015) ise aynı ilişkiyi Denklem (1.19) ile tanımlamışlardır.

$$\frac{V_{c,\theta}}{V_{c,0}} = 1 + (0,022\theta) \quad (1.19)$$

Bu çalışmaların yanında, tünel içerisinde taşıt blokajının yangın üzerine etkisi ile ilgili incelemelerde yapılmıştır. Oka ve Atkinson (1995), blokaj etkisinin ısı yayma oranı üzerine yaptığı etkiyi incelemiştir. Bu çalışmada, yangının tünel genişliğinin büyük kısmını işgal ettiği ve tavana doğru yükselerek arttığı, kritik hızlarında azaldığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde yapılan diğer araştırmalarda da yangının gerisinde konumlandırılan araçların blokaj oranının artmasıyla kritik hızın azaldığı gösterilmiştir (Li ve diğerleri, 2010; Lee ve Tsai, 2012; Alva ve diğerleri, 2017).

Hu ve arkadaşlarının (2007) deneysel çalışmasında tünel içindeki duman sıcaklığının değişimi incelenmiştir. Deneylerden 12 tanesi tünel tavanında bir boyutta yayılmakta olan duman hareketi için, 2 tanesi büyük ölçekli bir model üzerinde ve 10 tanesi ise gerçek taşıt tüneline gerçekleştirilmiştir. Deneylerde yangın boyutu, tünel kat yüksekliği, tünel kesit geometrisi ve havalandırma hızı etkisi incelenmiştir. Duman hareket yönünde olan havalandırma hızının etkisi ve tünel içindeki bariyer etkisinin duman sıcaklığı ve hareketi üzerindeki etkileri de çalışmada araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, tünel içinde taşıt hareketi olmadığı sürece yangın boyutundaki artışın tünel tavanındaki duman sıcaklığını artırdığını göstermektedir.

Tünel yangınlarıyla ilgili bir diğer araştırma konusu da tünellerin kesit değişimlerinin yangın üzerine etkisidir. Bu çalışmaların en önemlilerinden birisi Kurioka ve arkadaşlarının (2003), tünel içerisinde çıkan bir yangının yakın bölgesindeki olayları analiz etmek için yaptıkları

deneylerdir. Yaptıkları çalışmada 1/10, 1/2 ve tam ölçekli olmak üzere ve tam ölçekli modelde dikdörtgen ve at nalı kesitli olmak üzere modeller kullanmışlardır. Deneylerde kare kesitli yangın kaynağı kullanmışlardır. En/boy oranı, açığa çıkan ısı miktarı ve uzunlamasına havalandırma hızı değiştirilmiştir. Alevin eğilmesi, görünür alev yüksekliği, duman tabakasının maksimum sıcaklığı ve konumu için ampirik formüller 1/10 ölçekli model tünel kullanılarak elde edilmiştir. En/boy oranının etkisi bu modellerde dahil edilmiştir. $H^{3/2} / W^{1/2}$ oranı ile belirlenen boyutsuz uzunluğun, tünellerde yangın olayı için temsili uzunluk olduğunu belirtmişlerdir. 1/2 ve tam ölçekli modelleri kullanarak yaptıkları deneyler ile de kare yangın kaynağının yakınındaki alanda yangın olayını tahmin etmek için buldukları ampirik bağıntıların uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir. Lee ve Ryou (2005), benzer bir çalışmada aynı hidrolik çapa sahip tünel için en/boy oranı arttıkça kritik hızın arttığını tespit etmişlerdir. Vauquelin ve Wu (2006), ölçekli modeller üzerine yapılan deneysel çalışmalarında tünel genişliğinin kritik hız üzerindeki etkisini araştırmışlar ve tünel kesitinin en/boy oranının düşük olduğu durumlarda, tünelin genişliği arttıkça kritik hızın arttığını tespit etmişlerdir.

Bu çalışmaların dışında, Kashef ve diğerleri (2009), iki bölge (düz ve kavisli) tarafından oluşturulan uzun bir yol tüneline 30 MW'lık bir etkinlikte duman yayılmasını kontrol etmek için farklı acil durum havalandırma stratejilerinin etkinliğini değerlendirmiştir. Sonuçlar, düz bölgedeki senaryolar durumunda geri tepmenin önlendiğini veya sınırlandırıldığını göstermiştir. Tam tersine, kavisli bölgede yer aldığına, temiz hava ile yanma ürünleri arasında iyi bir karıştırma gerçekleştiği görülmüştür. Bu karıştırma prosesi, düz zonda gerilemeye neden olmuş ve düz bölgede geriye doğru uzanarak, geri tepme derecesini arttırmıştır. Çalışma sonucunda kavisli bölgedeki duman geri tepmesini en aza indirmek için, kavisli bölge boyunca tavan jet fanları kurmak önemi vurgulanmıştır. Benzer şekilde, Caliendo ve diğerleri (2012), kavisli tünellerde yangın etkisini incelemiş, tünelin tam ortasında meydana gelen bir otobüs yangını simüle ederek, 3 m/s kritik havalandırma hızı için geri tepmenin önlendiğini göstermiştir. Aynı çalışmada uzunlamasına havalandırma sisteminin etkisine bağlı olarak tünel uzunluğu boyunca sıcaklık değişimi gösterilmiş, en yüksek tavan sıcaklığının yangının yaklaşık 30 m aşağı akışında meydana geldiği tespit edilmiştir.

Karaaslan ve diğerleri (2011), at nalı kesitli bir tünelin ölçek modeli üzerinde yaptıkları tünel yangını çalışmasında “Fluent Species Transport (Türlerin taşınımı)” modeli kullanarak

duman hareketini incelemiş ve dumanın kontrolü için fan çalışma sırasının, fan itiş gücünün ve havalandırmaya başlama zamanının tünel yangınları üzerindeki önemini vurgulamışlardır.

Son dönemlerde, özellikle yüksek bölgelerde oluşan atmosfer basınçları ve rüzgârın tünel yangınları üzerine etkileri konusuna yoğunlaşmıştır (Ji ve diğerleri, 2017; Wang ve diğerleri, 2017). Bir diğer önemli inceleme konusu da su sisi sistemlerinin tünel yangınlarını önlemedeki rolü konusudur (Liang ve diğerleri, 2017).

Problemin tanımı

Bu çalışmada, çok uzun (14,5 km, çift tüp, çatı eğimli), karma havalandırma sistemi kullanılan, bir karayolu tüneline havalandırma tasarımı yapılarak, farklı lokasyonlarda emisyon ve yangın durumuna göre temsili havalandırma senaryoları çıkarılmıştır. Hazırlanan senaryolara göre bulunan en kritik havalandırma noktasının, HAD yazılımı kullanılarak kararlı ve kararsız analizleri yapılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Araştırmanın amacı

Literatür çalışmaları kısmında anlatıldığı üzere, karayolu tünel yangınlarıyla ilgili; kritik hız kavramı, geri katmanlaşma, maksimum duman sıcaklığı, tünel içerisindeki araçların blokaj etkileri, tünel kesitinin etkileri (en, boy, hidrolik çap, kavis vb.), yanan araç türünün etkileri, atmosferik koşulların etkisi ve son zamanlarda da yangın önleme sistemlerinin etkinliği (su sisi ve sulu yangın önleme sistemleri vb.) üzerine bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, literatür çalışmalarından faydalanılarak bölünmüş boyuna havalandırma (karma havalandırma) yapılan uzun bir karayolu tüneline optimum havalandırma tasarımı yapılarak ve yangın durumunda havalandırma sistemi incelenerek bulunan sonuçlar HAD yazılımıyla kıyaslanmış ve yorumlanmıştır.

Sınırlılıklar

Çalışma yapılan tünelde gerçek boyutta bir yangın düzeneği kurarak tünel içerisindeki duman gelişimine bağlı fiziksel ve kimyasal süreçleri (türbülans, yanma, radyasyon vb.) incelemek ve analiz etmek, hem çok uzun süre hem de oldukça yüksek maliyetler

getirmektedir. Küçük ölçekte deney düzenekleri ise genellikle tam ölçekteki özellikleri yeniden üretemeyebilir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği programları ile tam ölçekli ve küçük ölçekli çalışmalara göre maliyetin yanında diğer iki yaklaşımdan herhangi biriyle erişilemeyen birçok ayrıntılı veri daha hızlı kullanılmaktadır. Bu çalışmada Ansys/FLUENT yazılımı ile temel enerji denklemleri (enerji, momentum, kütle, tür) çözülerek türbülans, yüzdürme, yanma gibi karmaşık süreçler tanımlanmıştır. Nümerik hesaplamalarda ve yazılımda kullanılan giriş parametreleri, en doğru sonuçlara ulaşabilmek amacıyla literatür çalışmaları ve tam ölçekli tünel yangın testlerinden alınmıştır.





2. KARAYOLU TÜNELLERİNDE HAVALANDIRMA SİSTEMLERİ VE TASARIM KRİTERLERİ

Karayolu tünellerinde havalandırma sistemi kurmanın temel amaçları;

- Değişik hız ve trafik yoğunluklarında egzoz gazlarının zarar verici etkisinin azaltılması
- Tünel görüş mesafesinin gereken limitlerin altında tutulması
- Olası bir yangında, ortaya çıkan duman ve ısıнын trafik yönünden

uzaklaştırılması olarak sıralanabilir (Karayolları Genel Müdürlüğü [KGM], 2016: 215).

Havalandırma sisteminin projelendirilmesi, yapımı ve işletmesi sırasında aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulur (EPC, 2004: 65);

- Normal ve en yüksek trafik akışında, karayolu taşıtları tarafından çıkarılan kirleticilerin kontrolü,
- Bir olay veya kaza nedeniyle duran trafikteki karayolu taşıtları tarafından çıkarılan kirleticilerin kontrolü,
- Bir yangın durumunda ateş ve dumanın kontrolü

Bu amaçlar için doğal havalandırma ve mekanik havalandırma yöntemleri uygulanmaktadır (Karakaş, 2011).

2.1. Karayolu Tünellerinde Uygulanan Havalandırma Sistemleri

2.1.1. Doğal havalandırma

Her tünel belirli oranda doğal havalandırmaya sahiptir. Bu durum tünelin iki portalı arasındaki basınç farkından, araçların piston etkisinden ve baca etkisinden kaynaklanmaktadır. Doğal havalandırmanın yetip yetmeyeceği trafik yoğunluğu, tünel uzunluğu ve meteorolojik şartlara bağlıdır. Trafik yoğunluğu düşük tünellerde, özellikle dağlık bölgelerde basınç farklılıkları ve rüzgar etkisi nedeniyle havalandırma kendiliğinden olur (KGM, 2016: 216).

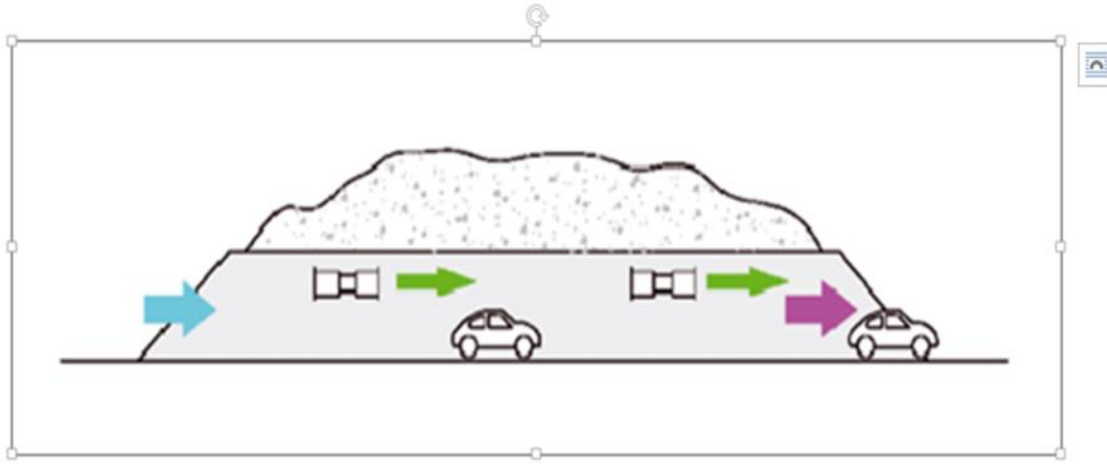
2.1.2. Mekanik havalandırma

Uygulamada 3 tip mekanik havalandırma kullanılır. Bunlar; boyuna havalandırma, yarı enine havalandırma ve enine havalandırmadır (Kayılı ve diğerleri, 2010). Ayrıca bu sistemlerin bir arada kullanıldığı Mont Blanc (Fransa) tüneli (11,6 km; enine + yarı enine) gibi karma sistemler de mevcuttur.

Tünellerde asgari güvenlik kriterlerini belirleyen Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin 2004/54/EC sayılı Direktifine uyum kapsamında, ülkemizde trafik hacminin şerit başına 2000 motorlu taşıttan yüksek olduğu 1000 m'den uzun olduğu tüm tünellerde mekanik havalandırma sistemi tercih edilmektedir (Sinoplu, 2007).

Boyuna havalandırma

Boyuna havalandırma en basit ve ucuz mekanik havalandırma yöntemi olup, hem temiz hava hem de egzoz gazları tünel aksı yönünde hareket ederek tünelin bir ucundan girer, diğer ucundan çıkar. Burada rüzgâr hızı, piston etkisi ve baca etkisine ek olarak jet fanların itki gücünden faydalanılır. Genelde jet fanlar iki yönde çalıştırılacak şekilde üretilirler (PIARC, 2011: 23, 31).



Şekil 2.1. Boyuna havalandırma (PIARC, 2011: 24)

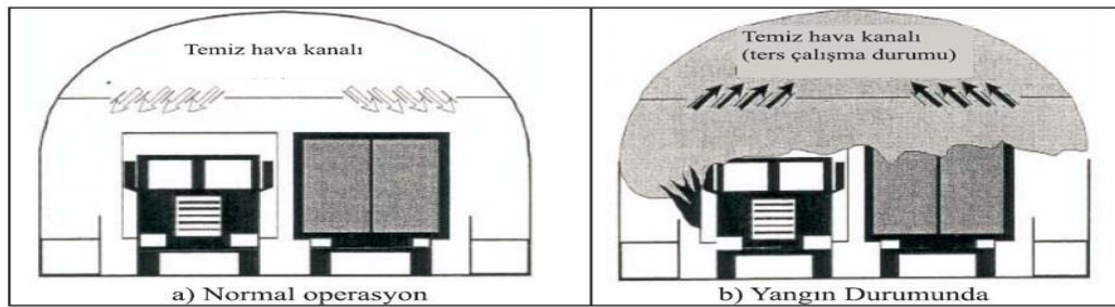
Boyuna havalandırmanın başlıca avantajları; basit olması, az enerji ihtiyacı göstermesi, bunların sonucunda az yatırımı ve işletme masrafını gerektirmesidir. Dezavantajı ise tünel uzunluğu ve trafik hacminin artmasıyla gerekecek fazla havanın sadece akış hızını arttırmak suretiyle temin edilebilmesidir.

Tek yönlü tünelin işletmesinde trafiğin akış istikametinde 10 m/s'ye kadar hava hızına müsaade edilmektedir. Çift yönlü trafikte bu değer 5 m/s, özel hallerde 7 m/s'dir (1000 m tünel uzunluğu ile sınırlı) (PIARC, 1999: 39,51). Bu sistemin yarı enine ve enine sistemlere göre en büyük avantajı, tünel gabarisinde herhangi bir artışa sebebiyet vermemesi dolayısıyla da maliyetlerin düşmesidir.

Tamamen boyuna havalandırma uygulanan bir tünelde yangın çıkması durumunda, yangının hızla yayılma riski vardır. Tünel boyunca meydana gelen kirlenme uniform bir şekilde artarak deşarj noktasında en yüksek sınır değerine ulaşır. Deşarj noktası doğal olarak tünelin ağzıdır.

Yarı enine havalandırma

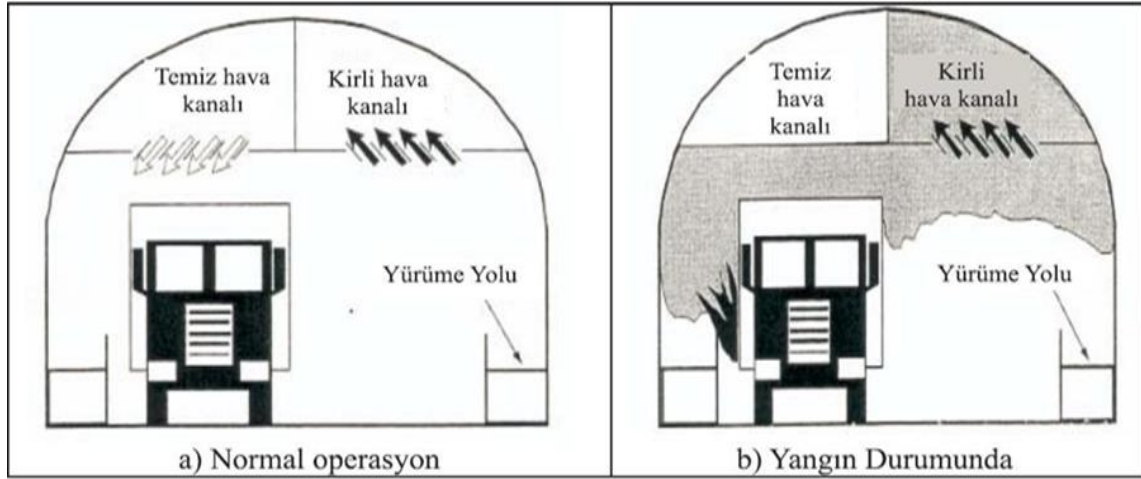
Yarı enine sistemler pratik ve ekonomik faktörleri uyumlu tarzda içerir. Temel özelliği, tüm trafik alanının çıkış kanalı gibi kullanılmasıdır. Hava veriş kanalı boyunca havanın basıncı ve hızı azaldığından menfezlerden uniform hava verilebilmesi için menfez hesabı dikkatle yapılır. Tünel boyunca kirlenmenin uniform olduğu ve hava ile tam karıştığı kabul edilerek kirlenmenin dağılımının da sabit kalması beklenir (Karakaş, 2011).



Şekil 2.2. Yarı enine havalandırma (Kayılı, Köktürk ve Eralp, 2010)

Enine havalandırma

Uzun tünellerin orta kısımları için tam enine havalandırma, tesis ve işletme masrafı yönünden engel teşkil etmezse ideal bir sistemdir. Gerekli hava, bir kanal içerisinden yol kotu seviyesinde çekilir. Havanın verilmiş ve çekilişi tersine de yapılabilir. Bu şekilde trafik alanındaki hava hareketleri tünel uzunluğuna bir sınırlama getirmez, kirlenmenin toplanması da söz konusu değildir (Karakaş, 2011).

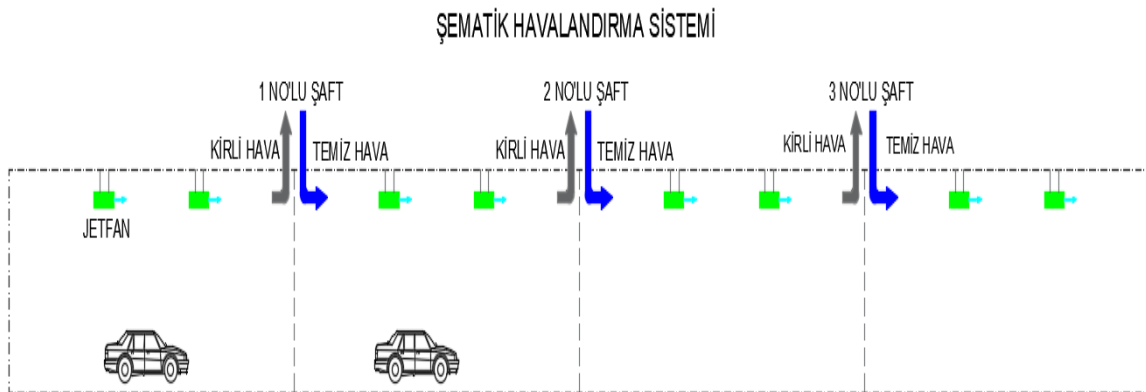


Şekil 2.3. Enine havalandırma (Kayılı, Köktürk ve Eralp, 2010)

Enine havalandırmada en önemli problemler, ilk yatırım ve işletme maliyetidir. Enerji sarfiyatı, kanal uzunluğunun küpü oranında artar. Geniş alanları gerektiren hava kanallarının yapımı pahalı olması sebebiyle tercih edilmeyebilir. Ayrıca kanalların bakım ve temizlik problemleri de vardır.

Karma havalandırma

Özellikle uzun tünellerde, yukarıdaki sistemlerin birkaçının birleşimiyle oluşturulan sistemlerdir. Örneğin Alp Dağlarında yapılan ve 2016'da açılan, 56 km'lik uzunluğuyla dünyanın en büyük demiryolu tüneli olan Gotthard Base Tüneli örnek olarak gösterilebilir. Ülkemizde de trafiğe açılan Ovit Tünelinde (14,3 km, çift tüp) boyuna havalandırmanın yanında, havalandırma tüneli de kullanılmaktadır (Bölünmüş boyuna havalandırma).



Şekil 2.4. Karma havalandırma sistemi

Çizelge 2.1. Yarı-enine, enine ve karma havalandırma kullanılan bazı tüneller

Ülke	Tünel Adı	Uzunluk (m)
Avusturya	Karawanken	7 864
Avusturya	Tauern 2. tüp	6 400
Avusturya	Katschberg 2. tüp	5 600
Avusturya	Plabutsch 2. tüp	10 000
İsviçre	San Bernardino	6 600
Fransa-İtalya	Frejus	13 000
Fransa-İtalya	Mont Blanc	11 600
Fransa-İspanya	Somport	8 608
İsviçre	Uetilberg	4 500
Türkiye	Ovit	14 300
Türkiye	Yeni Zigana	14 500

2.2. Karayolu Tünellerinde Havalandırma Sisteminin Belirlenmesi

Tünellerde havalandırma tasarımında başlıca faktörler; tünel uzunluğu, tüp sayısı, tüneldeki araç yoğunluğu ve emisyonları, tünelin konumu (şehir içi ya da dışı; koordinatları, arazinin deniz seviyesinden yüksekliği vb.), tünelin bulunduğu alandaki meteorolojik koşullar (rüzgâr hızı, hava sıcaklığı), tünelin yapısı, eğimi vb. sayılabilir.

Havalandırmanın ana elemanı fanlardır. Jet fan ve aksiyal fan kapasitesi belirlenirken öncelikle taze hava ihtiyacı belirlenir. Burada araç emisyonlarını ortadan kaldıracabilecek şekilde gerekli taze hava belirlenir. Bunun yanında yangın yükü hesabı da yapılmalıdır. Gerekli taze hava debisi bulunduktan sonra fan seçimi prosedürüne geçilir. Basınç kayıplarını hesaplayarak uygun sistem ve kullanılacak fan sayısı belirlenir.

Giriş bölümünde bahsedilen büyük tünel yangınlarından sonra oluşan hassasiyet nedeniyle karayolu tünelleri havalandırma sistemleri ile ilgili çeşitli kuruluşlar aracılığıyla bazı düzenlemeler getirilmiştir. Bunlardan tünel havalandırma ve yangın güvenliği konularında referans alınan kaynakların başlıcaları aşağıda listelenmiştir.

- Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin 29.04.2004 tarih ve 2004/54/EC sayılı "Trans Avrupa Karayolu Ağı Tünelleri İçin Minimum Güvenlik Gereksinimleri",
- PIARC (Dünya Yol Derneği); Bünyesinde kurulan teknik komiteler vasıtasıyla karayolu çalışmaları yapmaktadır. Yayınladığı 2012R05EN ve 2019R02EN sayılı

“Karayolu Tünellerinde Araç Emisyonları ve Havalandırma İhtiyacının Tespiti Komisyon Raporları” ve 2017R01EN sayılı (Karayolu Tünelleri Yangın Tasarım Kriterleri Komisyon Raporu) yayınlar, tüm dünyada tünel havalandırma ihtiyacı ve yangın yükü seçiminde referans olarak kullanılmaktadır.

- CETU (Fransa Tünel Çalışmaları Merkezi); Özellikle tünel havalandırması esnasında oluşan basınç kayıplarının hesaplanması konusunda “Ventilation” isimli yayını referans olarak kullanılmaktadır.
- Avusturya Planlama Kılavuzu RVS Kodları; “RVS.9.81, RVS.9.282, RVS.9.261, RVS.9.262”
- NFPA; Kuzey Amerika Yangından Korunma Ajansı uluslararası kabul görmüş yangın tasarım standartlarını yayınlamaktadır.
- KTK (Karayolu Teknik Şartnamesi, KGM)
- SP (İsveç Ulusal Test ve Araştırmalar Enstitüsü); Büyük yangın testleri ve tünel acil durum senaryoları üzerine düzenlediği bir çok rapor, referans olarak kullanılmaktadır.

2.2.1. Karayolu tünellerinde emisyon hesapları ve taze hava gereksiniminin belirlenmesi

Kimyasal reaksiyonlar ve yakma prosesleri esnasında ortam havasına karışan tüm gaz ve partiküllere emisyon denmektedir (KGM, 2016: 223).

Ülkemizde motorlu taşıtlarda yakıt olarak benzin, motorin ve LPG (Liquefied Petroleum Gas) kullanılmaktadır. Motorlu taşıtlar kullandıkları yakıt türüne göre atmosfere değişik kirleticiler bırakmaktadırlar. Gaz kirleticiler, karbon emisyonları (CO ve CO₂), NO_x ve hidrokarbonlar olurken, katı sayılabilecek yapıdaki kirleticiler ise partikül maddelerdir. Bu kirleticiler toksik (zehirli) özelliklere sahip olup fotokimyasal duman oluşumlarına ve istenmeyen meteorolojik şartlara sebebiyet verebilmektedirler (Vallero, 2007).

Hava, trafik doğrultusunda sıkıştırıldığında, kirletici maddeler tünel boyunca kirli madde konsantrasyonunu artırır. Eğer kirli madde seviyesi hava kalitesi sınırına ulaşır veya geçerse, piston etkisi yetersiz olacaktır. Bu durumda, trafik alanındaki jet fanlar çalıştırılmalıdır.

Gerekli taze hava miktarı; tüneldeki araç sayısı, araçların dağılımları, her bir araç türünün

emisy on değ erleri, tün elin fiziksel öz ellikleri (uzunluk, eğ im, rakım vb.), sağ lik yön ünden izin verilebilir emisy on değ erleri ve ortamın hava koş ullarına bağ lı olarak değ iş mektedir.

Emisy on durumuna göre gerekli taze hava miktarının hesabında PIARC 2012R05EN ve 2019R02EN raporları kılavuzluk etmektedir. Bu raporlara göre; hesaplamalara baş larken ilk olarak tünele ait bilgiler dikkate alınmalıdır. Bunlar (PIARC, 2012: 7,36 ve PIARC, 2019: 6,36);

Tek ya da çift yönlü trafik; Emisy on tahminlerini yapabilmek açısından trafiğ in tek ya da çift yönlü olduğ u bilinmelidir. Ayrıca bakım periyodları ve tünellerin kapatılma ihtiyaç ları da buna göre planlanmalıdır (PIARC, 2012: 7,36).

Dizayn yılı; Tünel havalandırma sistemleri için dizayn yılı genellikle tün elin trafiğ e aç ıldığı seneye göre belirlenir. Ancak havalandırma planlanırken minimum 10 yıl sonrasına oluş akan trafik yoğunluğ u ve araç emisy on değ erleri düşün ülm elidir (PIARC, 2012: 7,36).

Trafik yoğunluğ u; Trafik yoğunluğ u tünel operasyonları için ana parametredir. Ş erit baş ı pik trafik saatleri ve yoğunluğ u, araç kompozisyonu gibi faktörler direkt olarak havalandırmayı etkiler. Denklem 2.1 ve 2.2 yardımıyla araç yoğunlukları hesaplanabilir (PIARC, 2019: 8.).

$$D_{pcu} = D_{veh} \times [1 - (a_{HGV})] + (a_{HGV}) \times (f_{HGV}) \quad (2.1)$$

$$n_{pcu} = [(1 - (a_{HGV})) \times n_{veh}] + [(a_{HGV}) \times (f_{HGV}) \times n_{veh}] \quad (2.2)$$

Burada;

D_{pcu} (pcu/km) = km'deki otomobil (binek araç) sayısı

D_{veh} (veh/km) = km'deki araç sayısı

a_{HGV} = Ağ ır yük taşı tı yüzdesi

f_{HGV} = Birim pcu sayısına karş ılık HGV sayısı

n_{pcu} = otomobil (binek araç) sayısı

n_{veh} = toplam araç sayısı (Otomobil, LCV, HGV)

Trafik hız ı ≤ 10 km/h ise; $f_{HGV} = 3$,

Trafik hız ı > 10 km/h ise; $f_{HGV} = 2$ alınır.

Yoğun trafik ve duran trafik; Araç hızının yaklaşık 10 km/saat seviyelerine düştüğü ve trafiğin durduğu bölümdür. Trafiğin özellikle uzun tünellerde tamamen durduğu durumlara göre hesaplar yapılarak havalandırma sistemi seçilmelidir.

Trafik hızı; Tünel içi trafik hızları genelde yönetmeliklerle kısıtlanır (Ülkemiz tünellerinde 80 - 60 km/saat arasında araç türüne göre değişmektedir.). Tünelin eğim değerleri özellikle ağır taşıtlarda hızların düşmesine neden olur.

Hızlara göre emisyon hesabında kullanılacak pik trafik verileri önerileri Çizelge 2.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Hıza ve yol tipine bağlı pik trafik verileri (PIARC, 2019: 9)

ORTALAMA PİK TRAFİK VERİLERİ					
		Ortalama Pik Trafik Yoğunluğu			
		ŞEHİR DIŞI TÜNELLERİ			
		Tek Yönlü Trafik		Çift Yönlü Trafik	
	V (km/h)	pcu/km	pcu/h	pcu/km	pcu/h
Akan Trafikte	60	30	1800	23	1400
Sıkışık Trafikte	10	70	700-850	60	600
Durağan trafikte	0	150	-	150	-
		ŞEHİR İÇİ TÜNELLERİ			
		Tek Yönlü Trafik		Çift Yönlü Trafik	
		pcu/km	pcu/h	pcu/km	pcu/h
Akan Trafikte	60	33	2000	25	1500
Sıkışık Trafikte	10	100	1000	85	850
Durağan trafikte	0	165	-	165	-

Araç çeşitleri; Emisyon hesapları için trafikte bulunan araçların yoğunluklarını, büyüklüklerine göre gruplamak gerekmektedir. Normal binek araçlar, hafif yük araçları (3,5 tona kadar) ve ağır yük araçları olarak gruplandırma yapılabilir. Ayrıca emisyon değerlerinin saptanması açısından bu araçların kullandığı yakıt türüne göre de gruplandırılması gerekir.

Emisyon kuralları: Emisyonlarla ilgili, ülkeden ülkeye uygulamalar değişmektedir. Genel olarak CO emisyonları referans olarak alınır. Dizel yakıt kullanan araçlarda da görüş faktörü önemli parametredir. Bazı ülkelerde NO₂ değerleri içinde tünel içi hava kalitesini belirleme noktasında eşik değerler belirlenmiştir. Bu kirletici değerleri belirlenirken aracın tünelden geçişi sırasında insan sağlığına etkileri zamana bağlı olarak belirlenmiştir. Partikül

maddelerin varlığı da tünel içinde görüş mesafesini etkilediği için havalandırma hesaplarında önemli parametrelerdendir. Partikül madde yanma sonucu ortaya çıkan egzoz gazlarından ve araçların tekerleri, frenlemeleri, asfalttaki yüzey aşınımı ve tozlar nedeniyle oluşan egzoz gazları dışındaki maddelerden oluşur (PIARC, 2012: 18).

WHO (World Health Organizaton) önerilerine göre, CO emisyonlarının 100 ppm değerini geçmemesi istenmektedir (WHO, 1988: 23). Çizelge 2.3'te değişik trafik durumları için izin verilebilir CO ve görüş değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.3. CO ve görüş mesafesi için tasarım eşik değerleri (PIARC, 2012: 16)

Trafik Durumu	CO	Görüş Mesafesi	
		Sönümleme katsayısı K	İletim s (Kiriş uzunluğu:100 m)
	ppm	$10^{-3}m^1$	%
Serbest akışlı yoğun trafik; 50-100 km/saat	70	5	60
Günlük yoğun trafik, tüm şeritlerin etkilendiği	70	7	50
Olağandışı yoğun trafik, tüm şeritlerin etkilendiği	100	9	40
Trafik akarken planlanmış bakım çalışmaları esnasında*	20	3	75
Tünel kapatılması gereken eşik değerleri**	200	12	30

*Uluslararası çalışmalar sonucu belirlenmiştir.

**Bu değer sadece tünel işletme koşullarıyla ilgilidir.

Emisyona bağlı gerekli taze hava debisi hesabında kullanılan denklemler (PIARC, 2019: 6, 20)

Taze hava ihtiyacını hesaplayabilmek için her bir kirletici faktörünün oluşturduğu hacimsel debiler bulunarak bunları bertaraf edebilecek toplam havalandırma debisi bulunmalıdır. Denklem 2.3 yardımıyla gerekli havalandırma debisi bulunabilir.

$$M^* = G_{tun} / (C_{adm} - C_{amb}) \quad (2.3)$$

Partikül maddeler ve dizel dumanı için $(C_{adm} - C_{amb})$ yerine K_{adm} kullanılır.

Burada;

M^* = Gereken hava debisi (m^3/s)

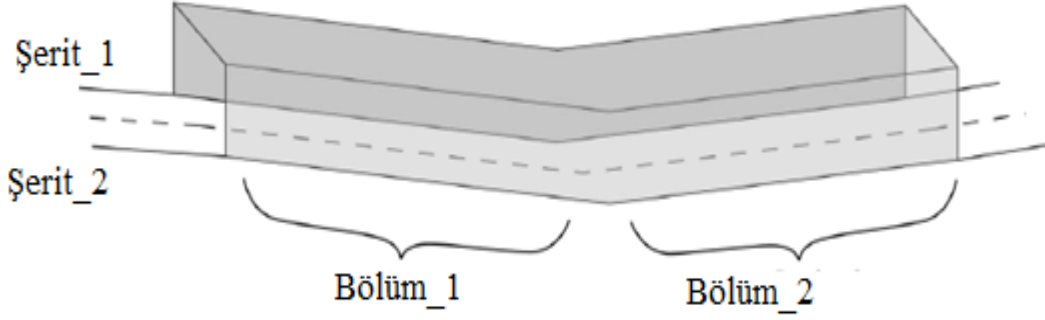
G_{tun} = Tüneldeki toplam emisyon miktarı; gazlar için (g/s), görünürlük için (m^2/s)

C_{adm} = İzin verilen konsantrasyonu (g/m^3)

C_{amb} = Ortamdaki konsantrasyonu (g/m^3)

K_{adm} = Kabul edilebilir duman yok olma seviyesi (m^{-1})

K_{amb} = Ortamdaki duman yok olma seviyesi (m^{-1})



Şekil 2.5. İki şeritli, çatı eğimli basit bir tünel (PIARC, 2019: 18)

Tüneldeki toplam emisyon oranı (G_{tun}), her bir şerit için emisyon oranları (G_{lane}) eklenerek hesaplanır. G_{lane} , sabit yol eğimi ve trafik hızı için şerit başına emisyon oranlarının toplamı gibi düşünülmelidir (Denklem 2.4 ve Denklem 2.5). Şekil 2.5'te, her bölümde sabit yol eğimine sahip 2 şeritli ve 2 bölümlü bir tünelin taslağı gösterilmektedir.

$$G_{sec} = \sum_{i=1}^{N_{cat}} (g_{fac,i} \times n_{veh,i}) \quad (2.4)$$

$$G_{tun} = \sum_{k=1}^{N_{lane}} \sum_{j=1}^{N_{sec}} (G_{sec,j}) \quad (2.5)$$

Bölüm emisyon oranı (G_{sec}), tünel bölümündeki ortalama araç sayısına bağlı olarak her araç kategorisinden (i), araç başına üretilen emisyon oranlarının toplamıdır. Her bir araç için belirlenen bölümdeki emisyon oranı, araç tipine bağlı olarak (PC, LCV, HGV) araç yaşı, tünelin teknik özellikleri, teknoloji faktörleri gibi parametrelerde hesaba katılarak hesaplanır. N_{sec} , ayrıık bölümlerin sayısıdır. N_{lane} ise, tüneldeki şeritlerin sayısıdır.

Birim araç başına emisyon değeri genel olarak Denklem 2.6 yardımıyla hesaplanabilir.

$$G_e = (G_{cat} \times f_a \times f_t \times f_m) + q_{non-ex} \quad (2.6)$$

Burada;

G_e = Emisyon değeri; CO ve NO_x için (g/(h.veh)), partikül madde için (m²/h.veh)

f_a = Yükseklik faktörü

f_t = Zaman faktörü (Tasarım yılından sonrası)

f_m = Araç ağırlığından kaynaklanan faktördür.

q_{non-ex} = Egzoz kaynaklı olmayan partikül madde emisyon miktarı (m²/ h.veh)

Her bir bölümdeki araç sayısı n_{cat} , Denklem 2.7 yardımıyla hesaplanabilir.

$$n_{cat} = D_{tra} \times L_{sec} \times a_{cat} \quad (2.7)$$

Burada;

n_{cat} = İlgili bölümdeki, ilgili kategorideki (otomobil, LSV, HGV) araç sayısı

L_{sec} = Kesit uzunluğu (m)

a_{cat} = İlgili kategorideki aracın, tüm araç içerisindeki yüzdesi

D_{tra} = İlgili bölümdeki hıza bağlı trafik yoğunluğu (araç/km)

D_{tra} , Denklem 2.1 ve 2.2 yardımıyla hesaplanabilirken, hıza bağlı olarak km'deki binek araç sayısından, Denklem 2.8 yardımıyla da hesaplanabilir.

$$D_{tra} = D_{veh} / V_{tra} \quad (2.8)$$

Burada;

D_{veh} = km'deki araç sayısı

V_{tra} = trafik hızıdır.

Emisyon değerleri genelde saatlik verilmektedir. Bu değer araç hızına bölündüğünde km'deki emisyon miktarına ulaşılır. Daha sonra yoğunlukla çarpılarak debi değerine ulaşılır. Ortalama atmosfer koşullarında ; $\rho_{CO} = 1,2 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{NO_2} = 1,9 \text{ kg/m}^3$ alınır. Partikül madde dönüşümlerinde $1g = 4,7 \text{ m}^2$ alınır.

Aşağıda; hesaplarda geçen bazı katsayıların tanımları yapılmıştır.

Yükseklik faktörü f_a ; motor tipine ve egzoz bileşenlerine göre değişmektedir. Deniz

seviyesinden 1000 m yükseklikte bu katsayı 1 alınır.

Zaman faktörü f_t ; 2018 yılı araç emisyon değerleri temel alınarak buna göre ileriki yıllarda alınacak sıkı önlemler neticesinde, araç emisyonlarında meydana gelebilecek değişiklikler düşünülerek hesaba katılan bir katsayıdır.

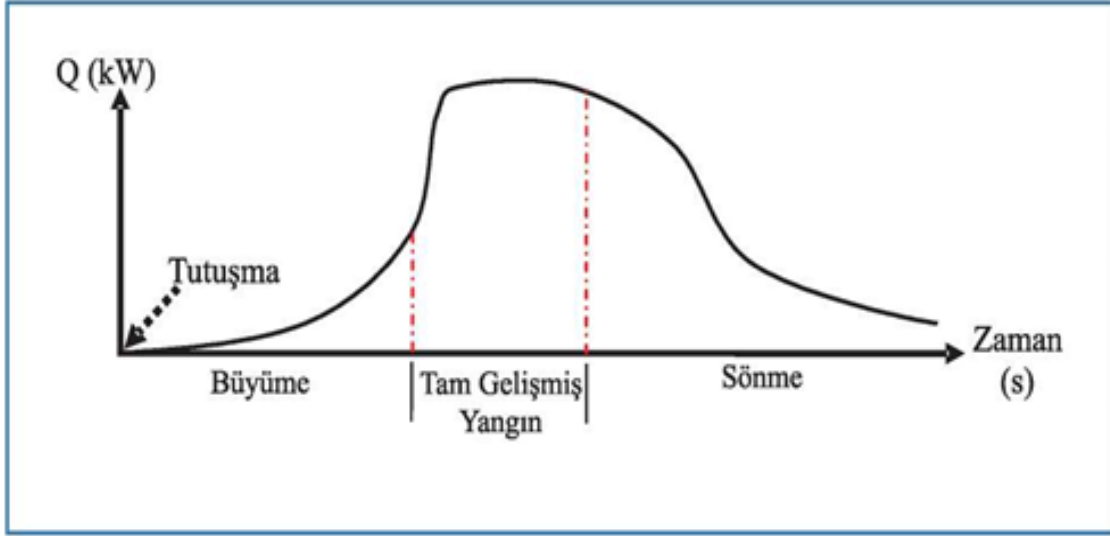
Ağır yük taşıyan araçların kütle faktörü f_m ; Ağır yük taşıyan araçlarla ilgili olan bu katsayı yüklü ya da boş ağırlığı yaklaşık 23 ton olan araçlardan referans değeri alınarak hesaba katılan bir katsayıdır.

Teknoloji faktörü f_e ; Araçların teknoloji grubu A, B veya C olması durumuna göre belirlenen bir katsayıdır.

2.2.2. Karayolu tünellerinde yangın tasarımı özelliklerinin belirlenmesi

Yangın fiziksel ve kimyasal bir olaydır. Isı, yakıt (yanıcı madde) ve oksijenin uygun oranda bir araya gelmesi ile başlayan reaksiyona yanma denir. Kontrol dışı gelişen yanma haline ise yangın denir (Alpgiray, 2016).

Yangın dört evreden oluşmaktadır. Bunlar tutuşma, büyüme, tam gelişim ve sönme evreleridir. Tutuşma, yangının başlaması için gerekli olan enerjinin verilmesi sonucunda yanma reaksiyonunun başlaması olayıdır. Tutuşma bir alev kaynağından olabileceği gibi ortamdaki sıcaklığın yükselmesiyle de olabilir. Yangının büyüme evresinde yangının gelişimi; yanan malzemelerin özelliğine, ortamdaki oksijen miktarına, ortam konfigürasyonuna ve yanma tipine bağlı olarak hızlı veya yavaş olabilir. Çevredeki malzemeler ortamdaki ısı transferi sonucunda sıcaklıkları artarak yanmaya başlarlar. Sıcaklığın artması sonucunda öyle bir an gelir ki ortamdaki cisimlerin birçoğu tutuşma sıcaklığına ulaşarak aniden yanmaya başlar. Bu ani reaksiyon, parlama olarak tanımlanır. Bu evreyi takip eden tam gelişmiş yangın evresinde, ortamdaki tüm yanıcı maddelerin yanmaya başladığı düşünülür. Bu evrede yangının ısıl gücü en yüksek değere ulaşır ve ortamdaki oksijen miktarı azdır. Tam gelişmiş yangın evresinde, yangının büyümesi oksijen miktarı ile sınırlıdır. Sönme evresinde ise ortamdaki yanan malzeme tükenmesi sonucunda yangın ısıl gücü azalmaktadır. (KGM, 2016: 274, 275).



Şekil 2.6. Yangının evreleri (KGM, 2016: 274, 275)

Karayolu tünellerinde kullanılacak ekipmanların seçilmesi ve acil durum planlarının geliştirilmesi için yangın tasarım özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yangının nasıl geliştiği, duman ve sıcak gazların nasıl yayıldığı bilinirse havalandırma dizaynı, yangın algılama-önleme sistemleri ve kurtarma stratejilerinin belirlenmesi mümkün olur. En yüksek ısı salınım oranı (HRR), havalandırma sisteminin belirlenmesinde ana faktördür (PIARC, 2017: 3).

İlk tünel çalışmalarında, araç tipine bağlı olarak yangın yükü 5 ila 30 MW arasında seçilmiştir. 1999 yılında yayınlanan “Fire and Smoke Control in Road Tunnels” raporunda, yangın tasarım yükü 30 MW olarak önerilmiştir (PIARC, 1999: 39, 51).

Sonraki yıllarda tünellerde, uluslararası katılımlı bir dizi tam ölçekli yangın testleri gerçekleştirilmiştir. Bunlardan en kapsamlıları; “EUREKA 499 Project”, “Benelux”, “Runehamar” ve “Memorial Tunnel” ile “RWS Fire Suppression Tests at Runehamar” olarak sayılabilir (PIARC, 2017: 34, 55). Çizelge 2.4’te bu testlerin ölçüm sonuçlarının kısa bir özeti bulunmaktadır.

Çizelge 2.4’te; t_1 , yangının başlangıç (tetikleme) süresini; t_2 , yangının gelişme (büyüme) süresini; t_t , toplam süreyi; HRR_{max} ise maksimum ısı salınım oranını ifade etmektedir.

Tünellerde yangın yükü seçilirken genellikle tek bir aracın yangını üzerinden varsayımlar

yapılmaktadır. Ancak, meydana gelen büyük tünel yangınları incelendiğinde birkaç aracın karıştığı kazalara bağlı yangınlar ve önemli miktarlarda yanıcı madde yüklü araçların yangınları çok daha büyük yangın yükleri ortaya çıkartmıştır (PIARC, 2017: 56, 64).

Çizelge 2.4. Yangın testleri sonuçları özeti (PIARC, 2017: 49)

Test Programı	Yükün Cinsi	Test Adı	t ₁	t ₂	t _t	u	HRR _{max}	Büyüme Hızı
			dak	dak	dak	m/s	MW	MW/dak
Eureka	Ahşap	W31	4	8	100	0,0	9,5	1,2
		W41	4	14	60	2,5	27	1,9
		W51	4	16	70	4,5	22,8	1,4
	Heptan	H11	0	35	100	0,5	12	0,3
		H21	0	100	120	2,0	12	0,1
		H31	0	30	50	0,0	13	0,4
		H41	0	17	120	1,5	13	0,8
	Araç	Plastik (C21)	6	8	62	0,0	6,1	0,8
		Otobüs (B11)	1,5	8,5	110	0,0	28	3,3
		Karışık (LF1)	2	8	120	0,0	17	2,1
	HGV (Ağır Yük Taşıtı)	HGV-GER	7	13	80	13,0	190	14,6
		HGV-NOR	8	13	27	13,5	320	24,6
		HGV-BR	9	10	65	14,0	130	13,0
Benelux	HGV (Ağır Yük Taşıtı)	P9	4	6,5	30	6,0	19	3,0
		P10	4	8	30	6,0	16	2,0
		P14	6	11,9	29	0,0	26	2,2
Runehamar	HGV (Ağır Yük Taşıtı)	Test 1	4,5	13,5	49	3,0	201	14,9
		Test 2	2,5	11,5	49	3,0	159	13,9
		Test 3	2	8	52	3,0	125	15,6
		Test 4	3	5	58	3,0	69	13,9

Tünellerde jet fan sayısı belirleme (CETU, 2003: 45, 69; PIARC, 2007: 258, 285)

Jet fanın görevi önündeki basıncı yenerek gerekli havayı sağlamaktır. Bu sebeple jet fan özelliklerini ve adetini belirleyebilmek için öncelikle sistemde meydana gelen maksimum basınç kayıplarını belirlemek ve bunları yenebilecek itki gücünü hesaplamak gerekmektedir.

Denge denklemi Denklem 2.9’da gösterilmiştir;

$$n_j * \Delta p_j = \Delta p_{veh} + \Delta p_{tu} + \Delta p_{met} + \Delta p_{fire} + \Delta p_{pis} + \Delta p_{baca} + \Delta p_{th} \quad (2.9)$$

Burada;

n_j = Jet fan adedi

Δp_j = Bir jet fanın basıncı

Δp_{veh} = Tüneldeki durgun trafikten kaynaklanan basınç kaybı

Δp_{tu} = Tünel girişindeki, çıkışındaki ve duvarlardaki sürtünmeden oluşan basınç kayıpları

Δp_{met} = Meteorolojik etkilerden kaynaklanan basınç yükselişi ve düşüşü

Δp_{fire} = Yangından kaynaklanan basınç yükselişi ve düşüşü

Δp_{pis} = Hareketli trafikten kaynaklanan basınç yükselişi ve düşüşü

Δp_{baca} = Eğimli tünellerde baca etkisinden kaynaklanan basınç yükselişi ve düşüşü

Δp_{th} = Termostatik etkilerden kaynaklı basınç düşüşü ya da yükselişi

Jet fan itme kuvveti de Denklem 2.10 yardımıyla bulunur;

$$F_J = \Delta p_j * A_T = \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * \rho * Q_j * (u_j - u) \quad (2.10)$$

Burada;

F_J = Tek bir fanın itme kuvveti

Δp_j = Bir jet fanın basıncı

η_1 = Jet fan verimi

η_2 = Duvar sürtünmesi etkinlik verimi

η_3 = Jet fanların beraber çalışma verimliliği

ρ = Jet fanın uzaklaştırdığı hava ya da dumanın yoğunluğu

Q_j = Jet fanın akışı

u_j = Jet fan akışkan çıkış hızı

u = Tünel içi duman ya da hava hızı

A_T = Tünel kesit alanı

Yangının tünel içinde çıktığı yere göre basınç kayıpları değişmektedir. Örneğin; yangın tünel girişlerine yakın bir yerde çıktıysa araçların önemli bir etkisi olmaz. Yangın tünel çıkışına doğru ise yangının akışının bir etkisi olmamaktadır. Baca etkisi yolun eğimi yukarıya doğru ise pozitif, aşağıya doğru ise negatif olmaktadır. Kısa tünellerde rüzgâr etkisi ve meteorolojik etkiler önemli iken, uzun tünellerde duvar sürtünmesi daha önemlidir.

Jet fanların verimi de yangının durumuna göre değişmektedir. Hava sıcaklığı arttıkça jet fanın itki kuvveti azalmaktadır. Sıcak havanın tahliye hızı tünel içine giren temiz hava

hızından daha fazladır ve ilgili basınç kayıpları daha yüksek olur. Jet fan sistemini seçebilmek için yangın sonucu oluşacak sıcaklığı belirlemek gerekmektedir.

Yangın sonucu oluşacak sıcaklığı saptamak için; tünel duvarlarındaki ve havada oluşabilecek termal değişimler saptanmalıdır. Termal kayıplar, tünel duvarlarındaki radyasyon ve tünel içindeki hava akışından kaynaklı taşınım ve iletim kayıplarıdır. Belirli bir tünel kesit alanındaki ortalama hava/duman sıcaklığı Denklem 2.11 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$T = T_0 + [(2/3 \cdot Q) / (\rho_0 \cdot c_p \cdot A_T \cdot u)] \quad (2.11)$$

Burada; ρ_0 , T_0 ve u_0 ortamdaki yoğunluk, sıcaklık ve hava hızı değerleridir (ilk değerler).

Konveksiyondan kaynaklı ısı akısı ise Denklem 2.12 ve 2.13 ile elde edilir.

$$\Phi_{\text{conv}} = Q_{\text{conv}} / (P \cdot L) = h_c \cdot (T - T_{\text{wall}}) \quad (2.12)$$

Burada;

Q_{conv} = Taşınım yangın yükü

P = Tünel kesitinin çevre uzunluğu

L = Hesaplanan tünel kesit uzunluğu

h_c = Isı taşınım katsayısı

$$h_c = [(\lambda/8) \cdot c_p \cdot \rho \cdot u^*] / [1.07 + 12.7 \cdot (Pr^{2/3} - 1) \cdot (\lambda/8)^{1/2}] \quad (2.13)$$

Burada Prandtl sayısı Pr , duvar pürüzlülük katsayısı ise λ 'dır. Radyasyondan kaynaklı ısı akısı ise Denklem 2.14 yardımıyla bulunur.

$$\Phi_{\text{rad}} = Q_{\text{rad}} / (P \cdot L) = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot F \cdot (T^4 - T_{\text{wall}}^4) \quad (2.14)$$

Burada;

ε = duvar ısı emisyonu; genelde 0.7 seçilir.

σ_0 = Stefan Boltzman sabiti ($5,68 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

P = Tünel kesitinin çevre uzunluğu

L = Hesaplanan tünel kesit uzunluğu

F = Duvar ve duman arasındaki şekil ve görüş faktörü, yaklaşık $F=1$

h_r = Işınım ısı transfer katsayısı

Q_{rad} tekrar denklemlerden çekilerek yazılırsa;

$$Q_{rad} = h_r \times P \times L \times (T - T_0) \quad (2.15)$$

$$h_r = \varepsilon \times \sigma_0 \times (T + T_0) \times (T^2 + T_0^2) \quad (2.16)$$

Isı akısına bağlı tünel boyunca (ΔL uzunlukta) sıcaklık düşüşü ise Denklem 2.17 yardımıyla bulunur.

$$\delta T / \delta x = - [P \times (h_c - h_r) \times (T - T_{wall})] / [\rho_0 \times c_p \times A_T \times u] \quad (2.17)$$

Duvar sıcaklığı ilk olarak $x=0$ 'da ortam sıcaklığı kabul edilir.

Dinamik basınç eşitliğinden (hava hızına bağlı) kütleli debi bulunabilir.

$$(1/2) \times \rho \times u^2 = (1/2) \times (m^* / A_T) \times u \quad (2.18)$$

$$m^* = \rho \times u \times A_T \quad (2.19)$$

Tünelin fiziksel özelliklerinden kaynaklanan Δp_{tu} basınç kayıpları Denklem 2.20 ile elde edilir.

$$\Delta p_{tu} = \Delta p_{entrance} + \Delta p_{walls} + \Delta p_{exit} \quad (2.20)$$

Girişte taze hava yangına karşı hareket ederken daha sonra yayılan duman yönünde hareket eder. Bu sebeple duman yönünde duvarlarda ve çıkışta basınç kayıpları artar. Yoğunluk ve hız üzerine sıcaklık yükselişinden kaynaklanan etkiler nedeniyle duvarlarda oluşan basınç kaybını herhangi bir ΔL uzunluğu boyunca Denklem 2.21 yardımıyla hesaplayabiliriz.

$$\Delta p_{walls, akış yönünde} = \lambda \times (L/D_H) \times (1/2) \times \rho_0 \times u^2 \times (T / T_0) \quad (2.21)$$

L uzunluğu boyunca sıcaklık duvar ilk sıcaklığının sabit kaldığı kabul edilir.

Tünel çıkışındaki ve girişindeki basınç kayıpları ise Denklem 2.22 ve 2.23 yardımıyla hesaplanır.

$$\Delta p_{\text{exit}} = \left(\frac{1}{2}\right) \times \rho_0 \times u^2 \times j \times (T / T_0) \quad (2.22)$$

$$\Delta p_{\text{entrance}} = \left(\frac{1}{2}\right) \times \rho_0 \times u^2 \times i \quad (2.23)$$

Burada i ve j giriş çıkış kayıp katsayılarıdır.

Yangın anında araçların durmasından kaynaklı blokaj nedeniyle oluşan basınç etkisi Denklem 2.24 ile elde edilir.

$$\Delta p_{\text{veh}} = C_w \times (A_V / A_T) \times \left(\frac{1}{2}\right) \times \rho \times n_{\text{PC}} \text{ (veya } n_{\text{HGV}}) \times (u)^2 \quad (2.24)$$

Burada;

A_V = Araç kesiti

C_w = Araç yüzey direnç katsayısı

n_{PC} = Otomobil sayısı (adet)

n_{HGV} = Ağır vasıta sayısı (adet)

u = Tüneldeki hava hızı (m/s)

Piston etkisi sebebiyle meydana gelen basınç kayıpları Denklem 2.25 ile bulunur.

$$\Delta p_{\text{pis}} = C_w \times (A_V / A_T) \times \left(\frac{1}{2}\right) \times \rho \times n_{\text{PC}} \text{ (veya } n_{\text{HGV}}) \times (u \pm V_{\text{tra}})^2 \quad (2.25)$$

Burada; V_{tra} trafik hızını ifade ederken, u ise havalandırma hızını ifade etmektedir. Piston etkisi yangın durumunda genel olarak yangına ters yönde trafik akışı durdurulduğu için ihmal edilebilir. Sadece duman yönünde akan trafik için hesaba dâhil edilir.

Meteorolojik ve coğrafi koşullara bağlı basınç kayıpları ise rüzgârdan kaynaklı ve tünel giriş-çıkış noktaları arasındaki kot farkından dolayı oluşan barometrik basınç kayıplarıdır (Denklem 2.26 ve 2.27).

$$\Delta p_{\text{rüzgar}} = \left(\frac{1}{2}\right) \times \rho_0 \times v_r^2 \times \lambda_r \quad (2.26)$$

$$\Delta p_{\text{th,atm}} = \theta \times (\rho_{\text{ç}} - \rho_{\text{g}}) \times L \times g \quad (2.27)$$

Burada;

$\Delta p_{\text{rüzgar}}$: Rüzgar kaynaklı basınç kaybı (Pa)

ρ_0 : Hava yoğunluğu (kg/m^3)

v_r : Rüzgar hızı (m/s)

λ_r : Akış kayıp katsayısı

g : Yerçekimi İvmesi (m/s^2)

L : Tünel Uzunluğu (m)

$\rho_{\text{ç}} - \rho_{\text{g}}$: Giriş ve çıkış hava yoğunluğu farkı [kg/m^3]

Yangından dolayı oluşan basınç kaybı Δp_{fire} 30 MW'a kadar yangınlarda 10-20 Pa, 200 MW'a kadar yangınlarda 40-100 Pa arası değişmektedir.

ΔL uzunluğu boyunca baca etkisinden dolayı oluşan basınç düşüşü ya da yükselişi Denklem 2.28 yardımıyla hesaplanır.

$$\Delta p_{\text{th,baca}} = - (\rho_0 - \rho) \times g \times \theta \times L \quad (2.28)$$

Burada θ ; yolun + ya da – eğim gradyantını göstermektedir.

Yangın nedeniyle sıcaklık yükselmesinden kaynaklı hava-duman karışımının yoğunluğu düşer, hız ise artar. Buda jet fan itiş gücünü etkiler. Örneğin 20°C ortam sıcaklığında, çıkış hızı 35 m/s olan 500 N itki kuvveti olan bir jet fan tünel içinde 5 m/s hava hızı oluştursun. Sıcaklık 400°C olduğunda havanın yoğunluğu;

$$\rho = (273+20) / (273+400) \times 1,2 \text{ kg/m}^3 = 0,74 \text{ kg/m}^3 \text{ olur.}$$

Düşük yoğunluktan dolayı hava hızı da; $u = 1/0,74 \times 5 \text{ m/s} = 6,75 \text{ m/s}$ olur. Jet fan çıkış hızı sabit kaldığı için jet fan itiş kuvveti %50'lere yakın oranda azalır. Bu sebeple jet fanların dizilişi önem arz etmektedir.

Fanların yerleşimi de önemlidir. Özellikle bakım sırasında trafiğe olacak etkiyi azaltmak için

3 şeritli otoyollarda 3 fan, 2 şeritli yollarda şerit başlarına 2 fan konarak fan yerleşimi yapılır. Jet fanlar 250-400 0C arasında 1-1,5 saate kadar dayanacak şekilde imal edilirler (PIARC, 2007: 270, 275).



3. TÜNEL HAVALANDIRMA SİSTEMİ HESAPLAMALARI

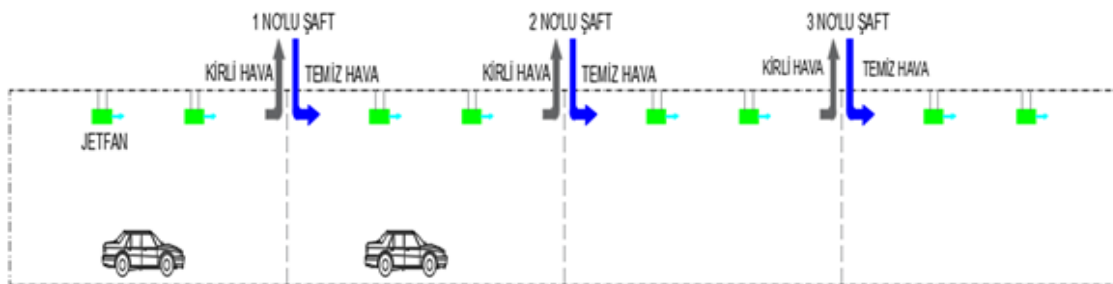
Bölüm 2.2’de gösterilen hesaplama yöntemleri kullanılarak tünele ait havalandırma sistemi hesapları yapılırken takip edilecek aşamalar;

- Tünel özellikleri (kesiti, trafik durumu, tehlikeli madde taşımacılığı konusu vb.) ve teknik hesap verilerinin tespit edilmesi,
- Tünelin emisyon durumuna göre gerekli taze hava ihtiyacının belirlenmesi,
- Tünelin yangın yükünün belirlenmesi,
- Tünel havalandırma sistemi jet fan seçimlerinin yapılmasıdır.

3.1. Tünelin Teknik Özellikleri

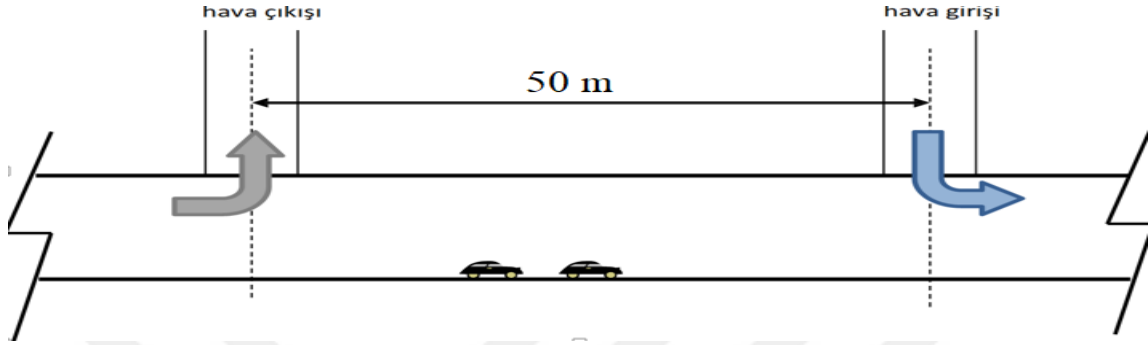
14,5 km uzunluğunda çift tüp bulunan tünel KGM Teknik Şartnamesine göre devlet ve il yolları standardına uygun olarak 2 şeritli yapılmaktadır (KGM, 1997:1,18). Tünelin havalandırma sistemi, trafikle aynı yönde çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Tünelin bulunduğu konum ve uzunluğu ile “EPC’nin 2004/54/EC sayılı direktifi” ve “Karayolları Teknik Şartnamesi” göz önünde bulundurularak klasik boyuna havalandırma sisteminin seçilmesi uygun görülmemiştir (EPC, 2004: 65; KGM, 1997:11).

Yapısal maliyetleri (gabarinin büyümesi ve kanal maliyetleri) ve işletme zorlukları dolayısıyla yarı enine ve enine havalandırma sistemlerinin yerine, çok uzun tünellerde kullanılan (Gotthard Tüneli (56 km), Ovit Tüneli (14,3 km) gibi) ve diğer sistemlere göre maliyeti daha uygun olan bölünmüş boyuna havalandırma sistemi tercih edilmiştir.



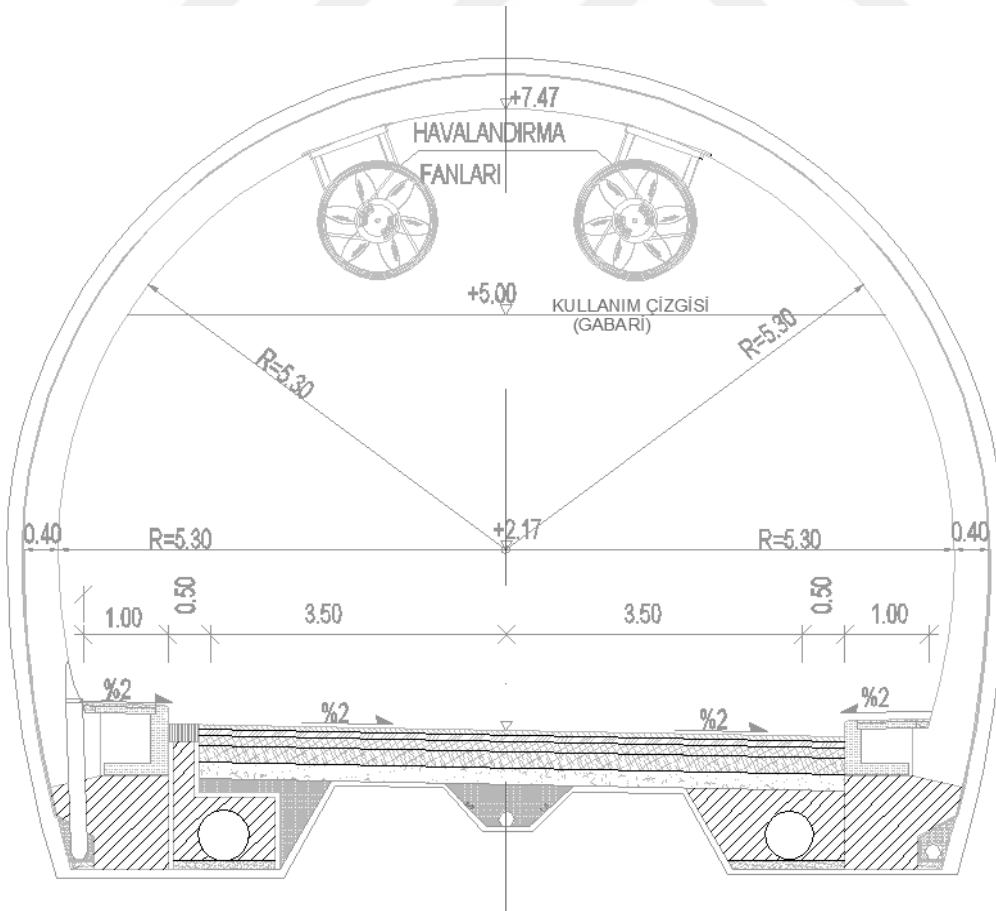
Şekil 3.1. Havalandırma sistemi şematik gösterimi

Tünelde havalandırma amaçlı 3 adet ana şaft yapısı bulunmaktadır. Aksiyal fanların bulunduğu her ana şaft yapısı içerisinde birbirinden 50 m mesafe aralıklı sırasıyla 1 kirli hava kanalı ve 1 temiz hava kanalı şaftı bulunmaktadır. Bu temiz ve kirli hava şaftları her iki tüpe de bağlanmaktadır. Bu sistemde jet fanlar ve aksiyal fanlar beraber kullanılmaktadır.



Şekil 3.2. Şaftların şematik gösterimi

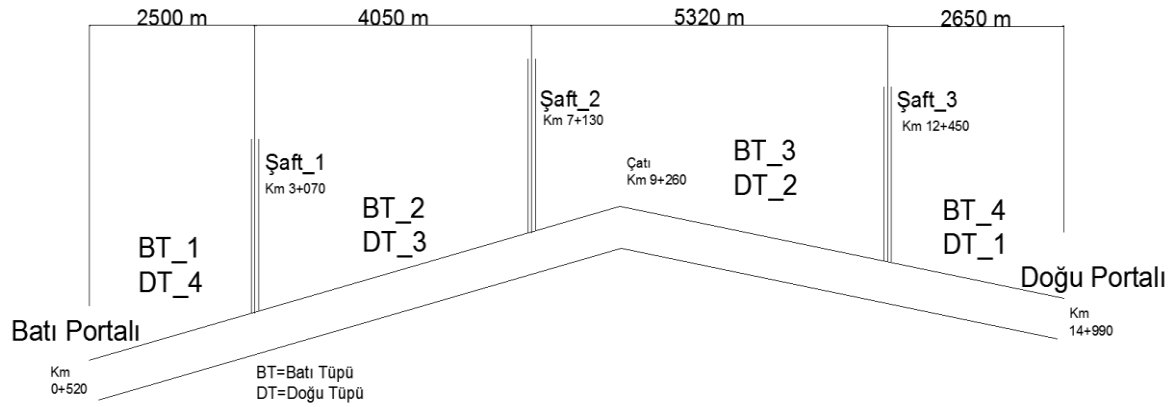
Karayolları devlet ve il yolları, bölünmüş yol standartlarına uygun tünel kesiti Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Tünel kesiti (KGM, 2016: 1,18).

Tünelin yapısal özellikleri

Tünele ait fiziksel özellikler Çizelge 3.1’de listelenmiştir. Tünelde eğim yer yer değişmekle beraber, büyük kısımlar çatı eğimli +0,85 ila -3,30 ve +3,30 ila -0,85 şeklinde değişmektedir. Hesaplamalarda eğime göre bölümler ayrı ayrı yapılmış olup bu bölümler Şekil 3.4.’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Hesap yapılan bölümlerin şematik gösterimi

Çizelge 3.1. Tünele ait fiziksel özellikler

Hesaplarda Kullanılacak Veriler	Sol tüp (Batı Tüpü)	Sağ tüp (Doğu Tüpü)
Giriş km'si	15+015	0+512
Çıkış km'si	0+519	15+032
Tünel uzunluğu	14 496 m	14 520 m
Tünel boyuna eğimi	Çatı eğim	Çatı eğim
Tünel kesit alanı	67 m ²	67 m ²
Tünel yüksekliği	7,3 m	7,3 m
Tünel çevresi	31,16 m	31,16 m
Tünel hidrolik çapı	8,6 m	8,6 m
Şerit sayısı	2	2
Giriş portalı rakımı	1210 m	1014 m
Çıkış portalı rakımı	1014 m	1210 m
Şaftların Lokasyonları		
1. shaft	3+120	3+120
2. shaft	7+100	7+100
3. shaft	12+470	12+470

Tünele ait havalandırma hesapları için 2045 yılı tahmini trafik dağılımı referans alınmıştır. Tünelin yapılacağı güzergahta, KGM'den alınan 2045 yılı trafik tahminine göre (Ek-1) hesaplanan pik yük saatlik trafik verileri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir. Pik yükler bulunurken, 2045 yılı trafik dağılımına göre, günlük trafiğin % 10 değeri olarak saatlik pik trafik yükü alınmıştır.

Çizelge 3.2. Trafik verileri

Trafik akış (tek/çift yönlü)	tek yön	tek yön
Yogt yılı	2045	2045
Ağır vasıta	286 araç/saat	286 araç/saat
Orta yüklü ticari araç	56 araç/saat	56 araç/saat
Otomobil	2166 araç/saat	2166 araç/saat
Dizel otomobil yüzdesi	30%	30%
Teknoloji standart	B	B

3.2. Emisyon ve Görüşe Göre Taze Hava Gereksiniminin Belirlenmesi

Karayolu tünellerinde havalandırma emisyonlarının hesaplanmasında Bölüm 2.2.1'de belirtildiği şekilde PIARC'ın 2019R02EN sayılı raporu referans alınmıştır. Bu rapor Türkiye'de uygulanacak karayolu tünellerinde kullanılacak araç emisyonlarını tanımlamamıştır. Fakat teknoloji standardına bağlı olarak emisyon hesaplamasını tanımlamıştır.

Avrupa araç emisyonlarının etkili kontrolünün yapıldığı durumlarda teknoloji standardı A olarak görünmektedir (Bölüm 2.2.1) . Emisyon hesaplamaları; yol yüzeyinin ve lastiklerin neden olduğu aşınmadan kaynaklı bulanıklığı da içermektedir. Araç emisyonlarında iyimser kabuller (Teknoloji A), yapım maliyetleri ve öngörülen işletme giderlerini azaltacaktır. Ancak çok güvenli tarafta kalınan kabuller, tünelin işletilmesini zorlamakta hatta tünelin kapanmasına neden olabilmektedir. Ülkemiz açısından ekonomik ve sosyal yapı düşünüldüğünde, daha güvenli taraf olan standart B daha uygun görünmektedir.

Hesaplamalar yapılırken trafik hızlarının 20 km/h altına düşmeyeceği (Düşmesi durumunda tünel kapatılacaktır.) ve tasarım hızı olan 80 km/h'in üstünde piston etkisi nedeniyle ek bir havalandırma talebi olamayacağı düşünülerek, hesaplamalar 20-80 km/h trafik hızı aralığında planlanmıştır.

Hava kalitesi kriterleri

Tüneller içerisinde havalandırma tasarımında göz önünde bulundurulacak motorlu taşıtlar tarafından oluşturulan CO, NO_x ve parçacıklar (bulanıklık, sönümleme) için konsantrasyon limitleri bir önceki bölüm Çizelge 2.3’de verilmiştir. Çizelge 2.3’e göre, akıcı trafik değerleri incelendiğinde CO sınırı 70 ppm, sönümleme değeri ise 0,005 1/m olmaktadır. % 20-30’luk NO₂/NO_x oranı olacağı kabul edilerek 1 ppm’lik NO₂ artışına göre hesaplar yapılmıştır (Hausberger ve diğerleri, 2010; CETU: 2017: 1, 12).

Taze hava ihtiyacının belirlenmesi

Tünel boyunca 2 portal ve 3 şaft ile hava giriş ve çıkışı sağlanmaktadır. Şaftlarda bir adet taze hava bir adet te kirli hava üzere iki kanal bulunmaktadır.

Hesaplamalar yapılırken her hava giriş ve çıkış kesiti ayrı bir tünel gibi düşünülecek ve hesaplamalar Şekil 3.4’de belirtilen lokasyonlara göre; batı tüpünde 4, doğu tüpünde 4 olmak üzere 8 kısımda ayrı ayrı yapılacaktır. Örnek olarak BT_1 kısmında 20 km/h trafik hızı için emisyon hesapları detaylı olarak anlatılacak olup, diğer kısımlar sonuç olarak verilecektir.

BT_1 kısmı 2500 metrelik (2,5 km) uzunluğa sahiptir (Şekil 3.4). Tünel eğimi sabit %3,3’tür. Çizelge 3.2’den araç yüzdeleri hesaplanırsa,

$a_{HGV} = 0,12$; $a_{LCV} = 0,02$; $a_{PC} = 0,86$ bulunur.

Denklem 2.7 ve Denklem 2.8 birleştirilerek 2,5 km’lik kısımdaki araç sayıları (n_{cat}) aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$n_{cat} = (D_{tra} \times L_{sec} \times a_{cat}) / V_{tra} \quad (3.1)$$

Çizelge 3.2’de ($D_{tra} \times a_{cat}$) değeri her bir araç tipi için direkt olarak verilmiştir. Tünel kesiti uzunluğu (L_{sec}) 2,5 km’dir. Trafik hızı (V_{tra}) 20 km/h için;

Otomobil sayısı; $n_{PC} = (2166 \times 2,5) / 20 = 270,76$

Hafif yük taşıtı sayısı; $n_{LCV} = (56 \times 2,5) / 20 = 6,94$

Ağır yük taşıtı sayısı; $n_{HGV} = (286 \times 2,5) / 20 = 35,78$ bulunur.

Birim araç başına emisyon değerleri Denklem 2.6 yardımıyla hesaplanır. Denklemden kullanılan f_a , f_t , ve f_m değerlerinin bulunması aşağıda açıklanmıştır.

Zaman faktörünün bulunması (f_t)

Otomobil için; Çizelge 3.3 yardımıyla, hafif yük taşıtları için; Çizelge 3.4 yardımıyla, ağır yük taşıtları için; Çizelge 3.5 yardımıyla bulunur.

Çizelge 3.3. Otomobiller için zaman faktörü seçim tablosu

f_t	CO		NO _x		Görünürlük	
Binek araç (PC)	Benzin	Dizel	Benzin	Dizel	Benzin	Dizel
2018	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2020	0,91	0,92	0,85	0,87	0,98	0,76
2025	0,78	0,80	0,62	0,51	0,95	0,44
2030	0,71	0,74	0,50	0,32	0,93	0,33
2035	0,69	0,72	0,46	0,26	0,92	0,31

Çizelge 3.4. Hafif yük taşıyan araçlar için zaman faktörü seçim tablosu

f_t	CO		NO _x		Görünürlük	
Hafif Yük Taşıtı (LCV)	Benzin	Dizel	Benzin	Dizel	Benzin	Dizel
2018	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2020	0,80	0,77	0,70	0,82	0,92	0,75
2025	0,57	0,43	0,32	0,49	0,82	0,38
2030	0,49	0,26	0,20	0,34	0,79	0,21
2035	0,48	0,25	0,19	0,29	0,78	0,17

Çizelge 3.5. Ağır yük taşıyan araçlar için zaman faktörü seçim tablosu

f_t	CO	NO _x	Görünürlük
Ağır Yük Taşıtı (HGV)	Dizel	Dizel	Dizel
2018	1,00	1,00	1,00
2020	0,89	0,71	0,96
2025	0,76	0,34	0,92
2030	0,72	0,22	0,91
2035	0,72	0,22	0,91

Yükseklik faktörünün bulunması (f_a)

Otomobil ve hafif yük taşıtları için; Çizelge 3.6 yardımıyla bulunur. Ağır yük taşıtları için, deniz seviyesinden 2000 m yüksekliğe kadar etkisizdir ($f_a = 1$).

Çizelge 3.6. Otomobiller ve hafif yük taşıtları için yükseklik faktörü seçim tablosu

f_a	CO		NO _x		Görünürlük
Binek araç ve Hafif Yük Taşıtı (PC ve LCV)	Benzin	Dizel	Benzin	Dizel	Dizel
2018	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2020	1,60	1,00	1,00	1,00	1,00
2025 ve sonrası	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Otomobil ve hafif yük taşıtları için yükseklik faktörü, Çizelge 3.6'ya göre 2025 yılı ve sonrası için tüm emisyon değerlerinde 1 olarak alınmıştır.

Araç ağırlığından kaynaklanan faktörün bulunması (f_m)

Ağır yük taşıtlarını ilgilendiren bu katsayı Çizelge 3.7 yardımıyla elde edilir.

Çizelge 3.7. Araç ağırlığına bağlı faktör seçim tablosu

f_t	CO	NO _x	Görünürlük
Ağır Yük Taşıtı (HGV)	Dizel	Dizel	Dizel
15 ton (Tek kamyon, otobüs)	0,90	0,90	0,90
23 ton (Ortalama)	1,00	1,00	1,00
32 ton (Uzun treyler, römorklu kamyon vb.)	1,20	1,20	1,20

Tablolardaki değerler teknoloji sınıfı A için verilmiştir. Teknoloji sınıfı B olduğunda zaman faktörlerinin 5 yıl gerisindeki sabit değerlerin alınması, teknoloji sınıfı C olduğunda zaman faktörlerinin 10 yıl gerisindeki sabit değerlerin alınması önerilmektedir. Tablolarda zaman faktörü en fazla 2035 yılına göre verilmiştir. Bu çalışmada, teknoloji sınıfı B olarak kabul edilmiş ve güvenli tarafta kalmak amacıyla zaman faktörleri 2030 yılına göre alınmıştır.

Yakıt cinsine göre her bir araç türü için çizelgelerden alınan zaman faktörü sayılarının özeti

Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Araç türü ve kullandığı yakıtı göre seçilen zaman faktörü sayıları

f_t	CO	NO _x	Görünürlük
Benzinli Otomobil (PC)	0,71	0,50	0,93
Dizel Otomobil (PC)	0,74	0,32	0,33
Benzinli Hafif Yük Taşıtı (LCV)	0,49	0,20	0,79
Dizel Hafif Yük Taşıtı (LCV)	0,26	0,34	0,21
Dizel Ağır Yük Taşıtı (HGV)	0,72	0,22	0,91

Araç ağırlığından kaynaklanan faktör Çizelge 3.7’de ortalama 23 t’luk ağır yük taşıtı için seçilerek, tüm emisyon durumlarında 1 olarak alınmıştır.

Denklem 2.6’daki birim araç başına egzoz kaynaklı olmayan partikül madde emisyon miktarları (q_{non-ex}) Çizelge 3.9 yardımıyla bulunur.

Çizelge 3.9. Birim araç başına, hıza göre egzoz kaynaklı olmayan partikül madde emisyon miktarları seçim tablosu

v [km/h]	Binek araç (PC) ve Hafif Yük Taşıtı (LCV) [m ² /h]		Ağır Yük Taşıtı (HGV) [m ² /h]	
	Çift Yönlü	Tek Tönlü	Çift Yönlü	Tek Tönlü
0	0	0	0	0
10	1,1	0,7	5,1	4,4
20	2,2	1,3	10,1	8,8
30	3,4	2	15,2	13,3
40	4,5	2,6	20,2	17,7
50	5,6	3,3	25,3	22,1
60	6,7	3,9	30,3	26,5
70	7,8	4,6	35,4	30,9
80	9	5,3	40,4	35,3
90	10,1	5,9	45,5	39,8
100	11,2	6,6	50,6	44,2
110	12,3	7,2		
120	13,4	7,9		
130	14,6	8,6		

Denklem 2.6’daki birim araç başına egzoz kaynaklı emisyon miktarları, araç türüne,

kullandığı yakıta, yolun eğimine ve araç hızlarına bağlı olarak değişmektedir. PIARC raporunda, birim araç başına emisyon miktarları, eğimin % -6 ile % +6 arasında, %2'lik dilimler halindeki değerlerine göre verilmiştir. %3,3 için % 4 ve % 2 arasında interpolasyon yapılarak değerler belirlenir. Ek 2'de, tüm bölümlerde yapılan çalışmaların sonuçları ve çizelgelerin detayları verilmiştir.

Tüm otomobiller (PC) için benzinli ve dizel araç oranları; %70 benzin ve %30 dizel araç olarak kabul edilmiştir. Hafif yük taşıtları için benzinli ve dizel araç oranları; %40 benzin, %60 dizel araç olacağı kabul edilmiştir. Ağır yük taşıtlarının tamamının dizel yakıt kullandığı kabul edilmiştir.

Çizelge 3.10'da örnek olarak hesapladığımız BT_1 bölümünde; 20 km/h trafik hızında % 3,3 eğim için, araç türü ve kullandığı yakıta göre, yükseklik, teknoloji ve zaman faktörünün de hesaba katılmasıyla beraber bulunan, birim araç başına egzoz kaynaklı emisyon miktarları verilmiştir.

Çizelge 3.10. %3,3 eğimde ve 20 km/h trafik hızında BT_1 bölümünde araç türüne göre birim egzoz kaynaklı emisyon miktarları ($G_{cat} \times f_a \times f_t \times f_m$) özet tablosu

Araç Tipi	CO (g/h)	NO _x (g/h)	Görünürlük (m ² /h)
Benzinli Otomobil (PC)	21,98	1,61	0,19
Dizel Otomobil (PC)	2,59	6,87	0,72
Benzinli Hafif Yük Taşıtı (LCV)	31,59	1,32	0,21
Dizel Hafif Yük Taşıtı (LCV)	0,53	8,01	0,91
Dizel Ağır Yük Taşıtı (HGV)	20,92	22,49	7,38

Çizelge 3.9'dan, egzoz kaynaklı olmayan emisyon miktarları seçim tablosu kullanılarak, 20 km/h trafik hızı ve tek yönlü trafik olması durumuna göre q_{non-ex} değerleri seçilip, Denklem 2.6'da yerine koyulduğunda, birim araç başına üretilen emisyon değerleri (G_e) bulunur.

Çizelge 3.11'de birim araç başına Denklem 2.6'ya göre hesaplanan emisyon değerleri (G_e) gösterilmiştir.

Çizelge 3.11. %3,3 eğimde ve 20 km/h trafik hızında BT_1 bölümünde araç türüne göre birim emisyon miktarları (G_e) özet tablosu

Araç Tipi	CO (g/h)	NO _x (g/h)	Görünürlük (m ² /h)
Benzinli Otomobil (PC)	22,25	1,89	1,49
Dizel Otomobil (PC)	2,86	7,14	2,02
Birim Otomobil Toplam (PC)	16,44	3,47	1,81
Benzinli Hafif Yük Taşıtı (LCV)	31,87	1,59	1,51
Dizel Hafif Yük Taşıtı (LCV)	0,80	8,29	2,21
Birim Hafif Yük Taşıtı Toplam (LCV)	13,23	5,61	1,93
Birim Dizel Ağır Yük Taşıtı (HGV)	22,80	24,37	16,18

Denklem 2.4 ve Denklem 2.5 yardımıyla tüneldeki toplam emisyon miktarı (G_{tun}) hesaplandığında bulunan değerler Çizelge 3.12’de verilmiştir.

Çizelge 3.12. %3,3 eğimde ve 20 km/h trafik hızında BT_1 bölümünde araç türüne göre toplam emisyon miktarları (G_{tun}) özet tablosu

Araç Tipi	Araç Sayısı	Birim araç başına CO (g/h)	Birim araç başına NO _x (g/h)	Birim araç başına Görünürlük (m ² /h)	Toplam CO (g/h)	Toplam Nox (g/h)	Toplam Görünürlük (m ² /h)
Birim Otomobil Toplam (PC)	270,76	16,44	3,47	1,81	4450,56	938,20	489,81
Birim Hafif Yük Taşıtı Toplam (LCV)	6,94	13,23	5,61	1,93	91,79	38,93	13,38
Birim Dizel Ağır Yük Taşıtı (HGV)	35,78	22,80	24,37	16,18	815,51	871,70	579,01
TOPLAM EMİSYON					5357,85	1848,84	1082,19

Taze hava talebinin bulunması (M^*)

20 km/h hava hızı için Denklem 2.3 yardımıyla taze hava talebi bulunur. Ortam hava yoğunluğu 1,2 kg/m³ alınmıştır. Kirlilik konsantrasyonunu ppm biriminden g/m³ birimine dönüştürebilmek için Denklem 3.2 kullanılır.

$$C \text{ (g/m}^3\text{)} = [C \text{ (ppm)} \times \rho \text{ (kg/m}^3\text{)}] / 1000 \quad (3.2)$$

CO için izin verilen emisyon miktarı (C_{adm}) 70 ppm, ortamdaki (C_{amb}) 1 ppm olmak üzere Denklem 3.2 yardımıyla, $(C_{adm} - C_{amb}) = 0,08 \text{ g/m}^3$ bulunur. Buna göre, Denklem 2.3 yardımıyla, BT_1 bölümünde, 20 km/h trafik hızında CO emisyonunu uzaklaştırmak için gerekli taze hava debisi;

$$M_{CO}^* = 5\,357,85 / 0,08 = 64\,708,36 \text{ m}^3/\text{h} = 17,97 \text{ m}^3/\text{s} \text{ bulunur.}$$

NO₂ için izin verilen emisyon miktarı (C_{adm}) 1 ppm, ortamdaki (C_{amb}) 0 ppm ve NO₂ yoğunluğu 1,9 kg/m³ olmak üzere Denklem 3.2 yardımıyla, $(C_{adm} - C_{amb}) = 0,0019 \text{ g/m}^3$ bulunur. Bulunan NO_x miktarının % 20'sinin NO₂ içerdiği kabul edilerek, Denklem 2.3 yardımıyla, BT_1 bölümünde, 20 km/h trafik hızında NO₂ emisyonunu uzaklaştırmak için gerekli taze hava debisi;

$$M_{NO_2}^* = (1\,848,84 / 0,0019) \times 0,2 = 194\,614 \text{ m}^3/\text{h} = 54,06 \text{ m}^3/\text{s} \text{ bulunur.}$$

Görünürlük (PM) için izin verilen emisyon miktarı ($K_{adm} - K_{amb}$) 0,007 m⁻¹ alınarak, Denklem 2.3 yardımıyla, BT_1 bölümünde, 20 km/h trafik hızında görünürlük için gerekli taze hava debisi;

$$M_{PM}^* = (1\,082,19 / 0,007) = 154\,599 \text{ m}^3/\text{h} = 42,94 \text{ m}^3/\text{s} \text{ bulunur.}$$

Sonuçlara göre BT_1 bölümünde 20 km/h için en yüksek değer NO₂ emisyonu için bulunmuştur. Bu sebeple BT_1 bölümünde tünel içi havalandırma sistemi tasarlanırken en düşük tasarım taze hava değeri 54,06 m³/s olmalıdır.

Çizelge 3.13'te batı tüpünde her bir bölümde yapılan hesaplamalar sonucunda, hızlara göre kritik (en yüksek) emisyon değerleri özetlenmiştir. Çizelge 3.13'de batı tüpünde hızlara bağlı emisyon hesaplarında en yüksek çıkan değerler gösterilirken, ayırt edici olması açısından tabloda renklendirme kullanılmıştır. Sarı renkli değerler ilgili lokasyonda NO_x emisyonunun, mavi renkli değerler ise partikül madde miktarının en yüksek çıktığını belirtmektedir. CO emisyonları diğerlerine göre tüm lokasyonlarda düşük çıkmıştır.

Çizelge 3.13. Batı tüpü kritik emisyon miktarları hesabı (M^*) özet tablosu

Trafik Hızı (km/h)	Batı_1 (m ³ /h)	Batı_2 (m ³ /h)	Batı_3 (m ³ /h)	Batı_4 (m ³ /h)
20	194.614,22	315.275,03	350.662,15	153.559,47
30	154.002,70	249.484,38	286.624,21	136.589,36
40	140.368,75	227.397,38	276.315,76	130.302,79
50	137.894,86	223.389,67	270.711,60	127.287,38
60	142.284,89	230.501,51	267.060,22	123.836,30
70	153.362,76	248.447,67	267.728,12	123.355,21
80	170.381,25	276.017,63	271.868,77	124.463,21

Örnek olarak gösterilen BT_1 lokasyonunda en yüksek emisyon miktarları NO_x için 20 km/h trafik hızında çıkmıştır. Tüm hesaplamalar incelendiğinde batı tüpünde en yüksek emisyon değerinin BT_3 lokasyonunda 20 km/h trafik hızında NO_x için çıktığı belirlenmiştir.

Çizelge 3.14. Doğu tüpü kritik emisyon miktarları hesabı (M^*) özet tablosu

Trafik Hızı (km/h)	Doğu_1 (m ³ /h)	Doğu_2 (m ³ /h)	Doğu_3 (m ³ /h)	Doğu_4 (m ³ /h)
20	174.988,24	307.442,12	212.111,76	130.933,19
30	142.619,52	274.982,09	196.416,41	121.244,70
40	137.355,89	263.287,52	186.227,98	114.955,54
50	134.656,30	257.730,27	181.840,39	112.247,15
60	132.095,28	252.177,73	177.144,58	109.348,50
70	131.845,53	251.638,08	176.690,11	109.067,97
80	134.263,26	254.215,25	176.056,52	108.676,86

Doğu tüpünde yapılan hesaplamalarda en yüksek emisyon değerinin NO_x için, DT_2 lokasyonunda, 20 km/h trafik hızında çıktığı belirlenmiştir (Çizelge 3.14).

Hangi lokasyonda, hangi durumda kaç tane fan çalıştırılacağını belirlemek için jet fan ve

aksiyal fan özelliklerini belirlemek gerekmektedir.

Jet fanların ve aksiyal fanların özellikleri

Tünel havalandırma sistemleri için kullanılacak jet fanların güç ve boyutları firmaların kataloglarına göre değişmektedir. Tüneli kullanacak araçların yüksekliği, tünel içerisinde jet fanların yerleşimi ile sınırlandırılmaktadır. Bu sebeple yeterli gücü verecek en küçük ebatlarda jet fanlar kullanılır. 2 şeritli tünellerde bakım ve işletme koşulları açısından çift sıra 100'er m aralıklı jet fan dizilimi uygun görülmektedir. Jet fan grupları arası 150 m'yi geçmemelidir.

Jet fanların 250 °C sıcaklıkta, 90 dakika çalışmaya devam etmesi istenmektedir. HRR > 30 MW ise 90 dakika, 400 °C sıcaklığa dayanıklı olması istenmektedir (PIARC, 2017: 24, 27). Bu çalışmada, Çizelge 3.15'de belirtilen özelliklerde jet fanların kullanılacağı kabul edilmiştir.

Çizelge 3.15. Jet fan özellikleri

İç çapı	1200 mm
Dış çapı	1400 mm
Uzunluğu	3400 mm
Nominal gücü	45 KW
Atış debisi (1,2 kg/m ³ yoğunlukta)	37 m ³ /s
Atış hızı (1,2 kg/m ³ yoğunlukta)	33,6 m/s
Jet fan verimi (η_1)	1,00
Jet fan montaj verimi (η_2)	0,90
Jet fan sistem verimi (η_3)	0,85

Şaftlarda kullanılacak aksiyal fanlar, hava değişim istasyonlarında kullanılacaktır. Bu çalışmada her bir şafta bağlı paralel çalışan 2 aksiyal fandan oluşan hava değişim istasyonları kullanılacağı öngörülmüştür. Hesaplamalarda, aksiyal fanların, nominal çalışmada tekli olarak 66 m³/h akış, paralel çalışmada 132 m³/h akış (2900 Pa, tahmini 300 kW) sağlayacağı kabul edilmiştir (HBI Haerter, 2017: 41).

Aksiyal fanlar seçilirken özellikle şaftlarda oluşacak basınç kayıplarını doğru hesaplamak gerekmektedir. Bu çalışmada, şaftların basınç kaybı hesabı yapılmamış olup, seçilen fanların

şaftlardan dolayı oluşacak basınç kaybını yendiği kabul edilmiştir.

Emisyon hesaplarına göre senaryoların belirlenmesi

Ek 2’de, jet fanların tünel içerisindeki yerleşim yerleri gösterilmiştir. Jet fanlar, şaftların ön ve arka sırasında olmak üzere 100’er m aralıklarla dizilmişlerdir.

Yüksek negatif eğim nedeniyle (% -3,2), yangın durumunda oluşacak baca etkisinin daha yoğun olduğu için, doğu tüpünde daha fazla jet fan kullanılmıştır.

Çizelge 3.16. Batı tüpü fan sayısı belirleme

Trafik Hızı (km/h)	Batı_1 (m ³ /s)	Batı_2 (m ³ /s)	Batı_3 (m ³ /s)	Batı_4 (m ³ /s)	Aksiyel Fanlar (Adet)		Jet Fanlar (Adet)			
					Egzoz Fanı	Taze Hava Fanı	Batı_1	Batı_2	Batı_3	Batı_4
20	54,06	87,58	97,41	42,66	3	3	4	6	6	2
30	42,78	69,30	79,62	37,94	3	3	2	6	6	2
40	38,99	63,17	76,75	36,20	3	3	2	4	6	2
50	38,30	62,05	75,20	35,36	3	3	2	4	6	2
60	39,52	64,03	74,18	34,40	3	3	2	4	6	2
70	42,60	69,01	74,37	34,27	3	3	2	6	6	2
80	47,33	76,67	75,52	34,57	3	3	2	6	6	2

Çizelge 3.17. Doğu tüpü fan sayısı belirleme

Trafik Hızı (km/h)	Doğu_1 (m ³ /s)	Doğu_2 (m ³ /s)	Doğu_3 (m ³ /s)	Doğu_4 (m ³ /s)	Aksiyel Fanlar (Adet)		Jet Fanlar (Adet)			
					Egzoz Fanı	Taze Hava Fanı	Batı_1	Batı_2	Batı_3	Batı_4
20	48,61	85,40	58,92	36,37	3	3	2	6	4	2
30	39,62	76,38	54,56	33,68	3	3	2	6	4	2
40	38,15	73,14	51,73	31,93	3	3	2	6	2	2
50	37,40	71,59	50,51	31,18	3	3	2	6	2	2
60	36,69	70,05	49,21	30,37	3	3	2	6	2	2
70	36,62	69,90	49,08	30,30	3	3	2	6	2	2
80	37,30	70,62	48,90	30,19	3	3	2	6	2	2

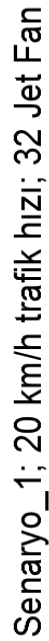
Trafik hızlarına bağı kritik emisyon değerlerine göre, Çizelge 3.13 ve 3.14'te bulunan saatlik taze hava debileri, saniyede gerekli hava debisine dönüştürülerek ($M^*/3600$) hesaplanan, taze hava debisi ve bu debiyi sağlayabilecek, optimum fan sayıları Çizelge 3.16 ve Çizelge 3.17'de özetlenmiştir.

Jet fanlar ikişer gruplar halinde çalışacağı için, herhangi bir arızalanma durumu da göz önüne alınarak, bütün lokasyonlarda birer grup fazla seçilmiştir.

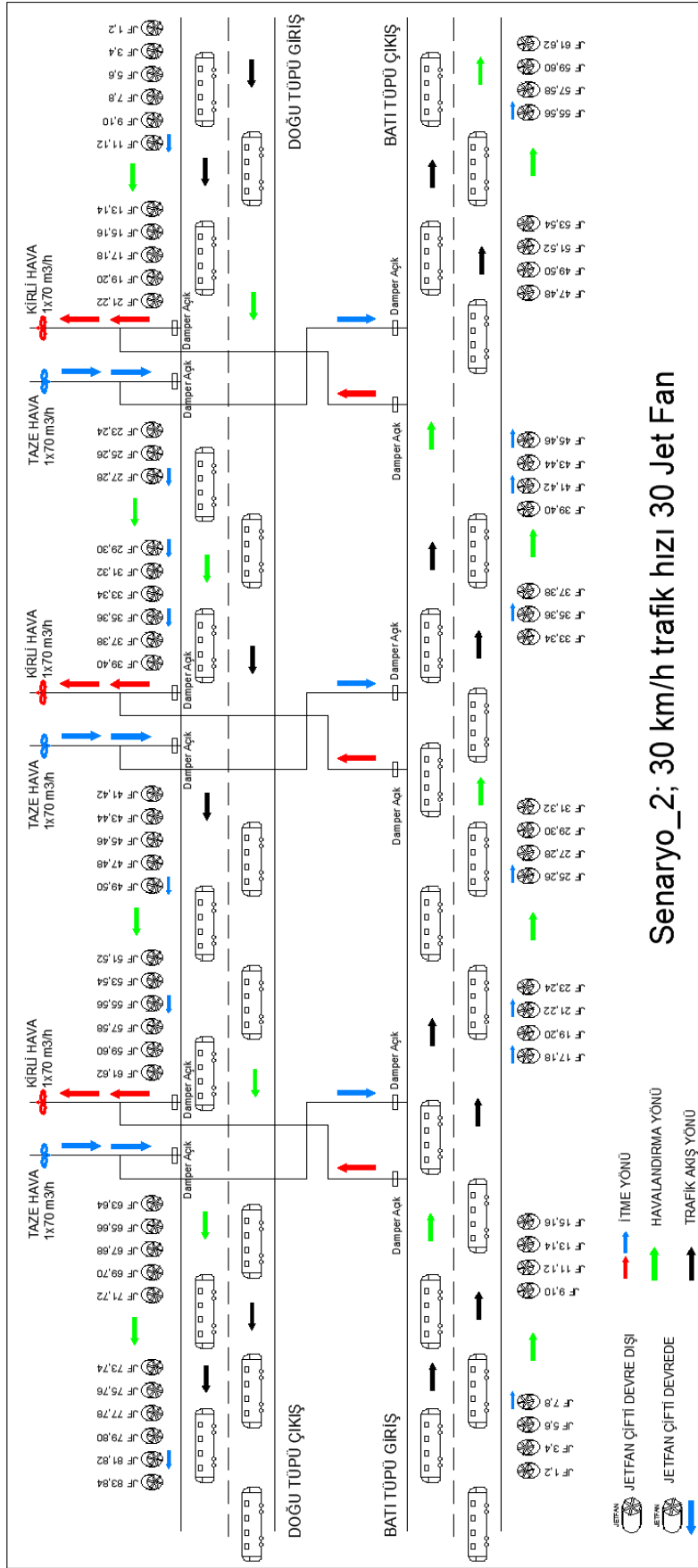
Şekil 3.3, 3.4, 3.5 ve 3.6'da, emisyon durumuna göre havalandırma senaryoları şematik olarak gösterilmiştir. Şematik gösterimde ve hesaplamalarda trafik hızlarına göre tahmin yapılmıştır. Gerçek çalışmada lokasyon sayısı artırılarak (örneğin her 1 000 m, bir lokasyon olacak şekilde) tünel içerisinde belirli aralıklarla kullanılan CO, NO_x, partikül madde emisyonu ölçüm cihazlarından alınan verilere göre bulmuş olduğumuz senaryolar 3 kademe haline getirilerek çalıştırılabilir.

Örneğin CO için; 5 ppm değer ölçüldüğünde sınır değer olarak belirlediğimiz Şekil 3.7'de gösterilen "Senaryo 3" işletilebilir. Değer 20-30 ppm'e ulaştığında Şekil 3.6 ve 3.8'te gösterilen "Senaryo 2 ve 4", değer 50-100 ppm seviyelerine geldiğinde Şekil 3.5'te gösterilen Senaryo 1 çalıştırılabilir. Daha yüksek emisyon değerlerinde tünel trafiğe kapatılır.

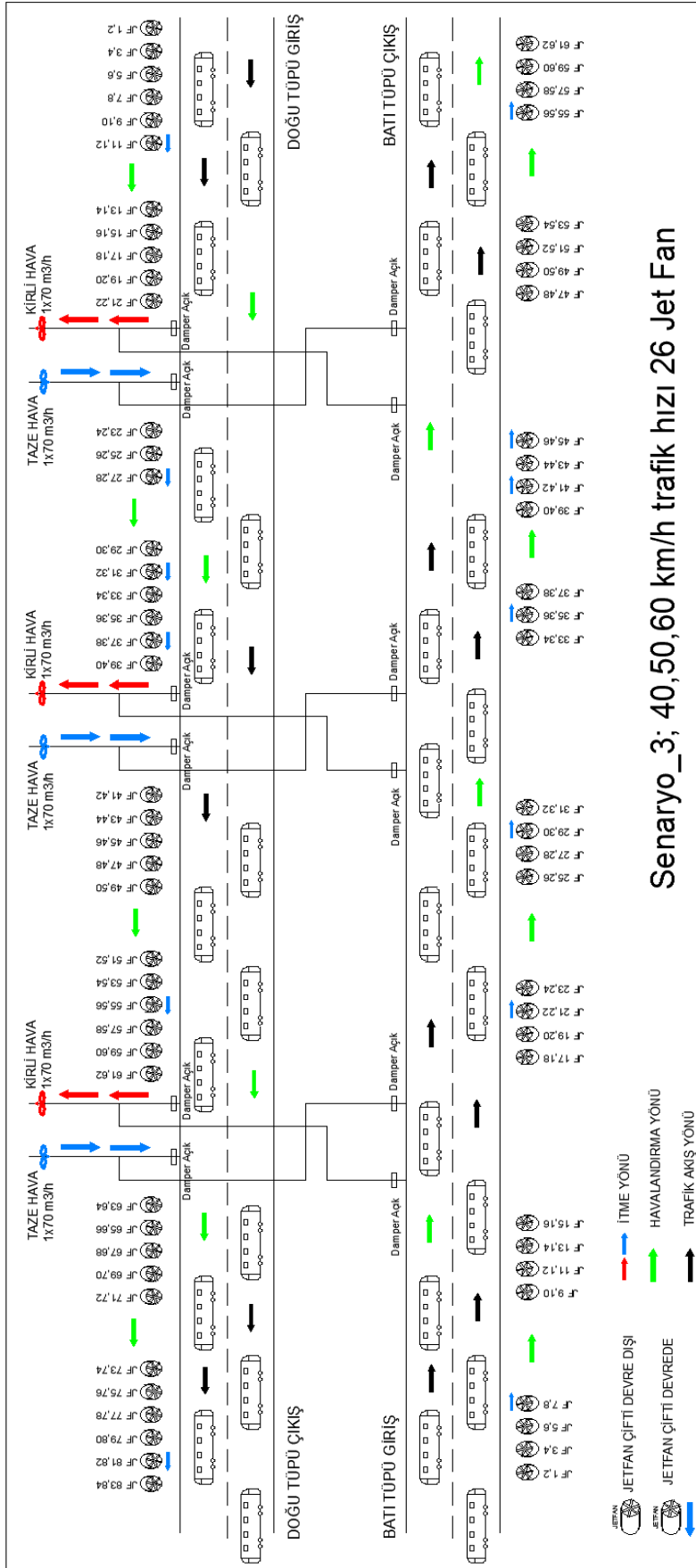
Aynı enerji dağıtım merkezine bağlı jet fan grupları (500 – 600 m aralıkta dizilmiş gruplar), herhangi bir senaryo devreye girdiğinde sürekli aynı jet fanlara yük binmemesi için, zaman ayarlı, eş yaşlandırma tekniğine göre çalıştırılmalıdır.



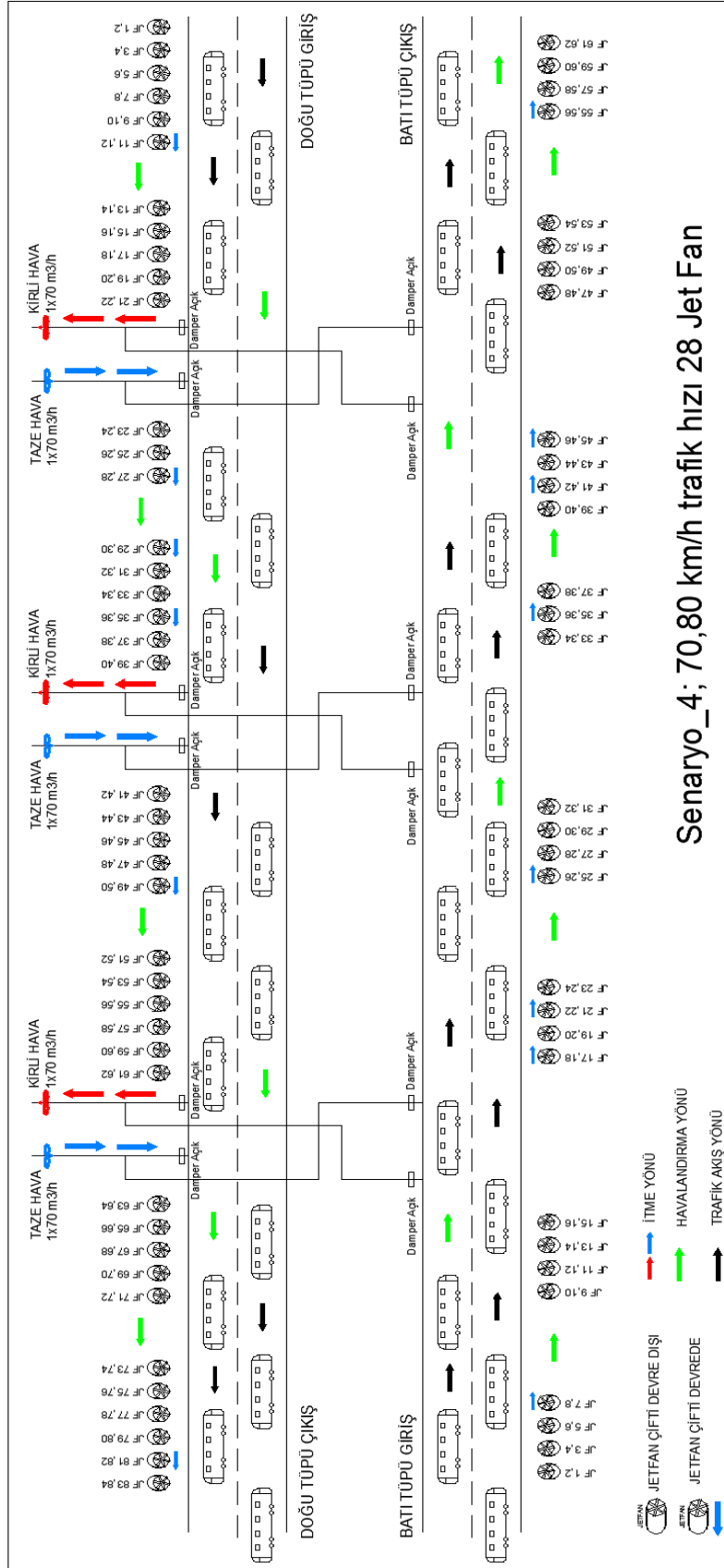
Şekil 3.5. Emisyon durumuna göre senaryo 1 havalandırma sistemi çalışma şeması



Şekil 3.6. Emisyon durumuna göre senaryo 2 havalandırma sistemi çalışma şeması



Şekil 3.7. Emisyon durumuna göre senaryo 3 havalandırma sistemi çalışma şeması



Şekil 3.8. Emisyon durumuna göre senaryo 4 havalandırma sistemi çalışma şeması

3.3. Acil Durum Havalandırma Sistemi (Yangın)

3.3.1. Yangın yükünün seçilmesi

Çizelge 3.18 incelendiğinde birçok ülkenin, aşırı ağır yük taşıtı trafiği ve tünelden tehlikeli madde geçişine izin verilmesi gibi risk analizi gerektiren durumlar haricinde 30 MW yangın tasarımını yeterli bulduğu görülmektedir.

Çizelge 3.18. Farklı ülkelerin yangın tasarım yük ve kriterleri özeti (PIARC, 2017: 6)

Ülke	Yangın Tasarım Yükü (MW)	Açıklamalar
Avustralya	50	Su sisi sistemiyle birlikte, havalandırma amaçlı
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.
Yunanistan	100	Boyuna havalandırma sistemlerinde kullanılıyor.
İtalya	20-200	Tehlikeli madde taşımacılığı varsa 200 MW
Japonya	30	Su sisi sistemiyle birlikte, havalandırma amaçlı
Hollanda	100-200	Tanker taşımacılığı yoksa 100 MW, Varsa 200 MW
Norveç	20-100	Risk sınıflarına göre değişiyor.
Portekiz	10-100	Trafik yoğunluğu ve özelliklerine göre değişiyor
Rusya	50-100	Trafik yoğunluğu ve özelliklerine göre değişiyor
Singapur	30-200	İzin verilen araç trafiğine göre değişiyor.
İspanya	≥ 30	
İsveç	100	Boyuna havalandırma sistemlerinde kullanılıyor.
İsviçre	30	Duman atım hızı 3,3-4 m/s arasında olacak şekilde
İngiltere	30-100	
Amerika	30-300	Tehlikeli madde taşımacılığı varsa 300 MW
Türkiye	≥ 30	Trafik yükü, tünel uzunluğu ve risk kategorisine göre

Bu çalışmada, tünelde tehlikeli madde taşımacılığı yapılmayacağı varsayılmıştır. Tehlikeli madde taşımacılığına bağlı yangınların dışında pik yükü 30 MW'ı geçen araç yangınlarını 25-50 tonluk ağır yük taşıtları yangınları ve bu taşıtların beraber karıştığı kazalar oluşturmaktadır (Ingason, 2009). Tünelde tüp başına trafik yükünün, nispeten küçük olduğu düşünülerek, birden fazla ağır yük taşıtının çarpışması ve yangınına bağlı riskin düşük olması beklenmektedir. Tüm bunların yanında, tünelde bir kaza sonucu olarak trafik aksamasını minimuma indirmek amacıyla, tünelde çarpışmaya bağlı kaza riskleri, işletmeye yönelik yapılacak diğer hassasiyet analizleriyle (Örneğin trafik yönetimi, yol işletmesi vb.)

minimuma indirilmektedir. Tüm faktörler değerlendirilerek, havalandırma tasarımında yangın yükü 30 MW olarak alınmıştır.

3.3.2. Kritik hız ve sıcaklığın bulunması

Olası bir yangın durumunda gerek acil durum araçlarının müdahalesi, gerekse tünel içinde dumandan ve sıcaklıktan arındırılmış bir ortam sağlanabilmesi amacıyla tünel içinde oluşabilecek ters katmanlaşmanın önlenmesi gerekmektedir. Ters katmanlaşma, duman ve sıcak havanın istenilen havalandırma yönünün tersine ilerlemesidir. Kritik hız ise ters katmanlaşmanın önüne geçilen minimum havalandırma hızıdır.

Tünel içerisinde yangın esnasında havalandırma sistemi aracılığı ile sağlanan hava hızı, dumanı istenilen yönde yönlendirmek ve bu esnada ters katmanlaşmayı engelleyebilmek için kritik hızdan büyük olmalıdır.

Karayolu tünellerinde duman, trafiğin akış yönüne doğru yönlendirilmelidir. Bu sayede yangın bölgesinde oluşabilecek bir trafik sıkışıklığı durumunda, araçların ve içerisindeki yolcuların dumana ve sıcaklığa maruz kalmamaları sağlanmış olur.

Kritik hız; yangın ısı yükü, tünel yüksekliği, tünel kesit alanı, tünel eğimi, ortam sıcaklığı gibi parametrelere bağlıdır. Denklem 3.3 ve Denklem 3.5'in birlikte çözülmesiyle kritik hız ve kritik sıcaklık hesaplanabilmektedir (Toprak, 2014).

$$V_c = K_v \cdot K_g \left(\frac{g Q_c H}{\rho_0 c_p T_f A} \right)^{1/3} \quad (3.3)$$

$$K_g = 1 + 0,0374(\theta)^{0,8} \quad (3.4)$$

Burada;

$$T_f = \frac{Q_c}{\rho_0 c_p A V_c} + T_0 \quad (3.5)$$

Tünelde çatı eğimi olduğu için üç ayrı kritik hız ve sıcaklık hesabı yapılması gerekmektedir (Artı eğimde ve eksi eğimde -0,85 ve -3,3 için). Pozitif eğimde eğim havalandırma sistemine

yardımcı olmaktadır. Ancak güvenli tarafta kalabilmek için pozitif eğimin etkisi (K_g) hesaplara katılmamıştır.

Pozitif eğimde 30 MW'lık yangın durumunda kritik hız ve sıcaklık

Çizelge 3.19. Pozitif eğim kritik hız hesabında kullanılan değerler

Yangın Yüğü (Q)	30,00	MW	Tünel Yüksekliği (H_T)	7,22	m
Ortam Hava Yoğunluğu (ρ_0)	1,20	kg/m ³	Tünel Kesit Alanı (A_T)	67,00	m ²
Ortam Sıcaklığı (T_0)	20,00	°C	Tünel Eğimi (m)	+	%
Havanın Özgül Isısı (C_p)	1,01	kJ/kg°C	Froude Sayısı Faktörü (K_1)	0,61	(Fr ^{-1/3})

Çizelge 3.20. Pozitif eğim kritik hız ve sıcaklık değerleri iterasyonları (National Fire Protection Association [NFPA] 502, 2017: Annex-D)

Iteration	Tf (C)	Vc (m/s)
1	20,00	2,71
2	156,56	2,39
3	175,13	2,35
4	177,33	2,35
5	177,59	2,35
6	177,62	2,35
7	177,62	2,35
8	177,62	2,35



Pozitif eğimin olduğu kısımlarda 30 MW'lık yangın durumunda kritik hız (V_c) 2,35 m/s, kritik sıcaklık (T_c) 178 °C bulunmuştur.

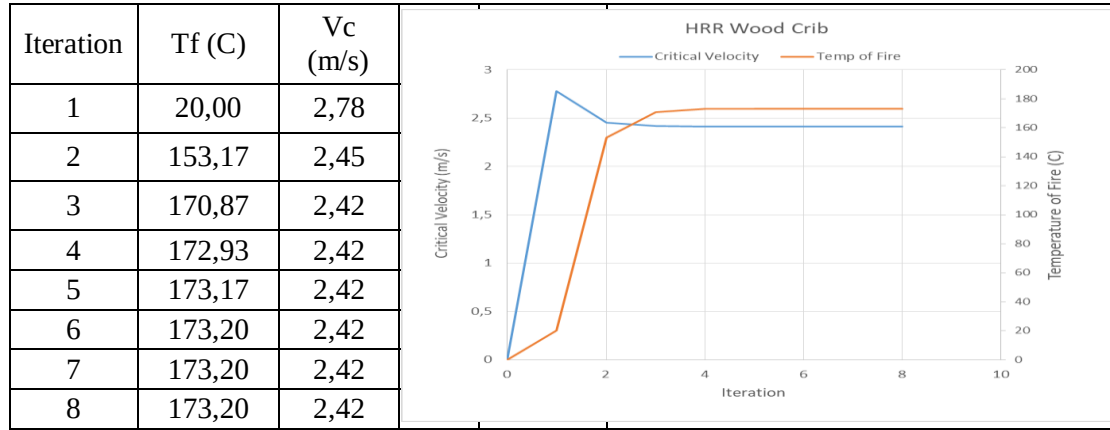
Eğimin -0,85% olduğu kısımda 30 MW'lık yangın durumunda kritik hız ve sıcaklık

Eğimin -0,85% olduğu kısımda 30 MW'lık yangın durumunda kritik hız (V_c) 2,42 m/s, kritik sıcaklık (T_c) 173 °C bulunmuştur.

Çizelge 3.21. Eğimin -0,85% olduğu kısımda kritik hız hesabında kullanılan değerler

Yangın Yüğü (Q)	30,00	MW	Tünel Yüksekliği (H_T)	7,22	m
Ortam Hava Yoğunluğu (ρ_0)	1,20	kg/m ³	Tünel Kesit Alanı (A_T)	67,00	m ²
Ortam Sıcaklığı (T_0)	20,00	°C	Tünel Eğimi (m)	-0,85	%
Havanın Özgül Isısı (C_p)	1,01	kJ/kg°C	Froude Sayısı Faktörü (K_1)	0,61	(Fr ^{-1/3})

Çizelge 3.22. Eğimin -0,85% olduğu kısımda kritik hız ve sıcaklık değerleri iterasyonları (NFPA 502, 2017: Annex-D)

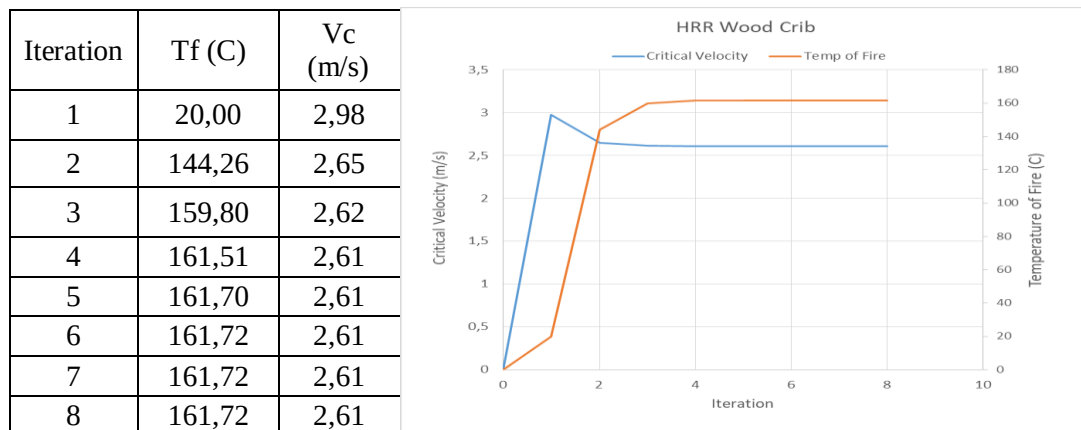


Eğimin -3,3% olduğu kısımda 30 MW'lık yangın durumunda kritik hız ve sıcaklık

Çizelge 3.23. Eğimin -3,3 % olduğu kısımda kritik hız hesabında kullanılan değerler

Yangın Yüğü (Q)	30,00	MW	Tünel Yüksekliği (H _T)	7,22	m
Ortam Hava Yoğunluğu (ρ ₀)	1,20	kg/m ³	Tünel Kesit Alanı (A _T)	67,00	m ²
Ortam Sıcaklığı (T ₀)	20,00	°C	Tünel Eğimi (m)	-3,30	%
Havanın Özgül Isısı (C _p)	1,01	kJ/kg°C	Froude Sayısı Faktörü (K ₁)	0,61	(Fr ^{-1/3})

Çizelge 3.24. Eğimin -3,3% olduğu kısımda kritik hız ve sıcaklık değerleri iterasyonları (NFPA 502, 2017: Annex-D)



Eğimin -3,3% olduğu kısımda 30 MW'lık yangın durumunda kritik hız (V_c) 2,61 m/s, kritik sıcaklık (T_c) 162 °C bulunmuştur. Yüksek eğim nedeniyle, yangın sonucu oluşan baca etkisi

en çok bu bölümde etkili olmaktadır. Tünel içi havalandırma tasarım hızı, bu değeri aşacak şekilde 3 m/s olarak seçilmiştir.

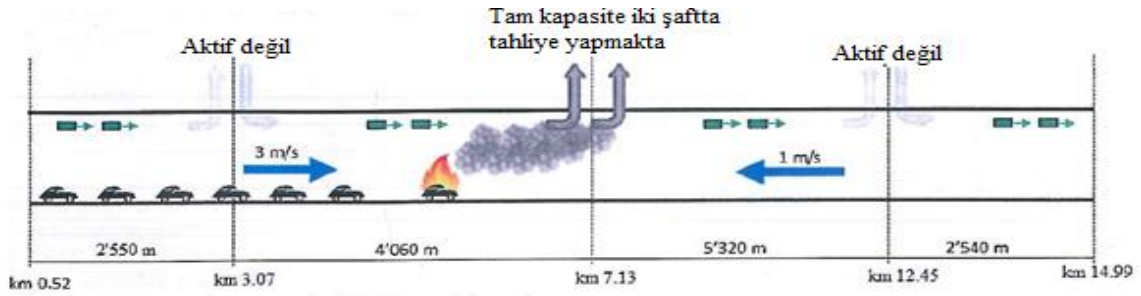
3.3.3. Acil durum senaryoları

Acil durum senaryoları, yangın sırasında oluşacak dumanı tahliye edecek hava akışını tespit etmek ve söz konusu yangın yeri için hesaplanan "kritik hız" değeri ile karşılaştırmak için gereklidir.

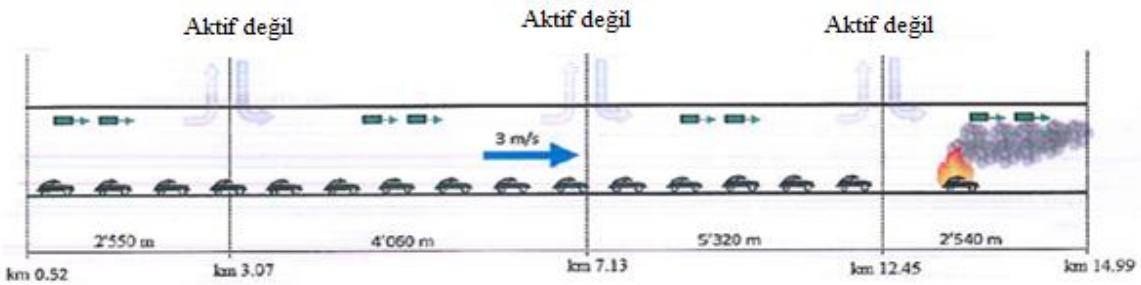
Tünel içerisindeki yangının etkisi, yangının tünel içerisindeki pozisyonuna bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada yangın sonucu oluşan dumanın tahliyesi için iki durum göz önünde bulundurulmuştur (CETU, 2003: 69).

Durum 1; Duman, en yakın hava değişim istasyonunun yayılım yönüne yönlendirilir.

Durum 2; Duman, tüm hava değişim istasyonlarının ilerisinde ise jet fanlar vasıtasıyla çıkışa yönlendirilir.



Şekil 3.9. Şaftlar öncesi yangın durumu (Durum 1)



Şekil 3.10. Şaftlar sonrası yangın durumu (Durum 2)

Yangın durumunda havalandırma tasarımı yapılırken, trafik yönüne göre yangın bölgesinin gerisinde kalan tünel kullanıcılarının, havalandırma yönünün tersi doğrultusunda acil geçiş kapılarından tahliye edileceği düşünülmüştür. Yangın olan bölgedeki yolcular en yakın tahliye tüneline diğer tüpe veya aynı tüpte tünel girişine doğru tahliye edileceklerdir.

Yangın durumunda, yangının yayılım yönünde duran hiçbir aracın olmadığı kabul edilmiştir. Duman tahliyesi trafik akış yönüne doğru yapılacaktır.

Durum 1’de, duman iki şaft aracılığıyla tahliye edilmiştir. Aksiyal fanlardaki hava akış yönü, dumanın tahliyesine destek sağlamak amacıyla dışarıya atış yönüne çevrilmektedir. Jet fanlar yangının yayılım yönüne doğru tünel içerisinde 3 m/s hava hızı sağlayacak şekilde, tahliye noktalarının ilerisinde ise yangının yayılım yönüne karşı 1m/s olacak şekilde, şafta yakın kısımlardaki jet fanlar devre dışı bırakılıp ilerideki jet fanlardan başlayarak çalıştırılacak şekilde yerleştirilmiştir (CETU, 2003: 27,28).

Durum 2’de, duman sadece jet fanlar kullanılarak tünel içerisinde 3 m/s hava hızı sağlayacak şekilde çıkış portalinden atılmaya zorlanmaktadır.

Kaza olmayan tüpte 1 m/s hızda, trafik akış yönüne karşı bir boyuna hava hızı öngörülmektedir. Bu, kaza olan tüpün çıkış portalı ile kaza olmayan tüpün giriş portalı arasında olası kısa devre riskinin asgaride tutulması için gereklidir.

Yangının olduğu noktaya 100 metreden yakın mesafede bulunan jet fanlar, yangını tetiklememesi ve oluşacak yüksek sıcaklık nedeniyle verimlerinin düşeceği düşünülerek (Bölüm 2.2.2) acil durum senaryolarında devre dışı bırakılmıştır.

Bu çalışmada, Durum 1 ve Durum 2’de belirtilen çalışma senaryolarına göre Şekil 3.4’te gösterilen, batı tüpünde 4 lokasyon ve doğu tüpünde 4 lokasyon olmak üzere 8 ayrı lokasyonda acil durum havalandırma sistemi tasarlanmıştır.

Yangın Durumunda Basınç Kayıplarının Hesaplanması ve Kritik Bölgenin Seçilmesi

Bölüm 2.2.2.’de gösterilen formüllerle, 500 m’de bir, her iki tüpte de 30 MW’lık yangın çıkması durumunda oluşacak basınçlar ve kullanılacak jet fan sayısı belirlenmiştir. Basınç

kayıplarının hesabı ve jet fan seçimi için bir yazılım geliştirilmiş olup, yazılımda kullanılan parametreler ve 8 ayrı lokasyonda kabul edilen senaryolar aşağıda açıklanmıştır.

Çizelge 3.25. Basınç kayıpları hesaplarında kullanılan değerler

Tünelin Yapısal Özellikleri		
Tünel Uzunluğu (L)	14500,00	m
Tünel Kesit Alanı (A_T)	67,00	m ²
Tünel Yüksekliği (H)	7,22	m
Tünel Hidrolik Çapı (D_H)	8,60	m
Tünel Çevre Uzunluğu (P)	31,00	m
Şerit Sayısı	2	
Araçlardan Kaynaklı Blokaaj Etkisi Hesaplama Verileri		
Otomobil Sayısı (n_{PC})	2437	araç/h
Orta/Hafif Yük Taşıtı Sayısı (n_{LCV})	322	araç/h
Ağır Yük Taşıtı Sayısı (n_{HGV})	62	araç/h
Otomobil Direnç Katsayısı (λ_{PC})	0,4	-
Orta/Hafif Yük Taşıtı Direnç Katsayısı (λ_{LDV})	1	-
Ağır Yük Taşıtı Direnç Katsayısı (λ_{HGV})	1	-
Otomobil Yüzey Alanı (A_{PC})	2	m ²
Orta/Hafif Yük Taşıtı Yüzey Alanı (A_{LCV})	6	m ²
Ağır Yük Taşıtı Yüzey Alanı (A_{HGV})	6	m ²
Dumanı Uzaklaştırmak İçin Havalandırma Hızı (u_1)	3,00	m/s
Duman Kontrolü İçin Havalandırma Hızı (u_2)	1,00	m/s
Meteorolojik Koşullardan Kaynaklı Etkilerin Hesaplama Verileri		
Tünel İçi Sıcaklık (T_o)	20,00	°C
Tünel Dışı Sıcaklık (T_d)	7,00	°C
Tünel Dışı Rüzgar Hızı (v_r)	13,3	m/s
Barometrik Basınç Farkı (ΔP_b)	160	Pa
Yerçekimi İvmesi (g)	9,81	m/s ²
Tünel Portalları ve Duvarlarından Kaynaklı Etkilerin Hesaplama Verileri		
Giriş Portali Kayıp Katsayısı (ξ_g) (Beton Kaplama)	0,4	-
Çıkış Portali Kayıp Katsayısı (ξ_c)	1,00	-
Duvarların Sürtünme Kayıp Katsayısı (λ)	0,02	-
Hesaplarda Kullanılan Termal Veriler		
Yangın Gücü (Q)	30,00	MW
Havanın Özgül Isısı (C_p)	1,01	kJ/kg°C
Duvar Emisyon Değeri (ϵ)	0,70	
Stefan Boltzman Sabiti (σ_o)	$5,68 \cdot 10^{-8}$	W/m ² K ⁴
Başlangıç Prandtl Sayısı (Pr)	0,70	-

Örnek olarak BT_1 lokasyonunda tünel girişinden 500 m mesafede yangın çıkması durumunda basınç kayıplarının nasıl hesaplandığı ve jet fan seçimlerinin nasıl yapıldığı anlatılmıştır. Diğer bölümlerle ilgili hesap özetleri de bölüm sonunda gösterilmiştir. Hesaplarda kullanılan ve sabit olarak alınan, katsayı ve değerler Çizelge 3.25'te gösterilmiştir.

Yangının çıktığı bölümde eğim pozitif yönde % 3,3'tür. Bölüm 3.3.2'de pozitif eğimde kritik sıcaklık (T_c) 178 °C olarak hesaplanmıştı. Denklem 2.17'ye göre mesafeye göre sıcaklık düşüşü hesaplanabilir. Denklem 2.17 incelendiğinde sabit olmayan terimler; ısı taşınım katsayısı (h_c), radyasyon ısı transfer katsayısı (h_r), yoğunluk ve c_p değerleridir. Yangın bölgesinden 10 m uzaklıktaki ilk değerler referans alınarak değişimi hesaplırsak;

Denklem 2.13 ve Denklem 2.16'dan;

$$h_c = [(0,7/8) \times 1,01 \times (1,2 \times 293/451) \times 2,35] / [1,07 + 12,7 \times (0,7^{2/3} - 1) \times (0,02/8)^{1/2}] \times 1000$$

$$= 4,94 \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

$$h_r = 0,7 \times 5,68 \times 10^{-8} \times (451+293)^* (451^2 + 293^2) = 8,57 \text{ (W/m}^2\text{K)} \text{ bulunur.}$$

Denklem 2.17'de değerler yerine koyulduğunda,

$$\delta T / \delta x = - [31 \times (4,94-8,57) \times (451-293)] / [(1,2 \times 293/451) \times 1,01 \times 67 \times 3 \times 1000]$$

$$= 0,126 \text{ bulunur.}$$

İlk 10 m'lik mesafede sıcaklık düşüşü $0,126 \times 10 = 1,26 \text{ K}$ bulunur. Buna göre, bir boyutta yangının 10 m ilerisinde sıcaklık değeri;

$$T_{10} = (178+273) - 1,26 = 449,74 \text{ K bulunur.}$$

Bu yaklaşımla, her metrede tek boyutlu sıcaklık, hava yoğunluğu, ısı taşınım katsayısı ve radyasyon ısı transfer katsayımı değişimi hesaplanabilir. Çizelge 3.26'da pozitif eğimde, Çizelge 3.27'de % -0,85 eğimde, Çizelge 3.28'de % -3,3 eğimde, 100 m aralıklarla, ilk 1000 m'lik bölümde, yangının başlangıç noktasından, duman atım yönünde bir boyutlu sıcaklık,

hava yoğunluğu, ısı taşınım katsayısı ve radyasyon ısı transfer katsayısı değişimi gösterilmiştir.

Çizelge 3.26. Pozitif eğimde kritik hız ve sıcaklığa bağlı özelliklerin mesafeye göre değişimi

Yangına Uzaklık	Sıcaklık (T) (K)	h_c (W/m ² K)	ρ_{air} (kg/m ³)	h_r (W/m ² K)	h_c / h_r
0	451,00	4,94	0,78	8,57	0,58
100	416,06	5,36	0,85	7,31	0,73
200	391,67	5,69	0,90	6,52	0,87
300	373,53	5,97	0,94	5,98	1,00
400	359,53	6,20	0,98	5,59	1,11
500	348,45	6,40	1,01	5,29	1,21
600	339,50	6,57	1,04	5,06	1,30
700	332,20	6,71	1,06	4,88	1,37
800	326,17	6,83	1,08	4,74	1,44
900	321,15	6,94	1,09	4,62	1,50
1000	316,95	7,03	1,11	4,52	1,56

Çizelge 3.27. % -0,85 eğimde, kritik hız ve sıcaklığa bağlı özelliklerin mesafeye göre değişimi

Yangına Uzaklık	Sıcaklık (T) (K)	h_c (W/m ² K)	ρ_{air} (kg/m ³)	h_r (W/m ² K)	h_c / h_r
0	446,00	5,15	0,79	8,38	0,61
100	412,36	5,57	0,85	7,18	0,78
200	388,69	5,91	0,90	6,43	0,92
300	371,04	6,19	0,95	5,91	1,05
400	357,39	6,42	0,98	5,53	1,16
500	346,57	6,62	1,01	5,24	1,26
600	337,85	6,80	1,04	5,02	1,35
700	330,73	6,94	1,06	4,85	1,43
800	324,85	7,07	1,08	4,71	1,50
900	319,97	7,18	1,10	4,59	1,56
1000	315,90	7,27	1,11	4,50	1,62

Çizelge 3.28. % -3,3 eğimde, kritik hız ve sıcaklığa bağlı özelliklerin mesafeye göre değişimi

Yangına Uzaklık	Sıcaklık (T) (K)	h_c (W/m ² K)	ρ_{air} (kg/m ³)	h_r (W/m ² K)	h_c / h_r
0	435,00	5,69	0,81	7,97	0,68
100	403,97	6,13	0,87	6,91	0,89
200	381,84	6,48	0,92	6,22	1,04
300	365,23	6,78	0,96	5,74	1,18
400	352,35	7,03	1,00	5,39	1,30

Çizelge 3.28 (devamı). % -3,3 eğimde, kritik hız ve sıcaklığa bağlı özelliklerin mesafeye göre değişimi

Yangına Uzaklık	Sıcaklık (T) (K)	h_c (W/m ² K)	ρ_{air} (kg/m ³)	h_r (W/m ² K)	h_c / h_r
500	342,14	7,23	1,03	5,13	1,41
600	333,91	7,41	1,05	4,92	1,51
700	327,22	7,56	1,07	4,76	1,59
800	321,71	7,69	1,09	4,63	1,66
900	317,16	7,80	1,11	4,53	1,72
1000	313,38	7,90	1,12	4,44	1,78

Tünelin fiziksel özelliklerinden kaynaklanan (Δp_{tu}) basınç kayıpları

Tünelin giriş portalından, çıkış portalından ve duvar sürtünmelerinden kaynaklı basınçları ifade eder. Denklem 2.20 ile bulunur.

Giriş portalı basınç kaybı ($\Delta p_{entrance}$), Denklem 2.23 ile elde edilir.

$$\Delta p_{entrance,1} = \left(\frac{1}{2}\right) \times 1,2 \times 32 \times 0,02 = 0,11 \text{ Pa (3 m/s hava hızının olduğu bölümde)}$$

$$\Delta p_{entrance,2} = \left(\frac{1}{2}\right) \times 1,2 \times 12 \times 0,02 = 0,01 \text{ Pa (1 m/s hava hızının olduğu bölümde)}$$

Çıkış portalı basınç kaybı (Δp_{exit}), Denklem 2.22 ile elde edilir. Çıkış shaftında sıcaklık Denklem 2.17'ye göre 297,74 K olarak bulunmuştur.

$$\Delta p_{exit,1} = \left(\frac{1}{2}\right) \times 1,2 \times 32 \times (297,74/293) = 5,49 \text{ Pa (3 m/s'lik bölümde)}$$

$$\Delta p_{exit,2} = \left(\frac{1}{2}\right) \times 1,2 \times 12 \times (297,74/293) = 0,61 \text{ Pa (1 m/s'lik bölümde)}$$

Çıkış portalı basınç kaybı (Δp_{exit}), Denklem 2.22 ile elde edilir. Çıkış shaftında sıcaklık Denklem 2.17'ye göre 297,74 K olarak bulunmuştur.

Duvarlardan kaynaklı oluşan basınç kaybı ΔL uzunluğu boyunca Denklem (2.21) yardımıyla hesaplayabiliriz. Her bir metrede sıcaklık ve sıcaklığa bağlı değerler değiştiğinden dolayı aşağıdaki işlemlerde sıcaklık T_x değeri değişken olarak gösterilmiş olup, belirtilen bölüm için programda bulunan sonuçlar verilmiştir.

$$\Delta p_{\text{walls, 0-500 m arası}} = 0,02 \times (490/8,6) \times (1/2) \times 1,2 \times 32 \times (T_x/293) = 6,15 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{\text{walls, 500 – 2500 m arası}} = 0,02 \times (2000/8,6) \times (1/2) \times 1,2 \times 32 \times (T_x/293) = 29,39 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{\text{walls, 2500 – 14500 m arası}} = 0,02 \times (12000/8,6) \times (1/2) \times 1,2 \times 12 \times (T_x/293) = 16,66 \text{ Pa}$$

Yangın anında araçların durmasından kaynaklı blokaj nedeniyle oluşan basınç etkisi (Δp_{veh}) Denklem (2.24) ile elde edilir.

$$\Delta p_{\text{veh, PC}} = 0,4 \times (2 / 67) \times (1/2) \times 1,2 \times 14,22 \times 32 = 0,92 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{\text{veh, HGV}} = 1 \times (6 / 67) \times (1/2) \times 1,2 \times 5,26 \times 32 = 2,54 \text{ Pa}$$

Baca etkisinden dolayı oluşan basınç düşüşü ya da yükselişi ($\Delta p_{\text{th,baca}}$), Denklem (2.28) yardımıyla hesaplanır. Yangının çıktığı bölümden itibaren (500 m), her bir metrede sıcaklık ve sıcaklığa bağlı olarak hava yoğunluğu değiştiğinden, aşağıdaki işlemlerde yoğunluk (ρ_x) değeri değişken olarak gösterilmiş olup, belirtilen bölüm için programda bulunan sonuç verilmiştir.

$$\Delta p_{\text{th,baca}} = - (1,2 - \rho_x) \times 9,81 \times 0,033 \times (2500-500) = - 85,50 \text{ Pa}$$

Yangın sonrasında havalandırma sistemi devreye girinceye kadar geçen sürede trafik akışının duracağı varsayılarak piston etkisi ve piston etkisinden kaynaklı basınç kayıpları (Δp_{pis}) olmayacağı kabul edilmiştir ($\Delta p_{\text{pis}}=0$).

Bölüm 2.2.2’de belirtildiği gibi, 30 MW’lık yangın durumunda yangın kaynaklı basınç kaybı (Δp_{fire}) 10-20 Pa aralığında alınmaktadır. Bu çalışmada $\Delta p_{\text{fire}}=10 \text{ Pa}$ olduğu kabul edilmiştir.

Meteorolojik etkilerden kaynaklı basınç kayıpları (Δp_{met}), Denklem 2.26 (Rüzgar kaynaklı), ve Denklem 2.27 (Barometrik basınç) ile hesaplanır.

$$\Delta p_{\text{rüzgar}} = (1/2) \times 1,2 \times 13,302 \times 1 = 106,13 \text{ Pa}$$

Tünel ortalama olarak 570 m kaya örtü kalınlığına sahip olduğu varsayılmaktadır. İki tünel

portalındaki barometrik basıncın farkı Δp_{bar} , tüplerdeki boyuna hava akışı ile yenilmelidir. Aksi halde duman kontrolü mümkün olmayacaktır. Tekrarlanan ölçümlerle hesaplanabilen bu veri, bu çalışmada 160 Pa olarak kabul edilmiştir (HBI Haerter, 2017: 23, 24).

Tünelin eğimi $\pm 3,3\%$ ve $\pm 0,85\%$ olarak tasarlanmıştır. Tünel ve çevre havası arasındaki sıcaklık farkı tünel içerisindeki sıcak havanın kaldırma kuvvetinden kaynaklı doğal baca etkisine sahip olacaktır. Tünel içi sıcaklık $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, tünel dışı sıcaklık $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak kabul edilmiştir. Genelde, tünel içi sıcaklığın çevre sıcaklığından yüksek olduğu varsayılabilir. Bu sebeple, bu doğal kaldırma kuvvetleri yukarı yönde beklenir. Hesaplamalarımızda bu basınç farkı sadece doğu yönünde uygulanacaktır. Buna göre;

$$\Delta p_{th} = d \times (\rho_g - \rho_c) \times L \times g = 0,033 \times (0,045) \times 14500 \times 9,81 = 211 \text{ Pa}$$

Toplam basınç kaybı Denklem 2.9 ile hesaplanır.

$$\Delta p_{T, 3 \text{ m/s}} = \Delta p_{entrance,1} + \Delta p_{exit,1} + \Delta p_{walls, 0-500 \text{ m arası}} + \Delta p_{walls, 500 - 2500 \text{ m arası}} + \Delta p_{veh, PC} + \Delta p_{veh, HGV} + \Delta p_{th,baca} + \Delta p_{fire} + \Delta p_{bar} + \Delta p_{th} = 129,11 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{T, 1 \text{ m/s}} = \Delta p_{entrance,2} + \Delta p_{exit,2} + \Delta p_{walls, 2500-14500 \text{ m arası}} + \Delta p_{rüzgar} = 123,40 \text{ Pa bulunur.}$$

Tünel kesiti 67 m^2 olduğundan dolayı, gerekli asgari itki gücü Denklem 2.10 yardımıyla;

$$F_{G,3 \text{ m/s}} = \Delta p_{T,3 \text{ m/s}} \times A_T = 129,11 \times 67 = 8650,21 \text{ N}$$

$$F_{G,1 \text{ m/s}} = \Delta p_{T,1 \text{ m/s}} \times A_T = 123,40 \times 67 = 8268,11 \text{ N bulunur.}$$

Bölüm 2.2’de belirtildiği üzere Jet fan seçimi için, jet fanın çalışma anındaki sıcaklığa bağlı, hava değişimi yoğunluğu ve verim katsayılarına bağlı olarak değişmektedir. Örneğin yangının çıktığı 500 metrede bulunan $1200 \text{ N} \times 2 = 2400 \text{ N}$ ’luk jet fan grubunun, yangın sırasında çalıştırılması durumunda sağlayabileceği itki gücü;

$$F_{J,500 \text{ m}} = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \rho \times Q_j \times (u_j - u) = 1 \times 0,9 \times 0,9 \times 1,2 \times (293/451) \times 37,31 \times (33-3)$$

$$F_{J,500 \text{ m}} = 1337,39 \text{ N}$$

Sonuçtan görüleceği üzere bu jet fan grubunun çalıştırılması durumunda verimliliği % 50'ye yakın azalmaktadır. Jet fan gruplarının dizilişine göre denemeler yapılarak en uygun çalışma durumu için, atış şaftına kadar seçilen jet fanlar Çizelge 3.29'da, atış şaftından tünel çıkışına kadar olan kesimde seçilen jet fanlar Çizelge 3.30'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.29. BT_1 bölümünde 500 m'de yangın durumunda şafta kadar çalıştırılan fanlar (u=3 m/s)

segment	jet fan durumu	verim	montaj verimi	sistem verimi	hava yoğunluğu	jet fan debisi	jet fan hava hızı	tünel hava hızı	yangın hava hızı	yangın hız farkı	yangın sıcaklığı	hava sıcaklığı	oran	jet fan birim itme	jet fan sayısı	jet fan toplam itme
I	var: 1 yok:0	nu1	nu2	nu3	ro	Qjet	ujet	uo	uo*T/To	ujet-uo	T	To	To/T			
m					kg/m ³	m ³ /s	m/s	m/s	m/s	m/s	kelvin	kelvin		N		N
100,00	1	1	0,9	0,9	1,2	37,31	33	3	3	30	293,00	293	1	1087,96	2	2175,92
200,00	1	1	0,9	0,9	1,2	37,31	33	3	3	30	293,00	293	1	1087,96	2	2175,92
300,00	1	1	0,9	0,9	1,2	37,31	33	3	3	30	293,00	293	1	1087,96	2	2175,92
400,00	1	1	0,9	0,9	1,2	37,31	33	3	3	30	293,00	293	1	1087,96	2	2175,92
2100,00	1	1	0,9	0,9	1,2	37,31	33	3	3,10	29,90	302,38	293	0,968968	1050,82	2	2101,64
2200,00	1	1	0,9	0,9	1,2	37,31	33	3	3,08	29,92	301,05	293	0,973249	1055,95	2	2111,89
2300,00	1	1	0,9	0,9	1,2	37,31	33	3	3,07	29,93	299,92	293	0,976941	1060,36	2	2120,73
2400,00	1	1	0,9	0,9	1,2	37,31	33	3	3,06	29,94	298,94	293	0,980124	1064,17	2	2128,34
2500,00	1	1	0,9	0,9	1,2	37,31	33	3	3,05	29,95	298,11	293	0,982868	1067,46	2	2134,91
2560,00	1	1	0,9	0,9	1,2	70	21,2	3	3,05	18,15	297,66	293	0,984329	1215,72	2	2431,45
2640,00	1	1	0,9	0,9	1,2	70	21,2	3	3,04	18,16	297,13	293	0,986086	1218,26	2	2436,52
TOPLAM														22,00		24169,16

Çizelge 3.30. BT_1 bölümünde 500 m'de yangın durumunda şaft-çıkış portali arasında çalıştırılan fanlar (u=1 m/s)

segment	jet fan durumu	verim	montaj verimi	sistem verimi	hava yoğunluğu	jet fan debisi	jet fan hava hızı	tünel hava hızı	yangın hava hızı	yangın hız farkı	yangın sıcaklığı	hava sıcaklığı	oran	jet fan birim itme	jet fan sayısı	jet fan toplam itme
I	var: 1 yok:0	nu1	nu2	nu3	ro	Qjet	ujet	uo	uo*T/To	ujet-uo	T	To	To/T			
m					kg/m ³	m ³ /s	m/s	m/s	m/s	m/s	kelvin	kelvin		N		N
11700,00	1	1	0,9	0,9	1,2	37,31	33	3	3	30	293,00	293	1	1087,96	2	2175,92
11800,00	1	1	0,9	0,9	1,2	37,31	33	3	3	30	293,00	293	1	1087,96	2	2175,92
12200,00	1	1	0,9	0,9	1,2	37,31	33	3	3	30	293,00	293	1	1087,96	2	2175,92
12300,00	1	1	0,9	0,9	1,2	37,31	33	3	3	30	293,00	293	1	1087,96	2	2175,92
14200,00	1	1	0,9	0,9	1,2	37,31	33	3	3	30	293,00	293	1	1087,96	2	2175,92
14300,00	1	1	0,9	0,9	1,2	37,31	33	3	3	30	293,00	293	1	1087,96	2	2175,92
14400,00	1	1	0,9	0,9	1,2	37,31	33	3	3	30	293,00	293	1	1087,96	2	2175,92
TOPLAM														14,00		15231,43

500 m'de bir, her iki tüpte de 30 MW'lık yangın çıkması durumunda, basınç kayıplarının hesabı ve jet fan seçimi için bir yazılım geliştirilmiş olup, yazılımda kullanılan parametreler ve 8 ayrı lokasyonda kabul edilen senaryolara göre oluşan durumun özeti aşağıda açıklanmıştır.

Batı Tüpü Giriş ve 1 Numaralı Şaft Arasında Yangın Olması Durumu (BT_1)

Batı Tüpü giriş portalından 1 numaralı şafta kadar 2 550 metrelik mesafede her 500 m’de bir 30 MW yükünde otobüs yangınına göre analizler yapılmıştır. Yangın noktasından ileride olan araçların tüneli terk ettiği, giriş portaline kadar olan kısımda ise araçların biriktiği varsayılmıştır. Tünel kesitinin eğimi +3,3 %’dür. Bu kesimde eğim nedeniyle baca etkisi havalandırmaya yardım etmektedir. Çizelge 3.31’de BT_1 lokasyonunda her 500 metrede bir yangın durumunda basınç kayıpları, gerekli jet fan itki gücü ve jet fan sayısı gösterilmektedir. Acil durum senaryosu şeması Şekil 3.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 31. BT_1 lokasyonunda yangın durumu hesap özeti

Basınç Kayıpları ve Jet fan Sayıları	Yangın Lokasyonu				
	500 m	1 000 m	1 500 m	2 000 m	2 500 m
Yangın Bölümü (u=3 m/s)					
Giriş Portalı (Pa)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Çıkış Portalı (Pa)	5,49	5,59	5,81	6,34	7,96
Duvar Sürtünmesi (Pa)	35,55	35,41	35,09	34,37	32,61
Rüzgar Etkisi (Pa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Baca Etkisi (Pa)	-85,50	-81,81	-74,05	-57,75	-23,31
Blokaj Etkisi (Pa)	3,46	6,92	10,38	13,84	17,30
Yangın Etkisi (Pa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Barometrik Etki (Pa)	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00
Atmosferik Etki (Pa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Toplam Basınç Kaybı (Pa)	129,11	136,21	147,34	166,91	204,67
Tünel Kesit Alanı (m ²)	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00
Gereken İtme Kuvveti (N)	8.650,21	9.126,33	9.871,53	11.182,66	13.712,65
Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	24.169,16	23.764,82	22.915,70	21.094,06	22.825,15
Jet Fan Sayısı (adet)	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
Diğer Bölüm (u=1 m/s)					
Giriş Portalı (Pa)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Çıkış Portalı (Pa)	0,61	0,62	0,65	0,70	0,88
Duvar Sürtünmesi (Pa)	16,65	16,65	16,66	16,67	16,71
Rüzgar Etkisi (Pa)	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13
Toplam Basınç Kaybı (Pa)	123,40	123,42	123,45	123,52	123,74
Tünel Kesit Alanı (m ²)	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00
Gereken İtme Kuvveti (N)	8.268,11	8.269,03	8.271,07	8.275,94	8.290,71
Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	15.231,43	15.231,43	15.231,43	15.231,43	15.231,43
Jet Fan Sayısı (adet)	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
Toplam Gereken İtme Kuvveti (N)	16.918,32	17.395,36	18.142,60	19.458,60	22.003,36
Toplam Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	39.400,59	38.996,25	38.147,14	36.325,49	38.056,58
Toplam Kullanılan Jet Fan Sayısı (adet)	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00

Batı Tüpü 1 Numaralı Şaft ve 2 Numaralı Şaft Arasında Yangın Olması Durumu (BT_2)

Batı Tüpü 1 numaralı şafttan, 2 numaralı şafta kadar 4 060 metrelik mesafede her 500 m’de bir 30 MW yükünde otobüs yangını durumuna göre analizler yapılmıştır. Yangın

noktasından ileride olan araçların tüneli terk ettiği, yangın gerisinde ise araçların biriktiği varsayılmıştır. Tünel kesitinin eğimi +3,3 %'dür. Bu kesimde eğim nedeniyle baca etkisi havalandırmaya yardım etmektedir. Çizelge 3.32'de BT_2 lokasyonunda her 500 metrede bir yangın durumunda basınç kayıpları, gerekli jet fan itki gücü ve jet fan sayısı gösterilmektedir. Acil durum senaryosu şeması Şekil 3.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.32. BT_2 lokasyonunda yangın durumu hesap özeti

Basınç Kayıpları ve Jet fan Sayıları	Yangın Lokasyonu							
	3000 m	3 500 m	4 000 m	4 500 m	5 000 m	5 500 m	6 000 m	6 500 m
Yangın Bölümü (u=3 m/s)								
Giriş Portalı (Pa)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Çıkış Portalı (Pa)	5,41	5,42	5,44	5,48	5,57	5,77	6,24	7,62
Duvar Sürtünmesi (Pa)	87,15	87,13	77,52	87,05	86,92	86,64	86,04	75,28
Rüzgar Etkisi (Pa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Baca Etkisi (Pa)	-88,49	-88,09	-87,26	-85,50	-81,81	-74,05	-57,75	-23,31
Blokaj Etkisi (Pa)	20,76	24,22	27,68	31,14	34,60	38,06	41,53	44,99
Yangın Etkisi (Pa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Barometrik Etki (Pa)	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00
Atmosferik Etki (Pa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Toplam Basınç Kaybı (Pa)	194,94	198,79	193,49	208,28	215,39	226,54	246,16	274,68
Tünel Kesit Alanı (m ²)	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00
Gereken İtme Kuvveti (N)	13.060,74	13.318,90	12.964,16	13.954,51	14.431,41	15.178,29	16.492,89	18.403,75
Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	35.397,63	35.377,14	35.334,04	35.243,43	35.053,19	34.654,13	33.811,55	32.891,46
Jet Fan Sayısı (adet)	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00
Diğer Bölüm (u=1 m/s)								
Giriş Portalı (Pa)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Çıkış Portalı (Pa)	0,60	0,60	0,60	0,61	0,62	0,64	0,69	0,85
Duvar Sürtünmesi (Pa)	10,94	10,94	9,74	10,94	10,94	10,94	10,95	9,75
Rüzgar Etkisi (Pa)	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13
Toplam Basınç Kaybı (Pa)	117,69	117,69	116,49	117,69	117,71	117,73	117,78	116,74
Tünel Kesit Alanı (m ²)	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00
Gereken İtme Kuvveti (N)	7.885,00	7.885,07	7.804,60	7.885,56	7.886,28	7.887,86	7.891,59	7.821,68
Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	23.935,11	23.935,11	23.935,11	23.935,11	23.935,11	23.935,11	23.935,11	23.935,11
Jet Fan Sayısı (adet)	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
Toplam Gereken İtme Kuvveti (N)	20.945,73	21.203,97	20.768,76	21.840,07	22.317,69	23.066,15	24.384,48	26.225,43
Toplam Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	59.332,74	59.312,25	59.269,15	59.178,54	58.988,30	58.589,24	57.746,66	56.826,57
Toplam Kullanılan Jet Fan Sayısı (adet)	54,00	54,00	54,00	54,00	54,00	54,00	54,00	54,00

Batı Tüpü 2 Numaralı Şaft ve 3 Numaralı Şaft Arasında Yangın Olması Durumu (BT_3)

Batı Tüpü 2 numaralı şafttan, 3 numaralı şafta kadar 5 320 metrelik mesafede her 500 m'de bir 30 MW yükünde otobüs yangını durumuna göre analizler yapılmıştır. Yangın noktasından ileride olan araçların tüneli terk ettiği, yangın gerisinde ise araçların biriktiği varsayılmıştır. Tünel kesitinin eğimi çatı noktasına kadar 2 130 metrelik kısımda +3,3 %, kalan kısımda -0,85 %'dir. Bu kesimde eğim nedeniyle baca etkisi çatı noktasına kadar

havalandırmaya yardım etmekte ancak kalan kısımda tahliye noktasına kadar direnç oluşturmaktadır.

Çizelge 3.33'te, BT_3 lokasyonunda her 500 metrede bir yangın durumunda basınç kayıpları, gerekli jet fan itki gücü ve jet fan sayısı gösterilmektedir.

Acil durum senaryosu şeması Şekil 3.13'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.33. BT_3 lokasyonunda yangın durumu hesap özeti

Basınç Kayıpları ve Jet fan Sayıları	Yangın Lokasyonu									
	7 000 m	7 500 m	8 000 m	8 500 m	9 000 m	9 500 m	10 000 m	10 500 m	11 000 m	11 500 m
Yangın Bölümü (u=3 m/s)										
Giriş Portalı (Pa)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Çıkış Portalı (Pa)	5,40	5,40	5,41	5,41	5,42	5,45	5,50	5,61	5,87	6,52
Duvar Sürtünmesi (Pa)	153,47	153,46	153,46	153,45	153,30	153,27	153,19	153,02	135,86	151,81
Rüzgar Etkisi (Pa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Baca Etkisi (Pa)	-80,64	-71,59	-52,60	-12,52	21,88	21,61	21,05	19,85	17,28	11,82
Blokaj Etkisi (Pa)	48,45	51,91	55,37	58,83	62,29	65,75	69,21	69,21	69,21	69,21
Yangın Etkisi (Pa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Barometrik Etki (Pa)	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00
Atmosferik Etki (Pa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Toplam Basınç Kaybı (Pa)	296,78	309,29	331,74	375,28	413,00	416,18	419,05	417,80	398,33	409,47
Tünel Kesit Alanı (m ²)	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00
Gereken İtme Kuvveti (N)	19.884,24	20.722,24	22.226,68	25.143,74	27.670,84	27.884,17	28.076,52	27.992,33	26.688,26	27.434,35
Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	55.625,00	57.167,20	57.158,16	57.139,15	57.105,71	57.026,68	56.858,27	56.499,99	55.736,75	54.049,01
Jet Fan Sayısı (adet)	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00
Diğer Bölüm (u=1 m/s)										
Giriş Portalı (Pa)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Çıkış Portalı (Pa)	0,60	4,81	0,60	0,60	0,60	0,61	0,61	0,62	0,65	0,72
Duvar Sürtünmesi (Pa)	3,57	3,57	3,57	3,57	3,57	3,57	3,57	3,57	3,18	3,59
Rüzgar Etkisi (Pa)	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13
Toplam Basınç Kaybı (Pa)	110,32	114,52	110,32	110,32	110,32	110,32	110,33	110,34	109,98	110,46
Tünel Kesit Alanı (m ²)	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00
Gereken İtme Kuvveti (N)	7.391,32	7.673,12	7.391,36	7.391,40	7.391,49	7.391,69	7.392,12	7.393,07	7.368,85	7.400,57
Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	8.703,68	8.703,68	8.703,68	8.703,68	8.703,68	8.703,68	8.703,68	8.703,68	8.703,68	8.703,68
Jet Fan Sayısı (adet)	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Toplam Gereken İtme Kuvveti (N)	27.275,56	28.395,36	29.618,04	32.535,14	35.062,32	35.275,86	35.468,64	35.385,40	34.057,11	34.834,92
Toplam Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	64.328,68	65.870,87	65.861,84	65.842,82	65.809,39	65.730,36	65.561,95	65.203,67	64.440,43	62.752,69
Toplam Kullanılan Jet Fan Sayısı (adet)	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00

Batı Tüpü 3 Numaralı Şaft ve Batı Tüpü Çıkış Arasında Yangın Olması Durumu (BT_4)

Batı Tüpü 3 numaralı şafttan, Batı Tüpü çıkış portalına kadar 2 540 metrelik mesafede her 500 m'de bir 30 MW yükünde otobüs yangını durumuna göre analizler yapılmıştır. Yangın

noktasından ileride olan araçların tüneli terk ettiği, yangın gerisinde ise araçların biriktiği varsayılmıştır. Tünel kesitinin eğimi -0,85 %'dir. Bu kesimde eğim nedeniyle baca etkisi havalandırmaya direnç oluşturmaktadır.

Çizelge 3.34'te, BT_4 lokasyonunda her 500 metrede bir yangın durumunda basınç kayıpları, gerekli jet fan itki gücü ve jet fan sayısı gösterilmektedir.

Acil durum senaryosu şeması, Şekil 3.14'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.34. BT_4 lokasyonunda yangın durumu hesap özeti

Basınç Kayıpları ve Jet fan Sayıları	Yangın Lokasyonu				
	12 000 m	12 500 m	13 000 m	13 500 m	14 000 m
Yangın Bölümü (u=3 m/s)					
Giriş Portalı (Pa)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Çıkış Portalı (Pa)	5,44	5,49	5,59	5,82	6,39
Duvar Sürtünmesi (Pa)	185,42	185,35	185,20	184,86	184,10
Rüzgar Etkisi (Pa)	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13
Baca Etkisi (Pa)	21,62	21,07	19,88	17,35	11,98
Blokaj Etkisi (Pa)	69,21	69,21	69,21	69,21	69,21
Yangın Etkisi (Pa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Barometrik Etki (Pa)	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00
Atmosferik Etki (Pa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Toplam Basınç Kaybı (Pa)	557,93	557,35	556,12	553,49	547,91
Tünel Kesit Alanı (m ²)	66,00	67,00	67,00	67,00	67,00
Gereken İtme Kuvveti (N)	36.823,63	37.342,73	37.259,94	37.083,80	36.710,30
Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	65.563,04	67.229,63	66.976,61	66.438,11	65.262,45
Jet Fan Sayısı (adet)	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00

Doğu Tüpü Giriş ve 3 Numaralı Şaft Arasında Yangın Olması Durumu (DT_1)

Doğu Tüpü giriş portalından 3 numaralı şafta kadar 2 540 metrelik mesafede her 500 m'de bir 30 MW yükünde otobüs yangını durumuna göre analizler yapılmıştır. Yangın

noktasından ileride olan araçların tüneli terk ettiği, giriş portaline kadar olan kısımda ise araçların biriktiği varsayılmıştır. Tünel kesitinin eğimi +0,85 %'dir. Bu kesimde eğim nedeniyle baca etkisi havalandırmaya yardım etmektedir.

Çizelge 3.35'te DT_1 lokasyonunda her 500 metrede bir yangın durumunda basınç kayıpları, gerekli jet fan itki gücü ve jet fan sayısı gösterilmektedir. Acil durum senaryosu şeması Şekil 3.15'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.35. DT_1 lokasyonunda yangın durumu hesap özeti

Basınç Kayıpları ve Jet fan Sayıları	Yangın Lokasyonu				
	500 m	1 000 m	1 500 m	2 000 m	2 500 m
Yangın Bölümü (u=3 m/s)					
Giriş Portalı (Pa)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Çıkış Portalı (Pa)	4,88	4,97	5,17	5,64	7,08
Duvar Sürtünmesi (Pa)	36,69	36,56	36,28	35,66	34,18
Rüzgar Etkisi (Pa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Baca Etkisi (Pa)	-19,71	-18,98	-17,44	-14,22	-7,44
Blokaj Etkisi (Pa)	3,46	6,92	10,38	13,84	17,30
Yangın Etkisi (Pa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Barometrik Etki (Pa)	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00
Atmosferik Etki (Pa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Toplam Basınç Kaybı (Pa)	195,43	199,58	204,49	211,03	221,24
Tünel Kesit Alanı (m ²)	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00
Gereken İtme Kuvveti (N)	13.093,95	13.371,96	13.701,08	14.138,84	14.823,03
Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	27.726,88	29.694,94	27.267,54	25.445,90	26.338,46
Jet Fan Sayısı (adet)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00
Diğer Bölüm (u=1 m/s)					
Giriş Portalı (Pa)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Çıkış Portalı (Pa)	0,54	0,54	4,81	4,81	4,81
Duvar Sürtünmesi (Pa)	16,54	16,54	16,55	16,56	16,60
Rüzgar Etkisi (Pa)	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13
Atmosferik Etki (Pa)	211,00	211,00	211,00	211,00	211,00
Toplam Basınç Kaybı (Pa)	334,23	334,23	338,50	338,51	338,55
Tünel Kesit Alanı (m ²)	67,00	67,00	67,00	67,00	67,00
Gereken İtme Kuvveti (N)	22.393,14	22.393,32	22.679,37	22.680,30	22.682,82
Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	36.990,63	36.990,63	36.990,63	36.990,63	36.990,63
Jet Fan Sayısı (adet)	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00
Toplam Gereken İtme Kuvveti (N)	35.487,08	35.765,28	36.380,45	36.819,14	37.505,85
Toplam Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	64.717,51	66.685,57	64.258,17	62.436,52	63.329,09
Toplam Kullanılan Jet Fan Sayısı (adet)	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00

Doğu Tüpü 3 Numaralı Şaft ve 2 Numaralı Şaft Arasında Yangın Olması Durumu (DT_2)

Doğu Tüpü 3 numaralı şafttan, 2 numaralı şafta kadar 5 320 metrelik mesafede her 500 m'de bir 30 MW yükünde otobüs yangını durumuna göre analizler yapılmıştır. Yangın

noktasından ileride olan araçların tüneli terk ettiği, yangın gerisinde ise araçların biriktiği varsayılmıştır. Tünel kesitinin eğimi çatı noktasına kadar 3 190 metrelik kısımda +0,85 %, kalan kısımda -3,3 %'dür. Bu kesimde eğim nedeniyle baca etkisi çatı noktasına kadar havalandırmaya yardım etmekte ancak kalan kısımda tahliye noktasına kadar direnç oluşturmaktadır.

Çizelge 3.36'da, DT_2 lokasyonunda her 500 metrede bir yangın durumunda basınç kayıpları, gerekli jet fan itki gücü ve jet fan sayısı gösterilmektedir. Acil durum senaryosu şeması Şekil 3.16'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.36. DT_2 lokasyonunda yangın durumu hesap özeti

Basınç Kayıpları ve Jet fan Sayıları	Yangın Lokasyonu							
	3000 m	3 500 m	4 000 m	4 500 m	5 000 m	5 500 m	6 000 m	6 500 m
Yangın Bölümü (u=3 m/s)								
Giriş Portalı (Pa)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Çıkış Portalı (Pa)	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81
Duvar Sürtünmesi (Pa)	103,58	103,54	103,46	103,30	102,94	102,14	100,09	100,09
Rüzgar Etkisi (Pa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Baca Etkisi (Pa)	-20,13	-19,88	-19,33	-18,19	-15,80	-10,77	0,00	0,00
Blokaj Etkisi (Pa)	20,76	24,22	27,68	31,14	34,60	38,06	41,53	44,99
Yangın Etkisi (Pa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Barometrik Etki (Pa)	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00
Atmosferik Etki (Pa)	211,00	211,00	211,00	211,00	211,00	211,00	211,00	211,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Toplam Basınç Kaybı (Pa)	490,12	493,80	497,73	502,16	507,66	515,34	527,53	530,99
Tünel Kesit Alanı (m ²)	67,00	67,00	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00
Gereken İtme Kuvveti (N)	32.838,07	33.084,74	32.850,01	33.142,73	33.505,49	34.012,71	34.816,82	35.045,21
Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	39.768,02	39.768,02	39.768,02	39.768,02	39.768,02	39.768,02	39.768,02	39.768,02
Jet Fan Sayısı (adet)	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00
Diğer Bölüm (u=1 m/s)								
Giriş Portalı (Pa)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Çıkış Portalı (Pa)	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81
Duvar Sürtünmesi (Pa)	9,11	9,11	9,11	9,11	9,11	9,11	9,11	9,11
Rüzgar Etkisi (Pa)	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13
Atmosferik Etki (Pa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Toplam Basınç Kaybı (Pa)	120,06	120,06	120,06	120,06	120,06	120,06	120,06	120,06
Tünel Kesit Alanı (m ²)	67,00	67,00	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00
Gereken İtme Kuvveti (N)	8.044,26	8.044,26	7.924,20	7.924,20	7.924,20	7.924,20	7.924,20	7.924,20
Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	23.935,11	23.935,11	23.935,11	23.935,11	23.935,11	23.935,11	23.935,11	23.935,11
Jet Fan Sayısı (adet)	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
Toplam Gereken İtme Kuvveti (N)	40.882,33	41.129,01	40.774,21	41.066,93	41.429,69	41.936,91	42.741,02	42.969,41
Toplam Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	63.703,13	63.703,13	63.703,13	63.703,13	63.703,13	63.703,13	63.703,13	63.703,13
Toplam Kullanılan Jet Fan Sayısı (adet)	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00	58,00

Doğu Tüpü 2 Numaralı Şaft ve 1 Numaralı Şaft Arasında Yangın Olması Durumu (DT_3)

Doğu Tüpü 2 numaralı şafttan, 1 numaralı şafta kadar 4 060 metrelik mesafede her 500 m'de bir 30 MW yükünde otobüs yangını durumuna göre analizler yapılmıştır. Yangın

noktasından ileride olan araçların tüneli terk ettiği, yangın gerisinde ise araçların biriktiği varsayılmıştır. Tünel kesitinin eğimi -3,3 %'dür. Bu kesimde eğim nedeniyle baca etkisi havalandırmaya direnç oluşturmaktadır.

Çizelge 3.37'de DT_3 lokasyonunda her 500 metrede bir yangın durumunda basınç kayıpları, gerekli jet fan itki gücü ve jet fan sayısı gösterilmektedir.

Acil durum senaryosu şeması Şekil 3.17'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.37. DT_3 lokasyonunda yangın durumu hesap özeti

Basınç Kayıpları ve Jet fan Sayıları	Yangın Lokasyonu									
	7 000 m	7 500 m	8 000 m	8 500 m	9 000 m	9 500 m	10 000 m	10 500 m	11 000 m	11 500 m
Yangın Bölümü (u=3 m/s)										
Giriş Portalı (Pa)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Çıkış Portalı (Pa)	4,81	4,81	4,81	4,81	4,82	5,44	5,48	5,59	5,83	6,45
Duvar Sürtünmesi (Pa)	100,09	100,09	154,03	154,02	154,01	153,98	153,93	153,80	153,52	152,85
Rüzgar Etkisi (Pa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Baca Etkisi (Pa)	0,00	0,00	8,80	40,87	69,76	69,37	68,51	66,58	62,32	52,95
Blokaj Etkisi (Pa)	48,45	51,91	55,37	58,83	62,29	65,75	69,21	69,21	69,21	69,21
Yangın Etkisi (Pa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Barometrik Etki (Pa)	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00
Atmosferik Etki (Pa)	211,00	211,00	211,00	211,00	211,00	211,00	211,00	211,00	211,00	211,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Toplam Basınç Kaybı (Pa)	534,45	537,91	604,12	639,64	671,98	675,64	678,23	676,29	671,99	662,57
Tünel Kesit Alanı (m ²)	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00
Gereken İtme Kuvveti (N)	35.273,60	35.501,99	39.871,69	42.216,06	44.350,73	44.592,47	44.763,15	44.635,01	44.351,07	43.729,31
Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	57.175,37	57.175,37	57.148,53	57.147,18	57.112,75	57.036,33	56.866,96	56.492,62	55.667,09	53.806,10
Jet Fan Sayısı (adet)	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00
Diğer Bölüm (u=1 m/s)										
Giriş Portalı (Pa)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Çıkış Portalı (Pa)	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81
Duvar Sürtünmesi (Pa)	9,11	9,11	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,47	3,47	3,49
Rüzgar Etkisi (Pa)	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13
Atmosferik Etki (Pa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Toplam Basınç Kaybı (Pa)	120,06	120,06	114,41	114,41	114,41	114,41	114,42	114,42	114,43	114,45
Tünel Kesit Alanı (m ²)	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00
Gereken İtme Kuvveti (N)	7.924,20	7.924,20	7.551,24	7.551,25	7.551,26	7.551,30	7.551,40	7.551,62	7.552,13	7.553,38
Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	10.879,60	10.879,60	10.879,60	10.879,60	10.879,60	10.879,60	10.879,60	10.879,60	10.879,60	10.879,60
Jet Fan Sayısı (adet)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Toplam Gereken İtme Kuvveti (N)	43.197,80	43.426,19	47.422,93	49.767,31	51.901,98	52.143,77	52.314,55	52.186,63	51.903,20	51.282,68
Toplam Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	68.054,97	68.054,97	68.028,12	68.026,78	67.992,35	67.915,92	67.746,55	67.372,22	66.546,68	64.685,69
Toplam Kullanılan Jet Fan Sayısı (adet)	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00

Doğu Tüpü 3 Numaralı Şaft ve Doğu Tüpü Çıkış Arasında Yangın Olması Durumu (DT_4)

Doğu Tüpü 3 numaralı şafttan, Doğu Tüpü çıkış portalına kadar 2 550 metrelik mesafede her 500 m'de bir 30 MW yükünde otobüs yangını durumuna göre analizler yapılmıştır. Yangın noktasından ileride olan araçların tüneli terk ettiği, yangın gerisinde ise araçların

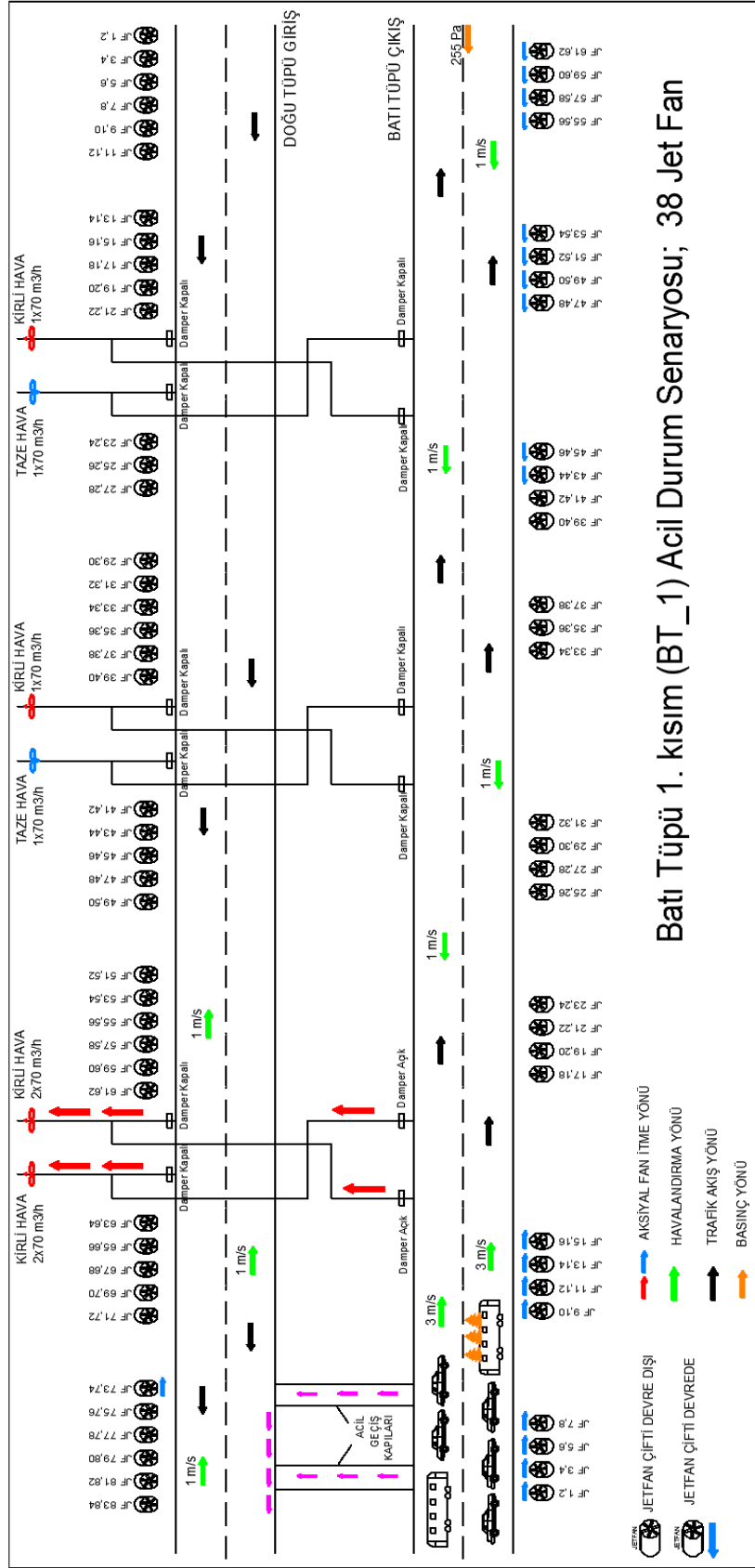
biriktiği varsayılmıştır. Tünel kesitinin eğimi -3,3 %'dür. Bu kesimde eğim nedeniyle baca etkisi havalandırmaya direnç oluşturmaktadır.

Çizelge 3.38'de DT_4 lokasyonunda her 500 metrede bir yangın durumunda basınç kayıpları, gerekli jet fan itki gücü ve jet fan sayısı gösterilmektedir.

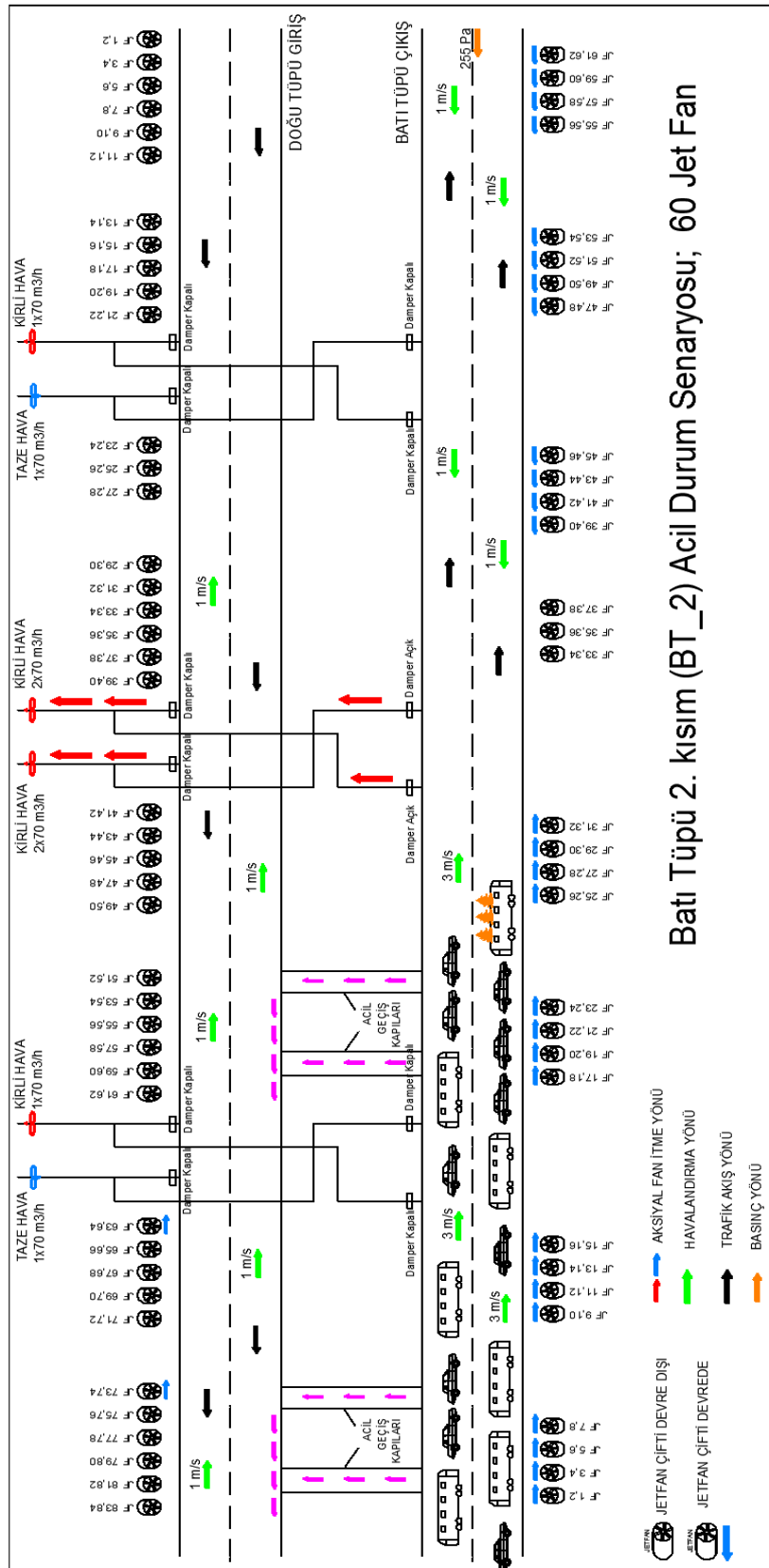
Acil durum senaryosu şeması Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.38. DT_4 lokasyonunda yangın durumu hesap özeti

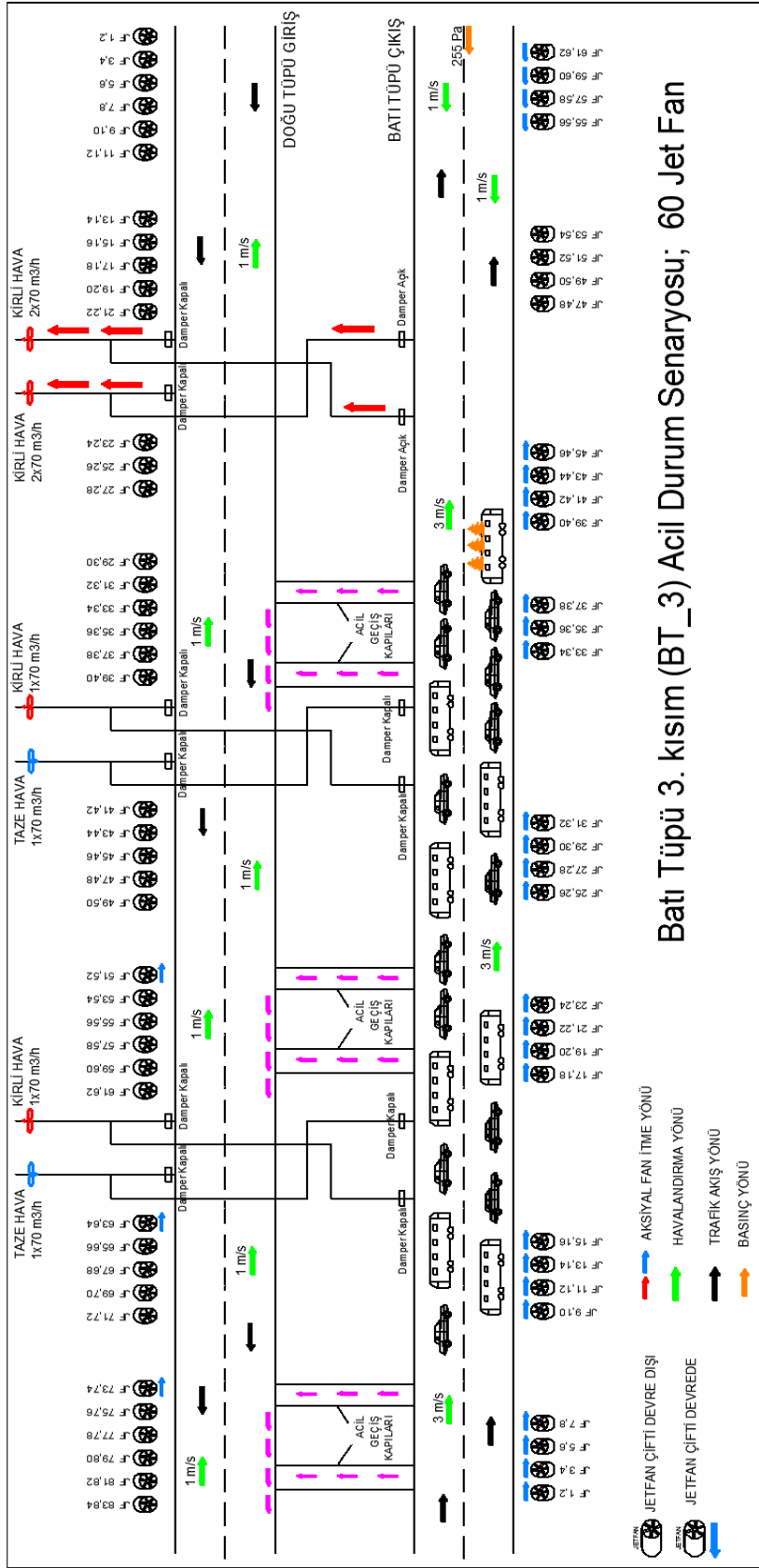
Basınç Kayıpları ve Jet fan Sayıları	Yangın Lokasyonu				
	12 000 m	12 500 m	13 000 m	13 500 m	14 000 m
Yangın Bölümü (u=3 m/s)					
Giriş Portalı (Pa)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Çıkış Portalı (Pa)	5,43	5,47	5,56	5,88	6,31
Duvar Sürtünmesi (Pa)	185,12	185,07	164,59	164,56	183,95
Rüzgar Etkisi (Pa)	106,13	106,13	106,13	106,13	106,13
Baca Etkisi (Pa)	77,30	75,53	71,63	68,58	43,87
Blokaj Etkisi (Pa)	69,21	69,21	69,21	69,21	69,21
Yangın Etkisi (Pa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Barometrik Etki (Pa)	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00
Atmosferik Etki (Pa)	211,00	211,00	211,00	211,00	211,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Toplam Basınç Kaybı (Pa)	824,30	822,52	798,23	795,47	790,58
Tünel Kesit Alanı (m ²)	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00
Gereken İtme Kuvveti (N)	54.403,91	54.286,50	52.683,45	52.501,02	52.178,08
Hesaplanan İtme Kuvveti (N)	72.207,95	73.791,43	73.560,97	72.892,38	71.915,32
Jet Fan Sayısı (adet)	68,00	68,00	68,00	68,00	68,00



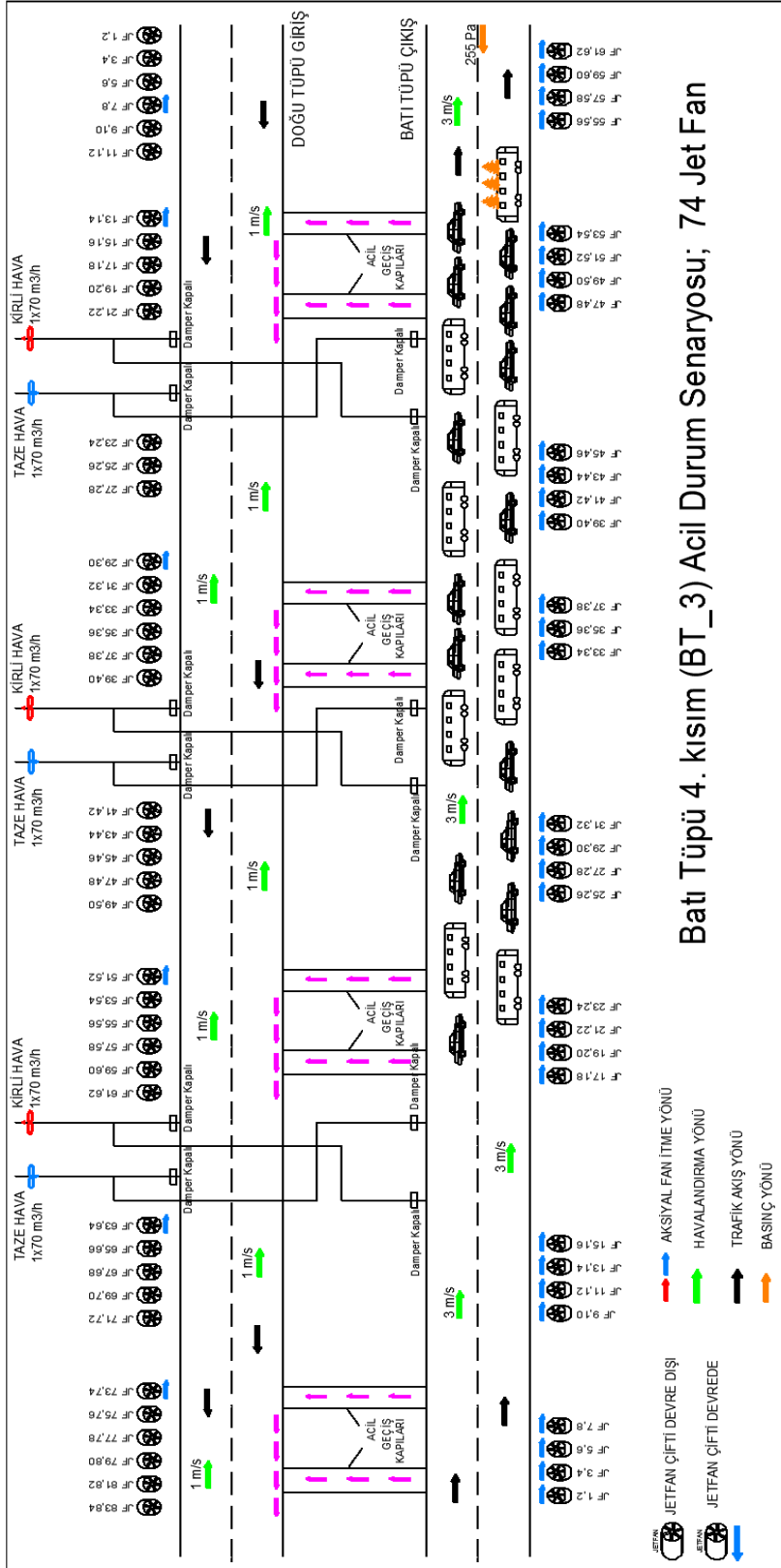
Şekil 3.11. BT_1 lokasyonlarında yangın durumunda havalandırma sistemi çalışma şeması



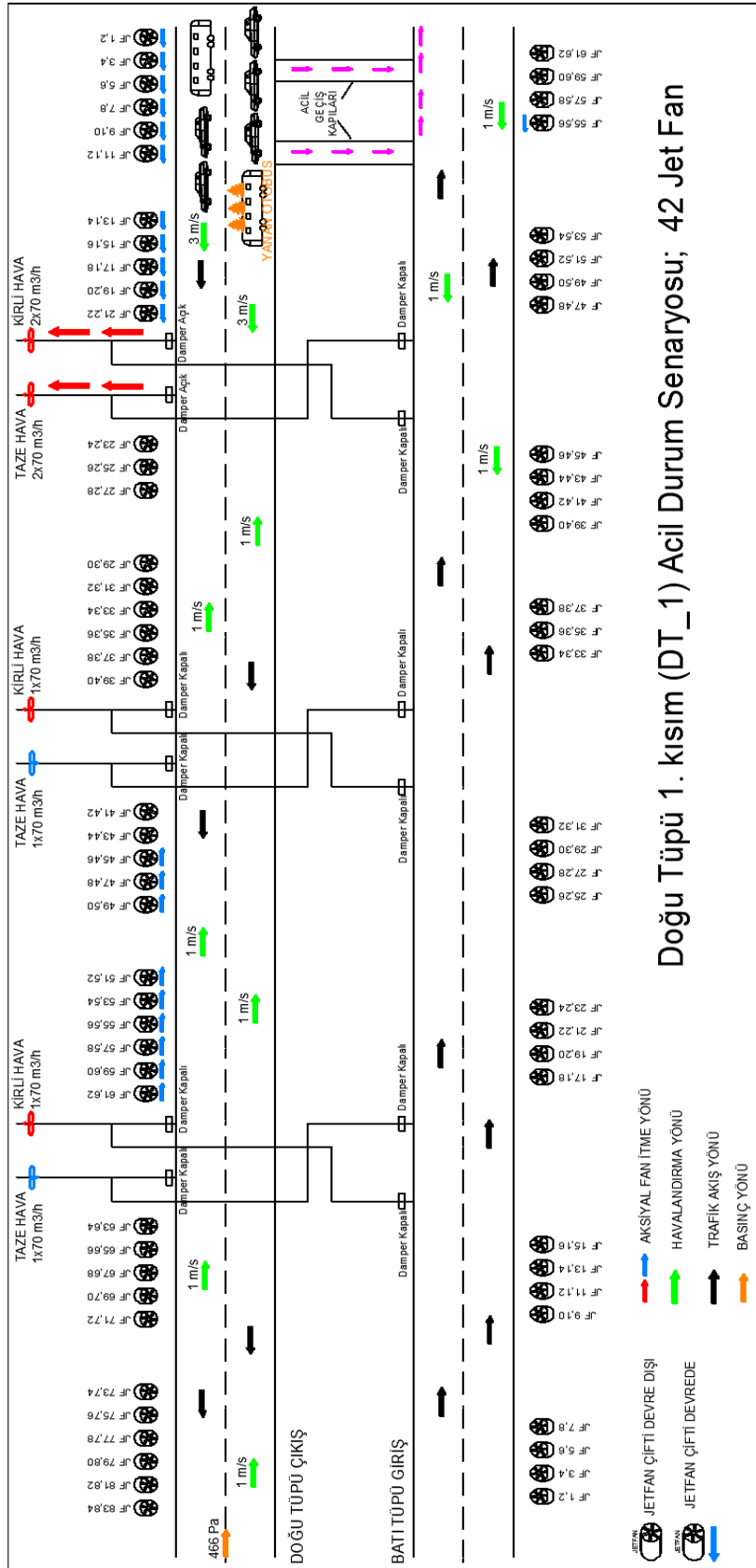
Şekil 3.12. BT_2 lokasyonlarında yangın durumunda havalandırma sistemi çalışma şeması



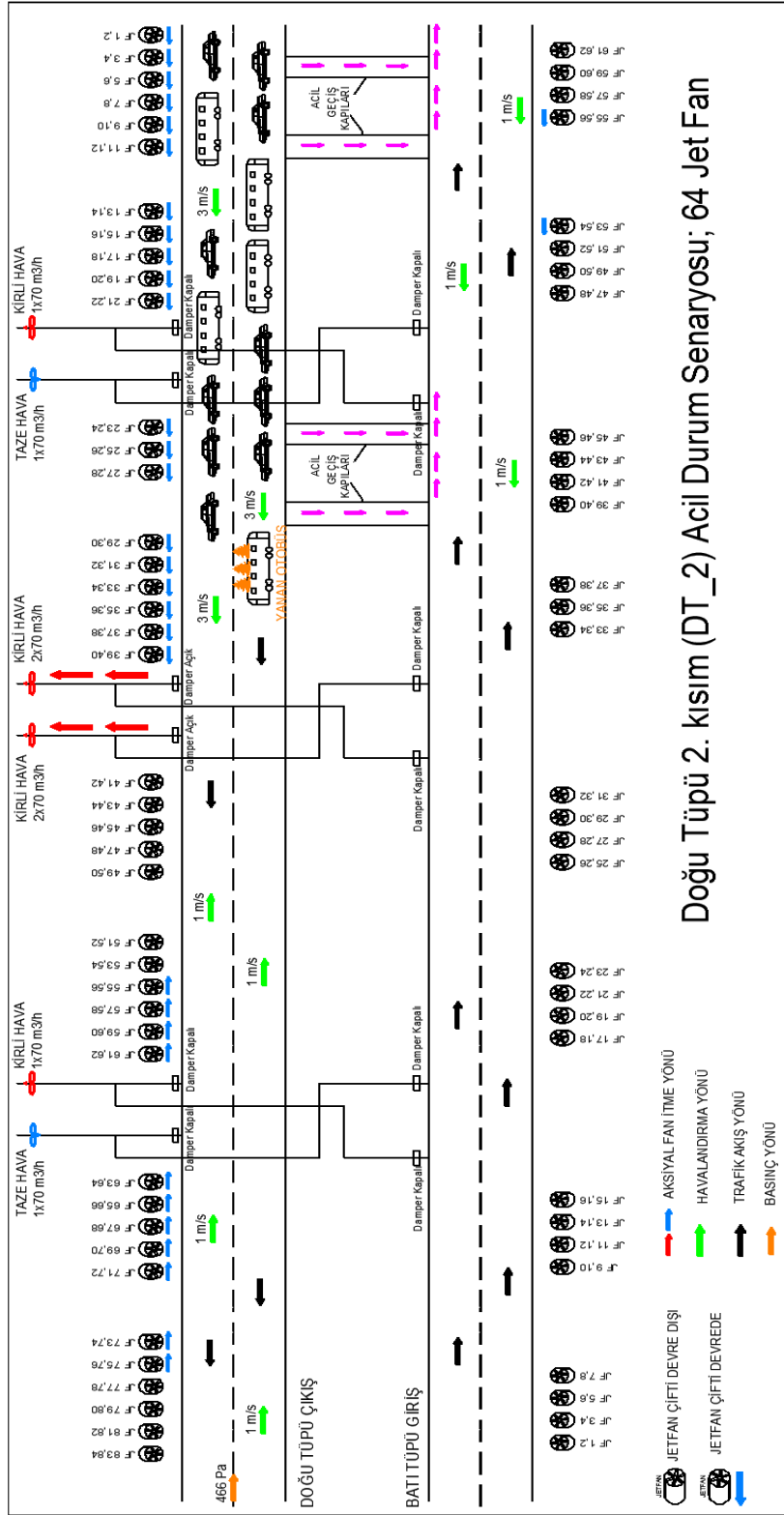
Şekil 3.13. BT_3 lokasyonlarında yangın durumunda havalandırma sistemi çalışma şeması



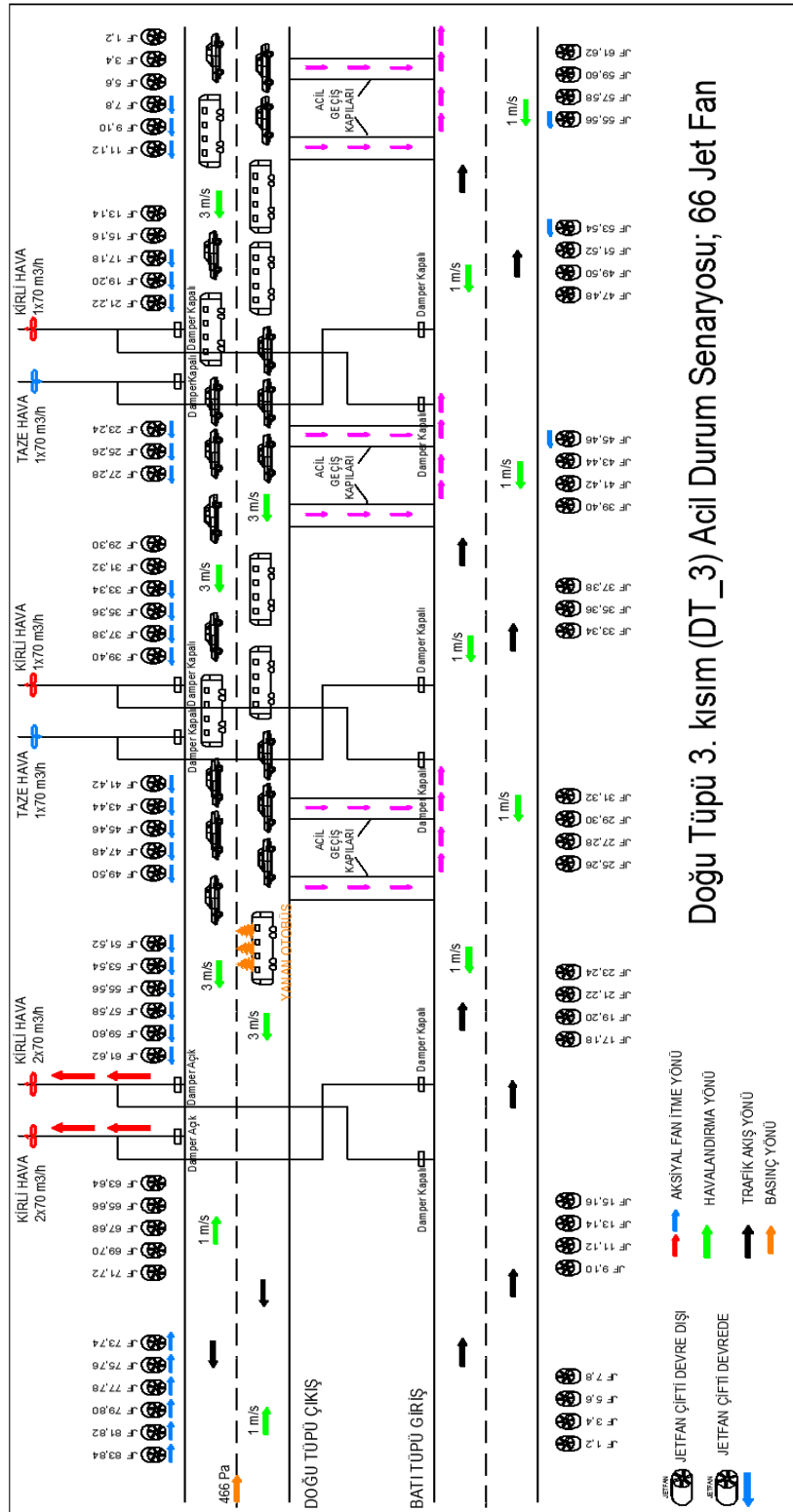
Şekil 3.14. BT_4 lokasyonlarında yangın durumunda havalandırma sistemi çalışma şeması



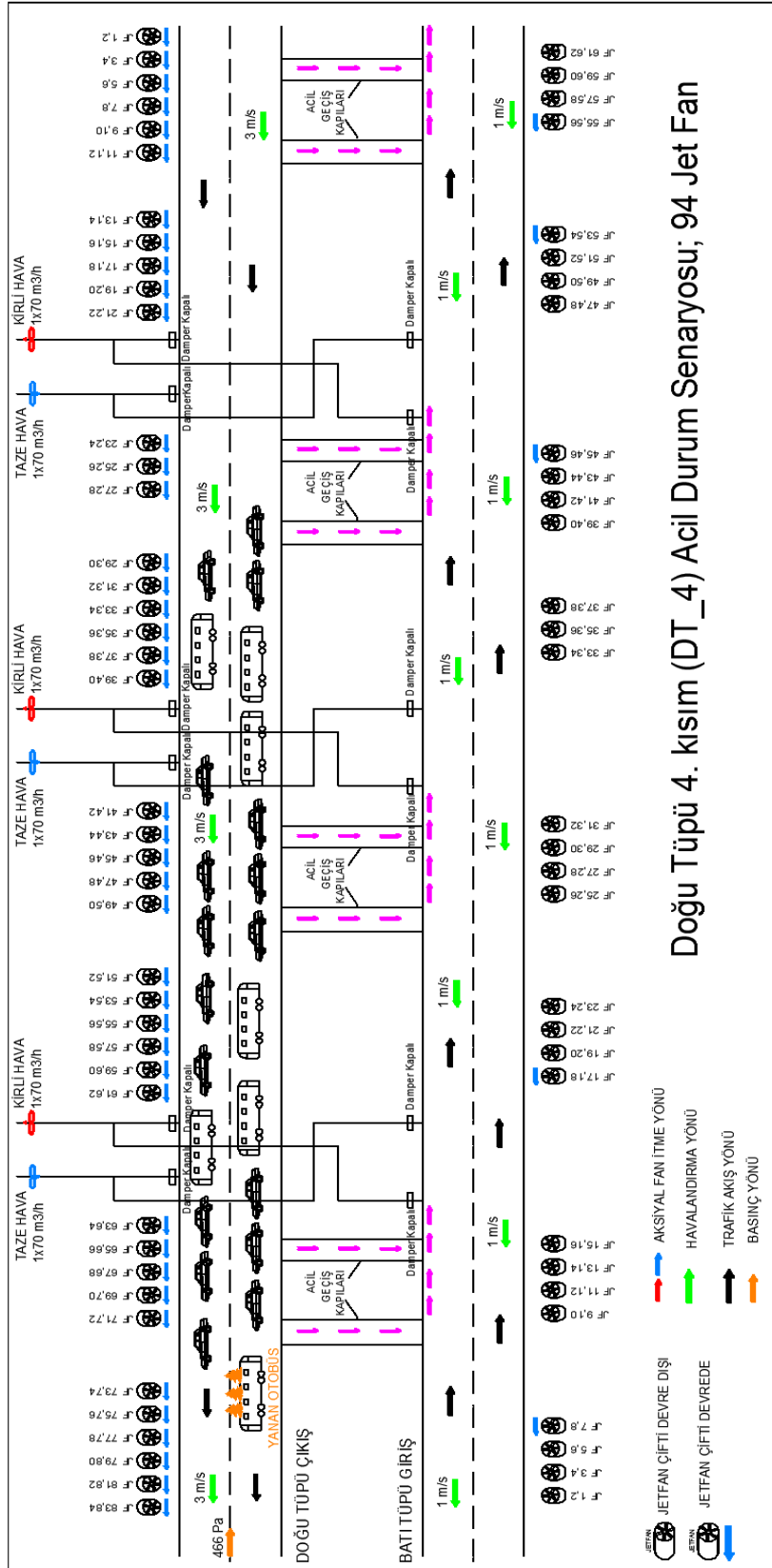
Şekil 3.15. DT_1 lokasyonlarında yangın durumunda havalandırma sistemi çalışma şeması



Şekil 3.16. DT_2 lokasyonlarında yangın durumunda havalandırma sistemi çalışma şeması



Şekil 3.17. DT_3 lokasyonlarında yangın durumunda havalandırma sistemi çalışma şeması



Şekil 3.18. DT_4 lokasyonlarında yangın durumunda havalandırma sistemi çalışma şeması

4. ACİL DURUM SENARYOLARI 3D SAYISAL ANALİZLERİ

Karayolu tünellerinde gerçek boyutta bir yangın düzeneği kurularak tünel içerisindeki yangına bağlı türbülans, sıcaklık değişimi, hava hızı değişimi, duman emisyonları, görüş mesafesi gibi parametreleri incelemek en doğru verileri sağlayabilir. Ancak bu düzeneklerin kurulumları hem süre hem maliyet yönünden olanaksızdır. Günümüzde HAD yazılımları sayesinde tam ölçekli ya da küçük ölçekli çalışmalara göre çok daha düşük maliyette, diğer yöntemlerle erişilmesi çok zor olan birçok ayrıntılı veri elde edilerek daha etkin değerlendirme yapılabilmektedir (Caliendo ve diğerleri, 2012).

Bu çalışmada, ölçek model yaklaşımı ve Fluent yazılımı ile temel enerji denklemleri çözülerek türbülans, yanma, yüzdürme gibi karmaşık süreçler tanımlanmış, yangın sonucu oluşan dumanın gaz sıcaklıkları, hava akış hızı, zehirli gaz konsantrasyonları, tünelde görüş mesafesi, insanların tahliye işlemleri gibi süreçlerle ilgili değerlendirmeler yapılmış ve analitik olarak tek boyutta bulunan sonuçlarla kıyaslanmıştır.

4.1. Tünel Geometrisi Ve Ölçek Model Kullanımı

Bölüm 3.3.3'te, kritik nokta olarak bulunan DT_3 lokasyonu 11 500 m'de (giriş portalından uzaklığı) meydana gelebilecek 30 MW'lık bir araç yangını, başlangıç noktası kabul edilmiş ve buna göre bir analiz çalışması yapılmıştır.

14 500 metrelik tünelin geometrisinin tam ölçekte modellenmesi hem zor hem de analiz açısından çok yüksek maliyetler gerektirmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada tüneldeki yangına bağlı fiziksel ve kimyasal süreçleri inceleyebilmek için ölçek model kullanılmıştır. Farklı ölçek modeller olmakla beraber bu çalışmada, birçok yangın güvenliğiyle ilgili bilimsel çalışmada kullanılan Froude ölçek modeli tercih edilmiştir (Lee ve Tsai, 2012; Alpgiray, 2016; Gon ve diğerleri, 2016; Tang ve diğerleri, 2017). Froude ölçek modele göre ölçek korelasyonlarının listesi Çizelge 4.1'de gösterilmiştir (Ingason ve diğerleri, 2015).

Geometri, yapının fiziksel geometrisini termodinamik yönden uygun yansıtabilecek boyutlarda hazırlanmalıdır. Seçilen senaryoda, yangının 1 000 metrelik kesiminde, 1/100 ölçek model kullanılarak, tünel geometrisi, araçlar, tahliye noktaları ve jet fanlar modellenmiştir.

Çizelge 4.1. Froude ölçek model sisteminde kullanılan korelasyonlara örnekler (Ingason, Li ve Lonnermark, 2015)

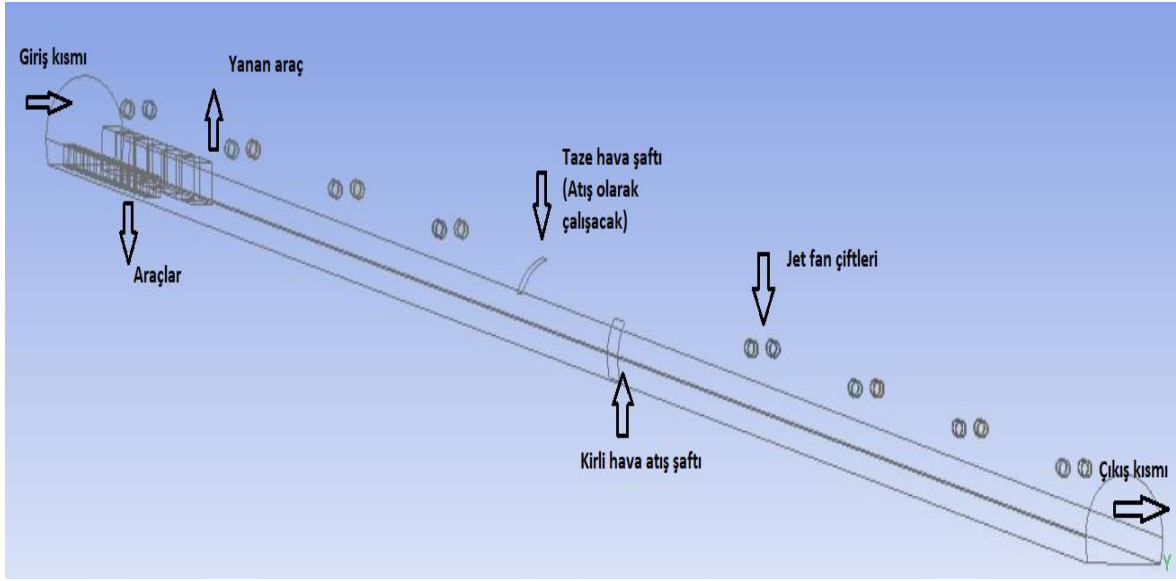
Birim	Ölçek
Isı salınım oranı (kW)	$Q_M/Q_F=(I_M/I_F)^{5/2}$
Hız (m/s)	$V_M/V_F=(I_M/I_F)^{1/2}$
Zaman (s)	$t_M/t_F=(I_M/I_F)^{1/2}$
Sıcaklık (K)	$T_M/T_F=1$
Gaz konsantrasyonu	$Y_M/Y_F=1$
Basınç (Pa)	$P_M/P_F=(I_M/I_F)$
Yanma hızı (kg/(m ² s))	$(m''_f \delta H_c)_M/(m''_f \delta H_c)_F=(I_M/I_F)^{1/2}$
Debi (kg/s)	$\rho_{w,M}/\rho_{w,F}=(I_M/I_F)^{5/2}$

Çizelge 4.2’de, tünel geometrik verileri, araçlar ve fanlara ait modelde kullanılan prototip modelin boyutları ve ölçek model karşılıkları verilmiştir.

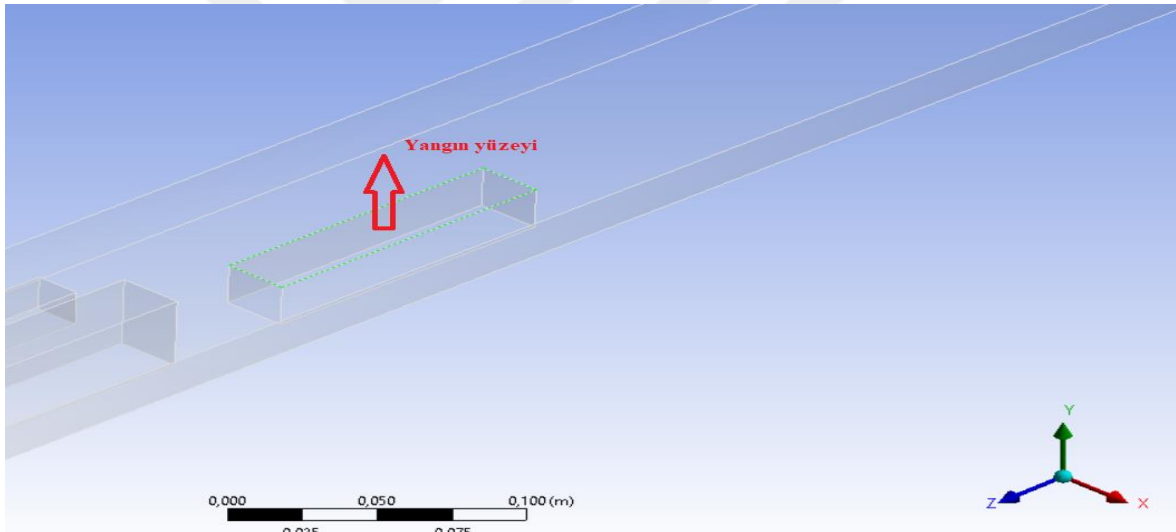
Çizelge 4.2. Tünelin ve kullanılan ekipmanların 1/100 ölçek model boyutları

Tünelin ve Kullanılan Ekipmanların Geometrik Verileri	Prototip Model	1/100 Ölçek Model	Birim
Hesap Yapılan Uzunluk	1000,00	10,00	m
Eğim	3,30%	3,30%	-
Tünel Yüksekliği (H _T)	7,22	0,0722	m
Tünel Hidrolik Çapı (D _H)	8,60	0,0086	m
Şerit Sayısı	2	2	-
Taze Hava Şaftı Ölçüleri	10 x 5	0,1 x 0,05	m ²
Egzoz Hava Şaftı Ölçüleri	4,5 x 3	0,045 x 0,03	m ²
Otomobil Ölçüleri (boy x en x yükseklik)	4,2 x 1,8 x 1,4	0,042 x 0,018 x 0,014	m ³
Otobüs Ölçüleri (boy x en x yükseklik)	12 x 2,5 x 2,9	0,12 x 0,025 x 0,029	m ³
Ağır Yük Taşıtı Ölçüleri (boy x en x yükseklik)	13 x 2,5 x 3,6	0,12 x 0,025 x 0,036	m ³
Jet Fan Dış Çapı	1,4	0,014	m
Jet Fan İç Çapı	1,25	0,0125	m
Jet Fan Uzunluk	3,4	0,034	m

Şekil 4.1’de analizi yapılan geometrik modelin gösterimi, Şekil 4.2’de ise yanan araç yüzeyinin şematik gösterimi verilmiştir.



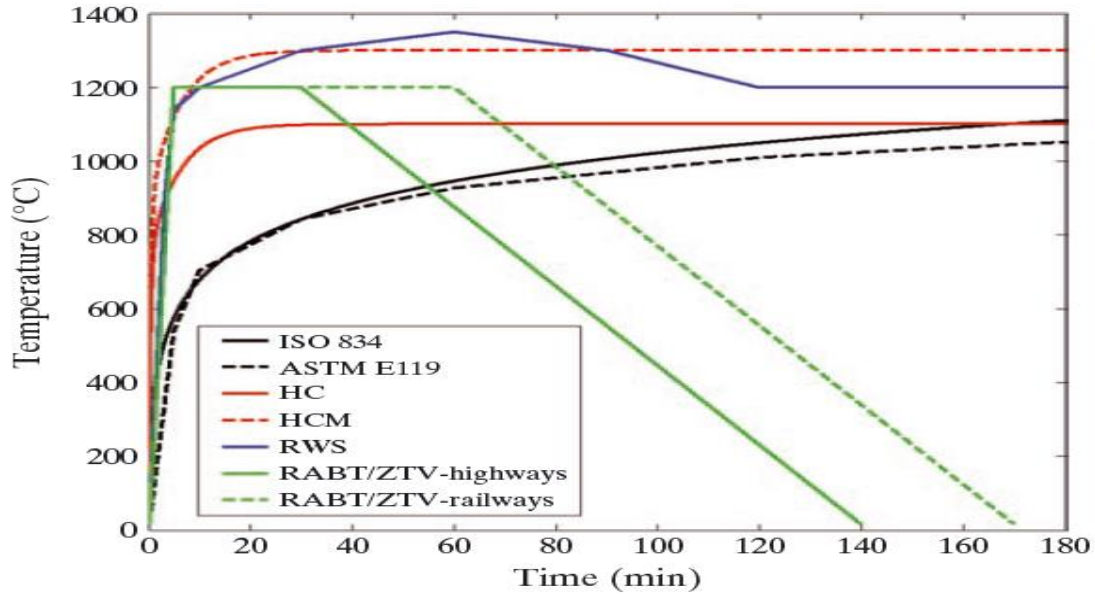
Şekil 4.1. Geometrik model şematik gösterimi



Şekil 4.2. Yangın yüzeyinin şematik gösterimi

4.2. Temel Sınır Koşullarının Belirlenmesi Ve Mesh Yapısı Seçimi

Modellemede yangın yüküne bağlı, oluşacak gaz debisi ve emisyon dağılımını doğru tahmin edebilmek önemlidir. Bu çalışmada, standartlar ve büyük yangın testi sonuçlarına göre, 30 MW'lık yangın durumunda oluşabilecek en yüksek duman sıcaklığını, duman debisi ve yanma ürünleri belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Yangın durumunda karakteristik zaman/sıcaklık eğrileri (Maraveas ve Vrakas, 2014)

Tünel yangınlarıyla ilgili uluslararası kabul yangın eğrileri Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Bu çalışmada yangının yaklaşık 5 dakikada en yüksek sıcaklık değerine ulaşacağı kabul edilmiş ve oluşacak en yüksek sıcaklık, modifiye edilmiş hidrokarbon eğrisi referans alınarak hesaplanmıştır. Modifiye edilmiş hidrokarbon eğrisine (HCM) göre, zamana bağlı sıcaklık farkı Denklem 4.1 ile hesaplanmaktadır (Taillefer ve diğerleri, 2013).

$$\delta T = 1280 \times (1 - 0,325\exp^{-0,167t} - 0,675\exp^{-2,5t}) \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de t, yangının başlangıcından itibaren dakika olarak geçen süreyi, δT oluşan sıcaklık farkını göstermektedir. Buna göre;

$$\delta T = 1280 \times (1 - 0,325\exp^{-0,167(5)} - 0,675\exp^{-2,5(5)}) = 1100 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ bulunur.}$$

Başlangıç tünel sıcaklığı 20 °C olduğundan, 1120 °C pik sıcaklık değeri bulunur. Hesaplamalar Kelvin değeri üzerinden yapıldığı için sınır şartlarında $1120 + 273 = 1393 \text{ K}$ olarak alınmıştır.

Yangın sonrası oluşacak duman miktarını ve içeriğini belirlemek için “Runehamar Tünel Yangın Testleri” sonuçlarından faydalanılmıştır. Bu testlerde 66 ve 202 MW aralığında dört farklı ağır yük taşıtı yangını incelenmiştir. Yangın sonrası oluşacak duman miktarı, tüketilen

yakıt miktarı ve tüketilen hava miktarının toplamına eşittir.

$$m^*_{\text{gaz}} = m^*_{\text{hava}} + m^*_{\text{yakıt}} \quad (4.2)$$

Runehamar T1 sonuçlarına göre (66 MW yangın), yakıt için ortalama yanma ısısı 18,5 MJ/kg'dır. Yangın sırasında O₂ için yanma ısısı, 13,1 MJ/kg olarak ölçülmüştür (Li ve diğerleri, 2012). Yangın bölgesinde yanma denklemi, yakıt türüne bağlı olarak,

Yakıt + ... O₂ → ... CO₂ + ...CO + ... olarak yazılabilir.

Havadaki N₂ gazının, O₂ gazına kütleli oranı yaklaşık 3,29 kg N₂/O₂'dir. Bu durumda 1 kg O₂ gazı yandığında 4,29 kg hava tüketiliyor demektir. Bir başka deyişle 13,1 MJ için 4,29 kg hava tüketilmektedir.

30 MJ için değerleri oranlarsak, yaklaşık olarak 9,824 kg hava, 1,622 kg yakıt tüketilmektedir. Denklem 4.2'e göre;

$$m^*_{\text{gaz}} = 9,824 + 1,622 = 11,45 \text{ kg/s bulunur.}$$

Yangın sonrası oluşacak dumanın gaz içeriği, öncelikli olarak yanan yakıtla bağlıdır. Bir çok küçük ve büyük yangın testleri yapılmış ve yangın sonucu oluşan CO₂, CO, HCN, NO, NH₃, HCl, SO₂ gibi gazların miktarları saptanıp bir korelasyona ulaşmaya çalışılmıştır (Ingason, 2015). Tünel içerisinde meydana gelen yangınlarda, yangın sonucu oluşan CO ve CO₂'in tüneldeki miktarının belirlenebilmesi önemlidir. CO₂ oranı yanan üründen bağımsız olarak sadece ısı salınım oranına bağlı olmakla beraber, CO oranı yanan yakıtın türü ve geometrisiyle doğrudan ilişkilidir. "Runehamar Tünel Yangın Testleri" raporuna göre oluşan CO₂ miktarı, Denklem 4.3'e göre belirlenebilir (Li ve diğerleri, 2012).

$$m^*_{\text{CO}_2} = 0,087 \times Q \quad (4.3)$$

olarak hesaplanabilir. Burada Q, MW birimiyle, m^{*}_{CO2} ise, kg/s birimiyle ifade edilmektedir.

Denklem 4.3'e göre, m^{*}_{CO2} = 2,61 kg/s bulunur.

Oluşan CO gazı miktarı ve is miktarı, yakıt türüne bağlı olarak değiştiğinden bunlarla ilgili kabuller yapılmıştır. “Fire in Tunnels” raporuna göre, tünelde 30 MW ‘lık bir otobüs yangınına ait test sonuçlarına göre, her 2 kg CO₂ gazına karşılık, 0,1 kg CO gazı, 0,05 kg is ortaya çıkmaktadır (Fire in Tunnels [FIT], 2005: 60, 70). Bu sonuçları Runehamar test sonuçlarıyla birleştirerek en kötü senaryo düşünüldüğünde; 11,45 kg gaz içeriğinde, 2,61 kg CO₂ ortaya çıkacaktır. Gaz içeriğinde yaklaşık % 22 oranında CO₂, % 1 oranında CO ve % 0,5 oranında is bulunduğu kabul edilmiş, kalan kısım su buharı olarak tanımlanmıştır.

Jet fanlar, analizde momentum kaynağı değerlendirilmiştir. Yangın bölgesine 100’er m yakınlıktaki fan grupları, yangını tetikleme riski ve yoğunluk değişimi nedeniyle verimsiz olacağı için çalıştırılmamıştır. Şafta kadar olan kısımdaki 2 grup (4 adet jet fan) devreye girmiştir.

Yangının arka kısmındaki jet fanların çalıştığı ve tünel içinde 3 m/s’lik hava hızının sağlandığı varsayılarak, model çalışmadaki tünel giriş portalı 3 m/s hava hızını sağlayacak şekilde dinamik basınç olarak tanımlanmıştır.

Şaftın ileri kısmındaki tersinir çalışan jet fanların nümerik olarak hesaplanan senaryoya göre, tünel içinde şafta kadar 1 m/s hava hızını sağladığı varsayılarak, model çalışmadaki çıkış portalından tünel içerisine 1 m/s hava hızını sağlayacak şekilde dinamik basınç tanımlanmıştır.

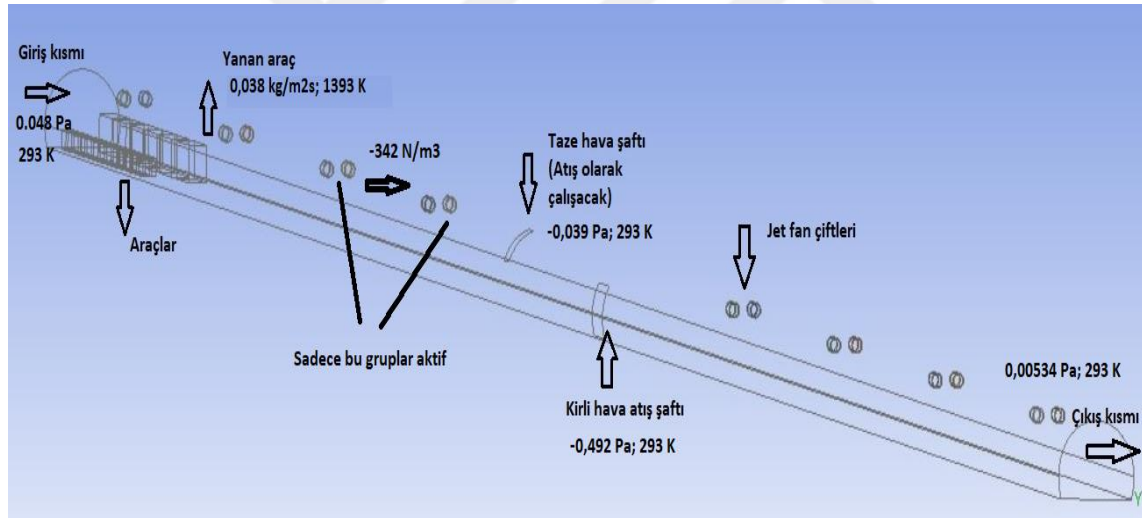
Tünel şaftlarındaki aksiyal fanlar, tam kapasite ile tahliye amaçlı çalıştırılmıştır. Her bir şaftta 2 x 70 m³/s’lik aksiyal fanlar bulunmaktadır. Tahliye fanlarına ait tünele bağlanan menfezler basınç olarak tanımlanmıştır.

Duman, programda birim yüzey alandan (ağır yük taşıtı ya da otobüsün yüzey alanı 30 m²) geçen kütle akısı olarak tanımlanmıştır. Yangın kaynağı yerden 2,5 m yükseklikte kabul edilmiştir.

Zamandan bağımsız analizler için kullanılan sınır şartları ve 1/100 ölçek model karşılıkları Çizelge 4.3 ve Şekil 4.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Zamandan bağımsız durumda sınır koşullarının ölçek model karşılığı

Kararlı Rejim Sınır Koşulları	Prototip Model	1/100 Ölçek Model
Isı salınım oranı (kW)	30000	0,30
Tünel içi hava hızı (m/s)	3,00	0,30
Kirli hava şaftı hava hızı	9,57	0,96
Taze hava şaftı hava hızı	2,68	0,27
Tünel içi sıcaklık (K)	293,00	293,00
Duman sıcaklığı (K)	1393	1393
Debi (kg/s)	11,45	0,0001145
Jet Fan itki gücü (N/m ³)	1304	342
Betonarme duvar kaplama kalınlığı (m)	0,30	0,003



Şekil 4.4. Zamandan bağımsız analizde kullanılan sınır koşullarının şematik gösterimi

Mesh yapısı seçimi

Analizlerden daha kesin ve kısa zamanda çözüm alabilmek için grid hücre boyutlarının uygun seçilmesi önemlidir (McGrattan ve Forney, 2004). Duman karakteristiğini ölçmek için minimum yangın karakteristik çapını Denklem 4.4 ile belirlenir.

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (4.4)$$

Burada, Q , kW biriminden ısı salınım oranını, ρ_0 , başlangıç hava yoğunluğunu, c_{p0} başlangıç havanın başlangıç özgül ısısını ve T_0 ise başlangıç ortam sıcaklığını ifade eder.

Yüksekliğe bağlı, boyutsuz ısı salınım oranı Denklem 4.5 ile belirlenir.

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g} H^{5/2}} \quad (4.5)$$

Denklem 4.4 ve Denklem 4.5 birleştirilerek Denklem 4.6 elde edilir.

$$D^* / H = (Q^*)^{2/5} \quad (4.6)$$

Eğer Denklem 4.6 doğru sonuç veriyorsa, Denklem 4.7 ile uygun ağ (grid) hücre boyutu elde edilir (Li ve diğerleri, 2012).

$$\text{Yangın bölgesi mesh boyutu} = 0.075 \times D^* \quad (4.7)$$

Ölçek modelde kullanılan sınır değerlerine göre (Çizelge 4.3), Denklem 4.4 ve 4.5'ten boyutsuz yangın çapı ve boyutsuz ısı salınım oranı hesaplanırsa;

$$D^* = \left(\frac{0,3}{1,2 \times 1,01 \times 293 \times \sqrt{9,81}} \right)^{2/5} = 0,037$$

$$Q = \frac{0,3}{1,2 \times 1,01 \times 293 \times \sqrt{9,81} \times 0,0722^{5/2}} = 0,193 \quad \text{bulunur.}$$

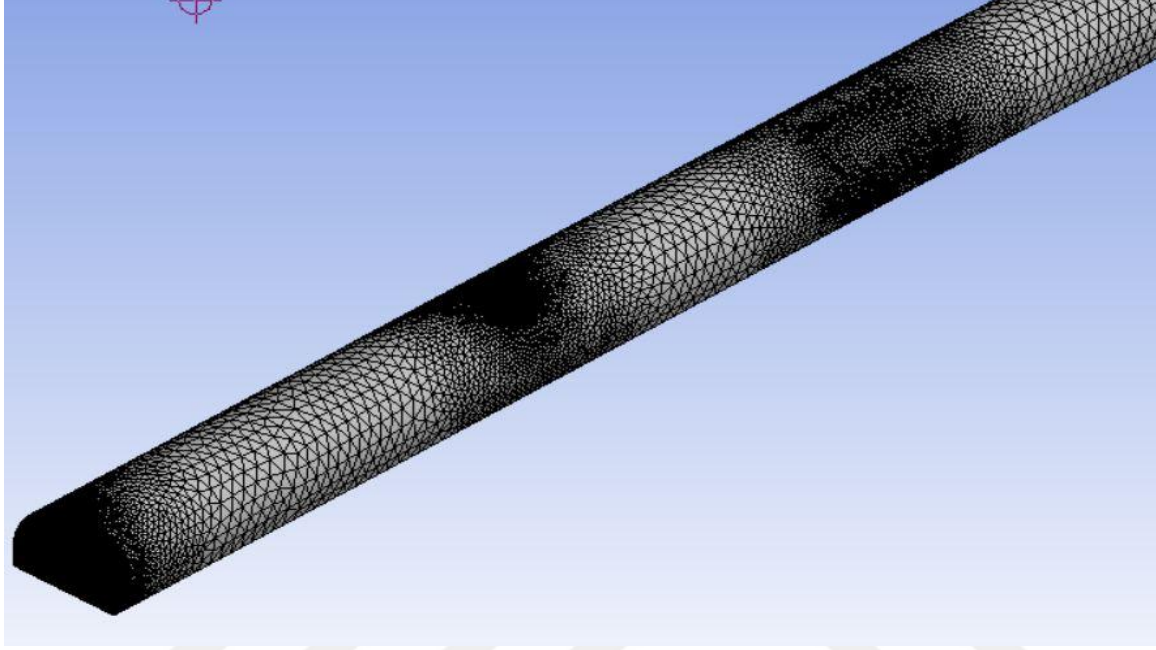
Denklem 4.6 ile kontrol yapıldığında,

$$D^* / H = 0,512, \quad (Q^*)^{2/5} = 0,512 \quad \text{bulunur.}$$

Doğru sonuç alındığı için, Denklem 4.7 ile $0.075 \times 0,037 = 0,0028$ m bulunur.

Hücre boyutu, tüneldeki mesh yapımını basitleştirmek için 0,0028 metre yerine 0,002 m olarak ayarlanmıştır.

Bu çalışmada, tetrahedral elemanlardan oluşan, düzensiz mesh yapısı kullanılmıştır. Mesh yangın bölgesinde, jet fan kısımlarında, şaftların bulunduğu bölgede ve portal giriş çıkışında iyileştirilmiştir. Toplam 2 293 533 ağ hücresi üretilmiştir. Bu çalışmada kullanılan mesh yapısı ve istatistik değerleri Çizelge 4.4, Çizelge 4.5’te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Mesh yapısı

Çizelge 4.4. Program “name selections ve mesh control” özeti

Object Name	inlet	outlet	tunnel_wall	mass_flow	egzhoust	fresh air
State	Fully Defined					
Object Name	Face Sizing		Face Sizing 2		Face Sizing 3	
State	Fully Defined					
Scope						
Scoping Method	Geometry Selection					
Geometry	48 Faces		1 Face		5 Faces	
Definition						
Suppressed	No					
Type	Element Size					
Element Size	2,e-002 m		2,e-003 m			
Behavior	Soft					
Curvature Normal Angle	Default					
Growth Rate	Default					
Local Min Size	Default (4,e-004 m)					

Çizelge 4.5. Programda kullanılan “mesh” yapısı özeti

Defaults		Assembly Meshing	
Physics Preference	CFD	Method	Tetrahedrons
Solver Preference	Fluent	Feature Capture	Program Controlled
Relevance	0	Tessellation Refinement	Program Controlled
Sizing		Intersection Feature Creation	
Use Advanced Size Function	On: Curvature	Advanced	
Relevance Center	Fine	Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Smoothing	High	Statistics	
Curvature Normal Angle	Default (18 °)	Nodes	426 631
Min Size	4,e-004 m	Elements	2 293 533
Max Size	2,56e-002 m	Mesh Metric	Skewness
Growth Rate	1,1	Min	0,00019944
Minimum Edge Length	1,75e-002 m	Max	0,96229
Inflation		Standard Deviation	0,13526
Use Automatic Inflation	None		
Inflation Option	Smooth Transition		
Transition Ratio	0,272		
Maximum Layers	5		
Growth Rate	1,2		
View Advanced Options	No		

4.3. Zamandan Bağımsız Analizler ve Sonuçları

Bu kısımda, 2045 yılı trafik verileri baz alınarak bir önceki bölümde tespit edilen doğu tüpü girişinden 11 500 metre uzaklıkta 30 MW’lık bir yangını durumu araştırılmıştır. Kaza anında tünelden geçecek araç sayıları da dikkate alınarak, oluşacak yangının kararlı ve kararsız analizleri Fluent programı yardımıyla incelenmiştir.

Akış Modellemesi Matematiksel Altyapısı

Analizler kararlı rejimde basınç tabanlı olarak yapılmıştır. Akışa dair parametreleri hesaplayabilmek için akışkanın uyması gereken kütle ve momentumun korunumu gibi temel prensiplerden yola çıkılarak temel akış denklemleri elde edilebilir. 3D bir akış alanında sürekliliği sağlamak için x,y,z yönlerinde süreklilik denklemleri vektörel formda S_m kaynak

terimi olmak üzere, sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışlar için genel olarak Denklem 4.8 ile gösterilebilir (Berberoğlu, 2008).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (4.8)$$

Akış alanında korunması gereken diğer özellik ise momentumun korunumudur. Vektörel formda momentum denklemi, Denklem 4.9 ile gösterilebilir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.9)$$

Burada; eşitliğin sağ tarafındaki ρg ; yerçekiminden dolayı ortaya çıkan gövde kuvvetlerini, $\vec{F}$; akışkana etkiyen kuvvetleri, $\bar{\bar{\tau}}$ ise gerilme tensörünü ifade etmektedir.

Problemin süreklilik, enerji, momentum, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans kinetik enerjisi yutulma denklemleri incelendiği zaman hepsinin benzer yapıda olduğu görülmektedir. Bundan dolayı genel değişken ϕ kullanılarak, tüm denklemler genel bir formda yazılabilir. Genel bir ϕ değişkeni için iki boyutlu kartezyen koordinatlarda taşınım denklemi Denklem 4.10'da gösterilmiştir (Alpgiray, 2016).

$$\frac{\partial (\rho \phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_{\phi} \quad (4.10)$$

Bu eşitlikte, ϕ ; genel bir değişkeni, Γ ; genel difüzyon katsayısını ve S ; kaynak terimini temsil etmektedir. Genel taşınım denklemi için, değişkenler ve bunlara karşılık gelen difüzyon katsayıları ile kaynak terimleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Türbülans modeli seçiminde, Reynolds-Average Navier-Stokes (RANS) denklemleri, modellenen türbülans ölçeğindeki transport denklemlerini akışa dair parametrelerin ortalama değeri olarak ifade etmektedir. Çözüm yapılırken; basınç, sıcaklık, enerji ya da tür konsantrasyonu gibi skaler büyüklükler için ortalananmış değerler kullanılarak sistem çözümlenebilir hale getirilmektedir. Bu çalışmada, literatür çalışmaları incelenerek

realizable k/ε modeli tercih edilmiştir. Bu modelde k , türbülans kinetik enerjisini, ε , türbülans harcanım oranını (turbulence dissipation rate) ifade eder. Türbülanslı viskozite değeri μ_t ; k ve ε 'nın fonksiyonu olarak ifade edilir. Realizable k/ε modeli; süreklilik denkleminin sağlanması, türbülans harcanım oranının hesaplanması ve sonucun negatif çıkmaması (hızın karesi) gibi konularda oldukça tutarlıdır (Berberoğlu, 2008).

Çizelge 4.6. Genel denklem için, değişkenler ve bunlara karşılık gelen difüzyon katsayıları ve kaynak terimleri (Alpgiray, 2016)

Denklem	ϕ	Γ	S
Süreklilik	1	0	0
x-momentum	u	μ_{eff}	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x})$
y-momentum	v	μ_{eff}	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y})$
Enerji	T	Γ_t	$\frac{q}{C_p} \delta_{ij}$
Türbülans kinetik enerjisi	k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G_k - \rho \varepsilon$
Türbülans kinetik enerjisi yutulma	ε	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon}$	$\frac{\varepsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \varepsilon)$
$G_k = \mu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]$ $\mu_{eff} = \mu + \mu_T$ $\mu_T = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$ $\Gamma_t = \frac{k}{C_p} + \frac{\mu_T}{Pr_t}$ $C_1=1,44 ; C_2=1,92 ; C_\mu=0,09 ; \sigma_k=1,00 ; \sigma_\varepsilon=1,30$			

Karmaşık türbülanslı akışlarda (farklı şartlandırılmış çoklu inlet (giriş) barındıran sistemler gibi) türbülans intensitesi için bir ilk değer vermek çözümün hızını ve kalitesini arttırabilir. Türbülans intensitesini (I) hesaplamak için Ansys/FLUENT kullanma klavuzunda, Reynold sayısı (Re) ve karakteristik çap (D_h)'ın kullanıldığı, Denklem 4.11 önerilmektedir.

$$I = 0,16 \cdot Re_{D_h}^{-1/8} \quad (4.11)$$

Tam gelişmiş türbülanslı akış için %5 - %10 intensite değerleri yeterlidir. Türbülans kinetik enerjisi k ; türbülans intensitesi I ve akış karakteristik ortalama hızı u_{avg} kullanılarak Denklem 4.12'den hesaplanabilir (Berberoğlu, 2008).

$$k = \frac{3}{2} (I u_{avg})^2 \quad (4.12)$$

Türbülans kinetik enerjisi k hesaplandıktan sonra türbülans harcanım oranı ε ve özgül yitim hesaplanabilir. ε 'nın hesabı için kullanılabilecek formüller Denklem 4.13'te ve Denklem 4.14'te verilmektedir.

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (4.13)$$

$$\varepsilon = \rho C_\mu \frac{k^2}{\mu} \left(\frac{\mu_t}{\mu} \right)^{-1} \quad (4.14)$$

Çizelge 4.7. Zamandan bağımsız analizde kullanılan model ve sınır şartları

Solver	Pressure based, steady
Model	Energy Equation,
	Viscous, Realizable k-epsilon, enhanced wall treatment, C2-Epsilon=1,9
	Species Transport, Mixture Template
Materials	Mixture; CO, CO ₂ , N ₂ , O ₂ , H ₂ O
	Fluid; Air
	Solid; Concrete
Cell Zone Conditions	Source Term (Jet Fan); 342 N/m ³
Boundary Conditions	inlet: 0.054 Pa, 293,15 K, air,
	outlet: 0 Pa, 293,15 K, air,
	Fan(s): -0,039 Pa, 293,15 K, air
	Fan(e): -0,492 Pa, 293,15 K, air
	Mass Flow: 0,038 kg/ms ² , 1 393 K, mixture
Solution Method	Coupled, Body Force Weighted

Denklem 4.13 ve 4.14'te görülen C_μ , ampirik bir sabit katsayı olup değeri 0,09 kabul edilebilir. Eşitlikte bulunan l , pek çok durum için karakteristik uzunluğun 0,07 katı olarak

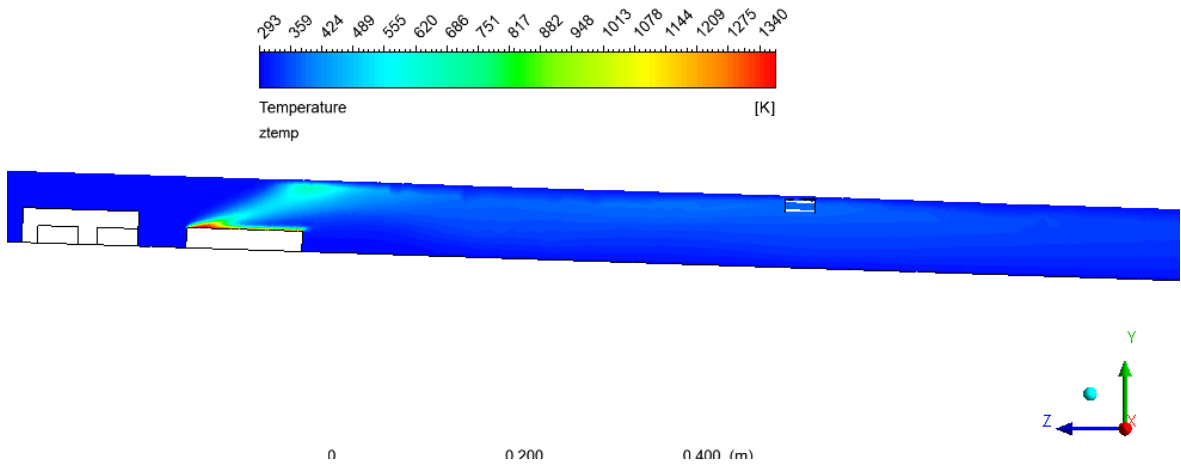
kabul edilir (Berberoğlu, 2008). Bu çalışmada karakteristik uzunluk olarak tünel hidrolik çapı alınmıştır.

Kullanılan analiz modeli ve sınır şartları Çizelge 4.7’de özetlenmiştir. 6000 iterasyon yapılmış ve tüm hesaplarda 10^{-6} ile 10^{-9} mertebesinde yakınsama sağlanmıştır.

Sıcaklık çözümleri ve değerlendirmeler

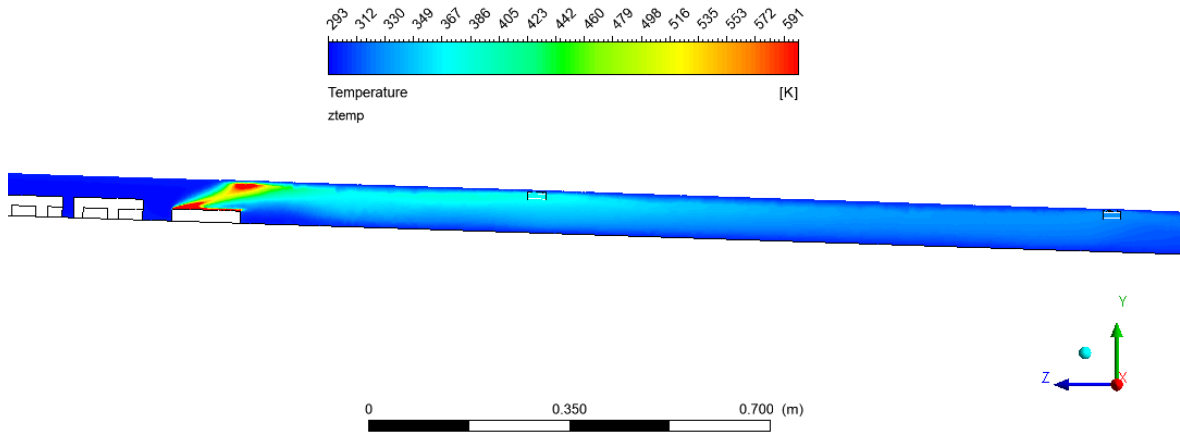
Şekil 4.6’da yangın bölgesinde sıcaklığın 600 K düzeyinde olduğu, havalandırma yönünde yangına en yakın fan grubunun bulunduğu ilk 50 m’lik kısımda 400-500 K seviyelerine düştüğü gözlemlenmektedir.

Şekil 4.7’de 200 m’lik kesimde sıcaklık aralığı 600 K üst seviye olarak sınırlandırılmış ve sıcaklığın dağılımı daha detaylı gösterilmiştir.



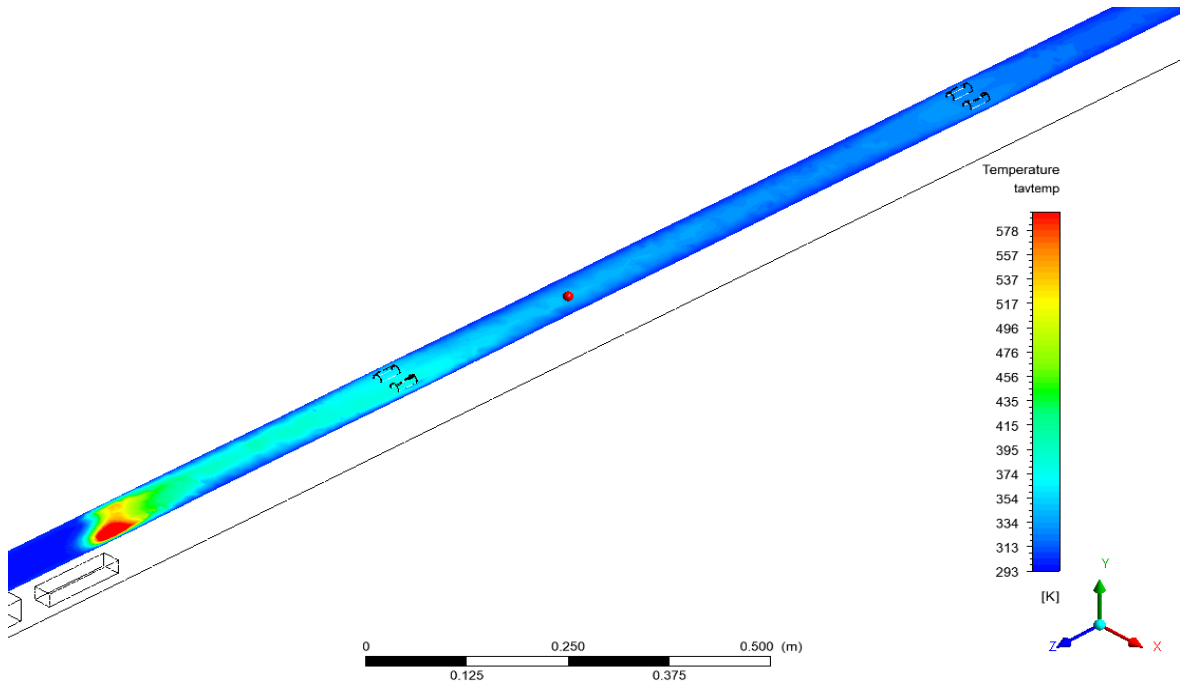
Şekil 4.6. Boyuna kesitte yangın bölgesinde sıcaklık dağılımı

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 incelendiğinde, yangın bölgesinden geriye doğru sıcaklık yayılmamıştır. Bu da havalandırma için seçilen tasarım hızının (3 m/s) yeterli olduğunu göstermektedir. Sıcaklığa bağlı karışım havası yoğunluk düşüşü nedeniyle yangın mahaline yakın noktalarda sıcak hava tünel tavanına yakın kısımlarda iken, yangın olan bölgeye uzaklık arttıkça soğuyan havanın, yoğunluğunun artması nedeniyle sıcaklığın tüm kesitte homojen olarak dağıldığı gözlemlenmektedir.

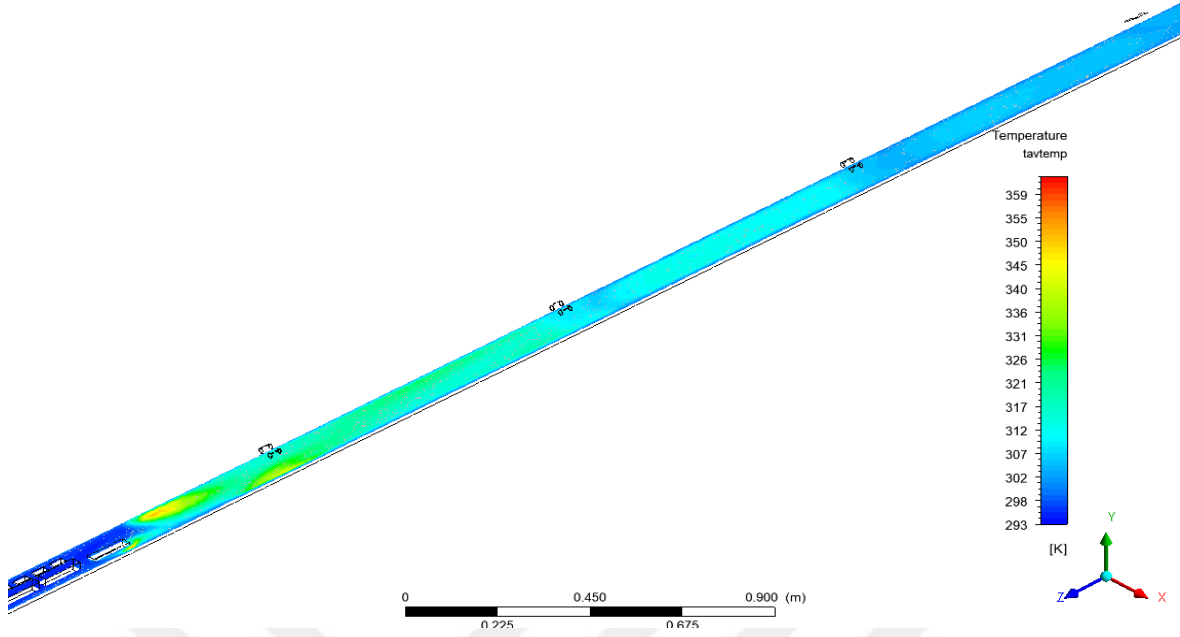


Şekil 4.7. Boyuna kesitte 200 m’lik bölümde 293-600 K aralığında sıcaklık dağılımı

Şekil 4.8’de, zeminden 6 m yükseklikte lokal sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Yangın bölgesinde sıcaklık değerleri 600 K seviyelerindeyken, yangın bölgesinden 200 m uzaklıkta tavan sıcaklığı 330 K seviyelerine düşmüştür. Çalıştırılmayan ilk jet fan grubunda sıcaklık değerleri 500 K seviyelerindedir. Havalandırma sisteminin ana elemanları olan jet fanlar 250 °C (523 K)’de 90 dakika süre ile çalışacak şekilde seçildiği kabulüyle (Bölüm 3.2), yangın bölgesinden 150 m ileride bulunan ve aktif olan jet fanların zarar görmeyeceği öngörülebilir.

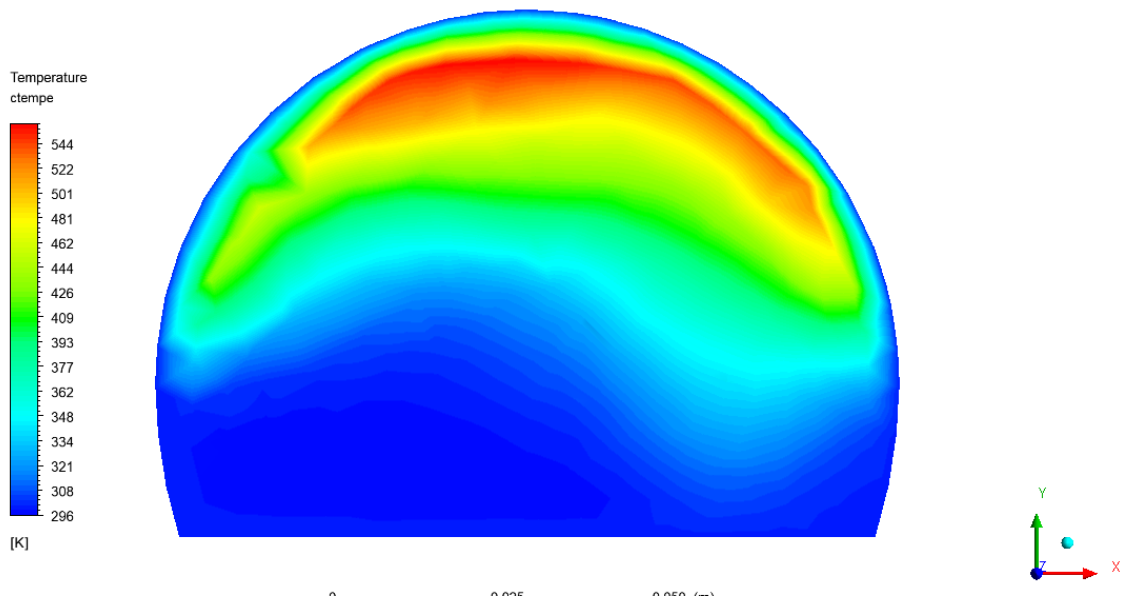


Şekil 4.8. Zeminden 6 m yükseklikte, 200 m’lik kısımda tavan bölgesi sıcaklık dağılımı



Şekil 4.9. Zeminden 1.7 m yükseklikte, 400 m’lik kısımda sıcaklık dağılımı

Şekil 4.9’da, ortalama bir insanın uzunluğunun 1.7 m olduğu düşünülerek, 400 m’lik kısımda zemin seviyesine yakın sıcaklık dağılımı verilmiştir. Yangın bölgesinden, tünel kullanıcılarının tahliyesinin yapılacağı geri bölgede sıcaklık değerlerinin yükselmediği görülmektedir. Havalandırma yönünde ilk 150 m’lik kısımda sıcaklık değeri 330 K (63 °C) seviyelerini geçmektedir.



Şekil 4.10. XY ekseninde yangın bölgesinden 10 m ileride sıcaklık dağılımı

Şekil 4.10'da yangın bölgesinden, trafik yönünde 10 m ileride tünel kesitinin lokal sıcaklık dağılımı verilmiştir. Beklenildiği gibi, karışım havasının sıcaklığı bağlı yoğunluk düşüşü nedeniyle sıcak hava yükselmiş ve tünel tavanında en yüksek değerler ölçülmüştür.

Çizelge 4.8'de 0 m yangın bölgesi olmak üzere, -40 m tünel kullanıcılarının tahliye güzergahında, 360 m'de trafik yönünde kirli hava atış şaftına kadar olan mesafede ölçülen en yüksek sıcaklıklar ve ortalama sıcaklıklar grafik olarak gösterilmiştir.

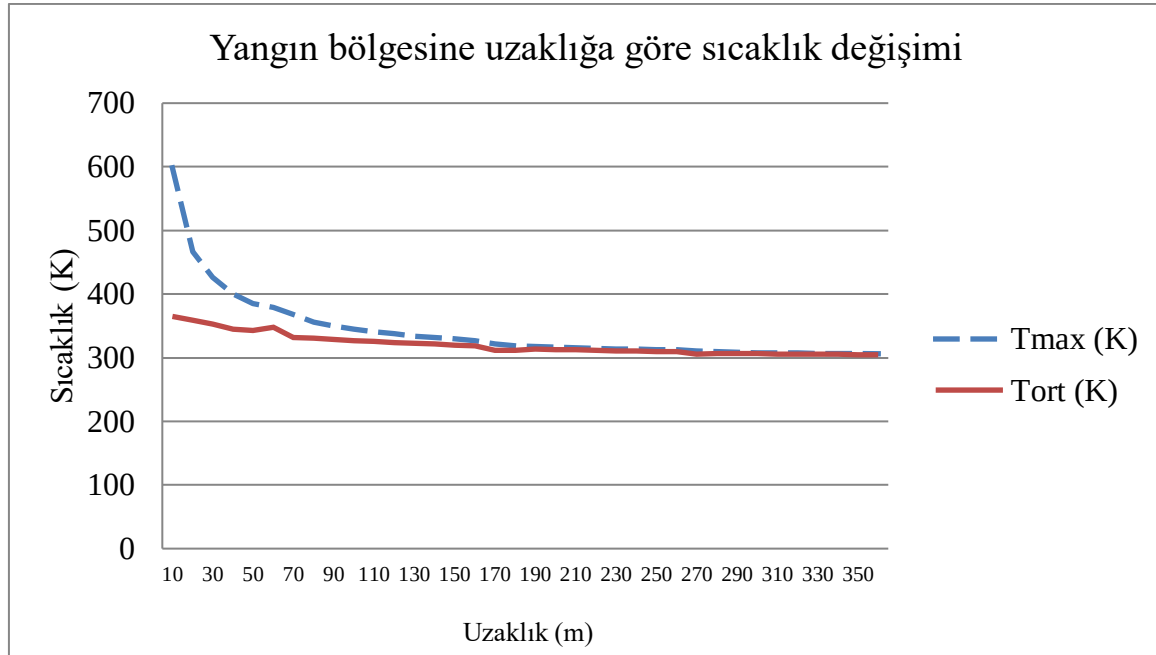
Çizelge 4.8. Yangın bölgesinden 40 m geride ve 360 m ileride (trafik yönüne) sıcaklık değişimi



Çizelge 4.9'da yangın bölgesinin 10 m ilerisinden, kirli hava atış şaftına kadar sıcaklık düşüşü detaylı olarak grafikte gösterilmiştir. Çizelge 4.9 incelendiğinde ortalama sıcaklık değerlerinin atış şaftına kadar 300 K'in altına düşmediği, özellikle ilk 30 m'de ortalama 100 °C seviyelerinde olduğu görülmektedir.

Tünel içindeki beton yapının hasarı; beton yapının dağılması ve ısı olarak mukavemetinin azalmasına bağlı olarak değerlendirilmektedir. Termal bozulma, tünel astar veya döşeme kalınlığının yarısını aşarsa yapının ciddi şekilde hasar gördüğü kabul edilir. Tünelde beton yüzeylere sıcaklığın yayılması 200 °C'de başlar, kritik sıcaklık ise 300 °C'dir. Çizelge 4.10'da, tünelde yaygın olarak kullanılan bazı yapısal malzemelerde hasarların meydana geldiği sıcaklıklar özetlemiştir (PIARC, 1991: 55,68; INERIS, 2005: 64).

Çizelge 4.9. Yangın bölgesinden kirli hava şaftına kadar sıcaklık değişimi



Çizelge 4.10. Bazı yapı malzemelerinin termal etkiler nedeniyle özellik kayıplarının özeti (PIARC, 1991: 55,68; INERIS, 2005: 64)

Malzeme	Geçici hasarlar	Kalıcı hasarlar
Yoğun beton	300 °C'de termal etkiler nedeniyle yapının mukavemeti azalmaya başlar, 600 °C'de mukavemeti %50 azalır	300 °C'den itibaren kalıcı hasarlar belirgin olmaya başlar.
Hafif Beton	500 °C'de termal etkiler nedeniyle yapının mukavemeti azalmaya başlar, 750 °C'de mukavemeti %50 azalır	500 °C'den itibaren kalıcı hasarlar belirgin olmaya başlar.
Güçlendirilmiş ve ön gerilmeli çelik	150 °C'de termal etkiler nedeniyle yapının mukavemeti azalmaya başlar, 450 °C'de mukavemeti %50 azalır	150 °C'de kalıcı hasarlar belirgin olmaya başlar, 450 °C'de kalıcı olarak mukavemeti %50 azalır.
Çelik yapılar	200 °C'de termal etkiler nedeniyle yapının mukavemeti azalmaya başlar, 500-600 °C'de mukavemeti %50 azalır	300 °C'de kalıcı olarak mukavemeti azalmaya başlar.

Şekil 4.8’de tavan bölgesi sıcaklıkları ve Şekil 4.10’da yangın bölgesi tünel kesiti sıcaklık dağılımları ile Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9 incelendiğinde, yangın bölgesinden trafik yönünde ilk 50 metrelik kısımda ölçülen en yüksek sıcaklıklar 200 °C’nin üzerinde seyretmektedir. Bu bölümde beton malzemelerin zarar görebileceği öngörülebilir. Özellikle yangın bölgesi ve 20 m ilerisine kadar olan bölümde sıcaklıklar belirli bölümlerde 300 °C’yi (573 K)

aşmaktadır. Bu bölümlerde yapısal dökülmeler ve kalıcı hasarlar beklenebilir. Özellikle yangının çıktığı bölgeye yakın olan 20 m'lik mesafede tavan sıcaklık değerleri kritik değerleri aşmaktadır.

Çizelge 4.11'de tünellerde kullanılan mekanik, elektrik ve elektronik sistemlerin çeşitli malzemelerinin ısı hasarları için kritik değerleri özetlenmektedir (PIARC, 1991: 55,68; INERIS, 2005: 65).

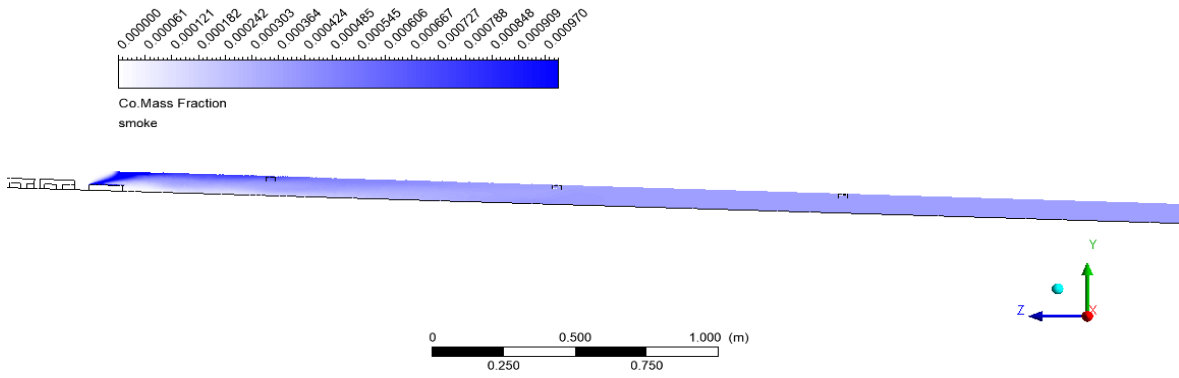
Yangın mahalinden trafik yönünde ilk 100 m'lik kısımda tünelin tavan kısmına yakın bulunan bölgede, 100 °C ile 350 °C arasında sıcaklık değerlerinin değiştiği ve Çizelge 4.8'deki sıcaklık dağılımına göre, yangına dayanıklı malzemelerin kullanılmaması durumunda, aydınlatma armatürlerinde, aydınlatma, haberleşme ve data kablolarında, kablo kanallarında, ve destek elemanlarında kalıcı hasarlar olabileceği öngörülebilir.

Çizelge 4. 11. Bazı tünel mekanik ve elektrik sistemi yardımcı elemanlarının termal etkiler nedeniyle özellik kayıplarının özeti (PIARC, 1991: 55,68; INERIS, 2005: 65)

Ekipman	Bozulma sıcaklığı
Termoplastik malzemeler (Kutu profil, kablo kılıfı, bağlantı aparatları, destek elemanları, kablo tavaları vb.)	Erime sıcaklığı 100-180 °C
Aluminyum alaşımları (Aydınlatma elemanları bağlantı aparatları)	300 °C'de kalıcı olarak özelliklerini yitirmeye başlar.
Mekanik destek aparatları (Köşebent, dirsek vb.)ve tesisatlar	500 °C'de kalıcı olarak özelliklerini yitirmeye başlar.
Haberleşme, aydınlatma ve data kabloları	250 °C'de özelliklerini yitirmeye başlar, acil durum aydınlatma kabloları 1000 °C'ye kadar zarar görmemektedir.
Armatürler	Sıcaklık 40 °C'yi aşmamalıdır.

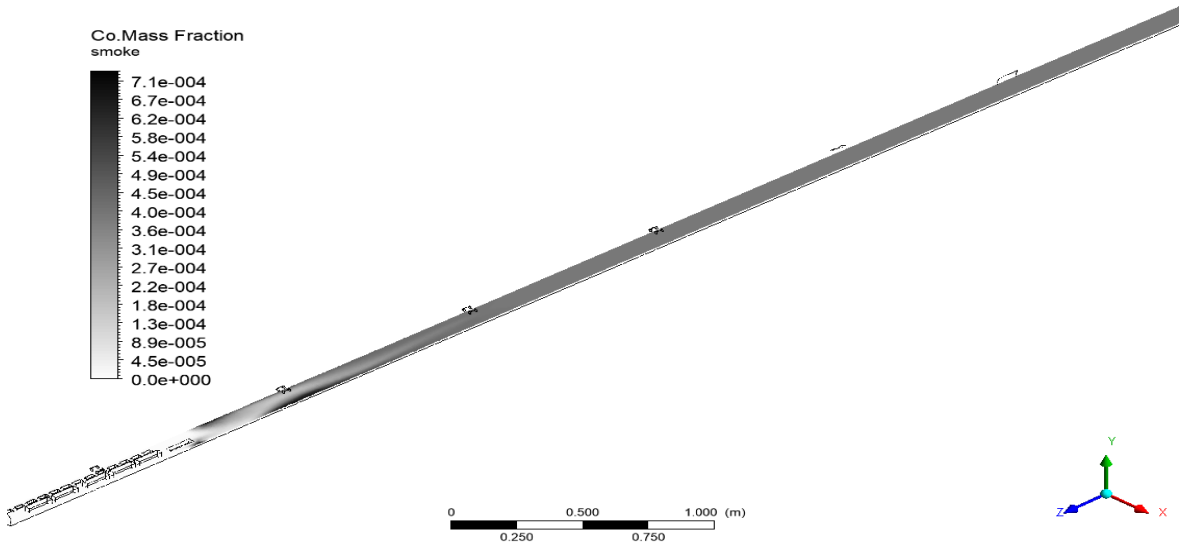
Yanma ürünleri dağılımı ve değerlendirmeler

Şekil 4.11'de yangın bölgesinden şafta doğru boyuna kesitte CO seviyesi görünmektedir. Buna göre yangın bölgesinden geriye doğru dumanın yayılmadığı görünmektedir. Yangın bölgesinden şafta kadar olan bölümde karışım havasında bulunan CO seviyesi 10000 ppm'den 400 ppm seviyelerine kadar azalmıştır.



Şekil 4.11. Boyuna kesitte 400 m’de zamandan bağımsız CO dağılımı

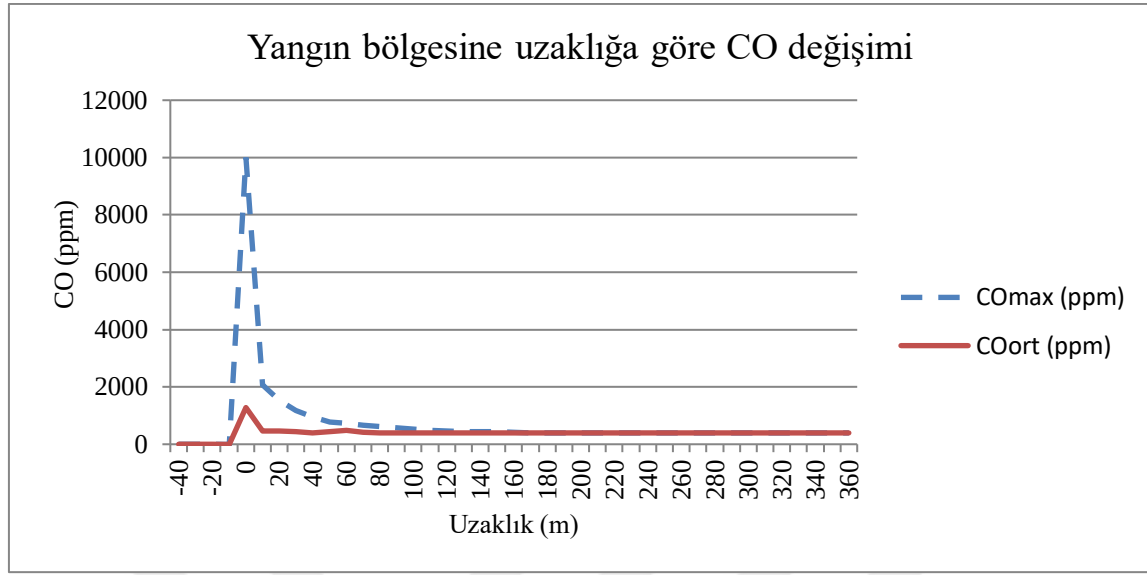
Şekil 4.12’de şaftların sonrasındaki duman dağılımını da görebilmek için 400 m’lik kısımda CO dağılımı gösterilmiştir. Sıcaklık düşmesi nedeniyle yangın mahalinden şaftta doğru karışım havasının yoğunluğu yükselmekte ve duman tünel kesitine dengeli biçimde dağılmaktadır. Yangının olduğu bölgenin hemen sonrasındaki çalışmayan ilk jet fan grubu havalandırmaya karşı blokaj etkisi yaptığından dolayı ilk jet fan grubunun altında ufak bir kısımda dumanın çöktüğü görülmektedir.



Şekil 4.12. Boyuna kesitte, zeminden 1,7 m mesafede CO ve duman dağılımı

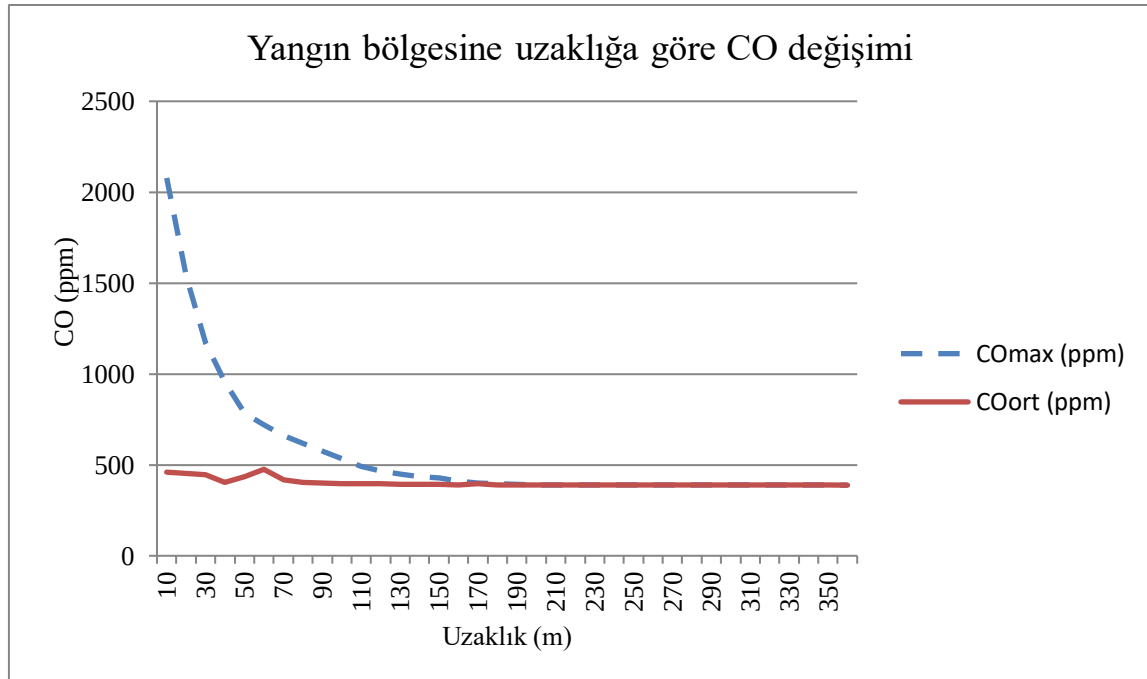
Çizelge 4.12’de 0 m yangın bölgesi olmak üzere, -40 m tünel kullanıcılarının tahliye güzergahında, 360 m’de trafik yönünde kirli hava atış şaftına kadar olan mesafede ölçülen en yüksek ve ortalama CO değerleri grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.12. Yangın bölgesinden 40 m geride ve 360 m ileride (trafik yönüne) CO değişimi



Çizelge 4.13’de yangın bölgesinin 10 m ilerisinden, kirli hava atış şaftına kadar CO miktarı değişimi detaylı olarak grafikte gösterilmiştir. Çizelge 4.13 incelendiğinde ortalama CO değerlerinin atış şaftına kadar 400 ppm seviyelerinin altına düşmediği, özellikle ilk 50 m’de ortalama 1000 ppm’in üzerinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.13. Yangın bölgesinden kirli hava şaftına kadar CO değişimi

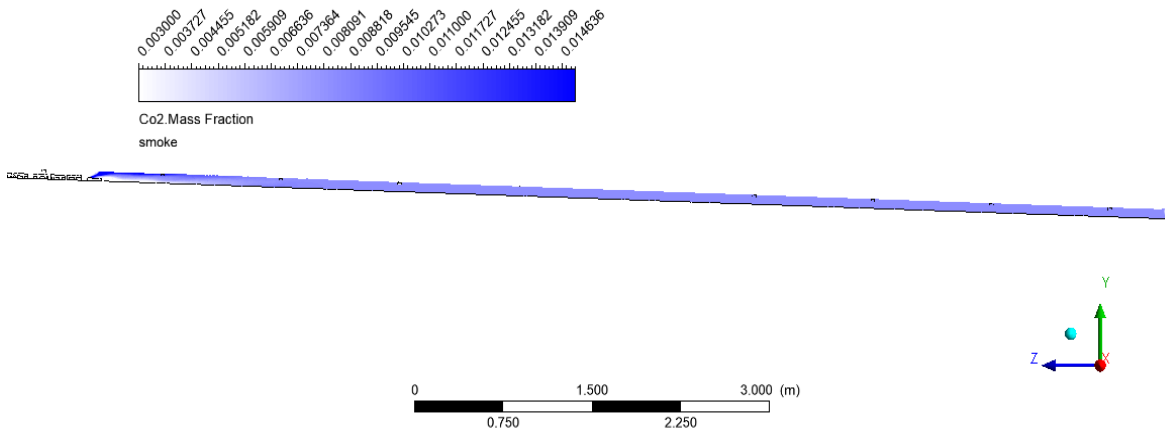


Çizelge 4.14. Yangın durumunda tünel kullanıcıları için kabul edilebilir güvenlik kıstasları özeti (Caliendo ve diğerleri, 2013)

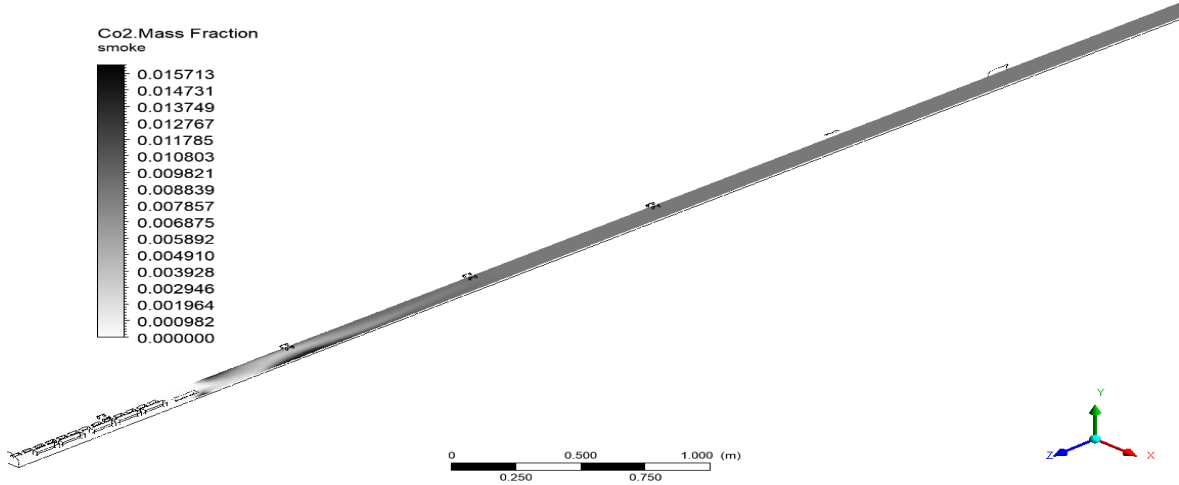
Sıcaklık	$\leq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	UPTON (2008)
	$\leq 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 15 dk için	PIARC (1999)
	$\leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ kurtarma ekibi için	UPTON (2008)
Görünürlük	$\geq 10\text{ m}$	UPTON (2008)
	$\geq 7\text{ m}$ dumanlı atmosferde yürüyebilmek için	PIARC (1999)
	$\geq 15\text{ m}$ işaretleri okuyabilmek için	PIARC (1999)
Karbon monoksit, CO	$\leq 1\text{ }200\text{ ppm}$	CFPA (2009)
Karbon dioksit, CO ₂	$\leq 40\text{ }000\text{ ppm}$	CFPA (2009)
Oksijen, O ₂	$\geq \%14$	CFPA (2009)

Çizelge 4.14'te, uluslararası kabul gören, yangın durumunda tünel kullanıcıları için kabul edilebilir güvenlik kıstaslarının özet tablosu verilmiştir. Çizelge 4.13 incelendiğinde yangın mahalinden trafik yönüne göre geride kalan kısımda CO oranının kabul edilebilir seviyelerde olduğu, sadece trafik yönünde ilk 50 m'de referans değerin aşıldığı görülmektedir.

Yangın mahaline yakın 50 m'lik mesafede sıcaklık kaynaklı yoğunluk farkı nedeniyle CO'nin tünelin tavan kısmında yoğunlaştığı, 60 m'de çalıştırılmayan jet fanın engellemesinden dolayı ortalama değerlerin nispeten yükseldiği, 70 m'den sonra ise dumanın soğuyarak çökmeye başlamasıyla beraber en üst ve ortalama değer arasındaki farkın kapandığı görülmektedir.



Şekil 4.13. Boyuna kesitte 400 m'de zamandan bağımsız CO₂ dağılımı

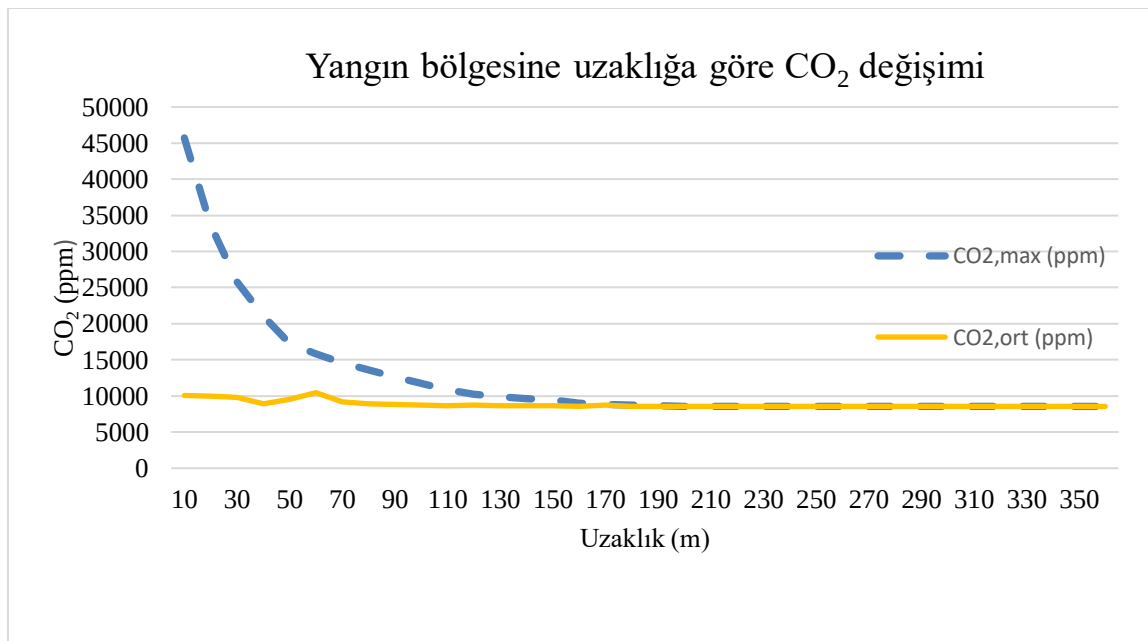


Şekil 4. 14. Boyuna kesitte, zeminden 1,7 m yükseklikte CO₂ ve duman dağılımı

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 incelendiğinde yangın bölgesinden şafta kadar olan bölümde karışım havasında bulunan CO₂ seviyesi 50000 ppm'den 10000 ppm seviyelerine kadar azalmıştır.

Şekil 4.14'de şaftların sonrasındaki duman dağılımını da görebilmek için 600 m'lik kısımda CO₂ dağılımı gösterilmiştir. Sıcaklık düşmesi nedeniyle yangın mahalinden şafta doğru karışım havasının yoğunluğu yükselmekte ve duman tünel kesitine dengeli biçimde dağılmaktadır.

Çizelge 4.15. Yangın bölgesinden kirli hava şaftına kadar CO₂ değişimi

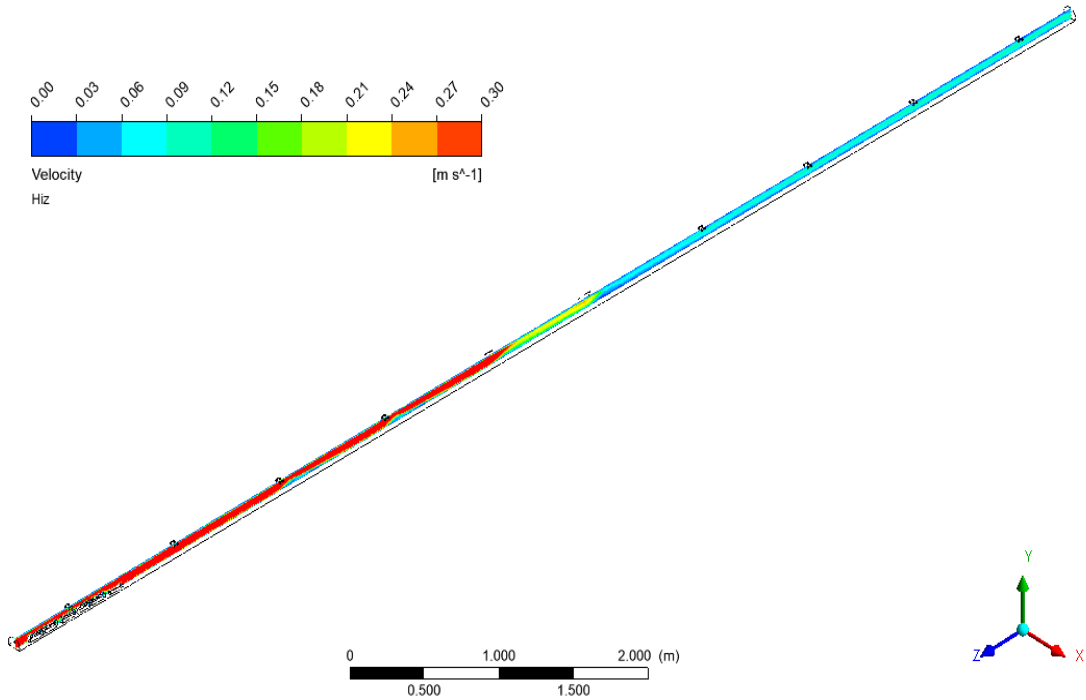


Çizelge 4.15’de yangın bölgesinin 10 m ilerisinden, kirli hava atış şaftına kadar CO₂ miktarı değişimi detaylı olarak grafikte gösterilmiştir. Çizelge 4.14 ve Şekil 4.13 incelendiğinde ortalama CO₂ değerlerinin atış şaftına kadar 10000 ppm seviyelerini aşmadığı, sadece ilk 30 m’de ortalama Çizelge 4.13’te verilen 40000 ppm seviyesinin üzerinde olduğu görülmektedir.

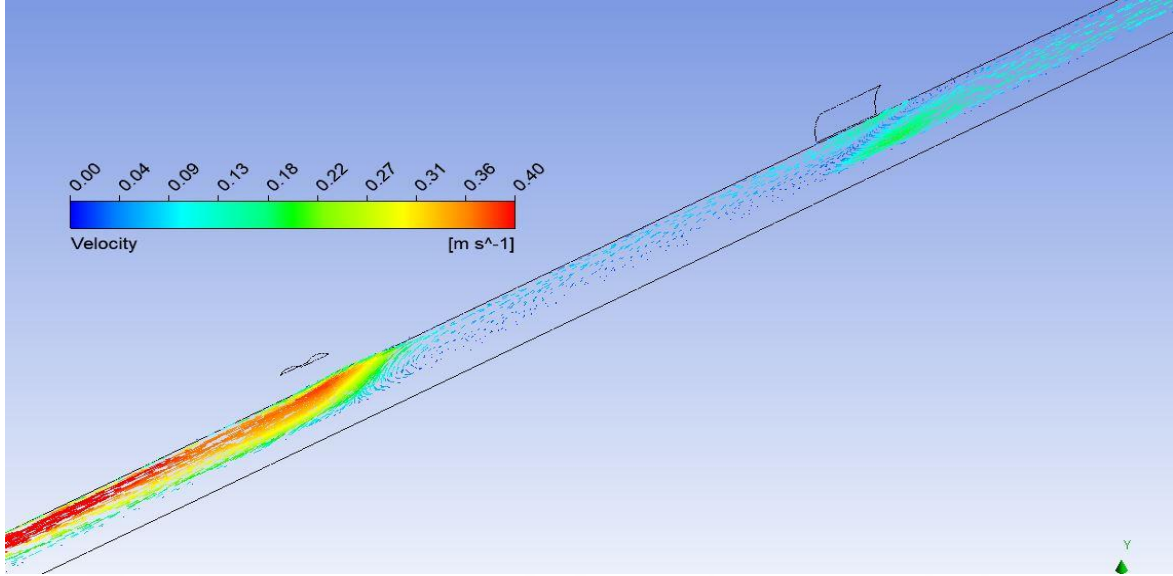
Hız dağılımı ve değerlendirmeler

Ölçek model yaklaşımından dolayı, ölçek model analiz sonuçları ile prototip model hız sonuçları arasında 10 kat fark oluşmaktadır. Şekil 4.15 ve 4.16 incelendiğinde hız dağılımının yangın bölgesinden kirli hava şaftına kadar 0,3 m/s değerinin altına düşmediği görülmektedir. Bu değerin prototip modelde karşılığı 3 m/s’dir.

Hedeflendiği şekilde, temiz hava şaftından, tünel çıkışına kadar olan kesimde ise trafiğin tersi yönde yaklaşık 0,1 m/s’lik hava hızı sağlanmaktadır. Bu değerin prototip model karşılığı 1 m/s’dir.

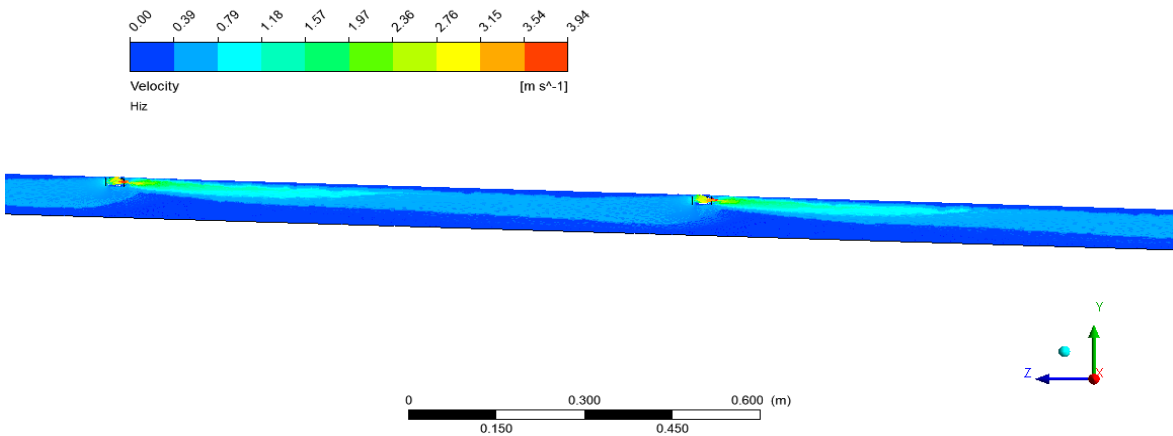


Şekil 4.15. Boyuna kesitte 1000 m’de 0-3 m/s aralığında hız dağılımı



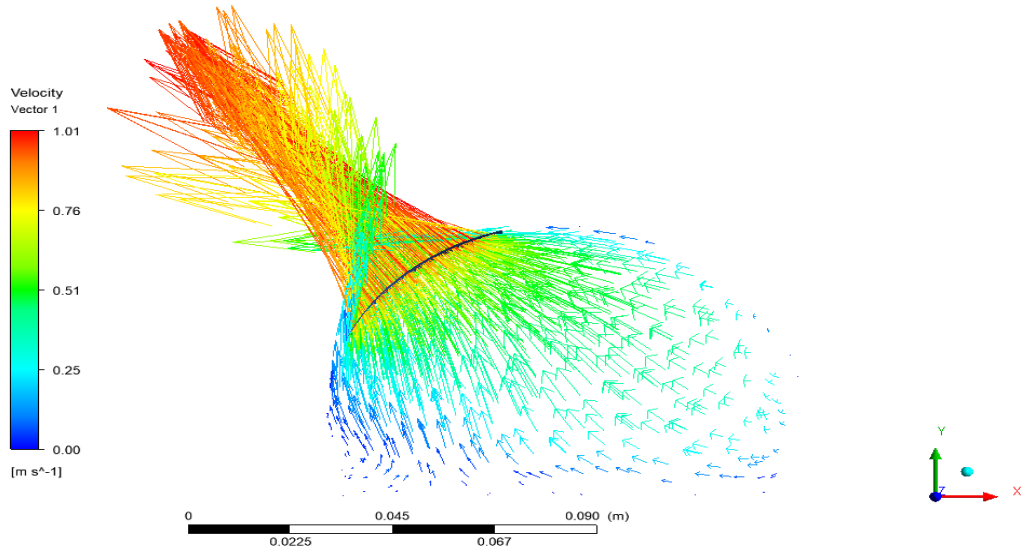
Şekil 4.16. Boyuna kesitte atış fanlarına yakın 150 m’lik kısımda lokal hız dağılımı

Şekil 4.17’de yangın bölgesinden 150 m ve 250 m mesafede çalışan jet fan gruplarının hız konturları incelendiğinde, Çizelge 3.15’deki jet fanlara ait teknik özellikler tablosundaki 33,6 m/s’lik hava hızını (ölçek modelde 3,36 m/s) doğru şekilde yansıttığı görülmektedir. Jet fan grupları arasındaki 100’er m’lik fark jet fanların çalışma verimi açısından yeterli görülmektedir.



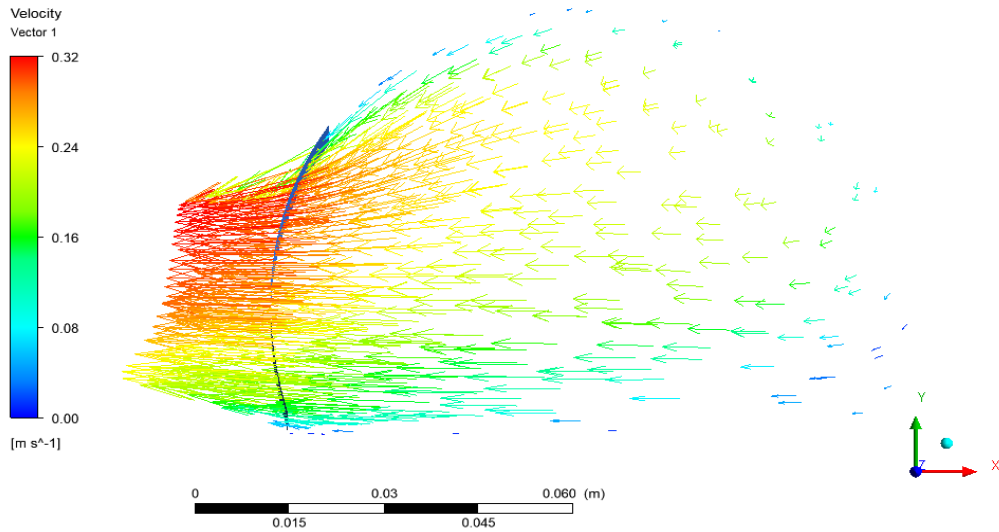
Şekil 4.17. Boyuna kesitte jet fan gruplarının çalıştığı 150 m’lik kesimde lokal hız dağılımı

Şekil 4.18’de kirli hava atış kanalının tünele bağlandığı menfezdeki hız vektörleri gösterilmektedir. Kanaldan 10 m/s’nin (ölçek modelde 1 m/s) üzerinde hızla atılan hava, tünelin iç kısmında Şekil 3.19’da gösterilen acil durum senaryosuna uygun olarak 3 m/s (ölçek modelde 0,3 m/s) hızla havayı çekmektedir.



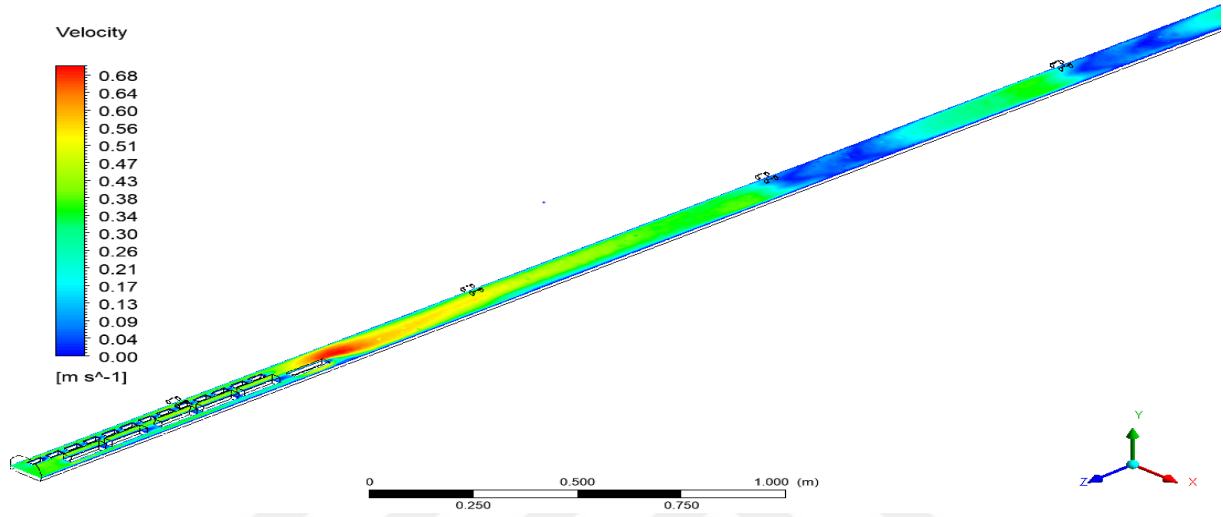
Şekil 4.18. Kirli hava atış fanında (egzoz) lokal hız vektörleri

Normal havalandırmada tünele ihtiyaç halinde taze hava basan temiz hava şaftı aksiyal fanı acil durumda tersinir çalıştırılarak kirli hava atış şaftına yardımcı olmaktadır. Şekil 4.19’da temiz hava şaftına bağlı kanal ve menfezdeki hız vektörleri gösterilmektedir. Kanal kesitleri, kirli hava şaftı kanallarından daha büyük olduğu için, hava hızları kanalda 3 m/s (ölçek modelde 0,3 m/s) iken tünelin iç kısmında Şekil 3.19’da gösterilen acil durum senaryosuna uygun olarak 1 m/s (ölçek modelde 0,1 m/s) hızla havayı çekmektedir.



Şekil 4.19. Temiz hava şaftında (atış olarak çalışmakta) lokal hız vektörleri

Şekil 4.20’de yerden 1,7 m mesafede lokal hız dağılımı gösterilmiştir. Yangın bölgesinin arka kısmında, insanların tahliye edileceği bölgede, yerden 1,7 m mesafede hız 3 m/s’dir (ölçek modelde 0,3 m/s). Trafik yönünde yangın mahaline yakın kısımlarda hız 6-7 m/s’ye (ölçek modelde 0,6-0,7 m/s) seviyelerindeyken, diğer kısımlarda 4 m/s’yi (ölçek modelde 0,4 m/s) geçmemektedir.



Şekil 4.20. Yerden 1,7 m mesafede 400 m’lik mesafede lokal hız dağılımı

4.4. Zamana Bağlı Analizler ve Sonuçları

Bu bölümde zamandan bağımsız (kararlı rejimde) olarak analizi yapılan modelin, zamana bağlı dağılımı izlenmiştir. Yangının 20 dakika süresince seyri (itfaiyenin müdahale süresi olarak düşünülmüştür), bu sürede havalandırma sisteminin çalışması, sıcaklık dağılımı, dumanın miktarı, hız dağılımlarının değişimi ve tünel kullanıcılarının tahliyesi süreci ile ilgili yorumlar yapabilmek amaçlanmıştır.

Zamandan bağımsız analizde kullanılan geometrik sınır şartlarına ek olarak bu kısımda, tünel için aşağıdaki çalışma senaryosu öngörülmüştür.

1. Yangının çıktığı an; sıcaklık yükselirken, trafik akışının devam etmesi (piston etkisi),
2. Tünel içinde trafik akışının durması ve havalandırma senaryosunun devreye girmesiyle dumanın kontrol altına alınması.

Yangın ilk çıktığı anda 1 dakika boyunca trafik akışından kaynaklı 6,5 m/s'lik piston etkisiyle dumanın tünel boyunca uzaklaştığı düşünülmüştür. Yangının büyüme hızı "Benelux Tünel Yangın Testlerinde" 26 MW'lık ağır yük taşıtı yangını testinde elde edilen 3,6 MW/dak'lık lineer yangın büyüme oranı ile temsil edilmiştir (PIARC, 2017:54).

Duman sıcaklıkları Denklem 4.1 ile elde edilmiştir. Oluşan duman debisi, yangın yüküne bağlı olarak, zamandan bağımsız sınır şartlarını belirlerken kullanılan Runehamar test sonuçlarına göre tanımlanmıştır. Sıcaklığın ve yangın yükünün 5 dakika içerisinde en yüksek değerine ulaşacağı, daha sonra sabit olarak 20 dakika boyunca yangının devam edeceği öngörülmüştür. İlk 5 dakikadaki sınır değer değişimleri Çizelge 4.16'da gösterilmiştir.

0-1 dakika arasında (ölçek modelde 0-6 saniye) trafik akışından kaynaklı (60-80 km/h), 6,5 m/s'lik piston etkisiyle, yangın sonucu oluşan duman trafik yönünde uzaklaştırılmıştır. 6,5 m/s'lik hız (ölçek modelde 0,65 m/s), giriş portalinden, hızın 1/100 ölçek model karşılığına denk gelen dinamik basınç olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 4.16 Zamana bağlı sınır şartları özet tablosu

Süre (dakika)	Yangın Yüğü (MW)	Duman Sıcaklığı (K)	Duman Debisi (kg/s)		Duman Kütle Akısı (kg/m ² s)	
			Tam Model	Ölçek Model	Tam Model	Ölçek Model
0-1	3,6	1150	1,423	1,42E-05	0,05	0,005
1-2	7,2	1270	2,847	2,85E-05	0,09	0,009
2-3	10,8	1321	4,27	4,27E-05	0,14	0,014
3-4	20,4	1359	8,0673	8,07E-05	0,27	0,027
4-5	30	1393	11,45	0,000115	0,38	0,038

2. dakikada (ölçek modelde 12 saniye) sıcaklık yükselmesine bağlı olarak, tünel tavanında bulunan doğrusal yangın algılama sistemi (50-70 °C aralığında uyarı verecek şekilde ayarlandığı varsayılmıştır.) tünel SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemini uyarmış ve acil durum senaryosu otomatik olarak devreye girmiştir. Acil durum senaryosunun içerisinde, tünel portallerindeki bariyerlerin kapatılarak tünele araç girişinin durması, aydınlatma seviyelerinin en üst kademeye çıkarılması, havalandırma senaryosunun başlaması, değişken trafik işaretleme ve değişken mesaj sistemlerinin tünel kullanıcılarını uyarması, tünel içi anons sistemleri ve ışıklı levhalarla tünel kullanıcılarının en yakın acil geçiş kapısına yönlendirilmesi, acil durum müdahale ekiplerine bilgi verilmesi vb. işlemler

bulunmaktadır.

3. dakikada (ölçek model 18 saniye), havalandırma sisteminin devreye girmesiyle duman dağılımı kontrol altına alınmaya başlamıştır. Kirli hava şaftı ve jet fanların 3. dakikadan itibaren çalışmaya başlayacağı kabul edilmiştir.

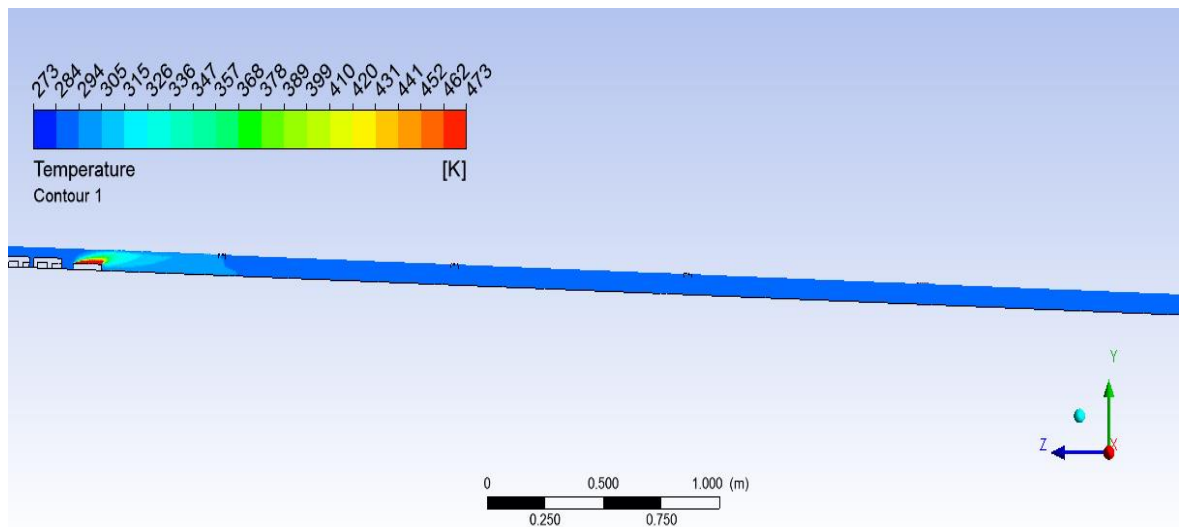
4. ve 5. dakika aralığında (ölçek model 24-30 saniye) sıcaklık ve yanma debisi, pik değerine ulaşmıştır.

5. dakikadan 20. dakikaya kadar (30-120 saniye arası) kararlı sınır koşullarında yangın süreci devam etmektedir.

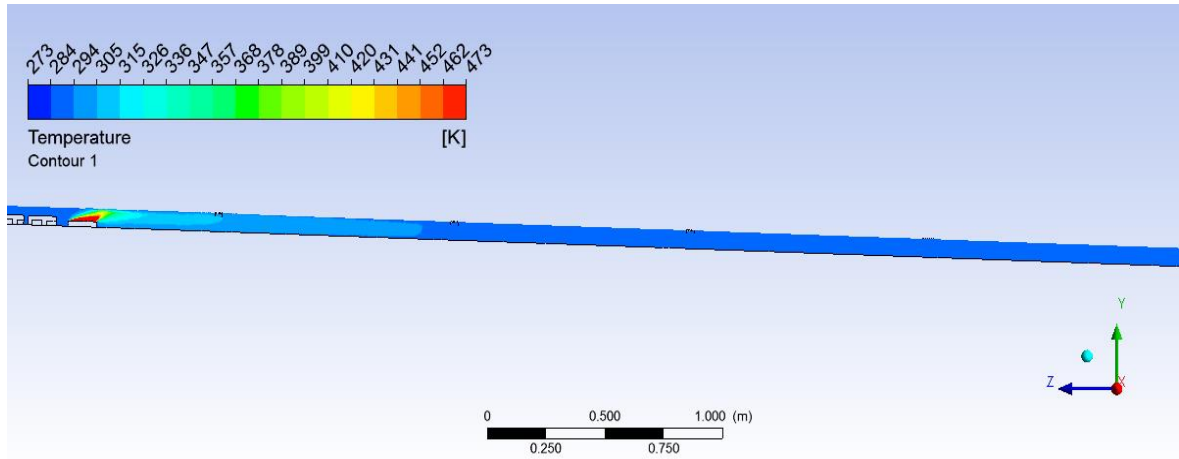
Zamana bağlı analizler, 0,20 s adım büyüklüğüyle, her seferinde 20 iterasyon yapılarak ve Ansys/FLUENT eğitim notlarında belirtildiği gibi her adımda, en az 5 yenileme olacak şekilde, zamandan bağımsız analizde kullanılan modele (Çizelge 4.7) göre, simple olarak çözdürülmüştür.

Analiz sonuçları şekillerle sunulmuştur.

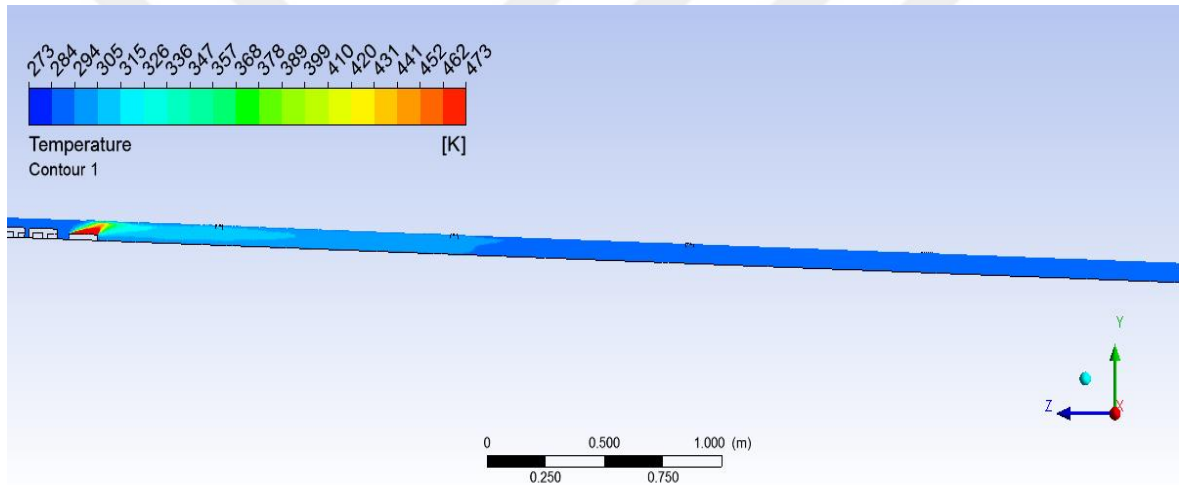
Boyuna kesitte, 293-473 K sıcaklık aralığında 500 m'lik kısımda zamana bağlı sıcaklık dağılımları



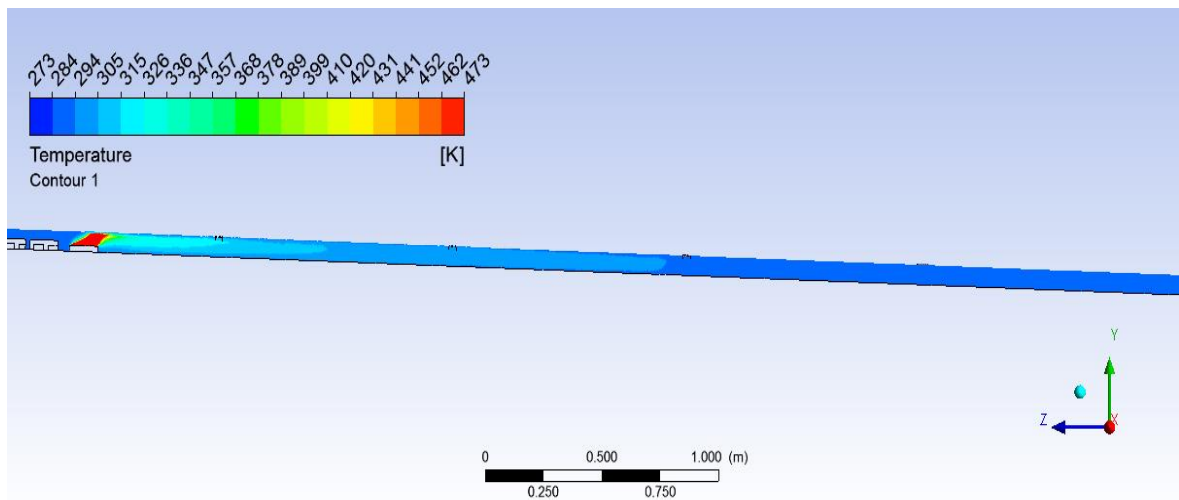
Şekil 4.21. Boyuna kesitte, 1. dakika 273K–473K aralığında sıcaklık dağılımı



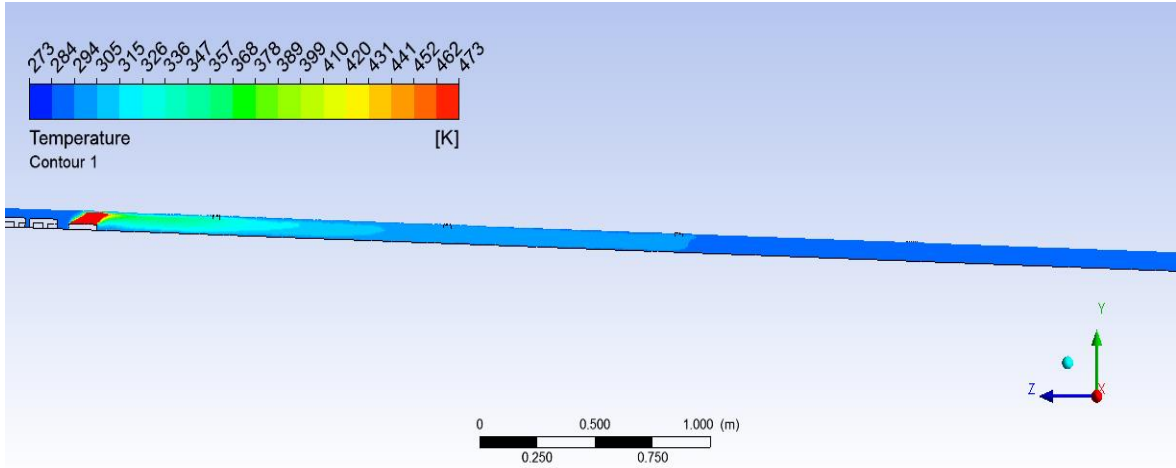
Şekil 4.22. Boyuna kesitte, 2. dakika 273K–473K sıcaklık dağılımı



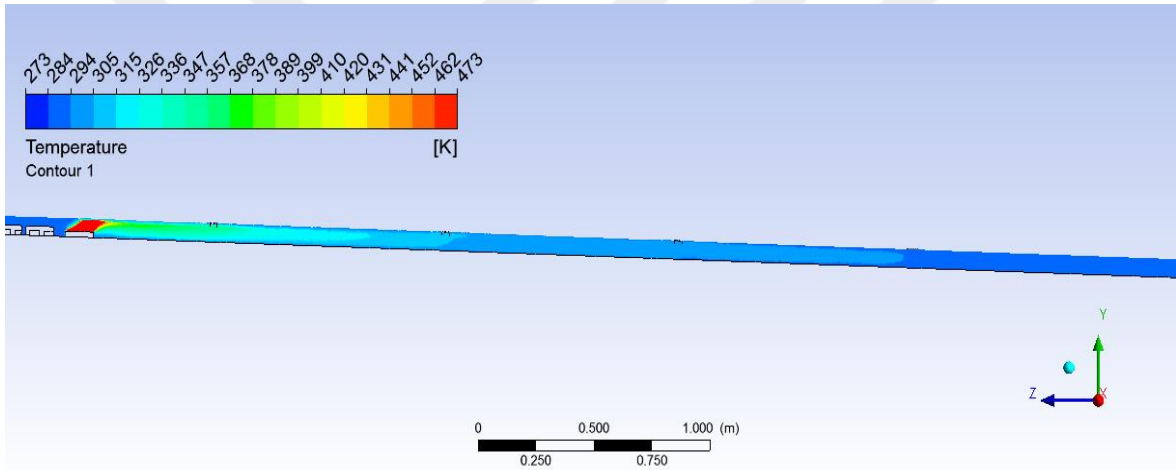
Şekil 4.23. Boyuna kesitte, 3. dakika 273K–473K sıcaklık dağılımı



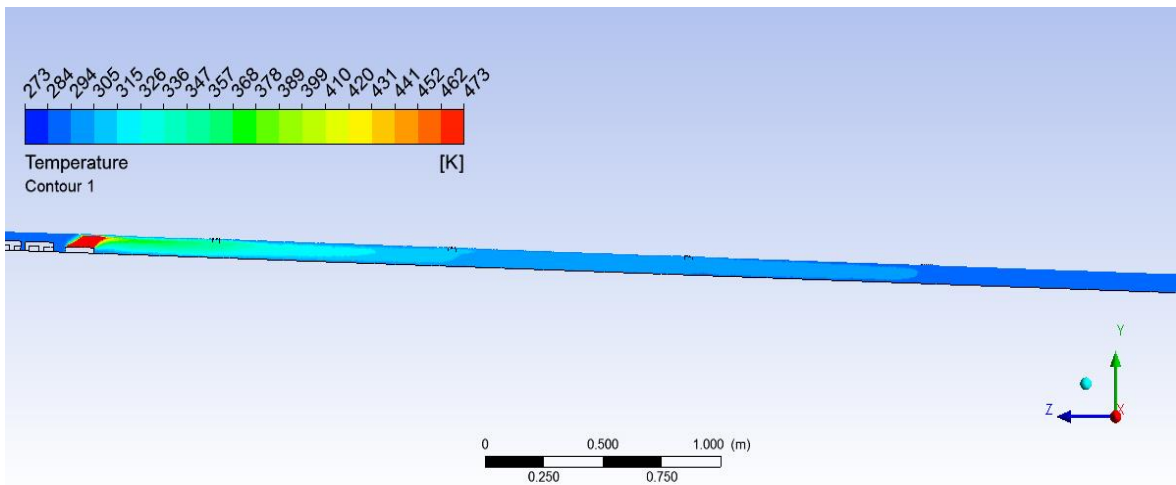
Şekil 4.24. Boyuna kesitte, 4. dakika 273K–473K sıcaklık dağılımı



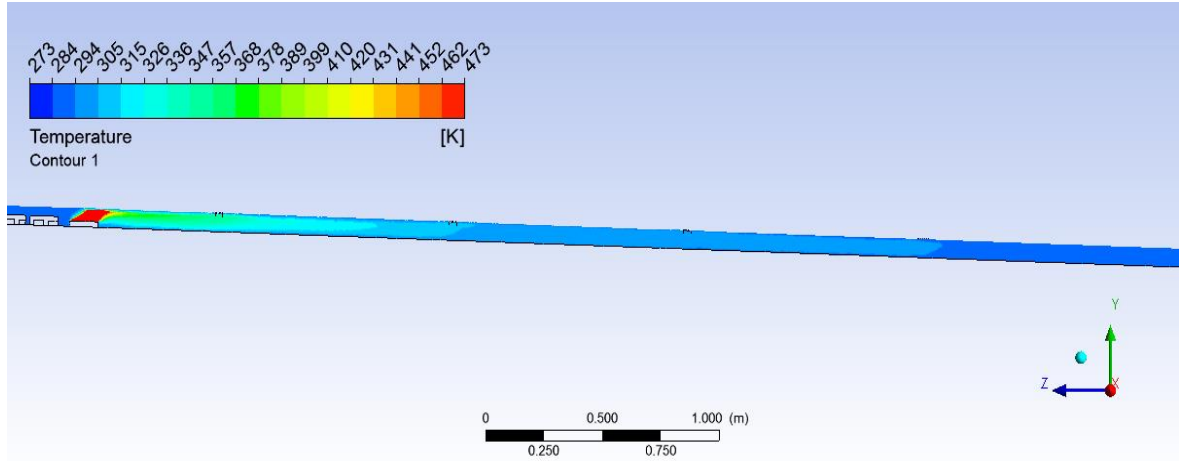
Şekil 4.25. Boyuna kesitte, 5. dakika 273K–473K sıcaklık dağılımı



Şekil 4.26. Boyuna kesitte, 10. dakika 273K–473K sıcaklık dağılımı



Şekil 4.27. Boyuna kesitte, 15. dakika 273K–473K sıcaklık dağılımı

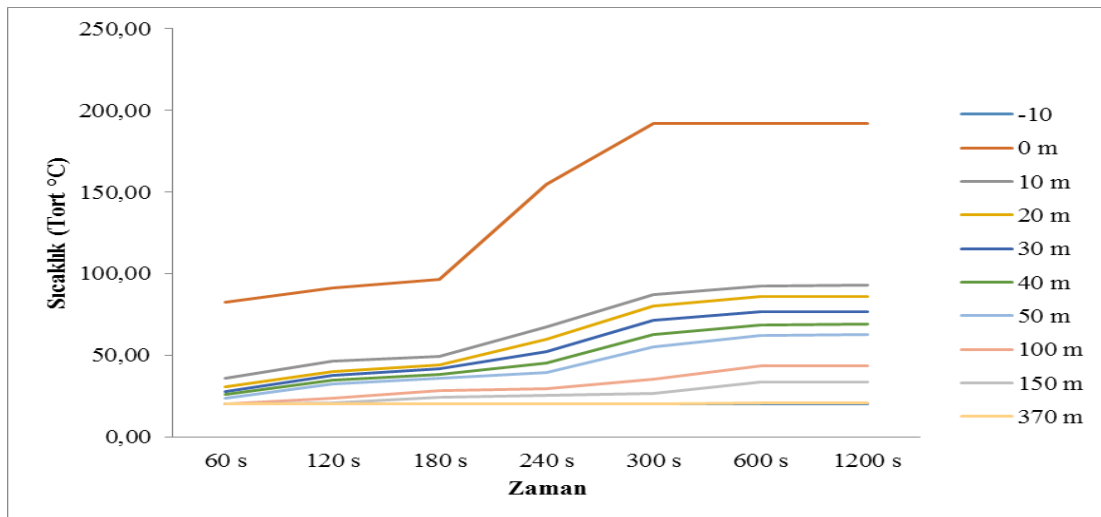


Şekil 4.28. Boyuna kesitte, 20. dakika 273K–473K sıcaklık dağılımı

Şekil 4.21’den, Şekil 4.28’e kadar 0 ile 200 °C aralığında tünel boyuna kesitindeki sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Bu aralığın seçilme nedeni, Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11’de, tünelde kullanılan yapısal malzemelerin sıcaklık dayanımlarıyla ilgili tabloları, daha küçük aralıkta bir renk skalasıyla değerlendirebilmektir.

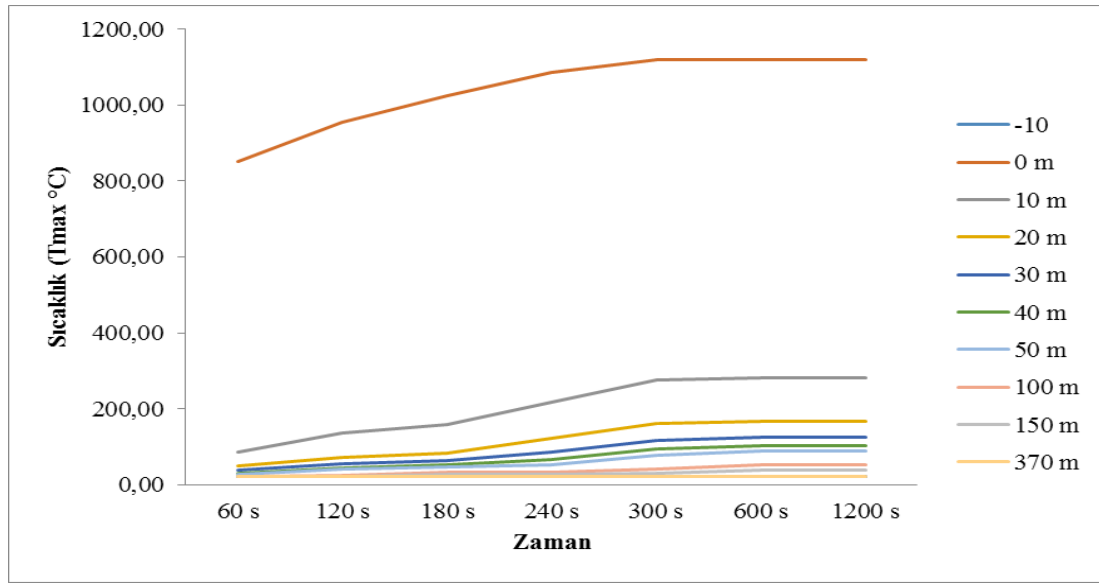
Yangının başlangıcından itibaren ilk 3 dakikada, piston hızı ve çıkan yanma ürünlerinin miktarına bağlı olarak sıcaklıklar daha düşük olmakta, 4. dakikadan itibaren, pik değerlere yanaşılmasından sonra, özellikle yangın mahalinde sıcaklıklar yüksek seyretmekte, atış şaftına kadar kademeli olarak sıcaklığın düştüğü görünmektedir. Yangının gerisinde, tünel kullanıcılarının bulunduğu bölümlerde sıcaklık artışı olmamaktadır.

Çizelge 4.17. Yangın mahaline uzaklık ve zamana göre tünel kesitindeki ortalama sıcaklık değerleri

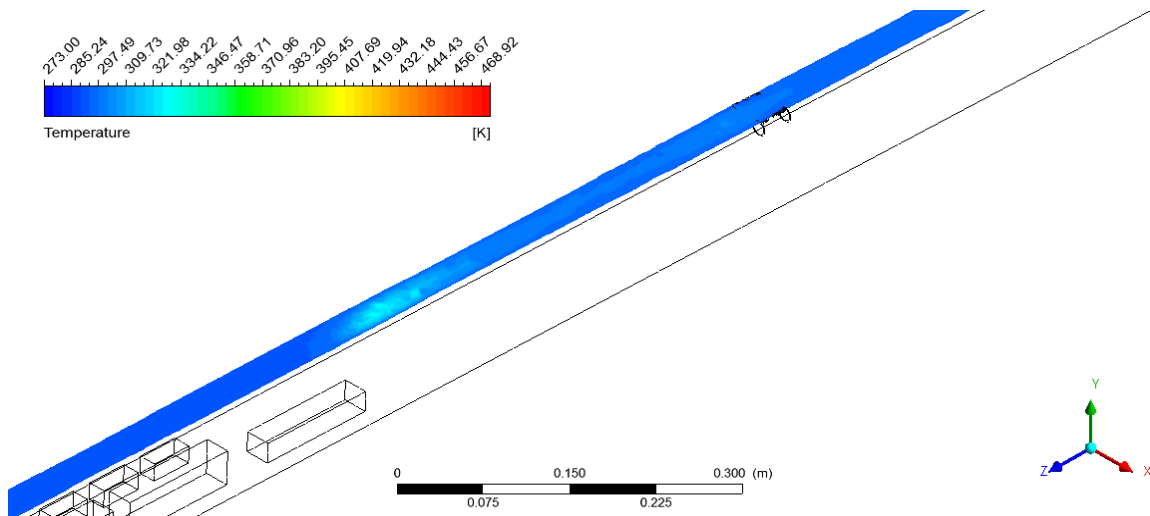


Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18’de renk skalasıyla zamana bağlı olarak tünel kesitindeki sıcaklık verileri grafiklerle gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde yangın mahalinde ilk 50 m’lik kısımda ortalama sıcaklık değerlerinin 50 °C’nin üzerinde seyrettiği, özellikle yangın mahalinde üst seviye sıcaklıklarının 1000 °C’nin üzerinde olduğu görülmektedir. Bunun da Bölüm 4.3’te açıklanan yapısal bozulmalara yol açabileceği öngörülebilir.

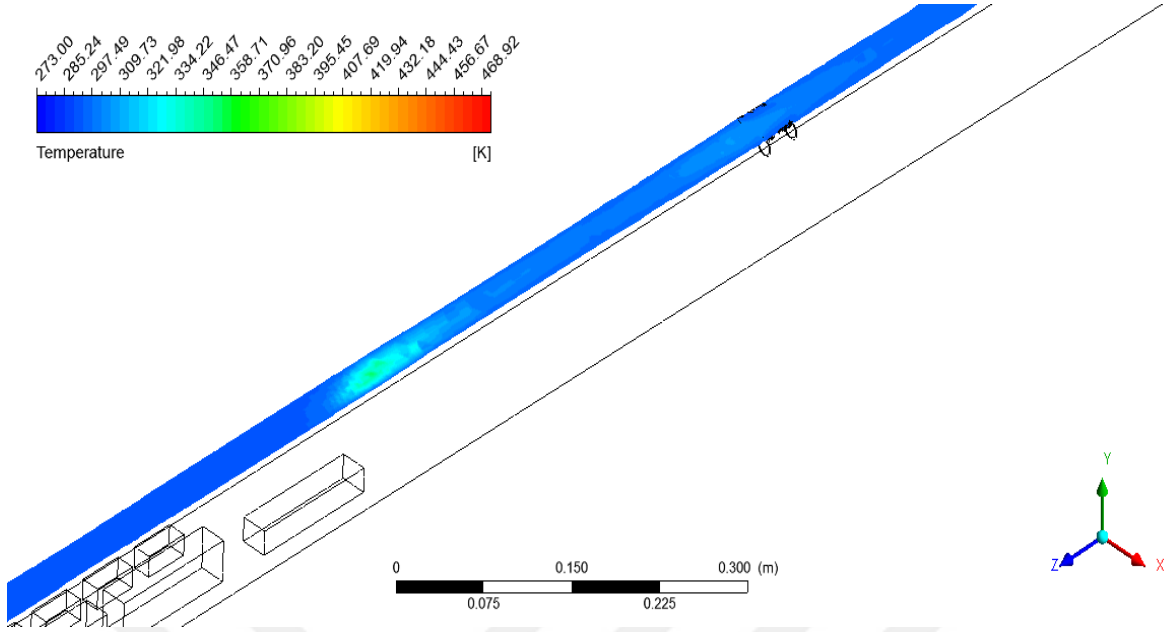
Çizelge 4.18. Yangın mahaline uzaklık ve zamana göre tünel kesitindeki en yüksek sıcaklık değerleri



Boyuna kesitte, zeminden 6,5 m yükseklikte tavana yakın bölgede, 273-473 K sıcaklık aralığında 100 m’lik kısımda zamana bağlı sıcaklık dağılımları

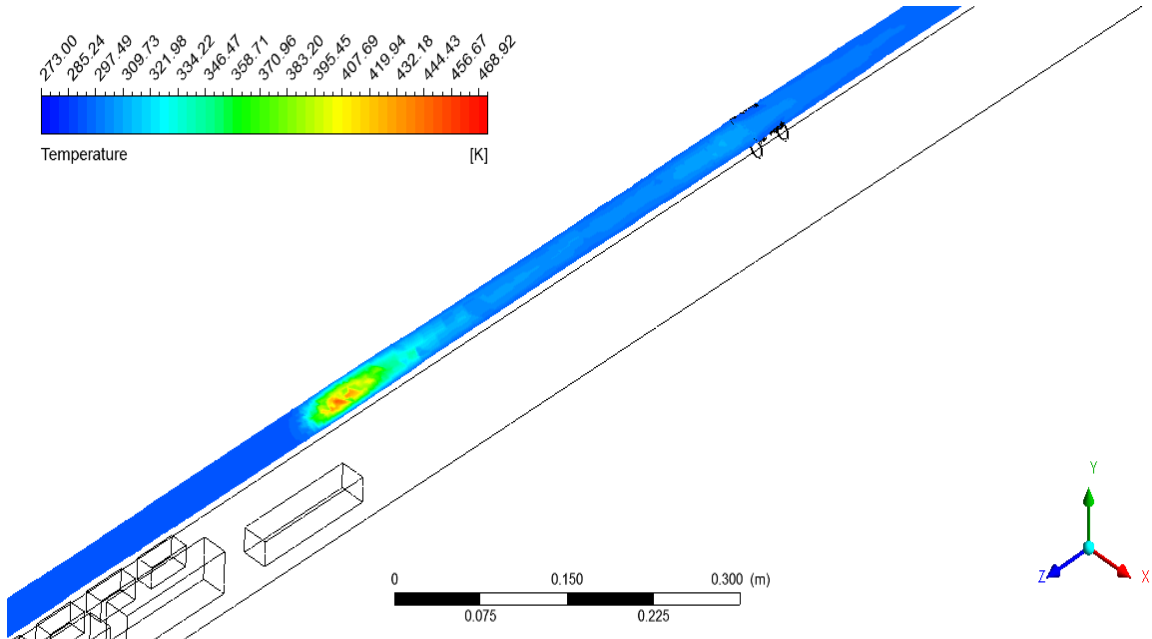


Şekil 4.29. Zeminden 6,5 m yükseklikte, 100 m’lik kısımda, 2. dakika 273K–473K tavan bölgesi sıcaklık dağılımı

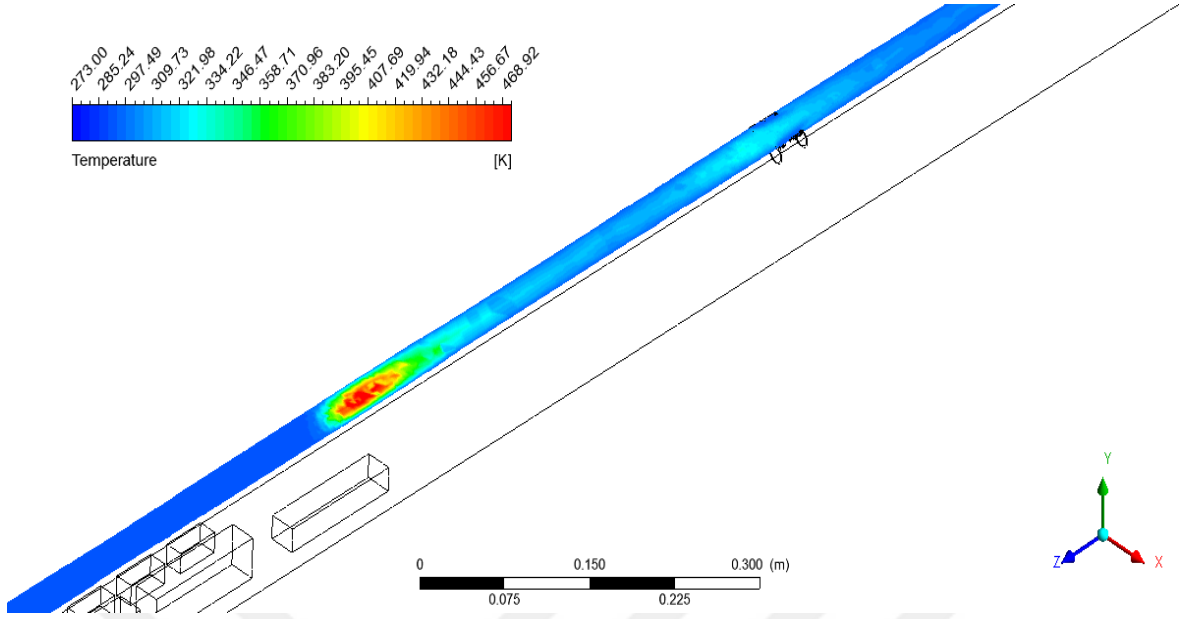


Şekil 4.30. Zeminden 6,5 m yükseklikte, 100 m’lik kısımda, 4. dakika 273K–473K tavan bölgesi sıcaklık dağılımı

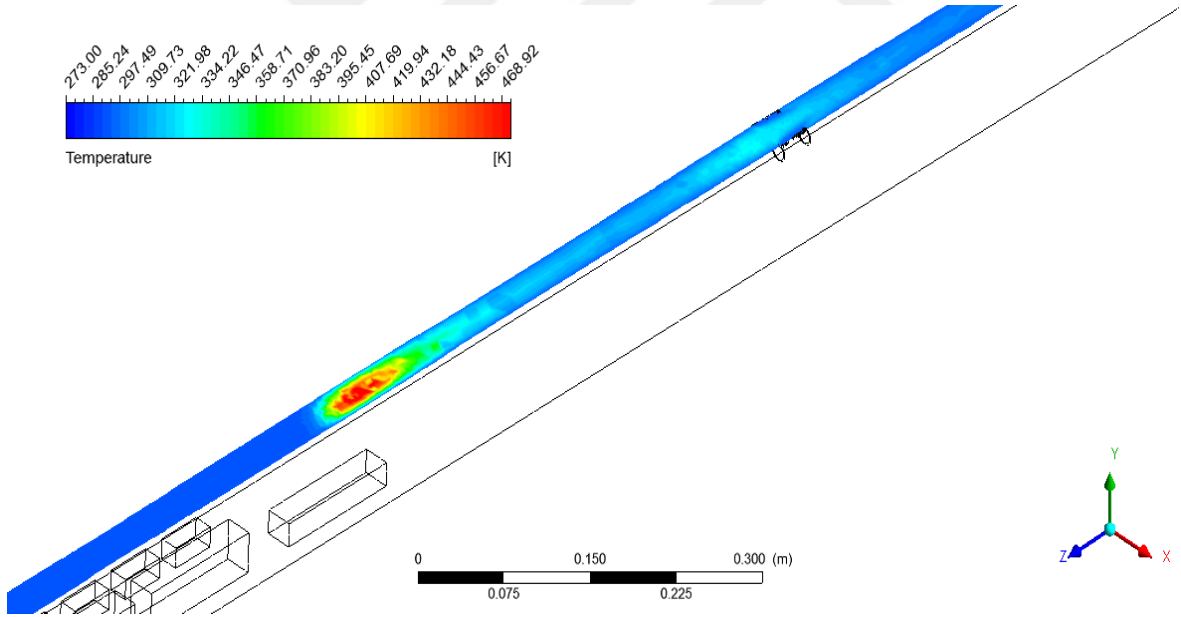
Şekil 4.29’dan, Şekil 4.33’e kadar, zamana bağlı, oluşacak tavan sıcaklıklarını saptamak amacıyla, zeminden 6,5 m yükseklikte, 0 ile 200 °C aralığında tünel boyuna kesitindeki sıcaklık dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 4.31. Zeminden 6,5 m yükseklikte, 100 m’lik kısımda, 5. dakika 273K–473K tavan bölgesi sıcaklık dağılımı



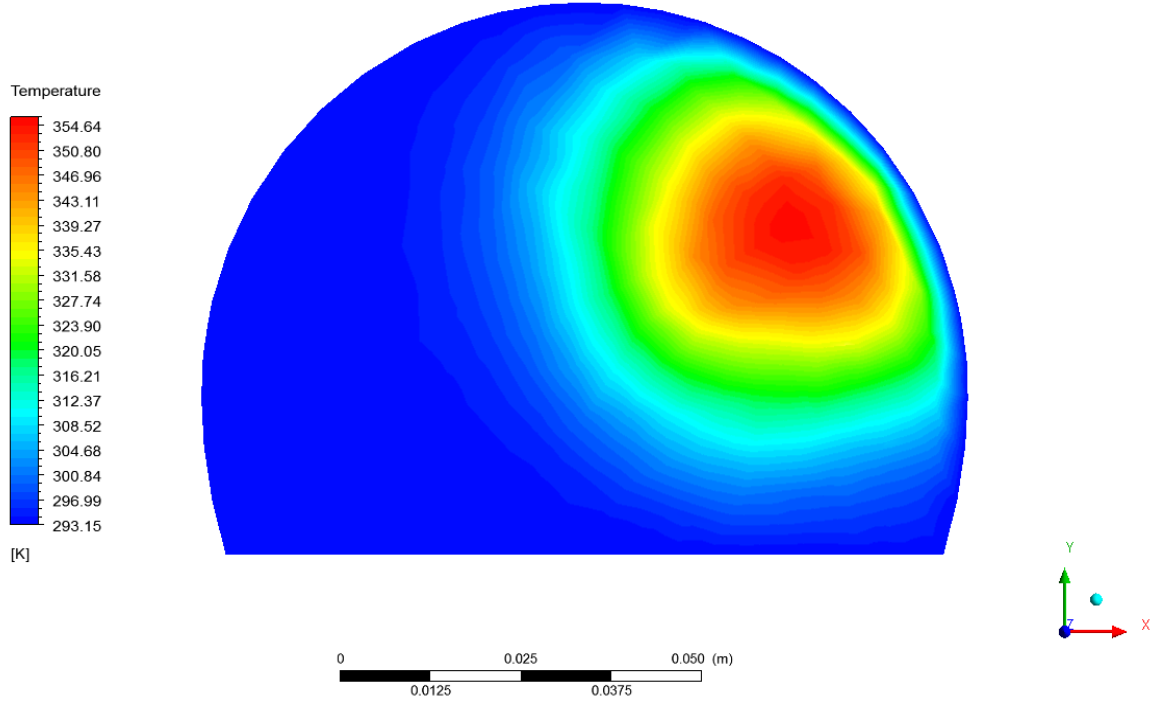
Şekil 4.32. Zeminden 6,5 m yükseklikte, 100 m’lik kısımda, 10. dakika 273K–473K tavan bölgesi sıcaklık dağılımı



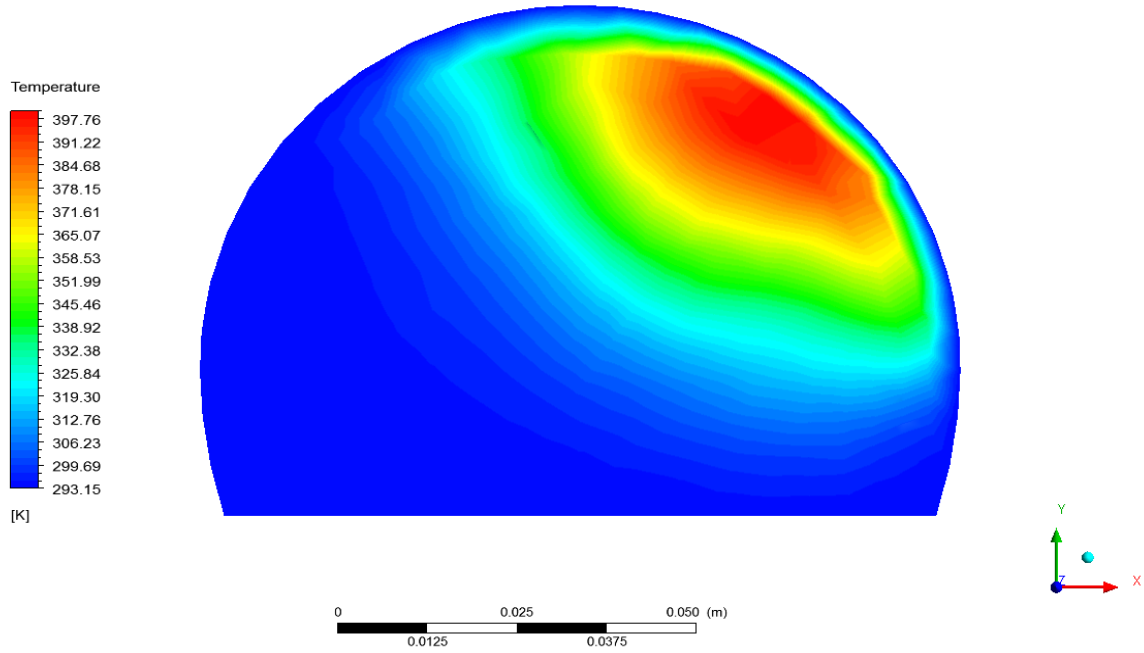
Şekil 4.33. Zeminden 6,5 m yükseklikte, 100 m’lik kısımda, 20. dakika 273K–473K tavan bölgesi sıcaklık dağılımı

Yangın bölgesinde, ilk 4 dakikaya kadar tavan sıcaklıkları 100 °C’yi geçmezken, 5. dakikadan itibaren artmaya başlamış, 20. dakikaya gelindiğinde, trafik yönünde 30 m’lik kısımda 100 °C ‘nin üzerinde, yangın mahalinde ise 200 °C’nin oldukça üzerinde tavan sıcaklıkları görülmüştür.

XY ekseninde, yangın bölgesinden 10 m ileride zamana bağlı lokal sıcaklık dağılımı

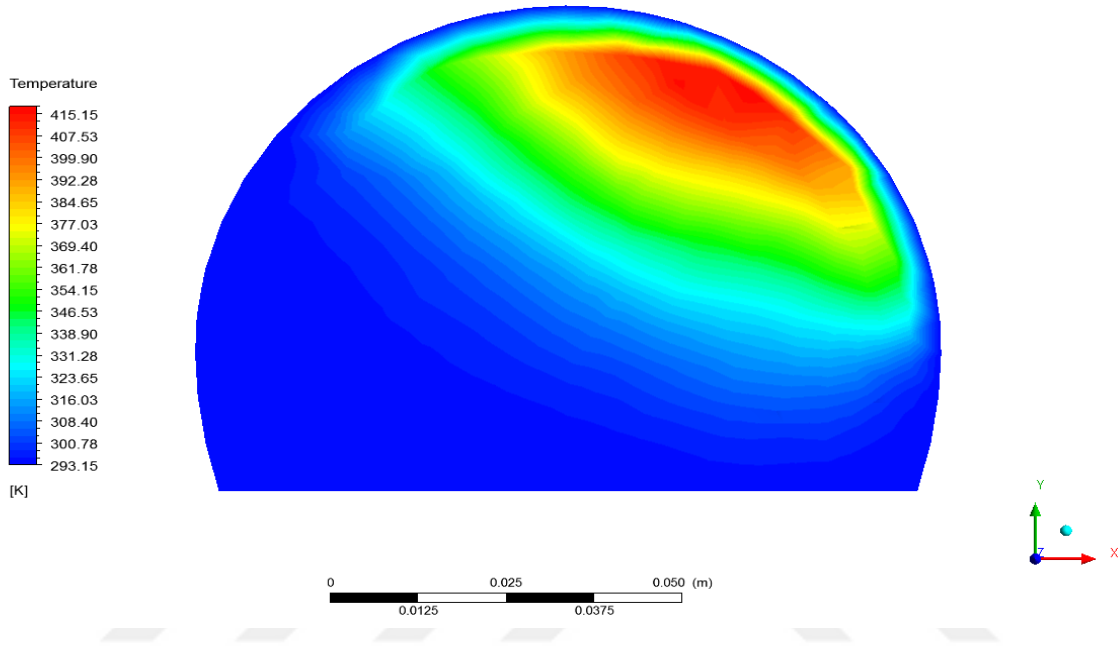


Şekil 4.34. XY ekseninde, yangın bölgesinden 10 m ileride 1. dakika sıcaklık dağılımı

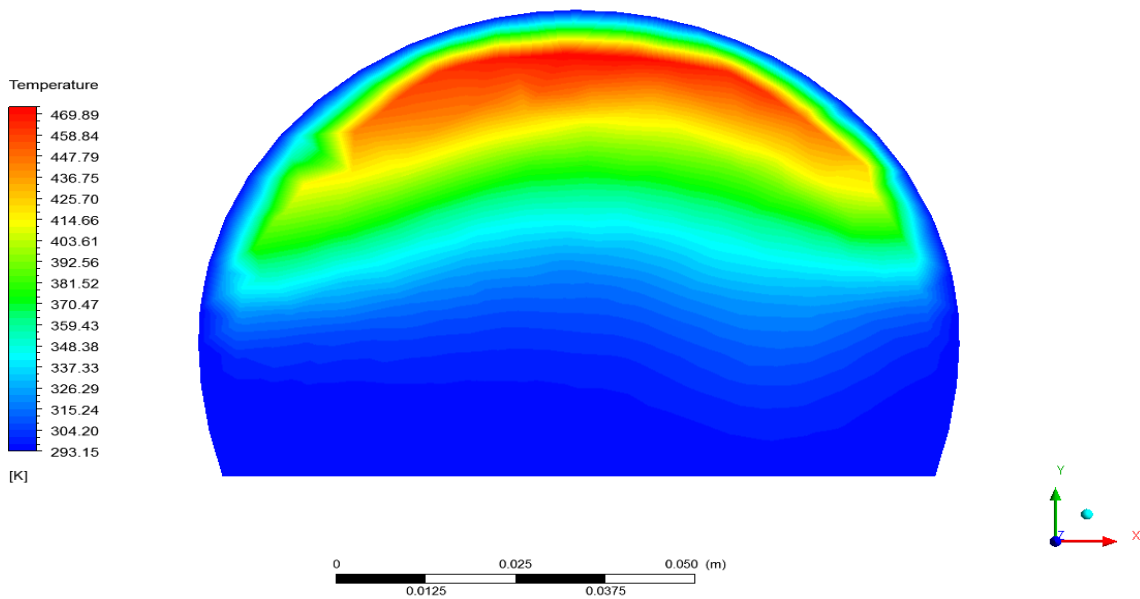


Şekil 4.35. XY ekseninde, yangın bölgesinden 10 m ileride 2. dakika sıcaklık dağılımı

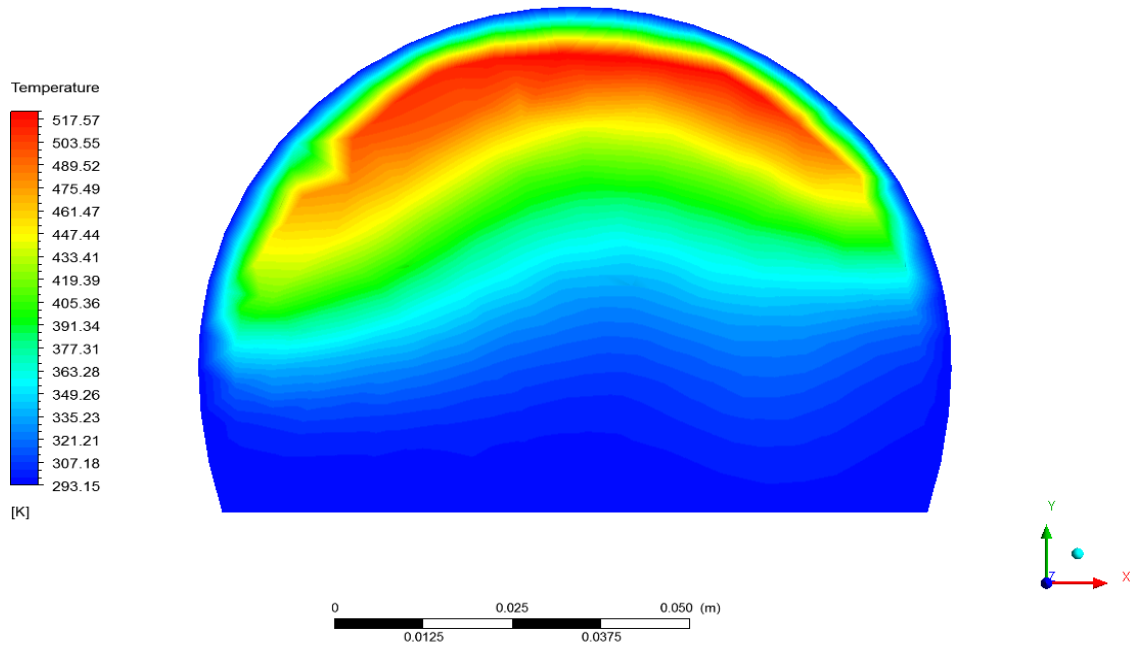
Şekil 4.34'den, Şekil 4.41'e kadar, yangın mahalinden 10 m uzaklıkta, tünel kesitinde zamana bağlı, sıcaklık dağılımları lokal olarak gösterilmiştir. 10. m'nin seçilme nedeni en üst sıcaklık değerlerinin, bu bölümde, yangın mahaline göre nispeten daha uniform dağılmasıdır.



Şekil 4.36. XY ekseninde, yangın bölgesinden 10 m ileride 3. dakika sıcaklık dağılımı

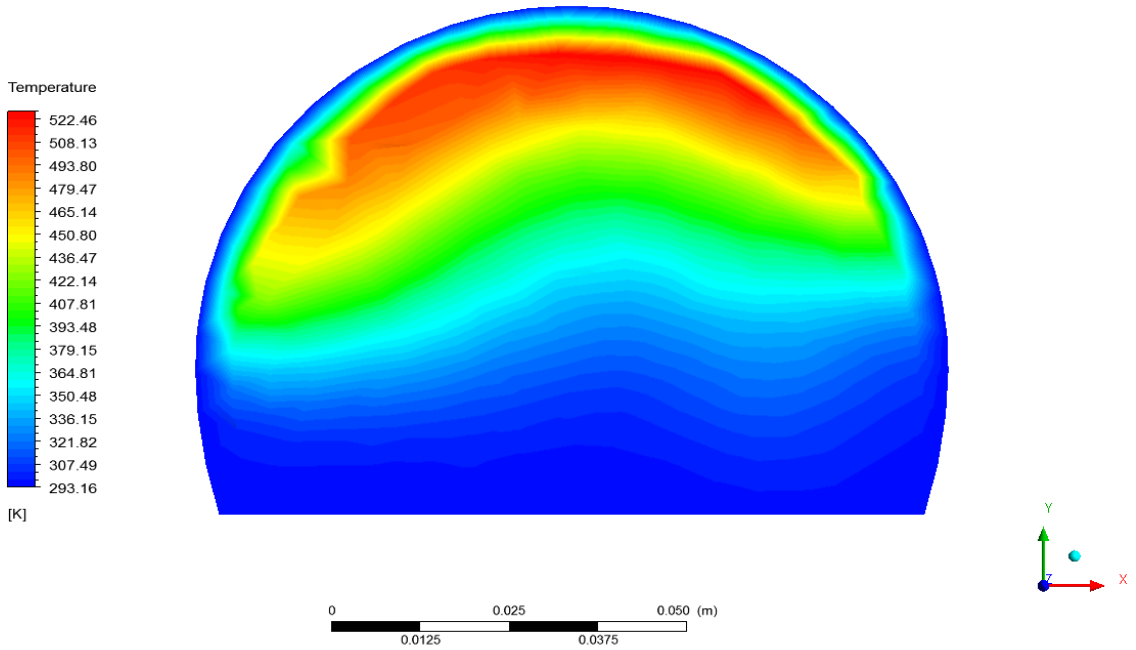


Şekil 4.37. XY ekseninde, yangın bölgesinden 10 m ileride 4. dakika sıcaklık dağılımı

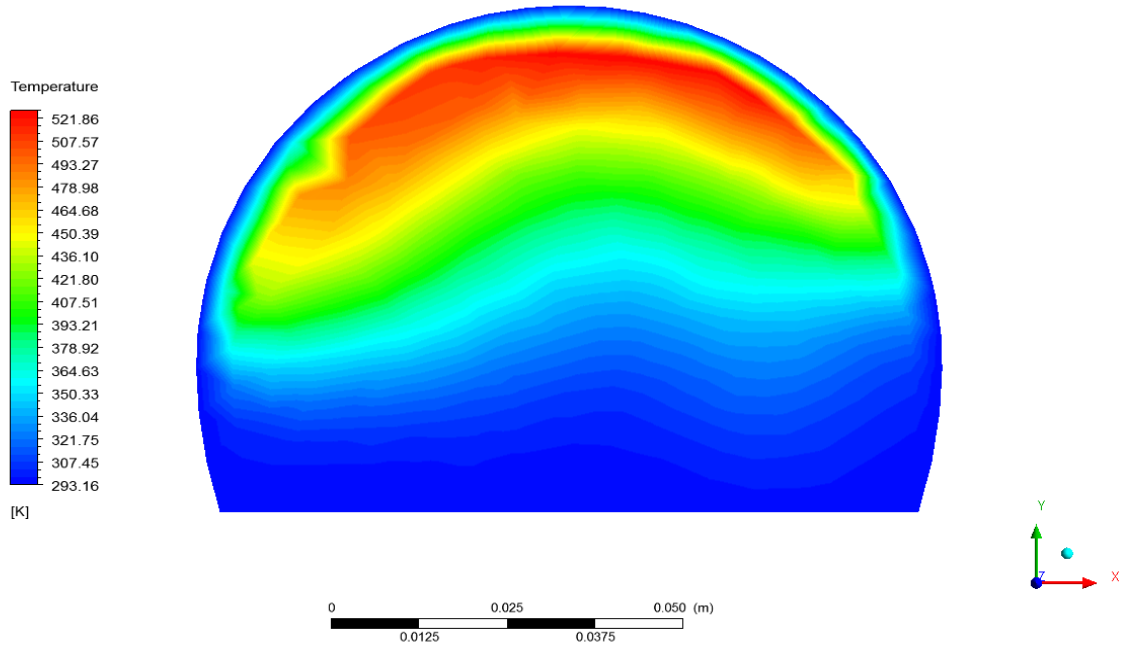


Şekil 4.38. XY ekseninde, yangın bölgesinden 10 m ileride 5. dakika sıcaklık dağılımı

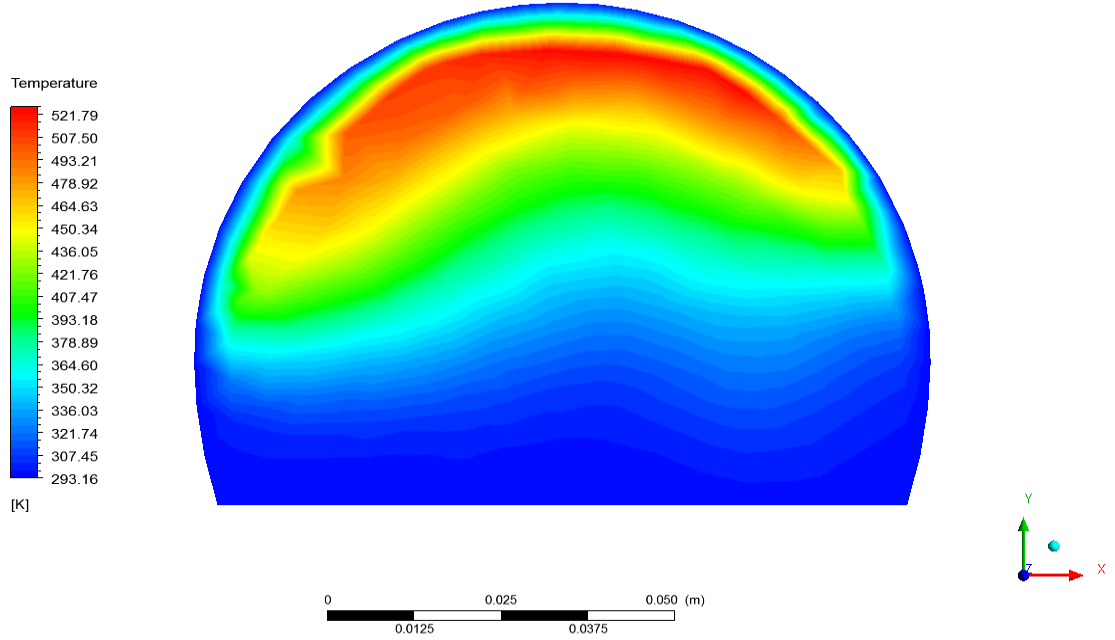
Yanan aracın trafik yönünde sağ şeritte bulunmasından dolayı, havalandırma tam anlamıyla devreye girene kadar en yüksek sıcaklıklar tavanın sağ kısmında olmaktadır.



Şekil 4.39. XY ekseninde, yangın bölgesinden 10 m ileride 10. dakika sıcaklık dağılımı



Şekil 4.40. XY ekseninde, yangın bölgesinden 10 m ileride 15. dakika sıcaklık dağılımı



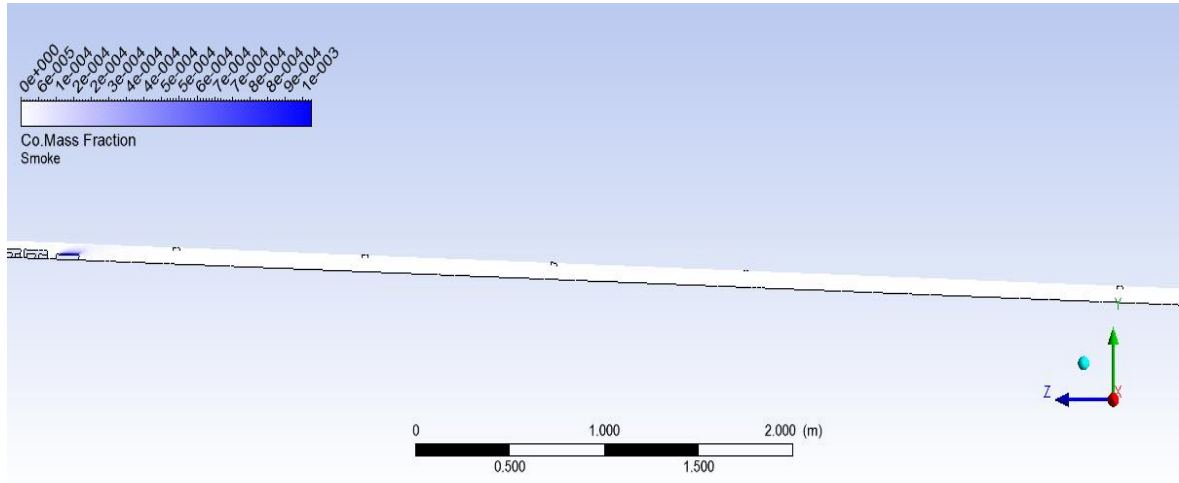
Şekil 4.41. XY ekseninde, yangın bölgesinden 10 m ileride 20. dakika sıcaklık dağılımı

En yüksek sıcaklıklar, havalandırma ve ısınan havanın yükselmesi nedeniyle tavan bölgesine yakın kısımlarda olmakta, 5. Dakikadan itibaren 200°C ‘nin üzerinde değerler ölçülmektedir. Zemine yakın kısımlarda 50 ile 100 °C ‘nin arasında değişmektedir.

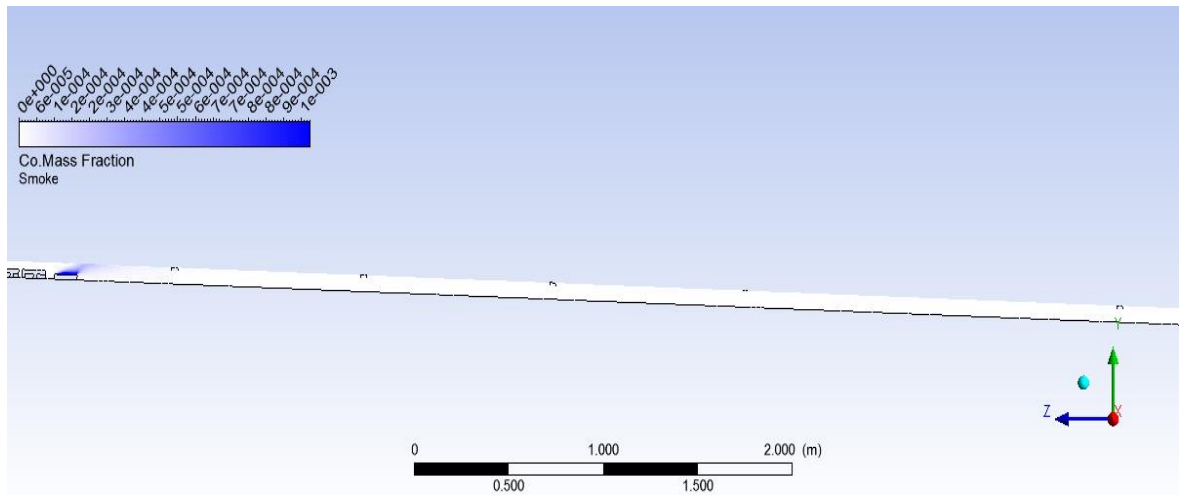
Boyuna kesitte, 0-1000 ppm aralığında 500 m'lik kısımda zamana bağlı CO dağılımları

İlk dakikalarda, piston etkisine bağlı olarak yangın sonucu oluşan CO değerleri trafik yönünde dağılmaktadır. Yangın mahalinde CO değerleri ilk dakikalarda 1000 ppm seviyelerindedir.

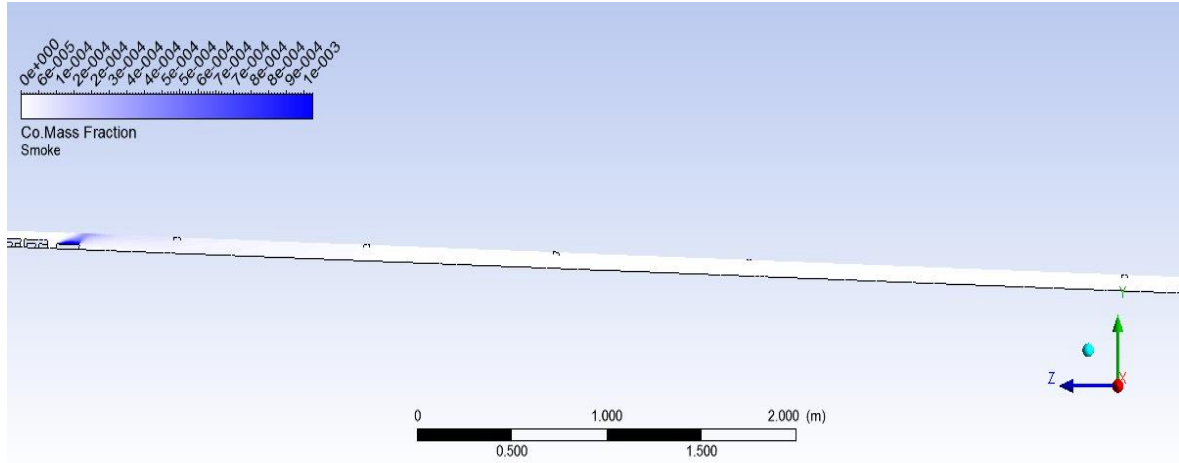
Tünel kullanıcılarının tahliye yönünde (trafik yönünün tersi) CO seviyeleri, piston etkisi nedeniyle oldukça düşüktür. Bu da kullanıcıların tahliyesinde CO zehirlenmesi riskinin olmadığını göstermektedir.



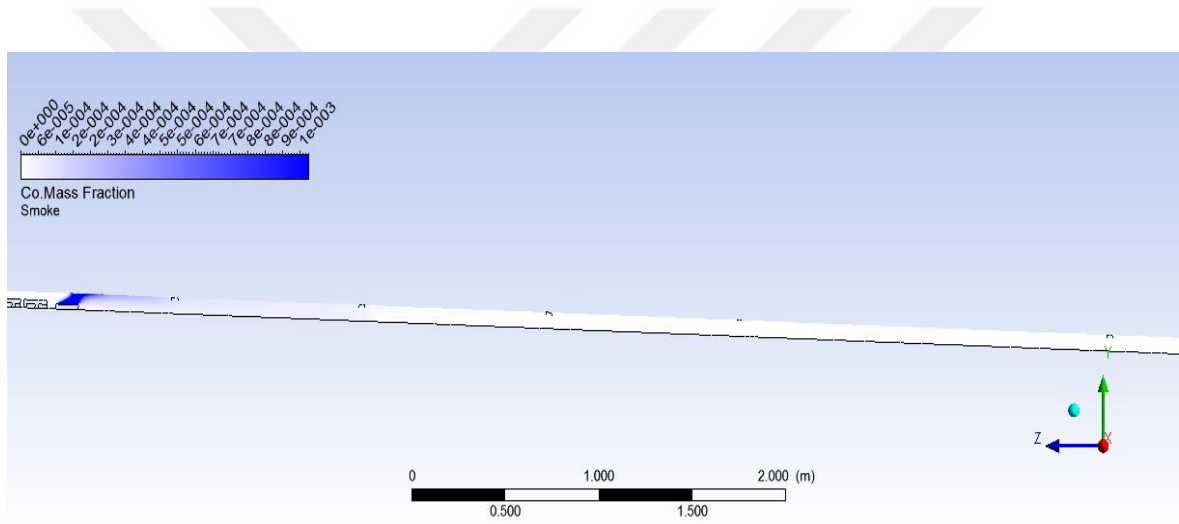
Şekil 4.42. Boyuna kesitte, 1. dakika 0-1000 ppm aralığında CO dağılımı



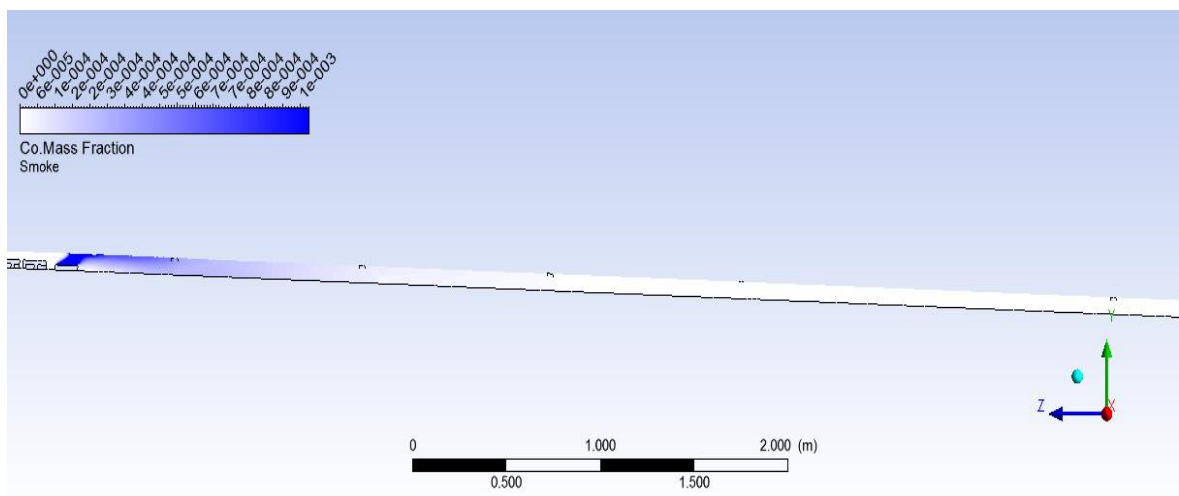
Şekil 4.43. Boyuna kesitte, 2. dakika 0-1000 ppm aralığında CO dağılımı



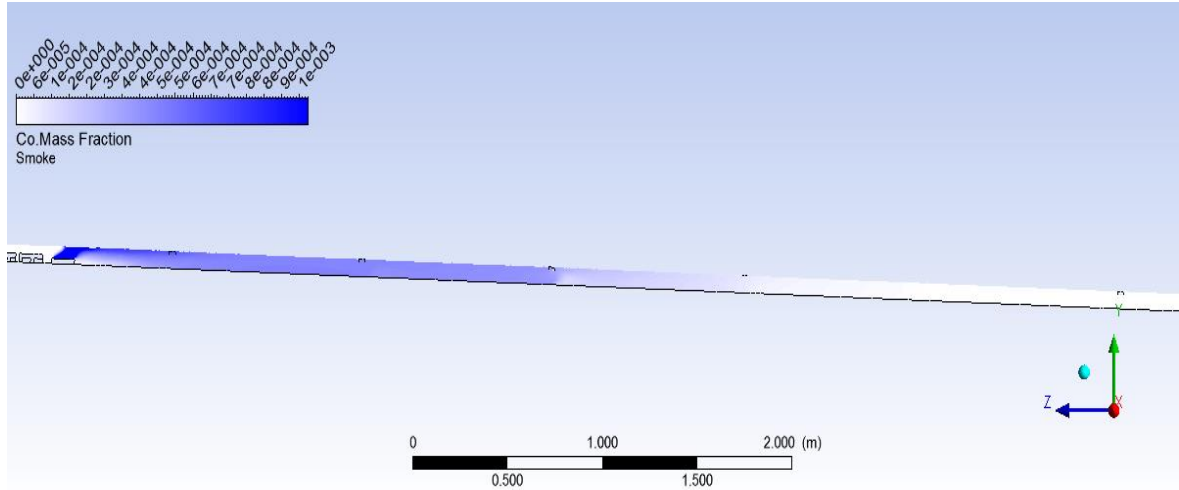
Şekil 4.44. Boyuna kesitte, 3. dakika 0-1000 ppm aralığında CO dağılımı



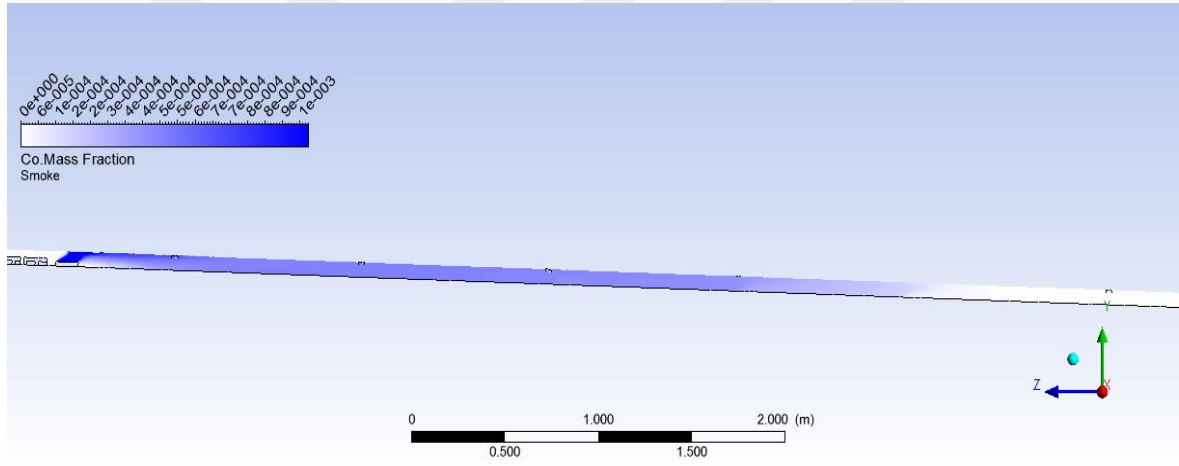
Şekil 4.45. Boyuna kesitte, 4. dakika 0-1000 ppm aralığında CO dağılımı



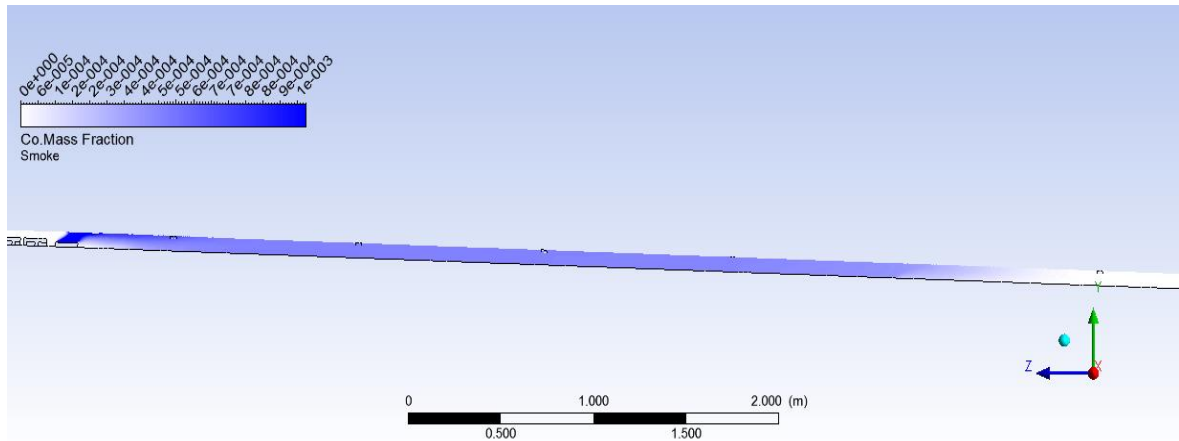
Şekil 4.46. Boyuna kesitte, 5. dakika 0-1000 ppm aralığında CO dağılımı



Şekil 4.47. Boyuna kesitte, 10. dakika 0-1000 ppm aralığında CO dağılımı



Şekil 4.48. Boyuna kesitte, 15. dakika 0-1000 ppm aralığında CO dağılımı

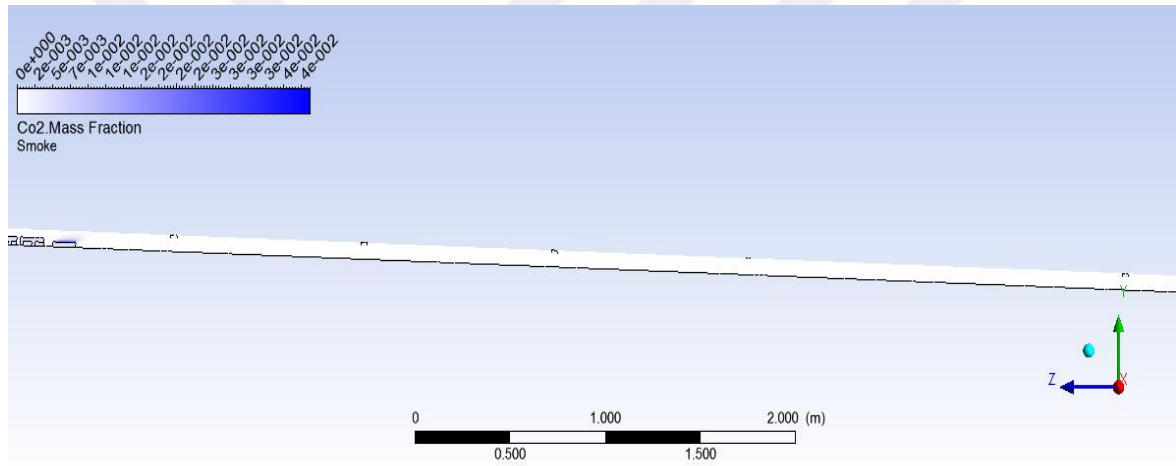


Şekil 4.49. Boyuna kesitte, 20. dakika 0-1000 ppm aralığında CO dağılımı

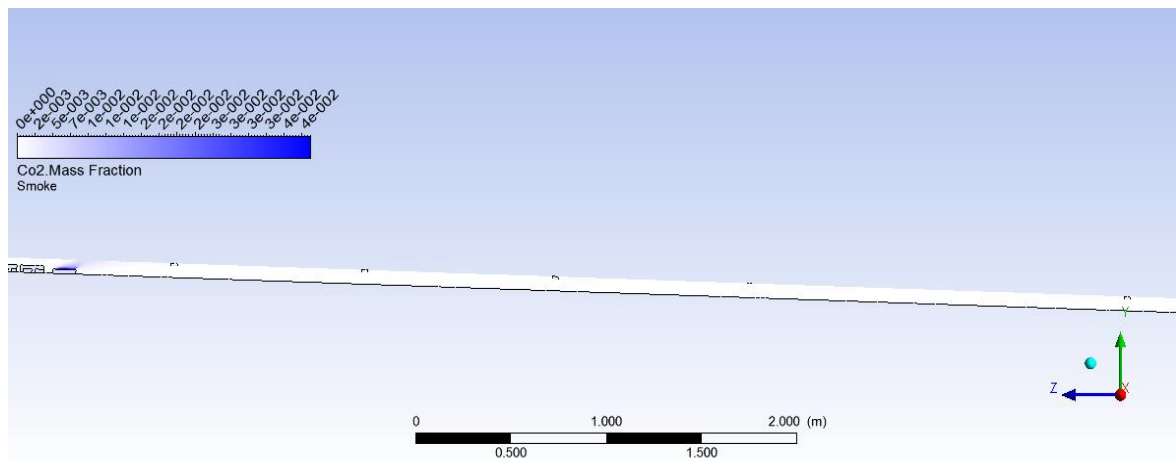
Yangının tünel çıkışına yakın bölgede çıkmasından dolayı, itfaiye ekipleri hızlı müdahale etmek amacıyla yangın çıkan tüpe ters istikametten giriş yaparsa, yangının çıktığı bölümle, dumanın tahliye yaptığı alan arasında kalan bölgede yüksek CO emisyonuna maruz kalabilirler. Bu sebeple oksijen maskesi vb. koruyucu güvenlik önlemlerini almaları gerekmektedir.

Boyuna kesitte, 0-1000 ppm aralığında 500 m'lik kısımda zamana bağlı CO₂ dağılımları

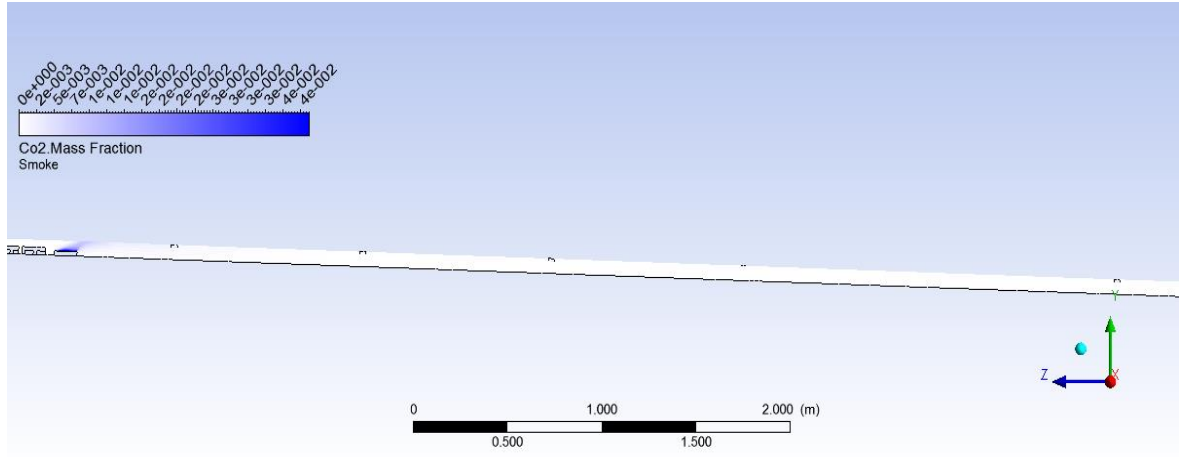
İlk dakikalarda, piston etkisine bağlı olarak yangın sonucu oluşan CO₂ değerleri trafik yönünde dağılmaktadır. Yangın mahalinde CO₂ değerleri ilk dakikalarda düşük seviyededir.



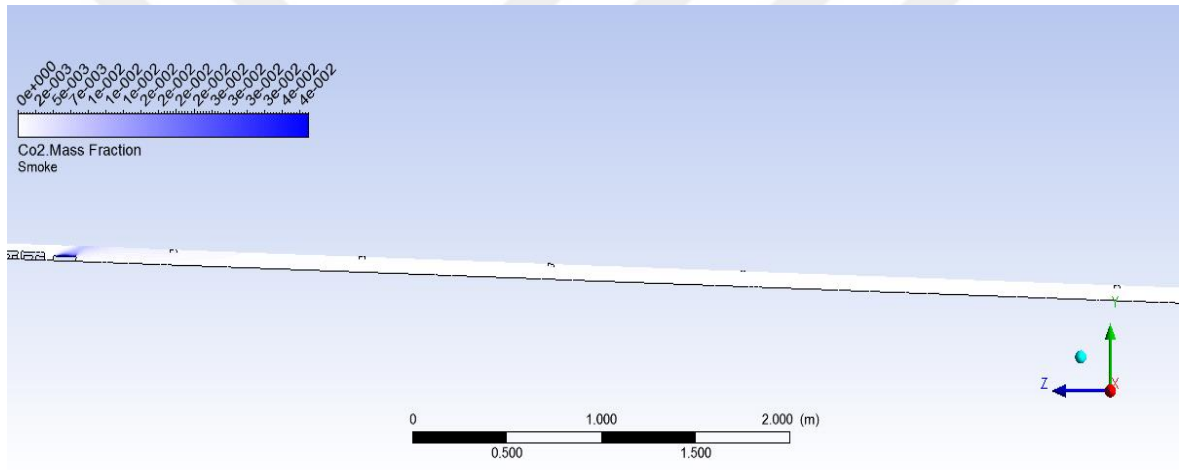
Şekil 4.50. Boyuna kesitte, 1. dakika 0-40000 ppm aralığında CO₂ dağılımı



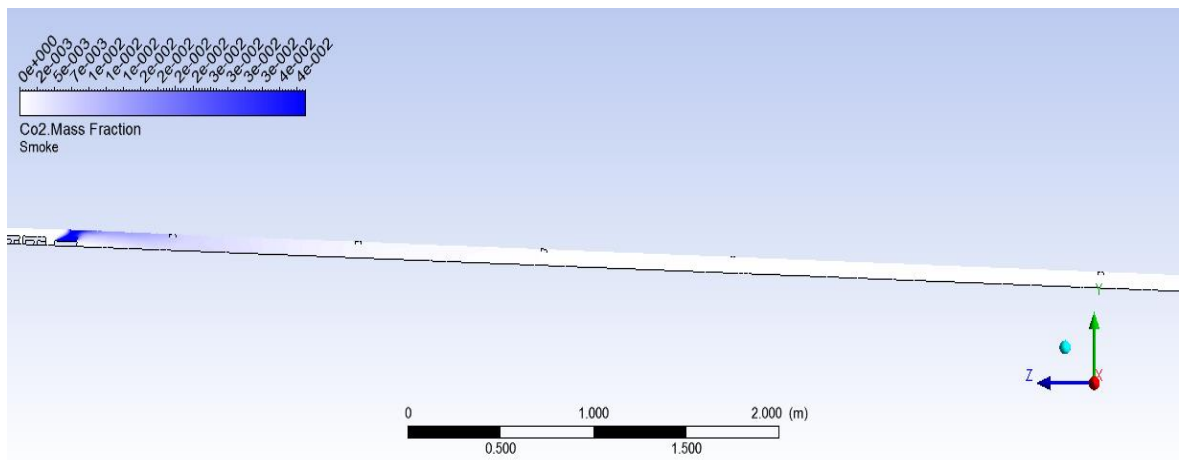
Şekil 4.51. Boyuna kesitte, 2. dakika 0-40000 ppm aralığında CO₂ dağılımı



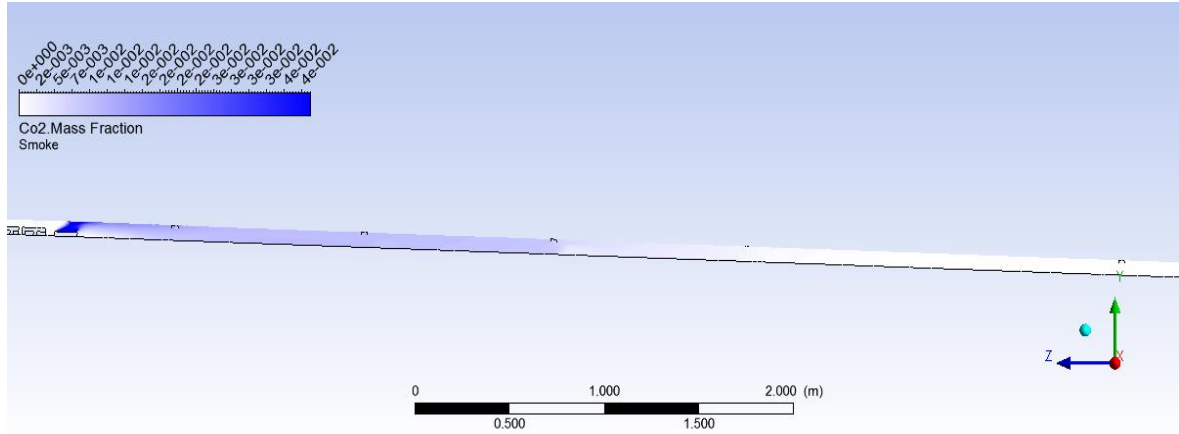
Şekil 4.52. Boyuna kesitte, 3. dakika 0-40000 ppm aralığında CO₂ dağılımı



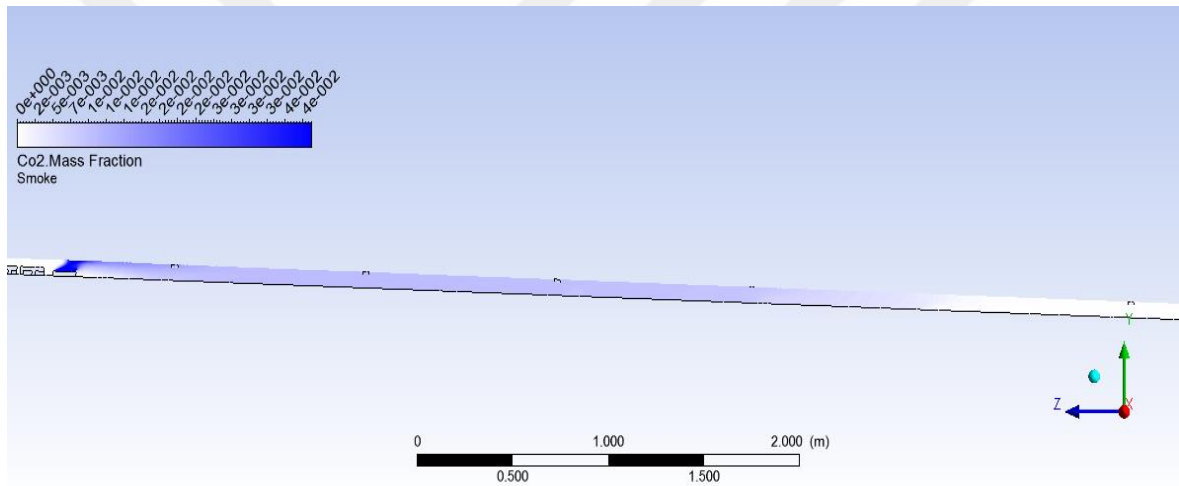
Şekil 4.53. Boyuna kesitte, 4. dakika 0-40000 ppm aralığında CO₂ dağılımı



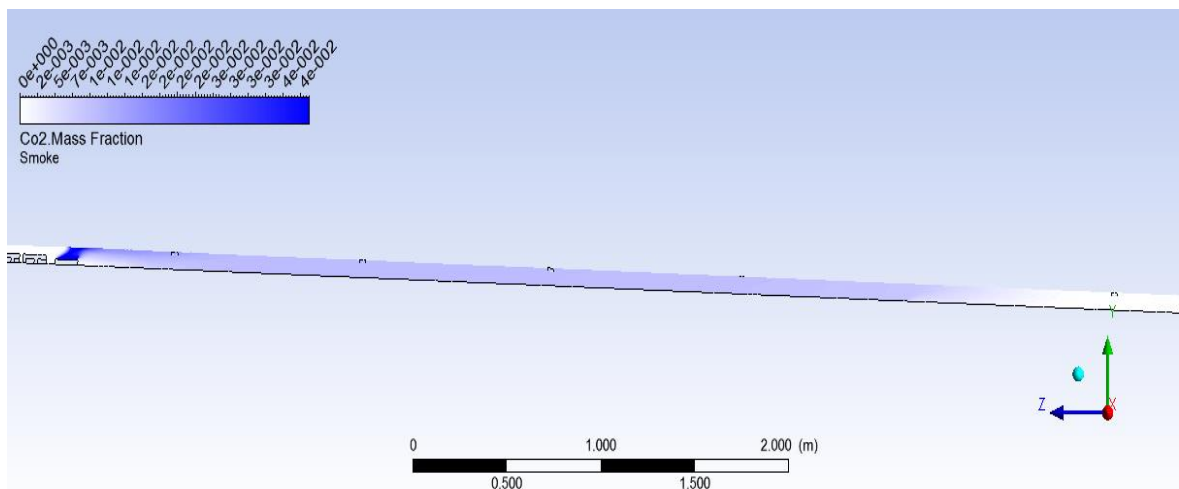
Şekil 4.54. Boyuna kesitte, 5. dakika 0-40000 ppm aralığında CO₂ dağılımı



Şekil 4.55. Boyuna kesitte, 10. dakika 0-40000 ppm aralığında CO₂ dağılımı



Şekil 4.56. Boyuna kesitte, 15. dakika 0-40000 ppm aralığında CO₂ dağılımı



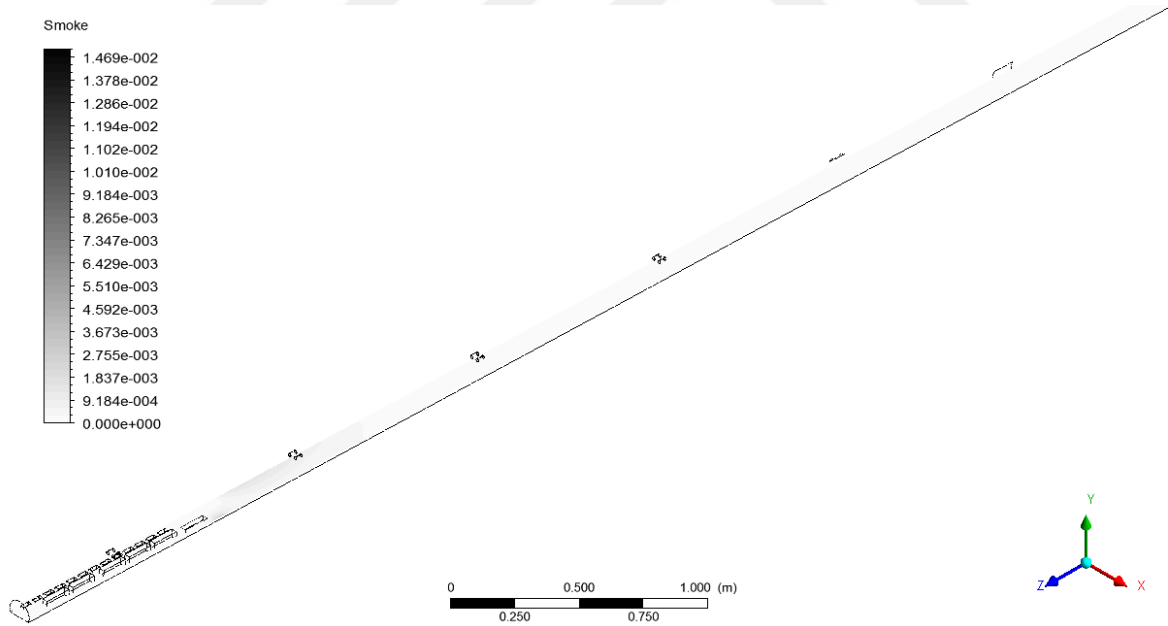
Şekil 4.57. Boyuna kesitte, 20. dakika 0-40000 ppm aralığında CO₂ dağılımı

Şekil 4.42’den, Şekil 4.49’a kadar 0 ile 1000 ppm aralığında tünel boyuna kesitindeki kirli hava atış şaftına kadar olan bölümün, zamana bağlı CO dağılımları; Şekil 4.50’den Şekil 4.57’ye kadar ise aynı bölgede, 0-40000 ppm aralığında zamana bağlı CO₂ dağılımları gösterilmiştir. Bu aralığın seçilme nedeni Çizelge 4.13’deki CO ve CO₂ için verilen sınır değerlerini, daha küçük aralıkta bir renk skalasıyla değerlendirebilmektir.

Yangının gerisinde, tünel kullanıcılarının bulunduğu bölümlerde, CO ve CO₂ değerlerinde artış görünmemektedir. Trafik yönünde ise 5. dakikadan itibaren, özellikle soğuyan karışımın, zemin bölgesine çökmesiyle beraber, duman ve yanma ürünlerinde artış olmaktadır. Atış şaftının ileri bölgesinde yanma ürünleri oldukça düşük seviyelerdedir.

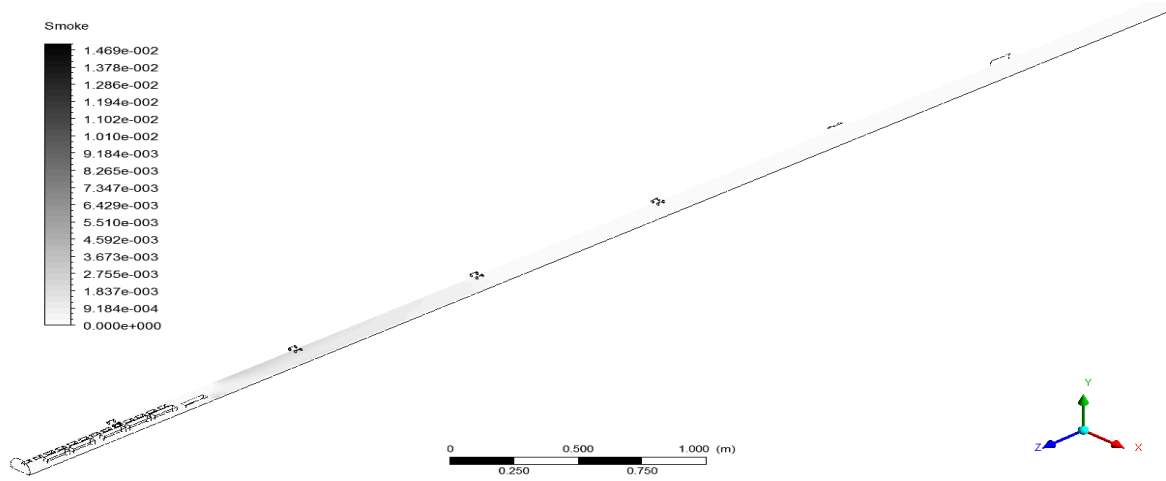
Boyuna kesitte, zeminden 1,7 m yükseklikte, 600 m’lik kısımda zamana bağlı duman dağılımı

Şekil 4.58’den, Şekil 4.64’e kadar, zeminden 1,7 m yükseklikte, 600 m’lik boyuna tünel kesitinde zamana bağlı duman dağılımı gösterilmiştir.

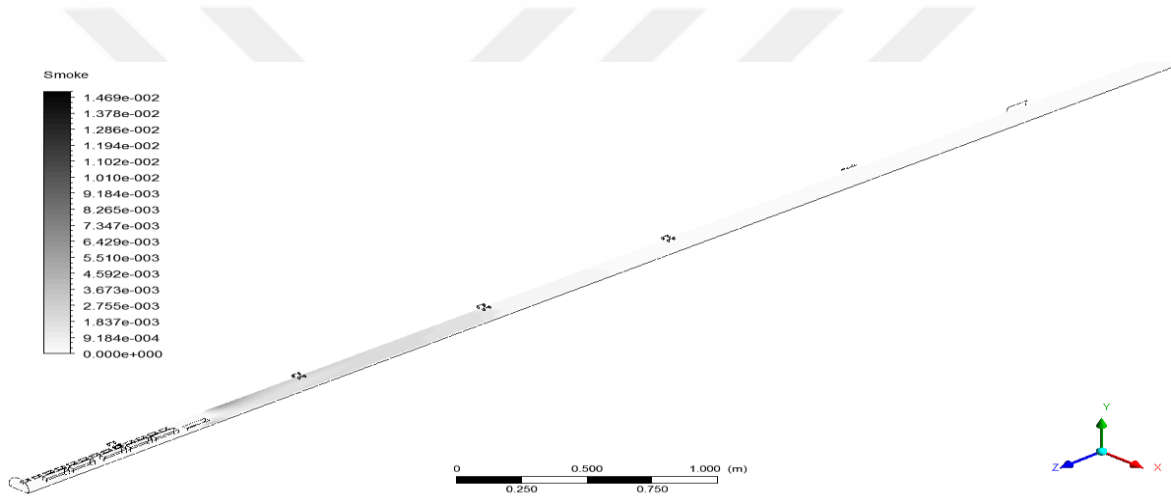


Şekil 4.58. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 2. dakika duman dağılımı

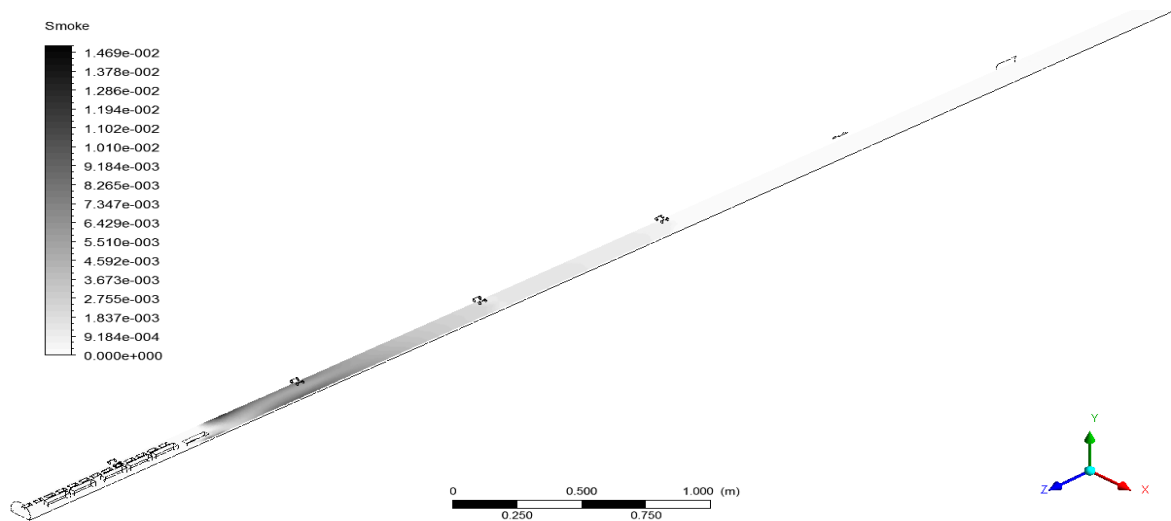
İlk dakikalarda, yangın büyüklüğü 10 MW’ın altında ve duman debisi düşük seviyelerdedir. Piston etkisine de bağlı olarak duman hızlı bir biçimde trafik yönünde dağılmaktadır. Bu anlarda görüş mesafesi yangın bölgesinin gerisinde, tünel kullanıcıları için kabul edilebilir seviyelerdedir.



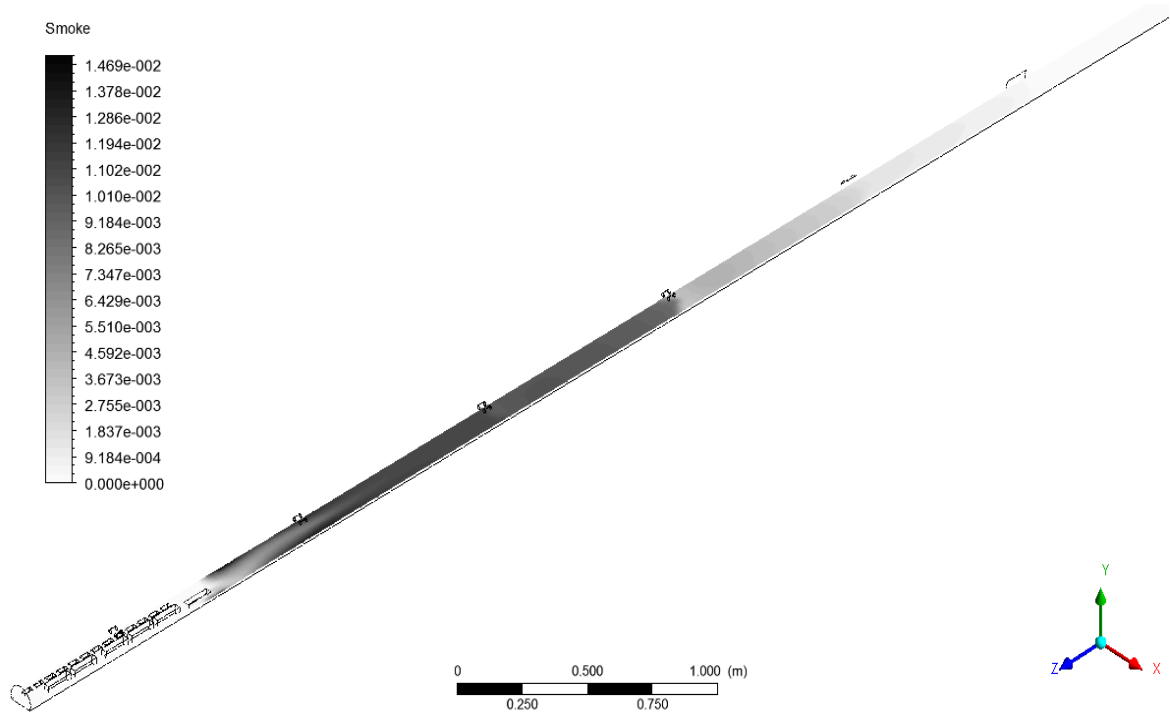
Şekil 4.59. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 3. dakika duman dağılımı



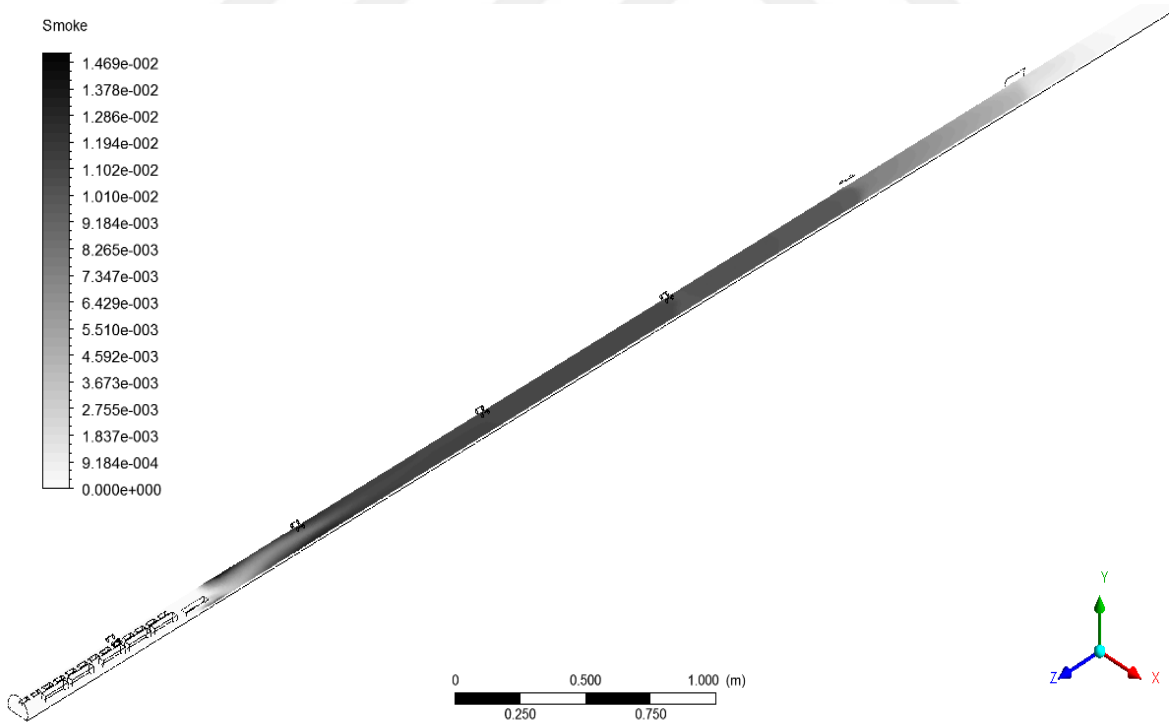
Şekil 4.60. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 4. dakika duman dağılımı



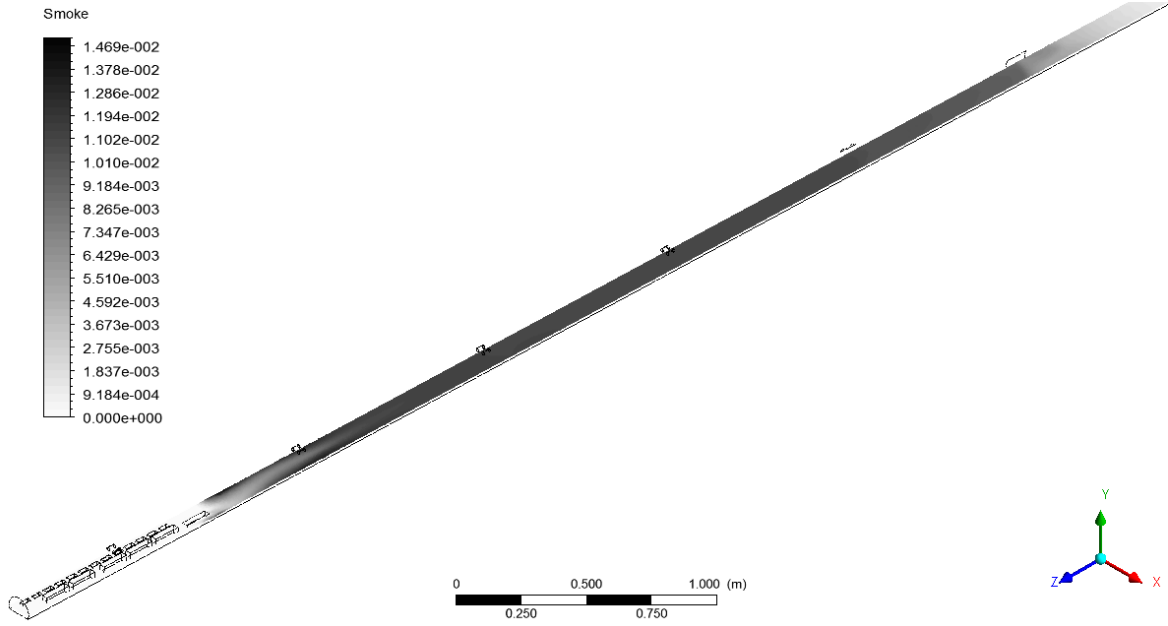
Şekil 4.61. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 5. dakika duman dağılımı



Şekil 4.62. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 10. dakika duman dağılımı



Şekil 4.63. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 15. dakika duman dağılımı



Şekil 4.64. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 20. dakika duman dağılımı

3. dakikadan itibaren trafik yönünde, dumana bağlı görüş mesafesi azalmakta, soğuyan dumanın zemin kotuna çökmesiyle beraber, şaft bölgesine kadar görüş mesafesi kalmamaktadır. Çizelge 4.18’de zamana ve yangın bölgesine uzaklığa bağlı görüş mesafeleri değişimi gösterilmiştir.

Görüş mesafeleri hesaplanırken Denklem 4.15’den faydalanılmıştır (Ingason, Li ve Lonnermark, 2014; 372, 384).

$$v_s = \frac{K}{2.3} \cdot \frac{u.A.\Delta U.H_c}{D_{mass}.Q} \quad (4.15)$$

Burada;

K = Yansıtıcı sabiti (Alt limit olarak sabit 2 alınır.)

u (m/s) = Havalandırma hızı (3 m/s alınır.)

A (m²) = Tünel kesiti (67 m² alınır.)

H_c (kJ/kg) = Yanan maddenin birim yanma ısısı

D_{mass} (m²/kg) = Kütleye özgül sönme katsayısı

Q (kW) = Isı salınımı

Denklem 4.8’de H_c değeri, Runehamar test sonuçlarından 28000 kJ/kg, D_{mass} değeri, otobüs

yangını referans alınarak test sonuçlarından 203 m²/kg alınmıştır.

Isı salınımı, mesafeye ve zamana bağlı olarak Denklem 4.16 yardımıyla hesaplanır.

$$\tau = t - \frac{x}{u} \quad (4.16)$$

Burada;

τ (s) = Lokal gerçek zaman

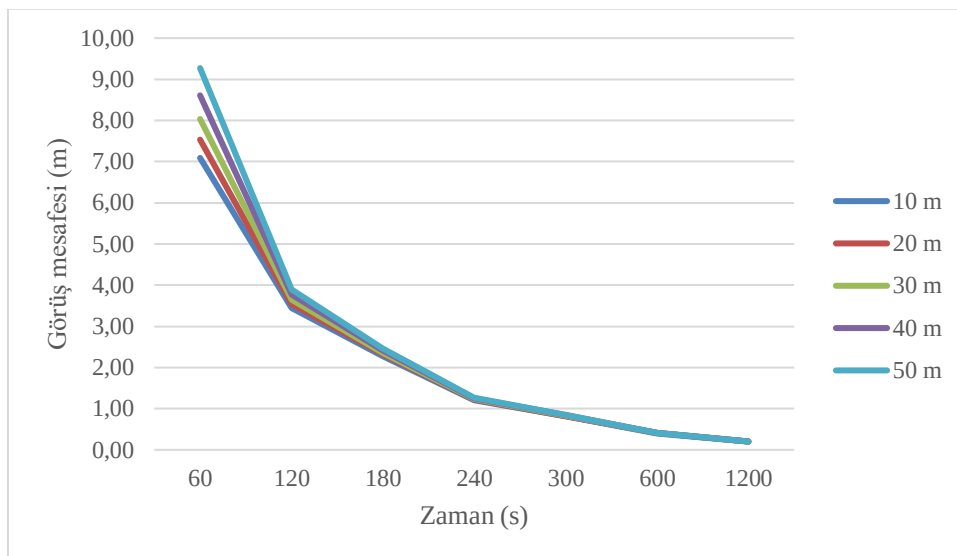
u (m/s) = Havalandırma hızı (3 m/s alınır.)

x (m) = Yangın mahaline uzaklık

Örneğin, yangın mahalinden 50 m uzaklıktaki, yangının başlangıcından 120 s sonraki gerçek zaman; $\tau = 120 - (50/3) = 63,4$ s bulunur. Buna göre; 120 s sonunda yangının 7,2 MW değerine ulaştığı kabulüne göre (Çizelge 4.16), saniyede 60 kW/s lineer artış kabul edilerek Q değeri, 63,4 s’de 3804 kW hesaplanır.

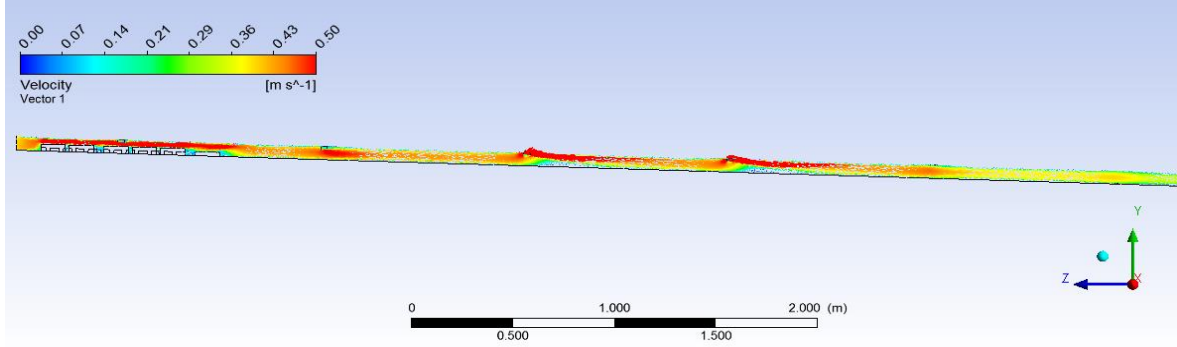
Yangın mahalinden 50 m’ye kadar duman atış yönünde (trafik yönünde) zamana bağlı görüş mesafesi değerleri Denklem 4.15 ve 4.16 yardımıyla hesaplanarak Çizelge 4.19’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.19. Yangın mahalinden 50 m uzaklığa kadar, zamana bağlı tünel kesitindeki görüş mesafeleri çizelgesi

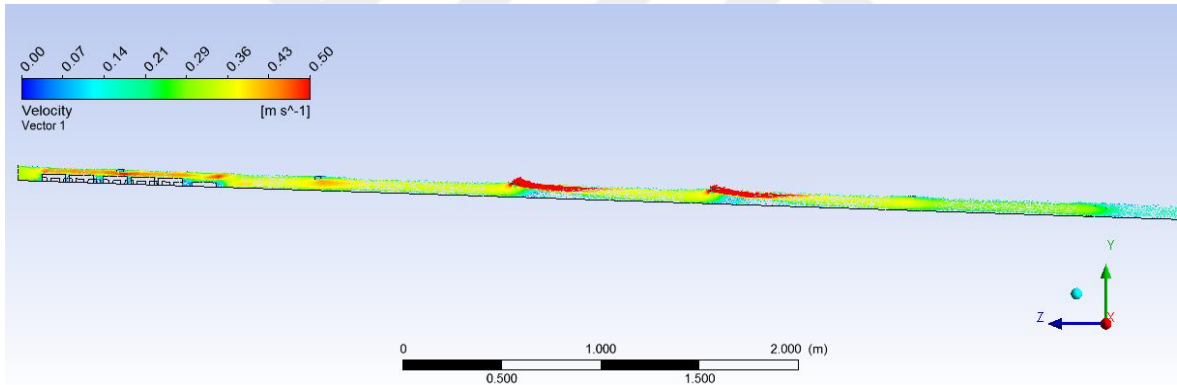


Boyuna kesitte, 0-5 m/s aralığında 600 m'lik kısımda zamana bağlı hız vektörleri

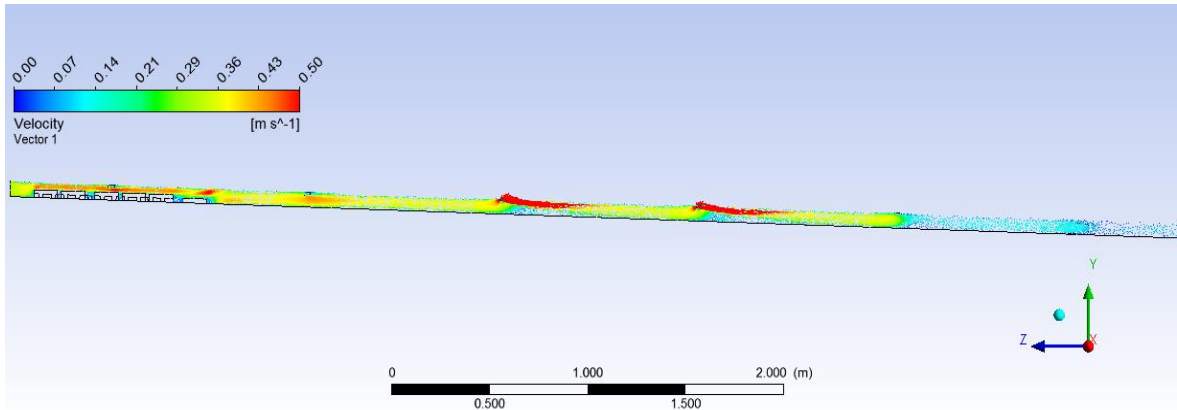
Şekil 4.65'den, Şekil 4.70'e kadar 600 m'lik, tünel boyuna kesitinde 0-5 m/s aralığında (ölçek model 0-0,5 m/s) hız dağılımı gösterilmiştir.



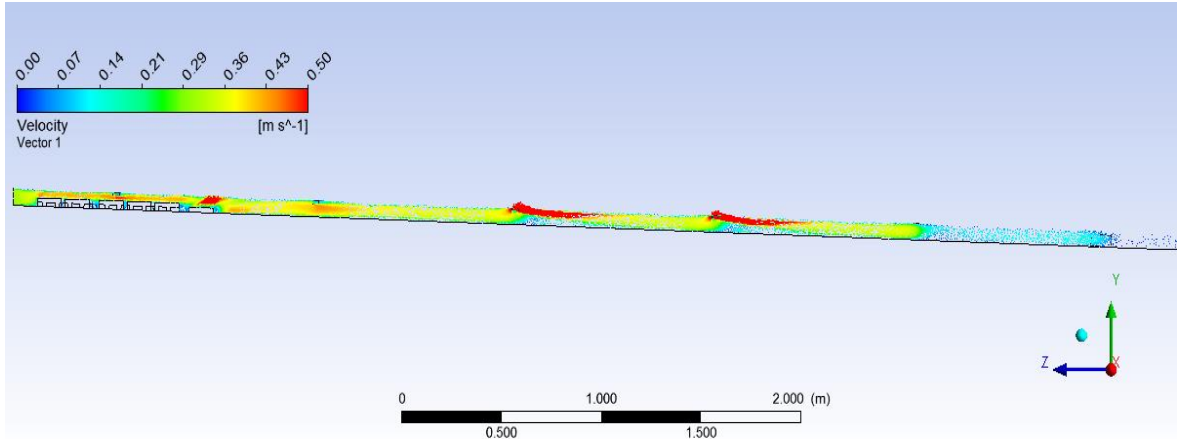
Şekil 4.65. Boyuna kesitte, 1. dakika 0-5 m/s aralığında hız dağılımı



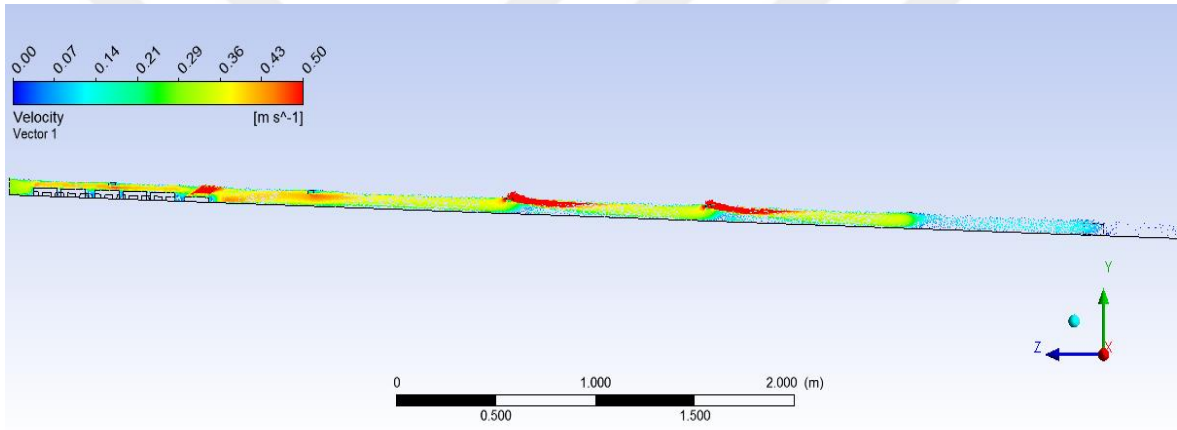
Şekil 4.66. Boyuna kesitte, 2. dakika 0-5 m/s aralığında hız dağılımı



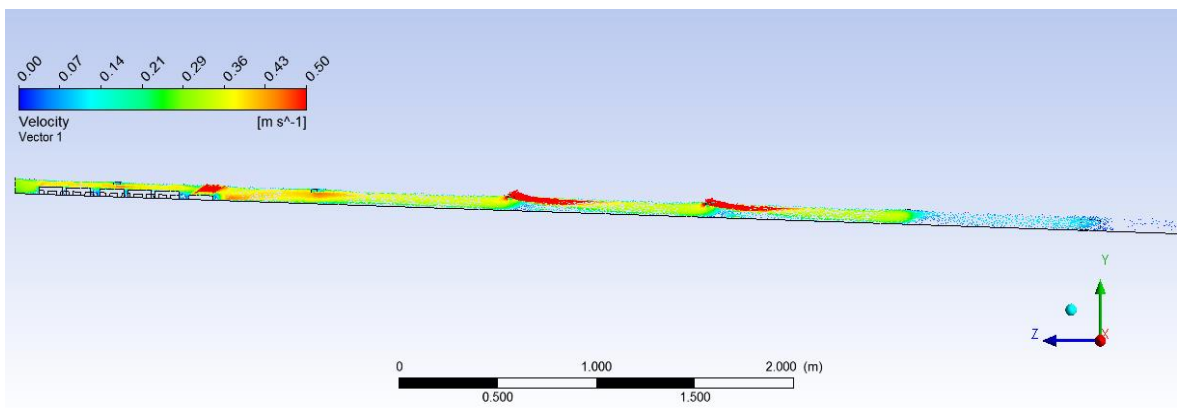
Şekil 4.67. Boyuna kesitte, 3. dakika 0-5 m/s aralığında hız dağılımı



Şekil 4.68. Boyuna kesitte, 4. dakika 0-5 m/s aralığında hız dağılımı



Şekil 4.69. Boyuna kesitte, 5. dakika 0-5 m/s aralığında hız dağılımı

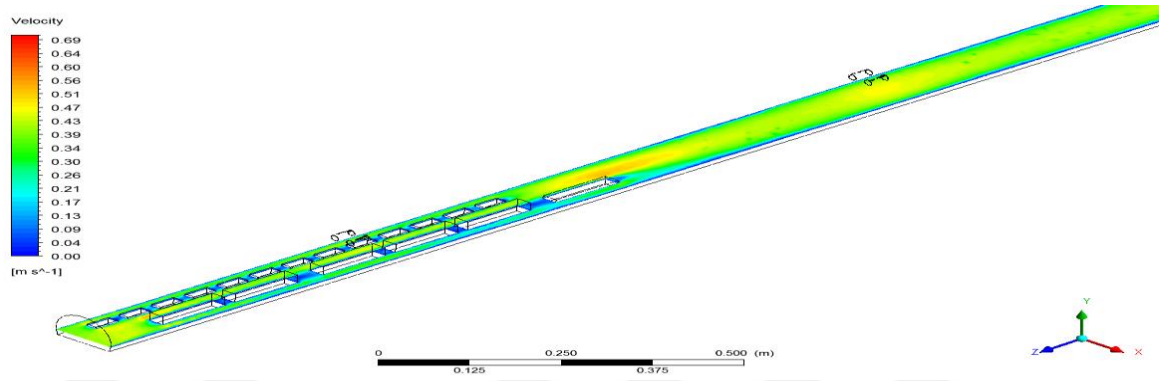


Şekil 4.70. Boyuna kesitte, 20. dakika 0-5 m/s aralığında hız dağılımı

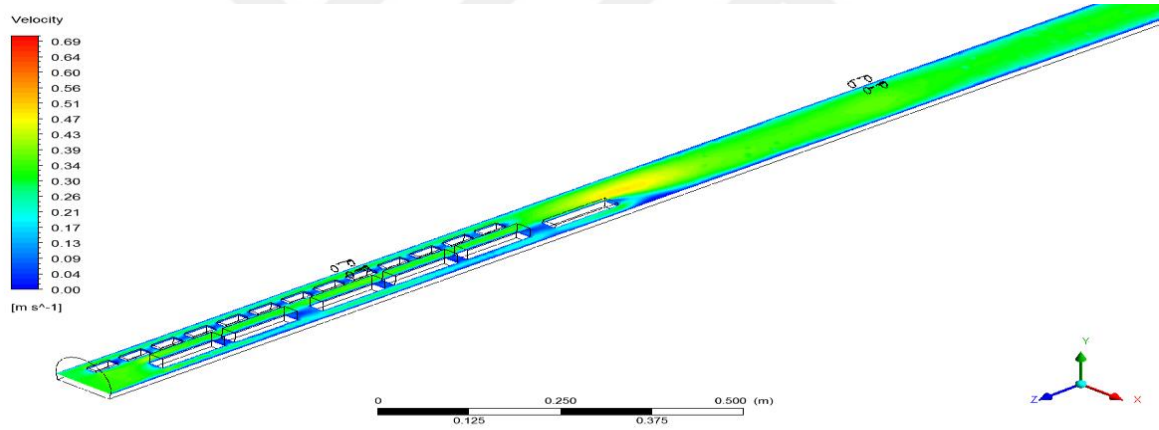
1. dakikada, tünel içi araç hareketliliği nedeniyle oluşan piston etkisinden dolayı hız değerleri 5 m/s'nin (ölçek model 0,5 m/s) üzerindeyken, 3. dakikadan itibaren havalandırma sisteminin devreye girmesiyle birlikte, tahliye amaçlı kullanılması gereken yangın

bölgesinin gerisinde 3 m/s (ölçek model 0,3 m/s) değeri olduğu görülmektedir.

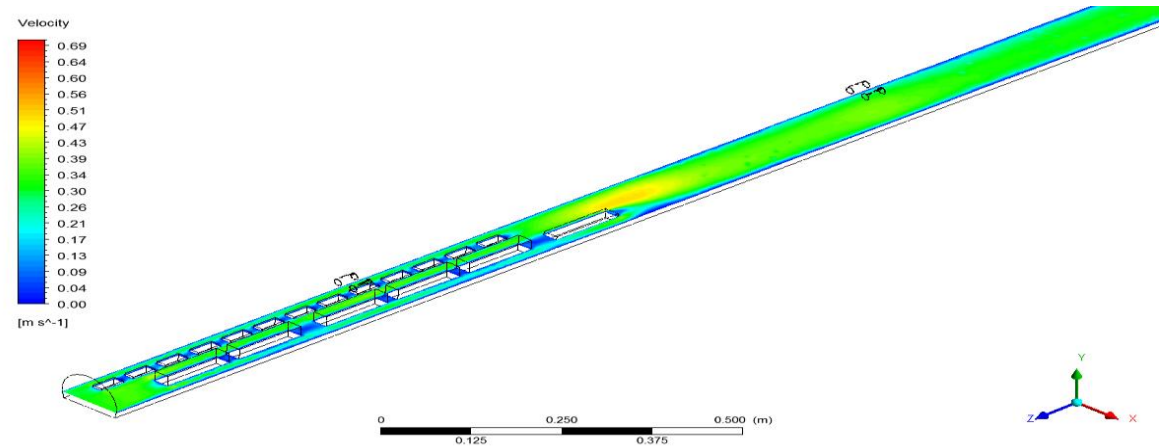
Boyuna kesitte, zeminden 1,7 m yükseklikte, 150 m'lik kısımda zamana bağlı hız dağılımı



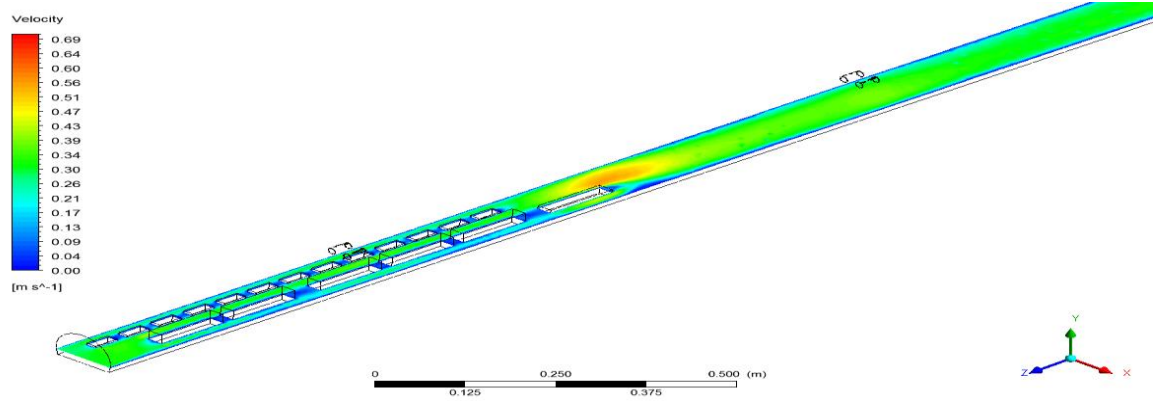
Şekil 4.71. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 1. dakika hız dağılımı



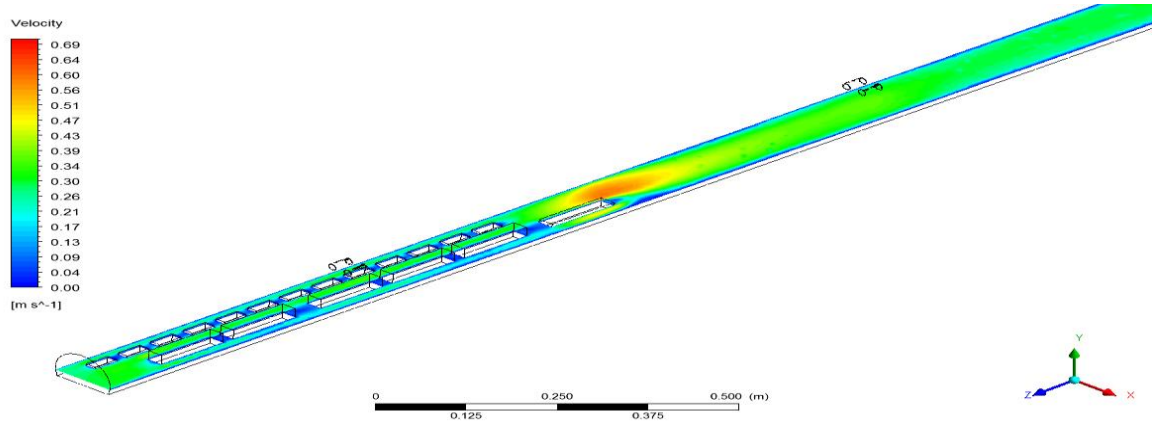
Şekil 4.72. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 2. dakika hız dağılımı



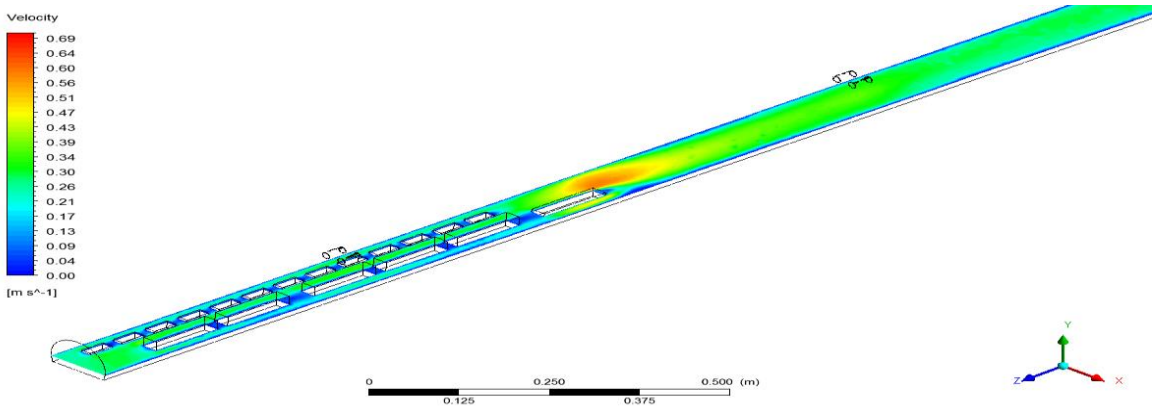
Şekil 4.73. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 3. dakika hız dağılımı



Şekil 4.74. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 4. dakika hız dağılımı



Şekil 4.75. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 5. dakika hız dağılımı



Şekil 4.76. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 20. dakika hız dağılımı

Şekil 4.71'den 4.76'ya kadar, yerden 1,7 m yükseklikte, yangın bölgesinde ve yangın bölgesinin gerisinde oluşan hız dağılımları gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, hızların yayaların tahliye yönünde düşük seviyede (< 3 m/s) olduğu tespit edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tünellerin yapım maliyetlerinin geçmiş yıllara göre düşmesi nedeniyle son yıllarda özellikle ülkemizde çok uzun karayolu tünelleri yapılmaktadır (Ovit Tüneli, Ilgaz 15 Temmuz İstiklal Tüneli, Cankurtaran Tüneli, Kırık Tüneli, Yeni Zigana Tüneli vb.). Bu tünellerin havalandırma sistemleri tasarlanırken, kısa tünellerde kullanılan ve jet fanlarla yapılan klasik boyuna havalandırmanın yanında karma havalandırma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Literatür çalışmalarında, giriş bölümünde bahsedildiği üzere karayolu tünel yangınlarıyla ilgili; kritik hız kavramı, geri katmanlaşma, maksimum duman sıcaklığı, tünel içerisindeki araçların blokaj etkileri, tünel kesitinin etkileri (en, boy, hidrolik çap, kavis vb.), yanan araç türünün etkileri, atmosferik koşulların etkisi ve son zamanlarda da yangın önleme sistemlerinin etkinliği (su sisi ve sulu yangın önleme sistemleri vb.) üzerine bir çok çalışma yapılmıştır. Ancak özellikle uzun tünellerde, gerçek durumda havalandırma sistem tasarımını baştan sona inceleyen kaynak bulunmamaktadır. Bu çalışmada tünelin uzunluğu, kesiti, trafik kompozisyonu, bulunduğu yöredeki meteorolojik şartlar vb. tasarım kabullerine göre tünellerde normal durum havalandırma ve acil durum havalandırma tasarımlarının nasıl yapılması gerektiği üzerine bir örnek çalışma yapılmıştır.

Bölüm 3.2’de araç emisyonlarını gidermek için yapılacak normal havalandırma sistemi hesaplamaları nümerik olarak yapılmış ve tünel içerisindeki ortalama trafik hızına bağlı olarak olası senaryolar geliştirilmiştir. Beklendiği üzere, düşük hızlarda tünel içerisindeki araç miktarının artmasına paralel olarak 20 km/h trafik hızında en fazla jet fanın çalıştırılması gerektiği ortaya görünmüştür. Tünelde trafiğin komple durduğu (0 km/h) durumda ve yüksek araç hızlarında (> 80 km/h) emisyon hesabı yapılmamıştır. Çok düşük hızlarda, acil durum senaryosu devreye girecektir. Yüksek araç hızlarında ise piston etkisi sebebiyle çok düşük havalandırma talebi ortaya çıkacağı için, SCADA senaryolarında hazırlanan en düşük kademe senaryosu yeterli olacaktır.

Bölüm 3.3’te literatür çalışmalarından faydalanılarak tasarım yangın yükü seçilmiş, buna göre kritik hız ve sıcaklık değerleri hesaplanmış ve iki yönlü olarak 8 ayrı lokasyonda yangın çıkması durumunda yangın sonucu oluşan basınç kayıplarını yenebilmek için nümerik hesaplar yapılmış ve kritik nokta olarak tünelde eğimin en yüksek olduğu DT_3 lokasyonu bulunmuştur. Bu bölgede eğimin negatif olması sebebiyle, yangın sonucu oluşan baca

etkisinin yüksek olması bu sonucu ortaya çıkarmıştır.

Bölüm 4'te, yangın durumunda bulunan kritik bölgenin kararlı ve kararsız sistemde HAD yazılımı ile modellenmesi yapılmış, literatür çalışmalarından faydalanılarak Froude ölçek model sistemi kullanılmıştır. Fluent yazılımında geometri hazırlanırken, mesh yapısı hazırlanırken ve uygun model seçilirken (k/e türbülans modeli) literatür çalışmalarından faydalanılmış ve sonuçların uygun olduğu görülmüştür. Yapılan analiz sonuçları, sıcaklık, hız ve duman dağılımlarının, Bölüm 3.3'te nümerik olarak bulunan sonuçlara uygundur.

Bu çalışmada tünel içerisinden tehlikeli madde yüklü araçların tüneli kullanmadığı (özellikle tankerle akaryakıt taşımacılığı) varsayımı yapılmıştır. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda çok uzun gerçek bir karayolu tüneline tehlikeli madde geçişi olan durumlar hesaba katılarak, değişik araç yangınları üzerine (30, 50, 100, 200 MW'lık yangın durumları) çalışma yapılması faydalı olacaktır. Bunun yanında özellikle meteorolojik, barometrik ve atmosferik koşulların çok uzun tünellerde yangın durumunda meydana getireceği etki üzerine özel çalışmalar yapılmalıdır.

Tünelde acil durum senaryoları oluşturulurken (Bölüm 3.3.3 ve Bölüm 4) ideal çalışma durumuna göre analiz yapılmış ve olası kullanıcı hatalarına yönelik analizler yapılmamıştır. Bu boyuttaki tünellerde olası bir yangın durumunda havalandırma sisteminin doğru bir şekilde çalıştırılabilmesi için yangına müdahale eden unsurların (tünel işletme personelleri, itfaiye birimleri, emniyet birimleri, sağlık birimleri ve tünel kullanıcıları) eğitilmiş ve koordineli olması önemlidir. Örneğin, yangın durumunda tünel kullanıcılarının yaya geçişi olarak kullanacağı bölgeye (yangın mahalinden gerideki en yakın yaya geçiş kapısı) doğru yönlendirme yapılmazsa, tünel trafiğe sadece tek yönlü kapatılırsa, itfaiye ve emniyet birimleri olay mahaline ulaşırken diğer tüpten, havalandırma yönünde açılmaması gereken araç geçiş kapısını kullanırsa havalandırma sistemi işlevsiz hale gelebilir ve telafisi mümkün olmayan sonuçlar meydana gelebilir. Bu sebeple belirli aralıklarla yangın tatbikatları yapılmalıdır. Literatür çalışmalarında acil geçiş kapılarının yanlış kullanımının tünel havalandırma sistemi üzerine etkisi ile ilgili bir çalışma bulunmamaktadır. Bu konuda yapılacak bir akademik çalışma, uygulamada yaşanan bu problemin çözümünde faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Alpgiray, B. (2016). *Enine havalandırma sistemine sahip bir tünelde yangın kaynaklı duman tahliyesinin sayısal yöntemle incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 11-12, Ankara.
- Alva, W.U., Jomaas, G., Anne, S. and Dederichs, A. (2017). The influence of vehicular obstacles on longitudinal ventilation control in tunnel fires, *Fire Safety Journal*, 87, 25-36.
- Atkinson, G.T. and Wu, Y. (1996). Smoke Control in Sloping Tunnels, *Fire Safety Journal*, 27(4), 335-341.
- Berberoğlu, B.İ. (2008). *Yeraltı raylı taşıma sistemi istasyonu için yangın modellemesi ve simülasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 140-153, Ankara.
- 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.
- Caliendo, C., Ciambelli, P., De Guglielmo, M.L., Meo, M.G. and Russo, P. (2013). Simulation of fire scenarios due to different vehicle types with and without traffic in a bi-directional road tunnel, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37, 22-36.
- CETU (Centre D'études Des Tunnels). (2003). *Dossier Pilote Des Tunnels Equipments - Ventilation*, Bron: Centre D'études Des Tunnels, 45-69.
- CETU (Centre D'études Des Tunnels). (2017). *Note d'information n° 26:La detection et le controle du dioxyde d'azote dans les tunnels routiers*, Bron: Centre D'études Des Tunnels, 1-12.
- Chow, W.K., Gao, Y., Zhao, J.H., Dang, J.F., Chow, C.L. and Miao, L. (2015). Smoke movement in tilted tunnel fires with longitudinal ventilation, *Fire Safety Journal*, 75, 14-22.
- Danziger, N.H. and Kennedy, W.D. (1982). *Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood Canyon Tunnels*, Proceedings of the Fourth International Symposium Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, York, 169-186.
- Deberteix, P. Gabay, D. and Blay, D. (2001). *Experimental study of fire-induced smoke propagation in a tunnel in the presence of longitudinal ventilation*, Proceedings of the International Conference on Tunnel Fires and Escape from Tunnels, Washington, 257-265.
- EPC (European Parliament and of the Council). (2004). "29 April 2004 On Minimum Safety Requirements for Tunnels in the Trans-European Road Network", *Official Journal of the European Union*, Brussel, L201, 56-76.

- EU (European Union) Directorate General for Energy and Transport. (2003). Safety in European Road Tunnels, *EU Report 1.4.73*, Brussel, 1-7.
- Germeau, L. and Brandt, R. (2017). Tunnel Ventilation Report Version 3, HBI Haerter Consulting Engineers, Zürich, 23-41.
- Gong, L., Jiang, L., Li, S., Shen, N., Zhang, Y. and Sun, J. (2016). Theoretical and experimental study on longitudinal smoke temperature distribution in tunnel fires, *International Journal of Thermal Sciences*, 102, 319-328.
- Haack, A., FIT (Fires in Tunnels), 2005. European Thematic Network Fire in Tunnels, *Design Fire Scenarios Technical Report 1*, 60-70.
- 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), 3095-3915.
- Hyun K.G., Ryul, K.S. and Sun, R.H. (2009). An experimental study on the effect of slope on the critical velocity in tunnel fires, *Journal of Fire Sciences*, 28, 27-47.
- Ignason, H., Li, Y.Z. and Lönnemark, A. (2015). Springer Science+Business Media New York, *Tunnel Fire Dynamics*, 372-384, 473-504.
- Ingason, H. (2009). Design Fire Curves for Tunnels, *Fire Safety Journal*, 44(2), 259-265.
- Ingason, H. (Editör). (2003). Proceedings of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires, Sweden: SP (Swedish National Testing and Research Institute) *Fire Technology Report*, (2004:05), 7-11.
- Ingason, H., Lönnemark, A. and Li, Y.Z. (2011). *Runehammar Tunnel Fire Tests*, SP Technical Research Institute of Sweden, Borås 35-37.
- Ji, J., Guo, F., Gao, Z., Zhu, J. and Sun, J. (2017). Numerical investigation on the effect of ambient pressure on smoke movement and temperature distribution in tunnel fires, *Applied Thermal Engineering*, PII: S1359-4311(16)34073-X.
- Karaaslan, S., Hepkaya, E., Yucel, N. (2011). Ölçeklendirilmiş Bir Kısa Tünelde Boyuna Havalandırma Sisteminin CFD Simülasyonu, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 33 (1), 63-77.
- Karakaş, T. (2011). *Tünellerin Havalandırma Sistemleri ve Bolu Tüneli Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- 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.
- Kayılı, S., Köktürk, T. ve Eralp, C. (Mayıs, 2010). Tünel Yangınlarının ve Yangın Güvenliği İçin Kullanılan Havalandırma Sistemlerinin Özellikleri, *Mühendis ve Makina*, 51(604), 1-8.

- Kennedy, W.D. (1996). Critical Velocity: Past, Present and Future. Seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels, *Independent Technical Conference*, London, 58-67.
- KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü) Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, (1997). *Karayolu Tüneli Uygulama Projesi Teknik Şartnamesi*, KGM Matbaası, Ankara, 1-18.
- KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü) Tesisler ve Bakım Dairesi Başkanlığı, (2016). *Tünel Bakım Onarım İşletme Kurs Notları*, KGM Matbaası, Ankara, 215-275.
- 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, C.K., Chaiken, R.F. and Singer, J.M. (1979). Interaction between duct fires and ventilation flow: an experimental study, *Combustion Science and Technology*, 20(1-2), 59-72.
- Lee, S.R. and Ryou, H.S. (March, 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.
- Lee, Y.P. and Tsai, K.C. (2012). Effect of vehicular blockage on critical ventilation velocity and tunnel fire behavior in longitudinally ventilated tunnels, *Fire Safety Journal*, 53(5), 35-42.
- Li, Y.Z., Ingason, H. and Lönnemark, A. (2012). *Numerical Simulation of Runehammar Tunnel Fire Tests*, SP Technical Research Institute of Sweden, 6th. International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation', Graz, 203-210.
- Li, Y.Z., Lei, B. and Ingason, H. (2010). Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires, *Fire Safety Journal*, 45(6-8), 361-370.
- Li, Y.Z., Lei, B. and Ingason, H. (2012). Scale modeling and numerical simulation of smoke control for rescue stations in long railway tunnels, *Journal of Fire Protection Engineering*, 22 (2), 101-131.
- Liang, Q., Li, Y., Li, J., Xu, H. and Li, K. (2017). Numerical studies on the smoke control by water mist screens with transverse ventilation in tunnel fires, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 64, 177-183.
- Maraveas, C., and Vrakas, A.S. (2014). Design of Concrete Tunnel Linings for Fire Safety, *Structural Engineering International*, 24(3), 319-329.
- McGrattan, K. and Forney, G. (2004). *Fire Dynamics Simulator (Version 4)*, User's Guide. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA.
- NFPA (National Fire Protection Association). 2017. *NFPA 502: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways*, 2017 Edition, NFPA, 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). (1991). *Fire in Road Tunnels. Protection for Civil Engineering Structures, Electrical Circuits and Equipment*, PIARC Committee on Road Tunnels, Paris, 175, 55-68.
- PIARC (Permanent International Association of Road Congress). (1999). *Road Tunnels: Fire and Smoke Control in Road Tunnels*, PIARC Technical Committee on Road Tunnels, Fransa, 39-51.
- PIARC (Permanent International Association of Road Congress). (2007). *Road Tunnels: Systems and Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnels*, PIARC Technical Committee 3.3 on Road Tunnels Operations, Paris, 258-285.
- PIARC (Permanent International Association of Road Congress). (2011). *Road Tunnels: (2011R02EN) Operational Strategies for Emergency Ventilation*, PIARC Technical Committee 3.3 on Road Tunnels Operations, Paris, 23-31.
- PIARC (Permanent International Association of Road Congress). (2012). *Road Tunnels: (2012R05EN) Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation*, PIARC Technical Committee C4 on Road Tunnels, Paris, 7-36.
- PIARC (Permanent International Association of Road Congress). (2017). *Road Tunnels: (2017R02EN) Design Fire Characteristics for Road Tunnels*, PIARC Technical Committee 3.3 on Road Tunnels Operations, Paris, 3-64.
- PIARC (Permanent International Association of Road Congress). (2019). *Road Tunnels: (2019R02EN) Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation*, PIARC Technical Committee D.5 on Road Tunnels, Paris, 3-61.
- Sinoplu, M.Z. (2007). *Avrupa Birliği Karayolu Tünelleri ile Türkiye Karayolu Tünellerinin Tünel Güvenliği Açısından Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Taillefer, N., Carlotti, P., Lemerle, C. and Avenel, R. (2013). Ten Years of Increased Hydrocarbon Temperature Curves in French Tunnels, *Fire Technology*, 49(2), 531-549.
- Tang, F., Li, L., Chen, W., Tao, C. and Zhan, Z.. (2017). Studies on ceiling maximum thermal smoke temperature and longitudinal decay in a tunnel fire with different transverse gas burner locations, *Applied Thermal Engineering*, 110, 1674-1681.
- Thomas, P.H. (1958). The movement of buoyant fluid against a stream and venting of underground fires, *Fire Research Station, Watford*, Fire Research Notes 351.
- Thomas, P.H. (1968). The movement of smoke in horizontal passages against an air flow, *Fire Research Station, Watford*, Fire Research Notes 723.

- Toprak, A.S. (2014). *CFD Application of a metro tunnel fire safety and emergency ventilation systems*, Master's Thesis, Marmara University Department of Mechanical Engineering, İstanbul.
- Vallero, D. (Editör). (2007). *Fundamentals of Air Pollution Fouth Edition*, Durham, North Carolina: Academic Press Elsevier, 52-76.
- Vauquelin, O. and Wu, Y. (2006). Influence of Tunnel Width on Longitudinal Smoke Control, *Fire Safety Journal*, 41(6), 420-426.
- Wang, X.Y., Spearpoint, M.J. and Fleischmann, C.M. (2017). Investigation of the effect of tunnel ventilation on crib fires through small-scale experiments, *Fire Safety Journal*, 88, 45-55.
- Weng, M., Lu, X., Liu, F., Shi, X. and Yu, L. (2015). Prediction of backlayering length and critical velocity in metro tunnel fires, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 47, 64-72.
- WHO (World Health Organization). (1988). *Air quality guidelines for Europe*, World Health Organization, WHO Regional Publications, European series, 23.
- 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.





EK-1. KGM'den alınan 2045 yılı tahmini YOGT verileri

Yıllar	Otomobil	Hafif Yüklü Ticari Taşıt	Otobüs	Kamyon	Kamyon, Römork, Çekici, Yarı Römork	Toplam
2015	3187	254	65	528	382	4416
2016	3442	262	67	544	458	4773
2017	3718	270	69	561	550	5168
2018	4015	278	71	577	660	5601
2019	4336	286	73	595	792	6082
2020	4683	298	75	607	872	6535
2021	5056	304	77	619	959	7015
2022	5463	313	80	631	1054	7541
2023	5900	322	82	644	1160	8108
2024	6372	332	85	657	1276	8722
2025	6754	342	87	663	1340	9186
2026	7159	352	90	670	1407	9678
2027	7589	363	92	677	1477	10198
2028	8040	374	95	683	1551	10743
2029	8527	385	98	690	1628	11328
2030	9038	396	102	694	1661	11891
2031	9581	408	104	697	1694	12484
2032	10156	420	107	701	1728	13112
2033	10765	433	110	704	1763	13775
2034	11411	446	114	708	1798	14477
2035	12095	455	116	708	1816	15190
2036	12821	464	118	709	1834	15946
2037	13590	473	121	710	1852	16746
2038	14406	483	123	710	1871	17593
2039	15270	492	126	711	1890	18489
2040	16186	502	128	712	1909	19437
2041	17158	512	130	712	1928	20440
2042	18187	523	133	713	1947	21503
2043	19278	533	136	714	1966	22627
2044	20435	544	138	715	1986	23818
2045	21661	555	141	715	2006	25078*

*Proje saatlik trafiği, 1 784 araç/h olarak verilmiştir.

EK-2. Jet fanların yerleşimi

BATI TÜPÜ			
No	Pozisyon (m)	No	Pozisyon (m)
JF_B01	100	JF_B43	11600
JF_B02	100	JF_B44	11600
JF_B03	200	JF_B45	11700
JF_B04	200	JF_B46	11700
JF_B05	300	JF_B47	11800
JF_B06	300	JF_B48	11800
JF_B07	400	JF_B49	12100
JF_B08	400	JF_B50	12100
JF_B09	2100	JF_B51	12200
JF_B10	2100	JF_B52	12200
JF_B11	2200	JF_B53	12300
JF_B12	2200	JF_B54	12300
JF_B13	2300	JF_B55	14100
JF_B14	2300	JF_B56	14100
JF_B15	2400	JF_B57	14200
JF_B16	2400	JF_B58	14200
JF_B17	2500	JF_B59	14300
JF_B18	2500	JF_B60	14300
JF_B19	2700	JF_B61	14400
JF_B20	2700	JF_B62	14400
JF_B21	2800		
JF_B22	2800		
JF_B23	2900		
JF_B24	2900		
JF_B25	6200		
JF_B26	6200		
JF_B27	6300		
JF_B28	6300		
JF_B29	6400		
JF_B30	6400		
JF_B31	6500		
JF_B32	6500		
JF_B33	6800		
JF_B34	6800		
JF_B35	6900		
JF_B36	6900		
JF_B37	7000		
JF_B38	7000		
JF_B39	7100		
JF_B40	7100		
JF_B41	11500		
JF_B42	11500		

DOĞU TÜPÜ			
No	Pozisyon (m)	No	Pozisyon (m)
JF_D01	14400	JF_D43	6400
JF_D02	14400	JF_D44	6400
JF_D03	14300	JF_D45	6300
JF_D04	14300	JF_D46	6300
JF_D05	14200	JF_D47	6200
JF_D06	14200	JF_D48	6200
JF_D07	14100	JF_D49	6100
JF_D08	14100	JF_D50	6100
JF_D09	14000	JF_D51	3200
JF_D10	14000	JF_D52	3200
JF_D11	13900	JF_D53	3100
JF_D12	13900	JF_D54	3100
JF_D13	12500	JF_D55	3000
JF_D14	12500	JF_D56	3000
JF_D15	12400	JF_D57	2900
JF_D16	12400	JF_D58	2900
JF_D17	12300	JF_D59	2800
JF_D18	12300	JF_D60	2800
JF_D19	12200	JF_D61	2700
JF_D20	12200	JF_D62	2700
JF_D21	12100	JF_D63	2400
JF_D22	12100	JF_D64	2400
JF_D23	11800	JF_D65	2300
JF_D24	11800	JF_D66	2300
JF_D25	11700	JF_D67	2200
JF_D26	11700	JF_D68	2200
JF_D27	11600	JF_D69	2100
JF_D28	11600	JF_D70	2100
JF_D29	7200	JF_D71	2000
JF_D30	7200	JF_D72	2000
JF_D31	7100	JF_D73	600
JF_D32	7100	JF_D74	600
JF_D33	7000	JF_D75	500
JF_D34	7000	JF_D76	500
JF_D35	6900	JF_D77	400
JF_D36	6900	JF_D78	400
JF_D37	6800	JF_D79	300
JF_D38	6800	JF_D80	300
JF_D39	6700	JF_D81	200
JF_D40	6700	JF_D82	200
JF_D41	6500	JF_D83	100
JF_D42	6500	JF_D84	100

EK-3. Batı tüpü 1 (BT_1) bölümü emisyon hesapları

EK 3.1. BT 1’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim benzinli PC, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ OTOMOBİL/BENZİN (PC) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	10,20	12,60	15,50	22,70	35,40	30,96	21,98
30	9,30	11,10	13,70	17,30	22,80	20,88	14,82
40	10,30	12,90	16,40	22,30	33,20	29,39	20,86
50	11,80	14,00	18,20	23,80	33,10	29,85	21,19
60	11,40	13,30	18,20	25,30	37,80	33,43	23,73
70	13,30	17,90	25,60	36,40	60,40	52,00	36,92
80	16,20	21,10	31,00	49,80	89,10	75,35	53,49
fh	1,00						
ft	0,71						

EK 3.2. BT 1’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel PC, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ OTOMOBİL/DİZEL (PC) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	1,00	1,30	2,80	3,30	3,60	3,50	2,59
30	1,20	1,40	2,40	3,00	3,50	3,33	2,46
40	1,20	1,40	2,00	2,70	3,20	3,03	2,24
50	1,10	1,40	1,80	2,60	3,10	2,93	2,16
60	1,10	1,20	1,60	2,40	3,00	2,79	2,06
70	1,10	1,20	1,60	2,10	2,80	2,56	1,89
80	1,10	1,20	1,60	2,10	2,40	2,30	1,70
fh	1,00						
ft	0,74						

EK 3.3. BT 1’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim benzinli LCV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/BENZİN (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	40,10	46,80	51,70	58,30	67,80	64,48	31,59
30	42,20	51,90	57,90	66,50	79,70	75,08	36,79
40	43,20	57,40	67,80	86,20	116,50	105,90	51,89
50	44,20	57,60	70,00	90,00	124,00	112,10	54,93
60	47,10	61,20	69,30	93,80	131,60	118,37	58,00
70	51,80	71,90	90,80	126,50	193,50	170,05	83,32
80	61,60	81,30	98,30	164,50	272,50	234,70	115,00
fh	1,00						
ft	0,49						

EK-3 (devamı). Batı tüpü 1 (BT_1) bölümü emisyon hesapları

EK 3.4. BT_1'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	1,20	1,50	1,80	1,90	2,10	2,03	0,53
30	1,30	1,60	2,00	2,20	2,40	2,33	0,61
40	1,30	1,70	2,00	2,30	2,50	2,43	0,63
50	1,40	1,70	2,10	2,50	2,80	2,70	0,70
60	1,40	1,70	2,10	2,70	3,00	2,90	0,75
70	1,60	1,80	2,30	3,00	3,30	3,20	0,83
80	1,70	1,90	2,50	3,30	3,60	3,50	0,91
fh	1,00						
ft	0,26						

EK 3.5. BT_1'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	11,40	17,80	22,30	26,20	30,60	29,06	20,92
30	10,10	18,30	23,90	30,60	37,80	35,28	25,40
40	8,70	18,80	26,90	37,30	48,10	44,32	31,91
50	6,20	19,30	29,40	43,20	56,80	52,04	37,47
60	6,10	19,80	34,90	53,30	62,30	59,15	42,59
70	6,10	20,30	40,30	63,10	67,80	66,16	47,63
80	6,10	20,70	45,80	73,30	77,20	75,84	54,60
fh	1,00						
ft	0,72						
fm	1,00						

EK 3.6. BT_1'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	20,92	1,87	22,80
30	25,40	2,83	28,23
40	31,91	3,77	35,68
50	37,47	4,70	42,17
60	42,59	5,64	48,23
70	47,63	6,57	54,21
80	54,60	7,51	62,11

EK-3 (devamı). Batı tüpü 1 (BT_1) bölümü emisyon hesapları

EK 3.7. BT_1'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, CO emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (CO)				otomobil/dizel (CO)				otomobil ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	70%	30%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	21,98	0,28	22,25	20	2,59	0,28	2,86	20	15,58	0,86	16,44
30	14,82	0,43	15,25	30	2,46	0,43	2,89	30	10,67	0,87	11,54
40	20,86	0,55	21,42	40	2,24	0,55	2,79	40	14,99	0,84	15,83
50	21,19	0,70	21,89	50	2,16	0,70	2,87	50	15,32	0,86	16,18
60	23,73	0,83	24,56	60	2,06	0,83	2,89	60	17,19	0,87	18,06
70	36,92	0,98	37,90	70	1,89	0,98	2,87	70	26,53	0,86	27,39
80	53,49	1,13	54,62	80	1,70	1,13	2,83	80	38,24	0,85	39,08

EK 3.8. BT_1'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, CO emisyon miktarları (G_e)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	40%	60%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	31,59	0,28	31,87	20	0,53	0,28	0,80	20	12,75	0,48	13,23
30	36,79	0,43	37,21	30	0,61	0,43	1,03	30	14,89	0,62	15,50
40	51,89	0,55	52,44	40	0,63	0,55	1,18	40	20,98	0,71	21,69
50	54,93	0,70	55,63	50	0,70	0,70	1,40	50	22,25	0,84	23,09
60	58,00	0,83	58,83	60	0,75	0,83	1,58	60	23,53	0,95	24,48
70	83,32	0,98	84,30	70	0,83	0,98	1,81	70	33,72	1,09	34,81
80	115,00	1,13	116,13	80	0,91	1,13	2,04	80	46,45	1,22	47,67

EK 3.9. BT_1'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam CO emisyon miktarları ($G_{\text{tun,CO}}$)

CO GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	70,00	ppm	Camb	1,00	ppm	Cadm-Camb	69,00	0,08	kg/m ³	1,2000
										CO yoğunluk (kg/m ³)
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qCOu	qCO	orta yük.	qCOu	qCO	ağır vasıta	qCOu	qCO	Qtotat-CO
km/h	sayısı	g/h,u	m ³ /h	sayısı	g/h,u	m ³ /h	sayısı	g/h,u	m ³ /h	m ³ /h
20	270,76	16,44	53.750,68	6,94	13,23	1.108,52	35,78	22,80	9.849,16	64.708,36
30	180,51	11,54	25.154,66	4,63	15,50	866,05	23,85	28,23	8.131,87	34.152,58
40	135,38	15,83	25.881,18	3,47	21,69	908,56	17,89	35,68	7.707,26	34.497,00
50	108,31	16,18	21.169,76	2,78	23,09	773,99	14,31	42,17	7.288,24	29.231,98
60	90,25	18,06	19.687,39	2,31	24,48	683,75	11,93	48,23	6.945,64	27.316,77
70	77,36	27,39	25.590,64	1,98	34,81	833,24	10,22	54,21	6.691,59	33.115,47
80	67,69	39,08	31.951,62	1,73	47,67	998,61	8,94	62,11	6.709,09	39.659,32

EK-3 (devamı). Batı tüpü 1 (BT_1) bölümü emisyon hesapları

EK 3.13. BT_1'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, NO_x emisyon tablosu

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	6,60	8,70	11,70	15,90	27,70	23,57	8,0138
30	7,20	10,10	14,40	20,40	34,00	29,24	9,9416
40	6,90	10,20	15,70	23,80	40,20	34,46	11,7164
50	6,50	10,40	17,10	27,20	41,40	36,43	12,3862
60	7,70	10,70	18,50	37,90	57,50	50,64	17,2176
70	9,00	16,60	29,60	48,60	73,60	64,85	22,049
80	9,40	20,00	43,20	75,60	108,60	97,05	32,997
fh	1,00						
ft	0,34						

EK 3.14. BT_1'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, NO_x emisyon tablosu

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	55,30	76,20	88,70	98,80	104,10	102,25	22,4939
30	48,50	75,20	92,70	103,10	111,00	108,24	23,8117
40	41,60	69,30	105,30	119,20	141,20	133,50	29,37
50	33,10	64,20	111,80	129,80	167,10	154,05	33,8899
60	24,50	62,20	122,90	182,00	247,50	224,58	49,4065
70	16,30	57,50	134,00	234,20	328,00	295,17	64,9374
80	16,30	57,50	145,10	286,50	408,40	365,74	80,4617
fh	1,00						
ft	0,22						
fm	1,00						

EK 3.15. BT_1'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, NO_x emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	22,49	1,87	24,37
30	23,81	2,83	26,64
40	29,37	3,77	33,14
50	33,89	4,70	38,59
60	49,41	5,64	55,04
70	64,94	6,57	71,51
80	80,46	7,51	87,97

EK-3 (devamı). Batı tüpü 1 (BT_1) bölümü emisyon hesapları

EK 3.16. BT_1'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, NO_x emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (NO _x)				otomobil/dizel (NO _x)				otomobil ortalama (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	70%	30%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	1,61	0,28	1,89	20	6,87	0,28	7,14	20	1,32	2,14	3,47
30	1,99	0,43	2,42	30	8,60	0,43	9,03	30	1,69	2,71	4,40
40	2,38	0,55	2,93	40	10,13	0,55	10,68	40	2,05	3,20	5,25
50	2,54	0,70	3,24	50	11,63	0,70	12,33	50	2,27	3,70	5,97
60	3,14	0,83	3,96	60	14,55	0,83	15,38	60	2,78	4,61	7,39
70	3,73	0,98	4,71	70	17,99	0,98	18,97	70	3,30	5,69	8,99
80	4,48	1,13	5,61	80	24,82	1,13	25,95	80	3,93	7,78	11,71

EK 3.17. BT_1'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, NO_x emisyon miktarları (G_e)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (NO _x)				orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (NO _x)				orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	40%	60%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	1,32	0,28	1,59	20	8,01	0,28	8,29	20	0,64	4,97	5,61
30	1,95	0,43	2,38	30	9,94	0,43	10,37	30	0,95	6,22	7,17
40	2,29	0,55	2,84	40	11,72	0,55	12,27	40	1,14	7,36	8,50
50	2,54	0,70	3,24	50	12,39	0,70	13,09	50	1,30	7,85	9,15
60	2,77	0,83	3,60	60	17,22	0,83	18,05	60	1,44	10,83	12,27
70	3,38	0,98	4,35	70	22,05	0,98	23,03	70	1,74	13,82	15,56
80	4,15	1,13	5,27	80	33,00	1,13	34,12	80	2,11	20,47	22,58

EK 3.18. BT_1'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam NO_x emisyon miktarları (G_{tun,NO_x})

NO _x GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	1,00	ppm	Camb	0,00	ppm	Cadm-Camb	1,00	0,0019	g/m3	1,9000
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qNOu	qNO	oyt	qNOu	qNO	ağır vasıta	qNOu	qNO	Qtotal-NO
km/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	m3/h
20	270,76	3,47	493.788,96	6,94	5,61	20.491,46	35,78	24,37	458.790,66	973.071,08
30	180,51	4,40	418.137,29	4,63	7,17	17.455,46	23,85	26,64	334.420,77	770.013,52
40	135,38	5,25	374.371,30	3,47	8,50	15.514,86	17,89	33,14	311.957,60	701.843,76
50	108,31	5,97	340.290,19	2,78	9,15	13.363,01	14,31	38,59	290.658,90	644.312,10
60	90,25	7,39	351.013,05	2,31	12,27	14.932,84	11,93	55,04	345.478,53	711.424,43
70	77,36	8,99	365.870,72	1,98	15,56	16.230,75	10,22	71,51	384.712,34	766.813,81
80	67,69	11,71	417.184,43	1,73	22,58	20.615,20	8,94	87,97	414.106,63	851.906,26

EK-3 (devamı). Batı tüpü 1 (BT_1) bölümü emisyon hesapları

EK 3.22. BT_1’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (m2/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	2,30	2,80	3,30	3,80	4,60	4,32	0,91
30	2,30	2,90	3,50	4,70	5,90	5,48	1,15
40	2,80	3,30	4,20	5,40	7,20	6,57	1,38
50	2,70	3,70	4,80	6,10	8,80	7,86	1,65
60	3,00	4,20	5,90	7,20	10,50	9,35	1,96
70	3,30	4,60	6,90	9,80	12,20	11,36	2,39
80	4,60	6,40	9,10	12,30	14,80	13,93	2,92
fh	1,00						
ft	0,21						

EK 3.23. BT_1’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (m2/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	4,30	5,60	6,50	7,40	8,50	8,12	7,38
30	4,10	5,60	6,80	8,40	9,90	9,38	8,53
40	3,90	5,80	8,00	10,50	12,90	12,06	10,97
50	3,70	5,80	8,60	11,90	14,90	13,85	12,60
60	3,70	6,00	9,30	14,30	19,30	17,55	15,97
70	3,80	6,30	10,10	16,70	23,60	21,19	19,28
80	3,70	6,60	12,30	19,40	28,00	24,99	22,74
fh	1,00						
ft	0,91						
fm	1,00						

EK 3.24. BT_1’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, bulanıklık emisyon miktarları (Ge)

ağır vasıta (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	7,38	8,80	16,18
30	8,53	13,30	21,83
40	10,97	17,70	28,67
50	12,60	22,10	34,70
60	15,97	26,50	42,47
70	19,28	30,90	50,18
80	22,74	35,30	58,04

EK-3 (devamı). Batı tüpü 1 (BT_1) bölümü emisyon hesapları

EK 3.25. BT_1’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (bulanıklık)				otomobil/dizel (bulanıklık)				otomobil ortalama (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h	km/h	m2/h	m2/h	m2/h	km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,19	1,30	1,49	20	0,72	1,30	2,02	20	0,59	1,21	1,81
30	0,25	2,00	2,25	30	0,84	2,00	2,84	30	0,90	1,71	2,61
40	0,34	2,60	2,94	40	1,05	2,60	3,65	40	1,18	2,19	3,37
50	0,34	3,30	3,64	50	1,29	3,30	4,59	50	1,46	2,76	4,21
60	0,49	3,90	4,39	60	1,49	3,90	5,39	60	1,76	3,23	4,99
70	0,71	4,60	5,31	70	1,63	4,60	6,23	70	2,12	3,74	5,86
80	1,05	5,30	6,35	80	2,03	5,30	7,33	80	2,54	4,40	6,94

EK 3.26. BT_1’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

hafif yüklü ticari araç/benzin (bulanıklık)				hafif yüklü ticari araç/dizel (bulanıklık)				hafif yüklü ticari araç ortalama (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h	km/h	m2/h	m2/h	m2/h	km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,21	1,30	1,51	20	0,91	1,30	2,21	20	0,60	1,32	1,93
30	0,31	2,00	2,31	30	1,15	2,00	3,15	30	0,92	1,89	2,82
40	0,57	2,60	3,17	40	1,38	2,60	3,98	40	1,27	2,39	3,66
50	0,52	3,30	3,82	50	1,65	3,30	4,95	50	1,53	2,97	4,50
60	0,78	3,90	4,68	60	1,96	3,90	5,86	60	1,87	3,52	5,39
70	1,56	4,60	6,16	70	2,39	4,60	6,99	70	2,47	4,19	6,66
80	2,76	5,30	8,06	80	2,92	5,30	8,22	80	3,22	4,93	8,16

EK 3.27. BT_1’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam bulanıklık emisyon miktarları ($G_{\text{tun, bulanıklık}}$)

GÖRÜŞ MESAFESİ İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
							K	0,007	m-1	
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qPMu	qPM	oyt	qPMu	qPM	ağır vasıta	qPMu	qPM	Qtotat-PM
km/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	m3/h
20	270,76	1,81	69.973,15	6,94	1,93	1.910,85	35,78	16,18	82.715,12	154.599,12
30	180,51	2,61	67.186,75	4,63	2,82	1.860,11	23,85	21,83	74.382,19	143.429,05
40	135,38	3,37	65.126,12	3,47	3,66	1.812,13	17,89	28,67	73.273,84	140.212,10
50	108,31	4,21	65.167,74	2,78	4,50	1.783,25	14,31	34,70	70.943,87	137.894,86
60	90,25	4,99	64.352,90	2,31	5,39	1.780,73	11,93	42,47	72.351,53	138.485,15
70	77,36	5,86	64.793,13	1,98	6,66	1.885,03	10,22	50,18	73.270,63	139.948,80
80	67,69	6,94	67.064,10	1,73	8,16	2.021,53	8,94	58,04	74.157,61	143.243,24

EK-3 (devamı). Batı tüpü 1 (BT_1) bölümü emisyon hesapları

EK 3.28. BT_1'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı, gerekli asgari taze hava miktarları

EMİSYON GİDERMEK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARLARI							
trafik	CO	TOPLAM	NO2	TOPLAM	BULANIKLIK	TOPLAM	DİZAYN DEĞERİ
hızı	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA
km/h	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/s
20	64.708,36	17,97	194.614,22	54,06	154.599,12	42,94	54,06
30	34.152,58	9,49	154.002,70	42,78	143.429,05	39,84	42,78
40	34.497,00	9,58	140.368,75	38,99	140.212,10	38,95	38,99
50	29.231,98	8,12	128.862,42	35,80	137.894,86	38,30	38,30
60	27.316,77	7,59	142.284,89	39,52	138.485,15	38,47	39,52
70	33.115,47	9,20	153.362,76	42,60	139.948,80	38,87	42,60
80	39.659,32	11,02	170.381,25	47,33	143.243,24	39,79	47,33

EK-4 (devamı). Batı tüpü 2 (BT_2) bölümü emisyon hesapları

Ek 4.4. BT_2'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	1,20	1,50	1,80	1,90	2,10	2,03	0,53
30	1,30	1,60	2,00	2,20	2,40	2,33	0,61
40	1,30	1,70	2,00	2,30	2,50	2,43	0,63
50	1,40	1,70	2,10	2,50	2,80	2,70	0,70
60	1,40	1,70	2,10	2,70	3,00	2,90	0,75
70	1,60	1,80	2,30	3,00	3,30	3,20	0,83
80	1,70	1,90	2,50	3,30	3,60	3,50	0,91
fh	1,00						
ft	0,26						

Ek 4.5. BT_2'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	11,40	17,80	22,30	26,20	30,60	29,06	20,92
30	10,10	18,30	23,90	30,60	37,80	35,28	25,40
40	8,70	18,80	26,90	37,30	48,10	44,32	31,91
50	6,20	19,30	29,40	43,20	56,80	52,04	37,47
60	6,10	19,80	34,90	53,30	62,30	59,15	42,59
70	6,10	20,30	40,30	63,10	67,80	66,16	47,63
80	6,10	20,70	45,80	73,30	77,20	75,84	54,60
fh	1,00						
ft	0,72						
fm	1,00						

Ek 4.6. BT_2'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (Ge)

ağır vasıta (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	20,92	1,87	22,80
30	25,40	2,83	28,23
40	31,91	3,77	35,68
50	37,47	4,70	42,17
60	42,59	5,64	48,23
70	47,63	6,57	54,21
80	54,60	7,51	62,11

EK-4 (devamı). Batı tüpü 2 (BT_2) bölümü emisyon hesapları

Ek 4.7. BT_2’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, CO emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (CO)				otomobil/dizel (CO)				otomobil ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	70%	30%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	21,98	0,28	22,25	20	2,59	0,28	2,86	20	15,58	0,86	16,44
30	14,82	0,43	15,25	30	2,46	0,43	2,89	30	10,67	0,87	11,54
40	20,86	0,55	21,42	40	2,24	0,55	2,79	40	14,99	0,84	15,83
50	21,19	0,70	21,89	50	2,16	0,70	2,87	50	15,32	0,86	16,18
60	23,73	0,83	24,56	60	2,06	0,83	2,89	60	17,19	0,87	18,06
70	36,92	0,98	37,90	70	1,89	0,98	2,87	70	26,53	0,86	27,39
80	53,49	1,13	54,62	80	1,70	1,13	2,83	80	38,24	0,85	39,08

Ek 4.8. BT_2’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, CO emisyon miktarları (G_e)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	40%	60%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	31,59	0,28	31,87	20	0,53	0,28	0,80	20	12,75	0,48	13,23
30	36,79	0,43	37,21	30	0,61	0,43	1,03	30	14,89	0,62	15,50
40	51,89	0,55	52,44	40	0,63	0,55	1,18	40	20,98	0,71	21,69
50	54,93	0,70	55,63	50	0,70	0,70	1,40	50	22,25	0,84	23,09
60	58,00	0,83	58,83	60	0,75	0,83	1,58	60	23,53	0,95	24,48
70	83,32	0,98	84,30	70	0,83	0,98	1,81	70	33,72	1,09	34,81
80	115,00	1,13	116,13	80	0,91	1,13	2,04	80	46,45	1,22	47,67

Ek 4.9. BT_2’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam CO emisyon miktarları (G_{tun,CO})

CO GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	70,00	ppm	Camb	1,00	ppm	Cadm-Camb	69,00	0,08	kg/m3	1,2000
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			CO yoğunluk (kg/m3)
hızı	otomobil	qCOu	qCO	orta yük.	qCOu	qCO	ağır vasıta	qCOu	qCO	Qtotat-CO
km/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	m3/h
20	438,64	16,44	87.076,09	11,24	13,23	1.795,81	57,96	22,80	15.955,64	104.827,54
30	292,42	11,54	40.750,55	7,49	15,50	1.403,01	38,64	28,23	13.173,62	55.327,18
40	219,32	15,83	41.927,51	5,62	21,69	1.471,88	28,98	35,68	12.485,76	55.885,14
50	175,45	16,18	34.295,01	4,50	23,09	1.253,86	23,18	42,17	11.806,94	47.355,81
60	146,21	18,06	31.893,57	3,75	24,48	1.107,67	19,32	48,23	11.251,93	44.253,18
70	125,32	27,39	41.456,83	3,21	34,81	1.349,85	16,56	54,21	10.840,37	53.647,06
80	109,66	39,08	51.761,63	2,81	47,67	1.617,74	14,49	62,11	10.868,73	64.248,10

EK-4 (devamı). Batı tüpü 2 (BT_2) bölümü emisyon hesapları

Ek 4.13. BT_2’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, NO_x emisyon tablosu

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	6,60	8,70	11,70	15,90	27,70	23,57	8,0138
30	7,20	10,10	14,40	20,40	34,00	29,24	9,9416
40	6,90	10,20	15,70	23,80	40,20	34,46	11,7164
50	6,50	10,40	17,10	27,20	41,40	36,43	12,3862
60	7,70	10,70	18,50	37,90	57,50	50,64	17,2176
70	9,00	16,60	29,60	48,60	73,60	64,85	22,049
80	9,40	20,00	43,20	75,60	108,60	97,05	32,997
fh	1,00						
ft	0,34						

Ek 4.14. BT_2’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (Ge)

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	55,30	76,20	88,70	98,80	104,10	102,25	22,4939
30	48,50	75,20	92,70	103,10	111,00	108,24	23,8117
40	41,60	69,30	105,30	119,20	141,20	133,50	29,37
50	33,10	64,20	111,80	129,80	167,10	154,05	33,8899
60	24,50	62,20	122,90	182,00	247,50	224,58	49,4065
70	16,30	57,50	134,00	234,20	328,00	295,17	64,9374
80	16,30	57,50	145,10	286,50	408,40	365,74	80,4617
fh	1,00						
ft	0,22						
fm	1,00						

Ek 4.15. BT_2’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, NO_x emisyon miktarları (Ge)

ağır vasıta (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	22,49	1,87	24,37
30	23,81	2,83	26,64
40	29,37	3,77	33,14
50	33,89	4,70	38,59
60	49,41	5,64	55,04
70	64,94	6,57	71,51
80	80,46	7,51	87,97

EK-4 (devamı). Batı tüpü 2 (BT_2) bölümü emisyon hesapları

Ek 4.16. BT_2’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, NO_x emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	1,61	0,28	1,89
30	1,99	0,43	2,42
40	2,38	0,55	2,93
50	2,54	0,70	3,24
60	3,14	0,83	3,96
70	3,73	0,98	4,71
80	4,48	1,13	5,61

otomobil/dizel (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	6,87	0,28	7,14
30	8,60	0,43	9,03
40	10,13	0,55	10,68
50	11,63	0,70	12,33
60	14,55	0,83	15,38
70	17,99	0,98	18,97
80	24,82	1,13	25,95

otomobil ortalama (NO _x)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	70%	30%	100%
km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	1,32	2,14	3,47
30	1,69	2,71	4,40
40	2,05	3,20	5,25
50	2,27	3,70	5,97
60	2,78	4,61	7,39
70	3,30	5,69	8,99
80	3,93	7,78	11,71

Ek 4.17. BT_2’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, NO_x emisyon miktarları (G_e)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	1,32	0,28	1,59
30	1,95	0,43	2,38
40	2,29	0,55	2,84
50	2,54	0,70	3,24
60	2,77	0,83	3,60
70	3,38	0,98	4,35
80	4,15	1,13	5,27

orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	8,01	0,28	8,29
30	9,94	0,43	10,37
40	11,72	0,55	12,27
50	12,39	0,70	13,09
60	17,22	0,83	18,05
70	22,05	0,98	23,03
80	33,00	1,13	34,12

orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (NO _x)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	0,64	4,97	5,61
30	0,95	6,22	7,17
40	1,14	7,36	8,50
50	1,30	7,85	9,15
60	1,44	10,83	12,27
70	1,74	13,82	15,56
80	2,11	20,47	22,58

Ek 4.18. BT_2’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam NO_x emisyon miktarları (G_{tun,NO_x})

NO _x GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	1,00	ppm	Camb	0,00	ppm	Cadm-Camb	1,00	0,0019	g/m3	1,9000
										Nox yoğunluk kg/m3
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qNOu	qNO	oyt	qNOu	qNO	ağır vasıta	qNOu	qNO	Qtotall-NO
km/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	m3/h
20	438,64	3,47	799.938,12	11,24	5,61	33.196,17	57,96	24,37	743.240,87	1.576.375,16
30	292,42	4,40	677.382,40	7,49	7,17	28.277,85	38,64	26,64	541.761,65	1.247.421,90
40	219,32	5,25	606.481,51	5,62	8,50	25.134,08	28,98	33,14	505.371,31	1.136.986,90
50	175,45	5,97	551.270,10	4,50	9,15	21.648,07	23,18	38,59	470.867,42	1.043.785,60
60	146,21	7,39	568.641,14	3,75	12,27	24.191,21	19,32	55,04	559.675,23	1.152.507,57
70	125,32	8,99	592.710,56	3,21	15,56	26.293,81	16,56	71,51	623.234,00	1.242.238,37
80	109,66	11,71	675.838,78	2,81	22,58	33.396,63	14,49	87,97	670.852,74	1.380.088,15

EK-4 (devamı). Batı tüpü 2 (BT_2) bölümü emisyon hesapları

Ek 4.22. BT_2’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (m2/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	2,30	2,80	3,30	3,80	4,60	4,32	0,91
30	2,30	2,90	3,50	4,70	5,90	5,48	1,15
40	2,80	3,30	4,20	5,40	7,20	6,57	1,38
50	2,70	3,70	4,80	6,10	8,80	7,86	1,65
60	3,00	4,20	5,90	7,20	10,50	9,35	1,96
70	3,30	4,60	6,90	9,80	12,20	11,36	2,39
80	4,60	6,40	9,10	12,30	14,80	13,93	2,92
fh	1,00						
ft	0,21						

Ek 4.23. BT_2’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (m2/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	4,30	5,60	6,50	7,40	8,50	8,12	7,38
30	4,10	5,60	6,80	8,40	9,90	9,38	8,53
40	3,90	5,80	8,00	10,50	12,90	12,06	10,97
50	3,70	5,80	8,60	11,90	14,90	13,85	12,60
60	3,70	6,00	9,30	14,30	19,30	17,55	15,97
70	3,80	6,30	10,10	16,70	23,60	21,19	19,28
80	3,70	6,60	12,30	19,40	28,00	24,99	22,74
fh	1,00						
ft	0,91						
fm	1,00						

Ek 4.24. BT_2’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, bulanıklık miktarları (Ge)

ağır vasıta (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	7,38	8,80	16,18
30	8,53	13,30	21,83
40	10,97	17,70	28,67
50	12,60	22,10	34,70
60	15,97	26,50	42,47
70	19,28	30,90	50,18
80	22,74	35,30	58,04

EK-4 (devamı). Batı tüpü 2 (BT_2) bölümü emisyon hesapları

Ek 4.25. BT_2’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,19	1,30	1,49
30	0,25	2,00	2,25
40	0,34	2,60	2,94
50	0,34	3,30	3,64
60	0,49	3,90	4,39
70	0,71	4,60	5,31
80	1,05	5,30	6,35

otomobil/dizel (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,72	1,30	2,02
30	0,84	2,00	2,84
40	1,05	2,60	3,65
50	1,29	3,30	4,59
60	1,49	3,90	5,39
70	1,63	4,60	6,23
80	2,03	5,30	7,33

otomobil ortalama (bulanıklık)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,59	1,21	1,81
30	0,90	1,71	2,61
40	1,18	2,19	3,37
50	1,46	2,76	4,21
60	1,76	3,23	4,99
70	2,12	3,74	5,86
80	2,54	4,40	6,94

Ek 4.26. BT_2’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

hafif yüklü ticari araç/benzin (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,21	1,30	1,51
30	0,31	2,00	2,31
40	0,57	2,60	3,17
50	0,52	3,30	3,82
60	0,78	3,90	4,68
70	1,56	4,60	6,16
80	2,76	5,30	8,06

hafif yüklü ticari araç/dizel (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,91	1,30	2,21
30	1,15	2,00	3,15
40	1,38	2,60	3,98
50	1,65	3,30	4,95
60	1,96	3,90	5,86
70	2,39	4,60	6,99
80	2,92	5,30	8,22

hafif yüklü ticari araç ortalama (bulanıklık)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,60	1,32	1,93
30	0,92	1,89	2,82
40	1,27	2,39	3,66
50	1,53	2,97	4,50
60	1,87	3,52	5,39
70	2,47	4,19	6,66
80	3,22	4,93	8,16

Ek 4.27. BT_2’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam bulanıklık emisyon miktarları ($G_{tun, bulanıklık}$)

GÖRÜŞ MESAFESİ İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
							K	0,007	m-1	
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qPMu	qPM	oyt	qPMu	qPM	ağır vasıta	qPMu	qPM	Qtotat-PM
km/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	m3/h
20	438,64	1,81	113.356,51	11,24	1,93	3.095,57	57,96	16,18	133.998,50	250.450,57
30	292,42	2,61	108.842,53	7,49	2,82	3.013,38	38,64	21,83	120.499,14	232.355,05
40	219,32	3,37	105.504,31	5,62	3,66	2.935,66	28,98	28,67	118.703,63	227.143,60
50	175,45	4,21	105.571,73	4,50	4,50	2.888,87	23,18	34,70	114.929,07	223.389,67
60	146,21	4,99	104.251,69	3,75	5,39	2.884,78	19,32	42,47	117.209,48	224.345,95
70	125,32	5,86	104.964,88	3,21	6,66	3.053,75	16,56	50,18	118.698,42	226.717,05
80	109,66	6,94	108.643,84	2,81	8,16	3.274,88	14,49	58,04	120.135,33	232.054,06

EK-4 (devamı). Batı tüpü 2 (BT_2) bölümü emisyon hesapları

Ek 4.28. BT_2’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı, gerekli asgari taze hava miktarları

EMİSYON GİDERMEK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARLARI							
trafik	CO	TOPLAM	NO2	TOPLAM	BULANIKLIK	TOPLAM	DİZAYN DEĞERİ
hızı	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA
km/h	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/s
20	104.827,54	29,12	315.275,03	87,58	250.450,57	69,57	87,58
30	55.327,18	15,37	249.484,38	69,30	232.355,05	64,54	69,30
40	55.885,14	15,52	227.397,38	63,17	227.143,60	63,10	63,17
50	47.355,81	13,15	208.757,12	57,99	223.389,67	62,05	62,05
60	44.253,18	12,29	230.501,51	64,03	224.345,95	62,32	64,03
70	53.647,06	14,90	248.447,67	69,01	226.717,05	62,98	69,01
80	64.248,10	17,85	276.017,63	76,67	232.054,06	64,46	76,67

Ek-5. Batı tüpü 3, pozitif eğim (BT 2.1) bölümü emisyon hesapları

Ek 5.1. BT 3’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim benzinli PC, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ OTOMOBİL/BENZİN (PC) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	10,20	12,60	15,50	22,70	35,40	30,96	21,98
30	9,30	11,10	13,70	17,30	22,80	20,88	14,82
40	10,30	12,90	16,40	22,30	33,20	29,39	20,86
50	11,80	14,00	18,20	23,80	33,10	29,85	21,19
60	11,40	13,30	18,20	25,30	37,80	33,43	23,73
70	13,30	17,90	25,60	36,40	60,40	52,00	36,92
80	16,20	21,10	31,00	49,80	89,10	75,35	53,49
fh	1,00						
ft	0,71						

Ek 5.2. BT 3’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel PC, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ OTOMOBİL/DİZEL (PC) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	1,00	1,30	2,80	3,30	3,60	3,50	2,59
30	1,20	1,40	2,40	3,00	3,50	3,33	2,46
40	1,20	1,40	2,00	2,70	3,20	3,03	2,24
50	1,10	1,40	1,80	2,60	3,10	2,93	2,16
60	1,10	1,20	1,60	2,40	3,00	2,79	2,06
70	1,10	1,20	1,60	2,10	2,80	2,56	1,89
80	1,10	1,20	1,60	2,10	2,40	2,30	1,70
fh	1,00						
ft	0.74						

Ek 5.3. BT 3’de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim benzinli LCV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/BENZİN (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	40,10	46,80	51,70	58,30	67,80	64,48	31,59
30	42,20	51,90	57,90	66,50	79,70	75,08	36,79
40	43,20	57,40	67,80	86,20	116,50	105,90	51,89
50	44,20	57,60	70,00	90,00	124,00	112,10	54,93
60	47,10	61,20	69,30	93,80	131,60	118,37	58,00
70	51,80	71,90	90,80	126,50	193,50	170,05	83,32
80	61,60	81,30	98,30	164,50	272,50	234,70	115,00
fh	1,00						
ft	0,49						

Ek-5 (devamı). Batı tüpü 3, pozitif eğim (BT_2.1) bölümü emisyon hesapları

Ek 5.4. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	1,20	1,50	1,80	1,90	2,10	2,03	0,53
30	1,30	1,60	2,00	2,20	2,40	2,33	0,61
40	1,30	1,70	2,00	2,30	2,50	2,43	0,63
50	1,40	1,70	2,10	2,50	2,80	2,70	0,70
60	1,40	1,70	2,10	2,70	3,00	2,90	0,75
70	1,60	1,80	2,30	3,00	3,30	3,20	0,83
80	1,70	1,90	2,50	3,30	3,60	3,50	0,91
fh	1,00						
ft	0,26						

Ek 5.5. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	11,40	17,80	22,30	26,20	30,60	29,06	20,92
30	10,10	18,30	23,90	30,60	37,80	35,28	25,40
40	8,70	18,80	26,90	37,30	48,10	44,32	31,91
50	6,20	19,30	29,40	43,20	56,80	52,04	37,47
60	6,10	19,80	34,90	53,30	62,30	59,15	42,59
70	6,10	20,30	40,30	63,10	67,80	66,16	47,63
80	6,10	20,70	45,80	73,30	77,20	75,84	54,60
fh	1,00						
ft	0,72						
fm	1,00						

Ek 5.6. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (Ge)

ağır vasıta (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	20,92	1,87	22,80
30	25,40	2,83	28,23
40	31,91	3,77	35,68
50	37,47	4,70	42,17
60	42,59	5,64	48,23
70	47,63	6,57	54,21
80	54,60	7,51	62,11

Ek-5 (devamı). Batı tüpü 3, pozitif eğim (BT_2.1) bölümü emisyon hesapları

Ek 5.7. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, CO emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (CO)				otomobil/dizel (CO)				otomobil ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	70%	30%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	21,98	0,28	22,25	20	2,59	0,28	2,86	20	15,58	0,86	16,44
30	14,82	0,43	15,25	30	2,46	0,43	2,89	30	10,67	0,87	11,54
40	20,86	0,55	21,42	40	2,24	0,55	2,79	40	14,99	0,84	15,83
50	21,19	0,70	21,89	50	2,16	0,70	2,87	50	15,32	0,86	16,18
60	23,73	0,83	24,56	60	2,06	0,83	2,89	60	17,19	0,87	18,06
70	36,92	0,98	37,90	70	1,89	0,98	2,87	70	26,53	0,86	27,39
80	53,49	1,13	54,62	80	1,70	1,13	2,83	80	38,24	0,85	39,08

Ek 5.8. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, CO emisyon miktarları (G_e)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	40%	60%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	31,59	0,28	31,87	20	0,53	0,28	0,80	20	12,75	0,48	13,23
30	36,79	0,43	37,21	30	0,61	0,43	1,03	30	14,89	0,62	15,50
40	51,89	0,55	52,44	40	0,63	0,55	1,18	40	20,98	0,71	21,69
50	54,93	0,70	55,63	50	0,70	0,70	1,40	50	22,25	0,84	23,09
60	58,00	0,83	58,83	60	0,75	0,83	1,58	60	23,53	0,95	24,48
70	83,32	0,98	84,30	70	0,83	0,98	1,81	70	33,72	1,09	34,81
80	115,00	1,13	116,13	80	0,91	1,13	2,04	80	46,45	1,22	47,67

Ek 5.9. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam CO emisyon miktarları ($G_{\text{tun,CO}}$)

CO GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	70,00	ppm	Camb	1,00	ppm	Cadm-Camb	69,00	0,08	kg/m3	1,2000
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			CO yoğunluk (kg/m3)
hızı	otomobil	qCOu	qCO	orta yük.	qCOu	qCO	ağır vasıta	qCOu	qCO	Qtotat-CO
km/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	m3/h
20	230,69	16,44	45.795,58	5,91	13,23	944,46	30,48	22,80	8.391,48	55.131,52
30	153,79	11,54	21.431,77	3,94	15,50	737,88	20,32	28,23	6.928,35	29.098,00
40	115,34	15,83	22.050,76	2,96	21,69	774,10	15,24	35,68	6.566,58	29.391,44
50	92,28	16,18	18.036,63	2,36	23,09	659,44	12,19	42,17	6.209,58	24.905,65
60	76,90	18,06	16.773,66	1,97	24,48	582,55	10,16	48,23	5.917,68	23.273,89
70	65,91	27,39	21.803,22	1,69	34,81	709,92	8,71	54,21	5.701,23	28.214,38
80	57,67	39,08	27.222,78	1,48	47,67	850,81	7,62	62,11	5.716,15	33.789,74

Ek-5 (devamı). Batı tüpü 3, pozitif eğim (BT_2.1) bölümü emisyon hesapları

Ek 5.13. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, NO_x emisyon tablosu

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	6,60	8,70	11,70	15,90	27,70	23,57	8,0138
30	7,20	10,10	14,40	20,40	34,00	29,24	9,9416
40	6,90	10,20	15,70	23,80	40,20	34,46	11,7164
50	6,50	10,40	17,10	27,20	41,40	36,43	12,3862
60	7,70	10,70	18,50	37,90	57,50	50,64	17,2176
70	9,00	16,60	29,60	48,60	73,60	64,85	22,049
80	9,40	20,00	43,20	75,60	108,60	97,05	32,997
fh	1,00						
ft	0,34						

Ek 5.14. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (Ge)

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	55,30	76,20	88,70	98,80	104,10	102,25	22,4939
30	48,50	75,20	92,70	103,10	111,00	108,24	23,8117
40	41,60	69,30	105,30	119,20	141,20	133,50	29,37
50	33,10	64,20	111,80	129,80	167,10	154,05	33,8899
60	24,50	62,20	122,90	182,00	247,50	224,58	49,4065
70	16,30	57,50	134,00	234,20	328,00	295,17	64,9374
80	16,30	57,50	145,10	286,50	408,40	365,74	80,4617
fh	1,00						
ft	0,22						
fm	1,00						

Ek 5.15. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, NO_x emisyon miktarları (Ge)

ağır vasıta (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	22,49	1,87	24,37
30	23,81	2,83	26,64
40	29,37	3,77	33,14
50	33,89	4,70	38,59
60	49,41	5,64	55,04
70	64,94	6,57	71,51
80	80,46	7,51	87,97

Ek-5 (devamı). Batı tüpü 3, pozitif eğim (BT_2.1) bölümü emisyon hesapları

Ek 5.16. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, NO_x emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	1,61	0,28	1,89
30	1,99	0,43	2,42
40	2,38	0,55	2,93
50	2,54	0,70	3,24
60	3,14	0,83	3,96
70	3,73	0,98	4,71
80	4,48	1,13	5,61

otomobil/dizel (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	6,87	0,28	7,14
30	8,60	0,43	9,03
40	10,13	0,55	10,68
50	11,63	0,70	12,33
60	14,55	0,83	15,38
70	17,99	0,98	18,97
80	24,82	1,13	25,95

otomobil ortalama (NO _x)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	70%	30%	100%
km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	1,32	2,14	3,47
30	1,69	2,71	4,40
40	2,05	3,20	5,25
50	2,27	3,70	5,97
60	2,78	4,61	7,39
70	3,30	5,69	8,99
80	3,93	7,78	11,71

Ek 5.17. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, NO_x emisyon miktarları (G_e)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	1,32	0,28	1,59
30	1,95	0,43	2,38
40	2,29	0,55	2,84
50	2,54	0,70	3,24
60	2,77	0,83	3,60
70	3,38	0,98	4,35
80	4,15	1,13	5,27

orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	8,01	0,28	8,29
30	9,94	0,43	10,37
40	11,72	0,55	12,27
50	12,39	0,70	13,09
60	17,22	0,83	18,05
70	22,05	0,98	23,03
80	33,00	1,13	34,12

orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (NO _x)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	0,64	4,97	5,61
30	0,95	6,22	7,17
40	1,14	7,36	8,50
50	1,30	7,85	9,15
60	1,44	10,83	12,27
70	1,74	13,82	15,56
80	2,11	20,47	22,58

Ek 5.18. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam NO_x emisyon miktarları (G_{tun,NO_x})

NO _x GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	1,00	ppm	Camb	0,00	ppm	Cadm-Camb	1,00	0,0019	g/m3	1,9000
										Nox yoğunluk kg/m3
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qNOu	qNO	oyt	qNOu	qNO	ağır vasıta	qNOu	qNO	Qtotat-NO
km/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	m3/h
20	230,69	3,47	420.708,20	5,91	5,61	17.458,72	30,48	24,37	390.889,64	829.056,56
30	153,79	4,40	356.252,97	3,94	7,17	14.872,05	20,32	26,64	284.926,50	656.051,52
40	115,34	5,25	318.964,35	2,96	8,50	13.218,66	15,24	33,14	265.787,87	597.970,89
50	92,28	5,97	289.927,24	2,36	9,15	11.385,28	12,19	38,59	247.641,39	548.953,91
60	76,90	7,39	299.063,12	1,97	12,27	12.722,78	10,16	55,04	294.347,71	606.133,61
70	65,91	8,99	311.721,85	1,69	15,56	13.828,60	8,71	71,51	327.774,92	653.325,36
80	57,67	11,71	355.441,14	1,48	22,58	17.564,15	7,62	87,97	352.818,85	725.824,14

Ek-5 (devamı). Batı tüpü 3, pozitif eğim (BT_2.1) bölümü emisyon hesapları

Ek 5.22. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (m2/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	2,30	2,80	3,30	3,80	4,60	4,32	0,91
30	2,30	2,90	3,50	4,70	5,90	5,48	1,15
40	2,80	3,30	4,20	5,40	7,20	6,57	1,38
50	2,70	3,70	4,80	6,10	8,80	7,86	1,65
60	3,00	4,20	5,90	7,20	10,50	9,35	1,96
70	3,30	4,60	6,90	9,80	12,20	11,36	2,39
80	4,60	6,40	9,10	12,30	14,80	13,93	2,92
fh	1,00						
ft	0,21						

Ek 5.23. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASİTA/DİZEL (HGV) (m2/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	3,3	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	4,30	5,60	6,50	7,40	8,50	8,12	7,38
30	4,10	5,60	6,80	8,40	9,90	9,38	8,53
40	3,90	5,80	8,00	10,50	12,90	12,06	10,97
50	3,70	5,80	8,60	11,90	14,90	13,85	12,60
60	3,70	6,00	9,30	14,30	19,30	17,55	15,97
70	3,80	6,30	10,10	16,70	23,60	21,19	19,28
80	3,70	6,60	12,30	19,40	28,00	24,99	22,74
fh	1,00						
ft	0,91						
fm	1,00						

Ek 5.24. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	7,38	8,80	16,18
30	8,53	13,30	21,83
40	10,97	17,70	28,67
50	12,60	22,10	34,70
60	15,97	26,50	42,47
70	19,28	30,90	50,18
80	22,74	35,30	58,04

Ek-5 (devamı). Batı tüpü 3, pozitif eğim (BT_2.1) bölümü emisyon hesapları

Ek 5.25. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,19	1,30	1,49
30	0,25	2,00	2,25
40	0,34	2,60	2,94
50	0,34	3,30	3,64
60	0,49	3,90	4,39
70	0,71	4,60	5,31
80	1,05	5,30	6,35

otomobil/dizel (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,72	1,30	2,02
30	0,84	2,00	2,84
40	1,05	2,60	3,65
50	1,29	3,30	4,59
60	1,49	3,90	5,39
70	1,63	4,60	6,23
80	2,03	5,30	7,33

otomobil ortalama (bulanıklık)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,59	1,21	1,81
30	0,90	1,71	2,61
40	1,18	2,19	3,37
50	1,46	2,76	4,21
60	1,76	3,23	4,99
70	2,12	3,74	5,86
80	2,54	4,40	6,94

Ek 5.26. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

hafif yüklü ticari araç/benzin (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,21	1,30	1,51
30	0,31	2,00	2,31
40	0,57	2,60	3,17
50	0,52	3,30	3,82
60	0,78	3,90	4,68
70	1,56	4,60	6,16
80	2,76	5,30	8,06

hafif yüklü ticari araç/dizel (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,91	1,30	2,21
30	1,15	2,00	3,15
40	1,38	2,60	3,98
50	1,65	3,30	4,95
60	1,96	3,90	5,86
70	2,39	4,60	6,99
80	2,92	5,30	8,22

hafif yüklü ticari araç ortalama (bulanıklık)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,60	1,32	1,93
30	0,92	1,89	2,82
40	1,27	2,39	3,66
50	1,53	2,97	4,50
60	1,87	3,52	5,39
70	2,47	4,19	6,66
80	3,22	4,93	8,16

Ek 5.27. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam bulanıklık emisyon miktarları ($G_{\text{tun, bulanıklık}}$)

GÖRÜŞ MESAFESİ İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qPMu	qPM	oyt	qPMu	qPM	ağır vasıta	qPMu	qPM	Qtotal-PM
km/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	m3/h
20	230,69	1,81	59.617,13	5,91	1,93	1.628,04	30,48	16,18	70.473,28	131.718,45
30	153,79	2,61	57.243,11	3,94	2,82	1.584,81	20,32	21,83	63.373,62	122.201,55
40	115,34	3,37	55.487,45	2,96	3,66	1.543,94	15,24	28,67	62.429,32	119.460,71
50	92,28	4,21	55.522,91	2,36	4,50	1.519,33	12,19	34,70	60.444,18	117.486,42
60	76,90	4,99	54.828,67	1,97	5,39	1.517,18	10,16	42,47	61.643,50	117.989,35
70	65,91	5,86	55.203,75	1,69	6,66	1.606,04	8,71	50,18	62.426,58	119.236,37
80	57,67	6,94	57.138,61	1,48	8,16	1.722,34	7,62	58,04	63.182,29	122.043,24

Ek-5 (devamı). Batı tüpü 3, pozitif eğim (BT_2.1) bölümü emisyon hesapları

Ek 5.28. BT_3'de, %3,3 eğimde, hıza bağlı, gerekli asgari taze hava miktarları

EMİSYON GİDERMEK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARLARI							
trafik	CO	TOPLAM	NO2	TOPLAM	BULANIKLIK	TOPLAM	DİZAYN DEĞERİ
hızı	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA
km/h	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/s
20	55.131,52	15,31	165.811,31	46,06	131.718,45	36,59	46,06
30	29.098,00	8,08	131.210,30	36,45	122.201,55	33,94	36,45
40	29.391,44	8,16	119.594,18	33,22	119.460,71	33,18	33,22
50	24.905,65	6,92	109.790,78	30,50	117.486,42	32,64	32,64
60	23.273,89	6,46	121.226,72	33,67	117.989,35	32,77	33,67
70	28.214,38	7,84	130.665,07	36,30	119.236,37	33,12	36,30
80	33.789,74	9,39	145.164,83	40,32	122.043,24	33,90	40,32

EK-6 (devamı). Batı tüpü 3, negatif eğim (BT_2.2) bölümü emisyon hesapları

Ek 6.4. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-0,85	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	1,20	1,50	1,80	1,90	2,10	1,67	0,43
30	1,30	1,60	2,00	2,20	2,40	1,83	0,48
40	1,30	1,70	2,00	2,30	2,50	1,87	0,49
50	1,40	1,70	2,10	2,50	2,80	1,93	0,50
60	1,40	1,70	2,10	2,70	3,00	1,93	0,50
70	1,60	1,80	2,30	3,00	3,30	2,09	0,54
80	1,70	1,90	2,50	3,30	3,60	2,25	0,58
fh	1,00						
ft	0,26						

Ek 6.5. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-0,85	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	11,40	17,80	22,30	26,20	30,60	20,39	14,68
30	10,10	18,30	23,90	30,60	37,80	21,52	15,49
40	8,70	18,80	26,90	37,30	48,10	23,46	16,89
50	6,20	19,30	29,40	43,20	56,80	25,11	18,08
60	6,10	19,80	34,90	53,30	62,30	28,48	20,51
70	6,10	20,30	40,30	63,10	67,80	31,80	22,90
80	6,10	20,70	45,80	73,30	77,20	35,13	25,30
fh	1,00						
ft	0,72						
fm	1,00						

Ek 6.6. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	14,68	1,87	16,55
30	15,49	2,83	18,32
40	16,89	3,77	20,66
50	18,08	4,70	22,78
60	20,51	5,64	26,15
70	22,90	6,57	29,47
80	25,30	7,51	32,81

EK-6 (devamı). Batı tüpü 3, negatif eğim (BT_2.2) bölümü emisyon hesapları

Ek 6.7. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim PC, CO emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (CO)				otomobil/dizel (CO)				otomobil ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	70%	30%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	10,13	0,28	10,41	20	1,60	0,28	1,88	20	7,28	0,56	7,85
30	8,94	0,43	9,37	30	1,46	0,43	1,89	30	6,56	0,57	7,12
40	10,59	0,55	11,14	40	1,29	0,55	1,84	40	7,80	0,55	8,35
50	11,65	0,70	12,36	50	1,21	0,70	1,91	50	8,65	0,57	9,22
60	11,44	0,83	12,27	60	1,06	0,83	1,89	60	8,59	0,57	9,16
70	15,85	0,98	16,83	70	1,06	0,98	2,04	70	11,78	0,61	12,39
80	19,02	1,13	20,15	80	1,06	1,13	2,19	80	14,11	0,66	14,76

Ek 6.8. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim LCV, CO emisyon miktarları (G_e)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	40%	60%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	24,31	0,28	24,59	20	0,43	0,28	0,71	20	9,84	0,43	10,26
30	27,12	0,43	27,55	30	0,48	0,43	0,90	30	11,02	0,54	11,56
40	31,06	0,55	31,61	40	0,49	0,55	1,04	40	12,64	0,62	13,27
50	31,72	0,70	32,42	50	0,50	0,70	1,20	50	12,97	0,72	13,69
60	32,27	0,83	33,10	60	0,50	0,83	1,33	60	13,24	0,80	14,04
70	40,56	0,98	41,53	70	0,54	0,98	1,52	70	16,61	0,91	17,53
80	44,63	1,13	45,75	80	0,58	1,13	1,71	80	18,30	1,03	19,33

Ek 6.9. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı, toplam CO emisyon miktarları ($G_{\text{tun,CO}}$)

CO GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	70,00	ppm	Camb	1,00	ppm	Cadm-Camb	69,00	0,08	kg/m3	1,2000
										CO yoğunluk (kg/m3)
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qCOu	qCO	orta yük.	qCOu	qCO	ağır vasıta	qCOu	qCO	Qtotat-CO
km/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	m3/h
20	345,49	7,85	32.745,13	8,85	10,26	1.097,18	45,65	16,55	9.125,01	42.967,32
30	230,33	7,12	19.816,32	5,90	11,56	823,90	30,43	18,32	6.734,94	27.375,16
40	172,75	8,35	17.425,06	4,43	13,27	709,24	22,82	20,66	5.693,81	23.828,10
50	138,20	9,22	15.392,37	3,54	13,69	585,46	18,26	22,78	5.023,48	21.001,30
60	115,16	9,16	12.737,12	2,95	14,04	500,31	15,22	26,15	4.804,84	18.042,27
70	98,71	12,39	14.774,59	2,53	17,53	535,37	13,04	29,47	4.642,15	19.952,12
80	86,37	14,76	15.398,00	2,21	19,33	516,61	11,41	32,81	4.521,62	20.436,23

EK-6 (devamı). Batı tüpü 3, negatif eğim (BT_2.2) bölümü emisyon hesapları

Ek 6.13. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, NO_x emisyon tablosu

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-0,85	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	6,60	8,70	11,70	15,90	27,70	10,43	3,5445
30	7,20	10,10	14,40	20,40	34,00	12,57	4,27465
40	6,90	10,20	15,70	23,80	40,20	13,36	4,54325
50	6,50	10,40	17,10	27,20	41,40	14,25	4,84585
60	7,70	10,70	18,50	37,90	57,50	15,19	5,1629
70	9,00	16,60	29,60	48,60	73,60	24,08	8,1855
80	9,40	20,00	43,20	75,60	108,60	33,34	11,3356
fh	1,00						
ft	0,34						

Ek 6.14. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (G_e)

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-0,85	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	55,30	76,20	88,70	98,80	104,10	83,39	18,34525
30	48,50	75,20	92,70	103,10	111,00	85,26	18,75775
40	41,60	69,30	105,30	119,20	141,20	90,00	19,8
50	33,10	64,20	111,80	129,80	167,10	91,57	20,1454
60	24,50	62,20	122,90	182,00	247,50	97,10	21,36255
70	16,30	57,50	134,00	234,20	328,00	101,49	22,32725
80	16,30	57,50	145,10	286,50	408,40	107,87	23,7314
fh	1,00						
ft	0,22						
fm	1,00						

Ek 6.15. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim HGV, NO_x emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	18,35	1,87	20,22
30	18,76	2,83	21,59
40	19,80	3,77	23,57
50	20,15	4,70	24,85
60	21,36	5,64	27,00
70	22,33	6,57	28,90
80	23,73	7,51	31,24

EK-6 (devamı). Batı tüpü 3, negatif eğim (BT_2.2) bölümü emisyon hesapları

Ek 6.16. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim PC, NO_x emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	1,12	0,28	1,39
30	1,22	0,43	1,65
40	1,40	0,55	1,95
50	1,41	0,70	2,11
60	1,57	0,83	2,40
70	1,72	0,98	2,70
80	2,18	1,13	3,30

otomobil/dizel (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	4,28	0,28	4,56
30	4,92	0,43	5,35
40	5,33	0,55	5,89
50	5,72	0,70	6,42
60	6,60	0,83	7,43
70	7,86	0,98	8,84
80	8,98	1,13	10,10

otomobil ortalama (NO _x)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	70%	30%	100%
km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	0,97	1,37	2,34
30	1,15	1,60	2,76
40	1,37	1,77	3,13
50	1,48	1,93	3,40
60	1,68	2,23	3,91
70	1,89	2,65	4,54
80	2,31	3,03	5,34

Ek 6.17. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim LCV, NO_x emisyon miktarları (G_e)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	0,80	0,28	1,07
30	0,92	0,43	1,34
40	0,97	0,55	1,52
50	1,00	0,70	1,70
60	1,19	0,83	2,02
70	1,45	0,98	2,42
80	1,90	1,13	3,03

orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	3,54	0,28	3,82
30	4,27	0,43	4,70
40	4,54	0,55	5,10
50	4,85	0,70	5,55
60	5,16	0,83	5,99
70	8,19	0,98	9,16
80	11,34	1,13	12,46

orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (NO _x)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	0,43	2,29	2,72
30	0,54	2,82	3,36
40	0,61	3,06	3,67
50	0,68	3,33	4,01
60	0,81	3,60	4,41
70	0,97	5,50	6,47
80	1,21	7,48	8,69

Ek 6.18. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı, toplam NO_x emisyon miktarları (G_{tun,NO_x})

NO _x GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	1,00	ppm	Camb	0,00	ppm	Cadm-Camb	1,00	0,0019	g/m3	1,9000
										Nox yoğunluk kg/m3
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qNOu	qNO	oyt	qNOu	qNO	ağır vasıta	qNOu	qNO	Qtotat-NO
km/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	m3/h
20	345,49	2,34	425.832,02	8,85	2,72	12.679,66	45,65	20,22	485.742,51	924.254,19
30	230,33	2,76	334.398,62	5,90	3,36	10.429,88	30,43	21,59	345.770,99	690.599,49
40	172,75	3,13	284.910,44	4,43	3,67	8.543,22	22,82	23,57	283.094,75	576.548,40
50	138,20	3,40	247.644,45	3,54	4,01	7.469,51	18,26	24,85	238.792,06	493.906,02
60	115,16	3,91	236.777,97	2,95	4,41	6.841,28	15,22	27,00	216.238,42	459.857,67
70	98,71	4,54	236.056,81	2,53	6,47	8.610,54	13,04	28,90	198.395,74	443.063,08
80	86,37	5,34	242.888,80	2,21	8,69	10.120,24	11,41	31,24	187.653,25	440.662,29

EK-6 (devamı). Batı tüpü 3, negatif eğim (BT_2.2) bölümü emisyon hesapları

Ek 6.22. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (m ² /h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-0,85	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	2,30	2,80	3,30	3,80	4,60	3,09	0,65
30	2,30	2,90	3,50	4,70	5,90	3,25	0,68
40	2,80	3,30	4,20	5,40	7,20	3,82	0,80
50	2,70	3,70	4,80	6,10	8,80	4,33	0,91
60	3,00	4,20	5,90	7,20	10,50	5,18	1,09
70	3,30	4,60	6,90	9,80	12,20	5,92	1,24
80	4,60	6,40	9,10	12,30	14,80	7,95	1,67
fh	1,00						
ft	0,21						

Ek 6.23. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASİTA/DİZEL (HGV) (m ² /h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-0,85	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	4,30	5,60	6,50	7,40	8,50	6,12	5,57
30	4,10	5,60	6,80	8,40	9,90	6,29	5,72
40	3,90	5,80	8,00	10,50	12,90	7,07	6,43
50	3,70	5,80	8,60	11,90	14,90	7,41	6,74
60	3,70	6,00	9,30	14,30	19,30	7,90	7,19
70	3,80	6,30	10,10	16,70	23,60	8,49	7,72
80	3,70	6,60	12,30	19,40	28,00	9,88	8,99
fh	1,00						
ft	0,91						
fm	1,00						

Ek 6.24. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim HGV, bulanıklık emisyon miktarları (Ge)

ağır vasıta (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m ² /h	m ² /h	m ² /h
20	5,57	8,80	14,37
30	5,72	13,30	19,02
40	6,43	17,70	24,13
50	6,74	22,10	28,84
60	7,19	26,50	33,69
70	7,72	30,90	38,62
80	8,99	35,30	44,29

EK-6 (devamı). Batı tüpü 3, negatif eğim (BT_2.2) bölümü emisyon hesapları

Ek 6.25. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim PC, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (bulanıklık)				otomobil/dizel (bulanıklık)				otomobil ortalama (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h	km/h	m2/h	m2/h	m2/h	km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,15	1,30	1,45	20	0,55	1,30	1,85	20	0,58	1,11	1,69
30	0,15	2,00	2,15	30	0,60	2,00	2,60	30	0,86	1,56	2,42
40	0,19	2,60	2,79	40	0,69	2,60	3,29	40	1,11	1,97	3,09
50	0,19	3,30	3,49	50	0,79	3,30	4,09	50	1,39	2,46	3,85
60	0,24	3,90	4,14	60	0,83	3,90	4,73	60	1,66	2,84	4,49
70	0,28	4,60	4,88	70	0,96	4,60	5,56	70	1,95	3,33	5,29
80	0,39	5,30	5,69	80	1,11	5,30	6,41	80	2,27	3,85	6,12

Ek 6.26. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim LCV, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

hafif yüklü ticari araç/benzin (bulanıklık)				hafif yüklü ticari araç/dizel (bulanıklık)				hafif yüklü ticari araç ortalama (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h	km/h	m2/h	m2/h	m2/h	km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,08	1,30	1,38	20	0,65	1,30	1,95	20	0,55	1,17	1,72
30	0,08	2,00	2,08	30	0,68	2,00	2,68	30	0,83	1,61	2,44
40	0,12	2,60	2,72	40	0,80	2,60	3,40	40	1,09	2,04	3,13
50	0,16	3,30	3,46	50	0,91	3,30	4,21	50	1,38	2,53	3,91
60	0,20	3,90	4,10	60	1,09	3,90	4,99	60	1,64	2,99	4,63
70	0,37	4,60	4,97	70	1,24	4,60	5,84	70	1,99	3,51	5,50
80	0,64	5,30	5,94	80	1,67	5,30	6,97	80	2,38	4,18	6,56

Ek 6.27. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı, toplam bulanıklık emisyon miktarları ($G_{\text{tun, bulanıklık}}$)

GÖRÜŞ MESAFESİ İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
							K	0,007	m-1	
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qPMu	qPM	oyt	qPMu	qPM	ağır vasıta	qPMu	qPM	Qttotal-PM
km/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	m3/h
20	345,49	1,69	83.399,28	8,85	1,72	2.175,91	45,65	14,37	93.690,62	179.265,82
30	230,33	2,42	79.658,50	5,90	2,44	2.057,49	30,43	19,02	82.706,68	164.422,67
40	172,75	3,09	76.199,09	4,43	3,13	1.979,60	22,82	24,13	78.676,37	156.855,06
50	138,20	3,85	76.010,32	3,54	3,91	1.977,39	18,26	28,84	75.237,47	153.225,19
60	115,16	4,49	73.890,82	2,95	4,63	1.953,28	15,22	33,69	73.226,76	149.070,87
70	98,71	5,29	74.546,03	2,53	5,50	1.985,63	13,04	38,62	71.960,09	148.491,74
80	86,37	6,12	75.547,34	2,21	6,56	2.073,82	11,41	44,29	72.204,37	149.825,53

EK-6 (devamı). Batı tüpü 3, negatif eğim (BT_2.2) bölümü emisyon hesapları

Ek 6.28. BT_3'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı, gerekli asgari taze hava miktarları

EMİSYON GİDERMEK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARLARI							
trafik	CO	TOPLAM	NO2	TOPLAM	BULANIKLIK	TOPLAM	DİZAYN DEĞERİ
hızı	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA
km/h	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/s
20	42.967,32	11,94	184.850,84	51,35	179.265,82	49,80	51,35
30	27.375,16	7,60	138.119,90	38,37	164.422,67	45,67	45,67
40	23.828,10	6,62	115.309,68	32,03	156.855,06	43,57	43,57
50	21.001,30	5,83	98.781,20	27,44	153.225,19	42,56	42,56
60	18.042,27	5,01	91.971,53	25,55	149.070,87	41,41	41,41
70	19.952,12	5,54	88.612,62	24,61	148.491,74	41,25	41,25
80	20.436,23	5,68	88.132,46	24,48	149.825,53	41,62	41,62

EK-7 (devamı). Batı tüpü 4, (BT_4) bölümü emisyon hesapları

Ek 7.4. BT_4'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-0,85	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	1,20	1,50	1,80	1,90	2,10	1,67	0,43
30	1,30	1,60	2,00	2,20	2,40	1,83	0,48
40	1,30	1,70	2,00	2,30	2,50	1,87	0,49
50	1,40	1,70	2,10	2,50	2,80	1,93	0,50
60	1,40	1,70	2,10	2,70	3,00	1,93	0,50
70	1,60	1,80	2,30	3,00	3,30	2,09	0,54
80	1,70	1,90	2,50	3,30	3,60	3,50	0,91
fh	1,00						
ft	0,26						

Ek 7.5. BT_4'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-0,85	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	11,40	17,80	22,30	26,20	30,60	20,39	14,68
30	10,10	18,30	23,90	30,60	37,80	21,52	15,49
40	8,70	18,80	26,90	37,30	48,10	23,46	16,89
50	6,20	19,30	29,40	43,20	56,80	25,11	18,08
60	6,10	19,80	34,90	53,30	62,30	28,48	20,51
70	6,10	20,30	40,30	63,10	67,80	31,80	22,90
80	6,10	20,70	45,80	73,30	77,20	35,13	25,30
fh	1,00						
ft	0,72						
fm	1,00						

Ek 7.6. BT_4'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	14,68	1,87	16,55
30	15,49	2,83	18,32
40	16,89	3,77	20,66
50	18,08	4,70	22,78
60	20,51	5,64	26,15
70	22,90	6,57	29,47
80	25,30	7,51	32,81

EK-7 (devamı). Batı tüpü 4, (BT_4) bölümü emisyon hesapları

Ek 7.7. BT_4'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim PC, CO emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (CO)				otomobil/dizel (CO)				otomobil ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	70%	30%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	10,13	0,28	10,41	20	1,60	0,28	1,88	20	7,28	0,56	7,85
30	8,94	0,43	9,37	30	1,46	0,43	1,89	30	6,56	0,57	7,12
40	10,59	0,55	11,14	40	1,29	0,55	1,84	40	7,80	0,55	8,35
50	11,65	0,70	12,36	50	1,21	0,70	1,91	50	8,65	0,57	9,22
60	11,44	0,83	12,27	60	1,06	0,83	1,89	60	8,59	0,57	9,16
70	15,85	0,98	16,83	70	1,06	0,98	2,04	70	11,78	0,61	12,39
80	19,02	1,13	20,15	80	1,06	1,13	2,19	80	14,11	0,66	14,76

Ek 7.8. BT_4'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim LCV, CO emisyon miktarları (G_e)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	40%	60%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	24,31	0,28	24,59	20	0,43	0,28	0,71	20	9,84	0,43	10,26
30	27,12	0,43	27,55	30	0,48	0,43	0,90	30	11,02	0,54	11,56
40	31,06	0,55	31,61	40	0,49	0,55	1,04	40	12,64	0,62	13,27
50	31,72	0,70	32,42	50	0,50	0,70	1,20	50	12,97	0,72	13,69
60	32,27	0,83	33,10	60	0,50	0,83	1,33	60	13,24	0,80	14,04
70	40,56	0,98	41,53	70	0,54	0,98	1,52	70	16,61	0,91	17,53
80	44,63	1,13	45,75	80	0,91	1,13	2,04	80	18,30	1,22	19,52

Ek 7.9. BT_4'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı, toplam CO emisyon miktarları ($G_{\text{tun,CO}}$)

CO GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	70,00	ppm	Camb	1,00	ppm	Cadm-Camb	69,00	0,08	kg/m ³	1,2000
										CO yoğunluk (kg/m ³)
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qCOu	qCO	orta yük.	qCOu	qCO	ağır vasıta	qCOu	qCO	Qtotal-CO
km/h	sayısı	g/h,u	m ³ /h	sayısı	g/h,u	m ³ /h	sayısı	g/h,u	m ³ /h	m ³ /h
20	287,01	7,85	27.202,07	7,35	10,26	911,45	37,92	16,55	7.580,33	35.693,85
30	191,34	7,12	16.461,83	4,90	11,56	684,43	25,28	18,32	5.594,85	22.741,12
40	143,50	8,35	14.475,36	3,68	13,27	589,18	18,96	20,66	4.729,96	19.794,50
50	114,80	9,22	12.786,76	2,94	13,69	486,35	15,17	22,78	4.173,11	17.446,22
60	95,67	9,16	10.581,00	2,45	14,04	415,62	12,64	26,15	3.991,48	14.988,09
70	82,00	12,39	12.273,57	2,10	17,53	444,75	10,83	29,47	3.856,33	16.574,64
80	71,75	14,76	12.791,44	1,84	19,52	433,49	9,48	32,81	3.756,20	16.981,14

EK-7 (devamı). Batı tüpü 4, (BT_4) bölümü emisyon hesapları

Ek 7.13. BT_4'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, NO_x emisyon tablosu

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-0,85	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	6,60	8,70	11,70	15,90	27,70	10,43	3,5445
30	7,20	10,10	14,40	20,40	34,00	12,57	4,27465
40	6,90	10,20	15,70	23,80	40,20	13,36	4,54325
50	6,50	10,40	17,10	27,20	41,40	14,25	4,84585
60	7,70	10,70	18,50	37,90	57,50	15,19	5,1629
70	9,00	16,60	29,60	48,60	73,60	24,08	8,1855
80	9,40	20,00	43,20	75,60	108,60	33,34	11,3356
fh	1,00						
ft	0,34						

Ek 7.14. BT_4'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (G_e)

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-0,85	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	55,30	76,20	88,70	98,80	104,10	83,39	18,34525
30	48,50	75,20	92,70	103,10	111,00	85,26	18,75775
40	41,60	69,30	105,30	119,20	141,20	90,00	19,8
50	33,10	64,20	111,80	129,80	167,10	91,57	20,1454
60	24,50	62,20	122,90	182,00	247,50	97,10	21,36255
70	16,30	57,50	134,00	234,20	328,00	101,49	22,32725
80	16,30	57,50	145,10	286,50	408,40	107,87	23,7314
fh	1,00						
ft	0,22						
fm	1,00						

Ek 7.15. BT_4'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim HGV, NO_x emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	18,35	1,87	20,22
30	18,76	2,83	21,59
40	19,80	3,77	23,57
50	20,15	4,70	24,85
60	21,36	5,64	27,00
70	22,33	6,57	28,90
80	23,73	7,51	31,24

EK-7 (devamı). Batı tüpü 4, (BT_4) bölümü emisyon hesapları

Ek 7.16. BT_4'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim PC, NO_x emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (NO _x)				otomobil/dizel (NO _x)				otomobil ortalama (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	70%	30%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	1,12	0,28	1,39	20	4,28	0,28	4,56	20	0,97	1,37	2,34
30	1,22	0,43	1,65	30	4,92	0,43	5,35	30	1,15	1,60	2,76
40	1,40	0,55	1,95	40	5,33	0,55	5,89	40	1,37	1,77	3,13
50	1,41	0,70	2,11	50	5,72	0,70	6,42	50	1,48	1,93	3,40
60	1,57	0,83	2,40	60	6,60	0,83	7,43	60	1,68	2,23	3,91
70	1,72	0,98	2,70	70	7,86	0,98	8,84	70	1,89	2,65	4,54
80	2,18	1,13	3,30	80	8,98	1,13	10,10	80	2,31	3,03	5,34

Ek 7.17. BT_4'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim LCV, NO_x emisyon miktarları (G_e)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (NO _x)				orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (NO _x)				orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	40%	60%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	0,80	0,28	1,07	20	3,54	0,28	3,82	20	0,43	2,29	2,72
30	0,92	0,43	1,34	30	4,27	0,43	4,70	30	0,54	2,82	3,36
40	0,97	0,55	1,52	40	4,54	0,55	5,10	40	0,61	3,06	3,67
50	1,00	0,70	1,70	50	4,85	0,70	5,55	50	0,68	3,33	4,01
60	1,19	0,83	2,02	60	5,16	0,83	5,99	60	0,81	3,60	4,41
70	1,45	0,98	2,42	70	8,19	0,98	9,16	70	0,97	5,50	6,47
80	1,90	1,13	3,03	80	11,34	1,13	12,46	80	1,21	7,48	8,69

Ek 7.18. BT_4'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı, toplam NO_x emisyon miktarları (G_{tun,NO_x})

NO _x GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	1,00	ppm	Camb	0,00	ppm	Cadm-Camb	1,00	0,0019	g/m3	1,9000
										Nox yoğunluk kg/m3
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qNOu	qNO	oyt	qNOu	qNO	ağır vasıta	qNOu	qNO	Qtotat-NO
km/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	m3/h
20	287,01	2,34	353.747,60	7,35	2,72	10.533,26	37,92	20,22	403.516,50	767.797,36
30	191,34	2,76	277.791,95	4,90	3,36	8.664,32	25,28	21,59	287.239,23	573.695,50
40	143,50	3,13	236.681,09	3,68	3,67	7.097,03	18,96	23,57	235.172,75	478.950,87
50	114,80	3,40	205.723,44	2,94	4,01	6.205,08	15,17	24,85	198.369,58	410.298,10
60	95,67	3,91	196.696,43	2,45	4,41	5.683,19	12,64	27,00	179.633,80	382.013,43
70	82,00	4,54	196.097,35	2,10	6,47	7.152,96	10,83	28,90	164.811,50	368.061,81
80	71,75	5,34	201.772,83	1,84	8,69	8.407,10	9,48	31,24	155.887,49	366.067,42

EK-7 (devamı). Batı tüpü 4, (BT_4) bölümü emisyon hesapları

Ek 7.22. BT_4'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (m ² /h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-0,85	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	2,30	2,80	3,30	3,80	4,60	3,09	0,65
30	2,30	2,90	3,50	4,70	5,90	3,25	0,68
40	2,80	3,30	4,20	5,40	7,20	3,82	0,80
50	2,70	3,70	4,80	6,10	8,80	4,33	0,91
60	3,00	4,20	5,90	7,20	10,50	5,18	1,09
70	3,30	4,60	6,90	9,80	12,20	5,92	1,24
80	4,60	6,40	9,10	12,30	14,80	7,95	1,67
fh	1,00						
ft	0,21						

Ek 7.23. BT_4'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (m ² /h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-0,85	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	4,30	5,60	6,50	7,40	8,50	6,12	5,57
30	4,10	5,60	6,80	8,40	9,90	6,29	5,72
40	3,90	5,80	8,00	10,50	12,90	7,07	6,43
50	3,70	5,80	8,60	11,90	14,90	7,41	6,74
60	3,70	6,00	9,30	14,30	19,30	7,90	7,19
70	3,80	6,30	10,10	16,70	23,60	8,49	7,72
80	3,70	6,60	12,30	19,40	28,00	9,88	8,99
fh	1,00						
ft	0,91						
fm	1,00						

Ek 7.24. BT_4'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim HGV, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m ² /h	m ² /h	m ² /h
20	5,57	8,80	14,37
30	5,72	13,30	19,02
40	6,43	17,70	24,13
50	6,74	22,10	28,84
60	7,19	26,50	33,69
70	7,72	30,90	38,62
80	8,99	35,30	44,29

EK-7 (devamı). Batı tüpü 4, (BT_4) bölümü emisyon hesapları

Ek 7.25. BT_4’de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim PC, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,15	1,30	1,45
30	0,15	2,00	2,15
40	0,19	2,60	2,79
50	0,19	3,30	3,49
60	0,24	3,90	4,14
70	0,28	4,60	4,88
80	0,39	5,30	5,69

otomobil/dizel (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,55	1,30	1,85
30	0,60	2,00	2,60
40	0,69	2,60	3,29
50	0,79	3,30	4,09
60	0,83	3,90	4,73
70	0,96	4,60	5,56
80	1,11	5,30	6,41

otomobil ortalama (bulanıklık)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,58	1,11	1,69
30	0,86	1,56	2,42
40	1,11	1,97	3,09
50	1,39	2,46	3,85
60	1,66	2,84	4,49
70	1,95	3,33	5,29
80	2,27	3,85	6,12

Ek 7.26. BT_4’de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı birim LCV, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

hafif yüklü ticari araç/benzin (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,08	1,30	1,38
30	0,08	2,00	2,08
40	0,12	2,60	2,72
50	0,16	3,30	3,46
60	0,20	3,90	4,10
70	0,37	4,60	4,97
80	0,64	5,30	5,94

hafif yüklü ticari araç/dizel (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,65	1,30	1,95
30	0,68	2,00	2,68
40	0,80	2,60	3,40
50	0,91	3,30	4,21
60	1,09	3,90	4,99
70	1,24	4,60	5,84
80	1,67	5,30	6,97

hafif yüklü ticari araç ortalama (bulanıklık)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,55	1,17	1,72
30	0,83	1,61	2,44
40	1,09	2,04	3,13
50	1,38	2,53	3,91
60	1,64	2,99	4,63
70	1,99	3,51	5,50
80	2,38	4,18	6,56

Ek 7.27. BT_4’de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı, toplam bulanıklık emisyon miktarları ($G_{\text{tun, bulanıklık}}$)

GÖRÜŞ MESAFESİ İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
							K	0,007	m-1	
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qPMu	qPM	oyt	qPMu	qPM	ağır vasıta	qPMu	qPM	Qtotat-PM
km/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	m3/h
20	287,01	1,69	69.281,54	7,35	1,72	1.807,58	37,92	14,37	77.830,76	148.919,88
30	191,34	2,42	66.173,99	4,90	2,44	1.709,20	25,28	19,02	68.706,17	136.589,36
40	143,50	3,09	63.300,18	3,68	3,13	1.644,50	18,96	24,13	65.358,11	130.302,79
50	114,80	3,85	63.143,37	2,94	3,91	1.642,66	15,17	28,84	62.501,35	127.287,38
60	95,67	4,49	61.382,66	2,45	4,63	1.622,63	12,64	33,69	60.831,01	123.836,30
70	82,00	5,29	61.926,95	2,10	5,50	1.649,50	10,83	38,62	59.778,76	123.355,21
80	71,75	6,12	62.758,76	1,84	6,56	1.722,76	9,48	44,29	59.981,69	124.463,21

EK-7 (devamı). Batı tüpü 4, (BT_4) bölümü emisyon hesapları

Ek 7.28. BT_4'de, % -0,85 eğimde, hıza bağlı, gerekli asgari taze hava miktarları

EMİSYON GİDERMEK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARLARI							
trafik	CO	TOPLAM	NO2	TOPLAM	BULANIKLIK	TOPLAM	DİZAYN DEĞERİ
hızı	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA
km/h	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/s
20	35.693,85	9,91	153.559,47	42,66	148.919,88	41,37	42,66
30	22.741,12	6,32	114.739,10	31,87	136.589,36	37,94	37,94
40	19.794,50	5,50	95.790,17	26,61	130.302,79	36,20	36,20
50	17.446,22	4,85	82.059,62	22,79	127.287,38	35,36	35,36
60	14.988,09	4,16	76.402,69	21,22	123.836,30	34,40	34,40
70	16.574,64	4,60	73.612,36	20,45	123.355,21	34,27	34,27
80	16.981,14	4,72	73.213,48	20,34	124.463,21	34,57	34,57

EK-8 (devamı). Doğu tüpü 1, (DT_1) bölümü emisyon hesapları

Ek 8.4. DT_1'de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	0,85	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	1,20	1,50	1,80	1,90	2,10	1,84	0,48
30	1,30	1,60	2,00	2,20	2,40	2,09	0,54
40	1,30	1,70	2,00	2,30	2,50	2,13	0,55
50	1,40	1,70	2,10	2,50	2,80	2,27	0,59
60	1,40	1,70	2,10	2,70	3,00	2,36	0,61
70	1,60	1,80	2,30	3,00	3,30	2,60	0,68
80	1,70	1,90	2,50	3,30	3,60	2,84	0,74
fh	1,00						
ft	0,26						

Ek 8.5. DT_1'de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	0,85	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	11,40	17,80	22,30	26,20	30,60	23,96	17,25
30	10,10	18,30	23,90	30,60	37,80	26,75	19,26
40	8,70	18,80	26,90	37,30	48,10	31,32	22,55
50	6,20	19,30	29,40	43,20	56,80	35,27	25,39
60	6,10	19,80	34,90	53,30	62,30	42,72	30,76
70	6,10	20,30	40,30	63,10	67,80	49,99	35,99
80	6,10	20,70	45,80	73,30	77,20	57,49	41,39
fh	1,00						
ft	0,72						
fm	1,00						

Ek 8.6. DT_1'de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (Ge)

ağır vasıta (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	17,25	1,87	19,12
30	19,26	2,83	22,09
40	22,55	3,77	26,32
50	25,39	4,70	30,09
60	30,76	5,64	36,40
70	35,99	6,57	42,57
80	41,39	7,51	48,90

EK-8 (devamı). Doğu tüpü 1, (DT_1) bölümü emisyon hesapları

Ek 8.7. DT_1’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim PC, CO emisyon miktarları (Ge)

otomobil/benzin (CO)				otomobil/dizel (CO)				otomobil ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	70%	30%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	13,18	0,28	13,45	20	2,23	0,28	2,51	20	9,42	0,75	10,17
30	10,81	0,43	11,24	30	1,96	0,43	2,39	30	7,87	0,72	8,58
40	13,42	0,55	13,98	40	1,70	0,55	2,25	40	9,78	0,68	10,46
50	14,61	0,70	15,31	50	1,58	0,70	2,29	50	10,72	0,69	11,41
60	15,06	0,83	15,89	60	1,44	0,83	2,27	60	11,13	0,68	11,81
70	21,43	0,98	22,41	70	1,34	0,98	2,32	70	15,69	0,70	16,39
80	27,68	1,13	28,81	80	1,34	1,13	2,47	80	20,17	0,74	20,91

Ek 8.8. DT_1’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim LCV, CO emisyon miktarları (Ge)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	40%	60%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	26,71	0,28	26,98	20	0,48	0,28	0,76	20	10,79	0,45	11,25
30	30,16	0,43	30,59	30	0,54	0,43	0,97	30	12,23	0,58	12,82
40	37,05	0,55	37,61	40	0,55	0,55	1,11	40	15,04	0,66	15,71
50	38,47	0,70	39,17	50	0,59	0,70	1,29	50	15,67	0,78	16,44
60	39,06	0,83	39,89	60	0,61	0,83	1,44	60	15,96	0,87	16,82
70	51,93	0,98	52,91	70	0,68	0,98	1,65	70	21,16	0,99	22,15
80	61,95	1,13	63,08	80	0,74	1,13	1,87	80	25,23	1,12	26,35

Ek 8.9. DT_1’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı, toplam CO emisyon miktarları (G_{tun,CO})

CO GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	70,00	ppm	Camb	1,00	ppm	Cadm-Camb	69,00	0,08	kg/m3	1,2000
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			CO yoğunluk (kg/m3)
hızı	otomobil	qCOu	qCO	orta yük.	qCOu	qCO	ağır vasıta	qCOu	qCO	Qtotat-CO
km/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	m3/h
20	287,01	10,17	35.251,03	7,35	11,25	998,88	37,92	19,12	8.757,55	45.007,46
30	191,34	8,58	19.836,97	4,90	12,82	758,80	25,28	22,09	6.744,04	27.339,80
40	143,50	10,46	18.129,12	3,68	15,71	697,48	18,96	26,32	6.026,30	24.852,90
50	114,80	11,41	15.813,83	2,94	16,44	584,12	15,17	30,09	5.512,89	21.910,84
60	95,67	11,81	13.640,48	2,45	16,82	497,97	12,64	36,40	5.556,43	19.694,88
70	82,00	16,39	16.227,68	2,10	22,15	562,18	10,83	42,57	5.570,10	22.359,96
80	71,75	20,91	18.118,32	1,84	26,35	585,10	9,48	48,90	5.599,10	24.302,52

EK-8 (devamı). Doğu tüpü 1, (DT_1) bölümü emisyon hesapları

Ek 8.13. DT_1'de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, NO_x emisyon tablosu

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	0,85	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	6,60	8,70	11,70	15,90	27,70	13,49	4,5849
30	7,20	10,10	14,40	20,40	34,00	16,95	5,763
40	6,90	10,20	15,70	23,80	40,20	19,14	6,50845
50	6,50	10,40	17,10	27,20	41,40	21,39	7,27345
60	7,70	10,70	18,50	37,90	57,50	26,75	9,0933
70	9,00	16,60	29,60	48,60	73,60	37,68	12,8095
80	9,40	20,00	43,20	75,60	108,60	56,97	19,3698
fh	1,00						
ft	0,34						

Ek 8.14. DT_1'de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (G_e)

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	0,85	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	55,30	76,20	88,70	98,80	104,10	92,99	20,45835
30	48,50	75,20	92,70	103,10	111,00	97,12	21,3664
40	41,60	69,30	105,30	119,20	141,20	111,21	24,46565
50	33,10	64,20	111,80	129,80	167,10	119,45	26,279
60	24,50	62,20	122,90	182,00	247,50	148,02	32,56385
70	16,30	57,50	134,00	234,20	328,00	176,59	38,8487
80	16,30	57,50	145,10	286,50	408,40	205,20	45,1429
fh	1,00						
ft	0,22						
fm	1,00						

Ek 8.15. DT_1'de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim HGV, NO_x emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	20,46	1,87	22,33
30	21,37	2,83	24,20
40	24,47	3,77	28,23
50	26,28	4,70	30,98
60	32,56	5,64	38,20
70	38,85	6,57	45,42
80	45,14	7,51	52,65

EK-8 (devamı). Doğu tüpü 1, (DT_1) bölümü emisyon hesapları

Ek 8.16. DT_1’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim PC, NO_x emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	1,31	0,28	1,58
30	1,50	0,43	1,92
40	1,76	0,55	2,32
50	1,83	0,70	2,54
60	2,12	0,83	2,95
70	2,40	0,98	3,38
80	3,07	1,13	4,20

otomobil/dizel (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	5,21	0,28	5,48
30	6,23	0,43	6,66
40	7,00	0,55	7,56
50	7,76	0,70	8,46
60	9,18	0,83	10,01
70	11,25	0,98	12,23
80	13,97	1,13	15,09

otomobil ortalama (NO _x)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	70%	30%	100%
km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	1,11	1,65	2,75
30	1,35	2,00	3,34
40	1,62	2,27	3,89
50	1,78	2,54	4,31
60	2,06	3,00	5,07
70	2,37	3,67	6,04
80	2,94	4,53	7,47

Ek 8.17. DT_1’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim LCV, NO_x emisyon miktarları (G_e)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	1,07	0,28	1,34
30	1,34	0,43	1,76
40	1,46	0,55	2,02
50	1,53	0,70	2,23
60	1,91	0,83	2,74
70	2,29	0,98	3,27
80	3,04	1,13	4,17

orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	4,58	0,28	4,86
30	5,76	0,43	6,19
40	6,51	0,55	7,06
50	7,27	0,70	7,98
60	9,09	0,83	9,92
70	12,81	0,98	13,79
80	19,37	1,13	20,50

orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (NO _x)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	0,54	2,92	3,45
30	0,70	3,71	4,42
40	0,81	4,24	5,04
50	0,89	4,79	5,68
60	1,10	5,95	7,05
70	1,31	8,27	9,58
80	1,67	12,30	13,96

Ek 8.18. DT_1’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı, toplam NO_x emisyon miktarları (G_{tun,NO_x})

NO _x GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	1,00	ppm	Camb	0,00	ppm	Cadm-Camb	1,00	0,0019	g/m3	1,9000
										Nox yoğunluk kg/m3
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qNOu	qNO	oyt	qNOu	qNO	ağır vasıta	qNOu	qNO	Qtotal-NO
km/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	m3/h
20	287,01	2,75	415.879,60	7,35	3,45	13.370,42	37,92	22,33	445.691,20	874.941,21
30	191,34	3,34	336.709,71	4,90	4,42	11.398,39	25,28	24,20	321.949,37	670.057,48
40	143,50	3,89	293.683,57	3,68	5,04	9.760,48	18,96	28,23	281.732,87	585.176,92
50	114,80	4,31	260.677,97	2,94	5,68	8.791,68	15,17	30,98	247.337,02	516.806,66
60	95,67	5,07	255.203,32	2,45	7,05	9.094,10	12,64	38,20	254.154,87	518.452,28
70	82,00	6,04	260.487,32	2,10	9,58	10.593,19	10,83	45,42	259.024,76	530.105,27
80	71,75	7,47	281.912,70	1,84	13,96	13.512,26	9,48	52,65	262.723,84	558.148,80

EK-8 (devamı). Doğu tüpü 1, (DT_1) bölümü emisyon hesapları

Ek 8.22. DT_1’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (m2/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	0,85	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	2,30	2,80	3,30	3,80	4,60	3,51	0,74
30	2,30	2,90	3,50	4,70	5,90	4,01	0,84
40	2,80	3,30	4,20	5,40	7,20	4,71	0,99
50	2,70	3,70	4,80	6,10	8,80	5,35	1,12
60	3,00	4,20	5,90	7,20	10,50	6,45	1,36
70	3,30	4,60	6,90	9,80	12,20	8,13	1,71
80	4,60	6,40	9,10	12,30	14,80	10,46	2,20
fh	1,00						
ft	0,21						

Ek 8.23. DT_1’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (m2/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	0,85	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	4,30	5,60	6,50	7,40	8,50	6,88	6,26
30	4,10	5,60	6,80	8,40	9,90	7,48	6,81
40	3,90	5,80	8,00	10,50	12,90	9,06	8,25
50	3,70	5,80	8,60	11,90	14,90	10,00	9,10
60	3,70	6,00	9,30	14,30	19,30	11,43	10,40
70	3,80	6,30	10,10	16,70	23,60	12,91	11,74
80	3,70	6,60	12,30	19,40	28,00	15,32	13,94
fh	1,00						
ft	0,91						
fm	1,00						

Ek 8.24. DT_1’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim HGV, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	6,26	8,80	15,06
30	6,81	13,30	20,11
40	8,25	17,70	25,95
50	9,10	22,10	31,20
60	10,40	26,50	36,90
70	11,74	30,90	42,64
80	13,94	35,30	49,24

EK-8 (devamı). Doğu tüpü 1, (DT_1) bölümü emisyon hesapları

Ek 8.25. DT_1’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim PC, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,19	1,30	1,49
30	0,19	2,00	2,19
40	0,23	2,60	2,83
50	0,23	3,30	3,53
60	0,32	3,90	4,22
70	0,36	4,60	4,96
80	0,58	5,30	5,88

otomobil/dizel (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,62	1,30	1,92
30	0,70	2,00	2,70
40	0,83	2,60	3,43
50	0,99	3,30	4,29
60	1,06	3,90	4,96
70	1,21	4,60	5,81
80	1,46	5,30	6,76

otomobil ortalama (bulanıklık)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,59	1,15	1,75
30	0,87	1,62	2,50
40	1,13	2,06	3,19
50	1,41	2,57	3,98
60	1,69	2,98	4,67
70	1,98	3,49	5,47
80	2,35	4,06	6,41

Ek 8.26. DT_1’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim LCV, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

hafif yüklü ticari araç/benzin (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,11	1,30	1,41
30	0,11	2,00	2,11
40	0,23	2,60	2,83
50	0,23	3,30	3,53
60	0,34	3,90	4,24
70	0,68	4,60	5,28
80	1,08	5,30	6,38

hafif yüklü ticari araç/dizel (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,74	1,30	2,04
30	0,84	2,00	2,84
40	0,99	2,60	3,59
50	1,12	3,30	4,42
60	1,36	3,90	5,26
70	1,71	4,60	6,31
80	2,20	5,30	7,50

hafif yüklü ticari araç ortalama (bulanıklık)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,57	1,22	1,79
30	0,85	1,71	2,55
40	1,13	2,15	3,28
50	1,41	2,65	4,06
60	1,70	3,15	4,85
70	2,11	3,78	5,89
80	2,55	4,50	7,05

Ek 8.27. DT_1’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı, toplam bulanıklık emisyon miktarları ($G_{\text{tun, bulanıklık}}$)

GÖRÜŞ MESAFESİ İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
	hızı	otomobil	qPMu	qPM	oyt	qPMu	qPM	ağır vasıta	qPMu	qPM
km/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	Qttotal-PM
20	287,01	1,75	71.654,89	7,35	1,79	1.877,94	37,92	15,06	81.602,06	155.134,89
30	191,34	2,50	68.216,26	4,90	2,55	1.786,11	25,28	20,11	72.617,14	142.619,52
40	143,50	3,19	65.349,42	3,68	3,28	1.724,73	18,96	25,95	70.281,74	137.355,89
50	114,80	3,98	65.334,80	2,94	4,06	1.707,95	15,17	31,20	67.613,55	134.656,30
60	95,67	4,67	63.769,95	2,45	4,85	1.697,70	12,64	36,90	66.627,62	132.095,28
70	82,00	5,47	64.071,78	2,10	5,89	1.769,36	10,83	42,64	66.004,38	131.845,53
80	71,75	6,41	65.725,45	1,84	7,05	1.851,59	9,48	49,24	66.686,21	134.263,26

EK-8 (devamı). Doğu tüpü 1, (DT_1) bölümü emisyon hesapları

Ek 8.28. DT_1’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı, gerekli asgari taze hava miktarları

EMİSYON GİDERMEK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARLARI							
trafik	CO	TOPLAM	NO2	TOPLAM	BULANIKLIK	TOPLAM	DİZAYN DEĞERİ
hızı	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA
km/h	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/s
20	45.007,46	12,50	174.988,24	48,61	155.134,89	43,09	48,61
30	27.339,80	7,59	134.011,50	37,23	142.619,52	39,62	39,62
40	24.852,90	6,90	117.035,38	32,51	137.355,89	38,15	38,15
50	21.910,84	6,09	103.361,33	28,71	134.656,30	37,40	37,40
60	19.694,88	5,47	103.690,46	28,80	132.095,28	36,69	36,69
70	22.359,96	6,21	106.021,05	29,45	131.845,53	36,62	36,62

EK-9 (devamı). Doğu tüpü 2, pozitif eğim (DT_2.1) bölümü emisyon hesapları

Ek 9.4. DT_2’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	0,85	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	1,20	1,50	1,80	1,90	2,10	1,84	0,48
30	1,30	1,60	2,00	2,20	2,40	2,09	0,54
40	1,30	1,70	2,00	2,30	2,50	2,13	0,55
50	1,40	1,70	2,10	2,50	2,80	2,27	0,59
60	1,40	1,70	2,10	2,70	3,00	2,36	0,61
70	1,60	1,80	2,30	3,00	3,30	2,60	0,68
80	1,70	1,90	2,50	3,30	3,60	2,84	0,74
fh	1,00						
ft	0,26						

Ek 9.5. DT_2’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	0,85	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	11,40	17,80	22,30	26,20	30,60	23,96	17,25
30	10,10	18,30	23,90	30,60	37,80	26,75	19,26
40	8,70	18,80	26,90	37,30	48,10	31,32	22,55
50	6,20	19,30	29,40	43,20	56,80	35,27	25,39
60	6,10	19,80	34,90	53,30	62,30	42,72	30,76
70	6,10	20,30	40,30	63,10	67,80	49,99	35,99
80	6,10	20,70	45,80	73,30	77,20	57,49	41,39
fh	1,00						
ft	0,72						
fm	1,00						

Ek 9.6. DT_2’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	17,25	1,87	19,12
30	19,26	2,83	22,09
40	22,55	3,77	26,32
50	25,39	4,70	30,09
60	30,76	5,64	36,40
70	35,99	6,57	42,57
80	41,39	7,51	48,90

EK-9 (devamı). Doğu tüpü 2, pozitif eğim (DT_2.1) bölümü emisyon hesapları

Ek 9.7. DT_2’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim PC, CO emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (CO)				otomobil/dizel (CO)				otomobil ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	70%	30%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	13,18	0,28	13,45	20	2,23	0,28	2,51	20	9,42	0,75	10,17
30	10,81	0,43	11,24	30	1,96	0,43	2,39	30	7,87	0,72	8,58
40	13,42	0,55	13,98	40	1,70	0,55	2,25	40	9,78	0,68	10,46
50	14,61	0,70	15,31	50	1,58	0,70	2,29	50	10,72	0,69	11,41
60	15,06	0,83	15,89	60	1,44	0,83	2,27	60	11,13	0,68	11,81
70	21,43	0,98	22,41	70	1,34	0,98	2,32	70	15,69	0,70	16,39
80	27,68	1,13	28,81	80	1,34	1,13	2,47	80	20,17	0,74	20,91

Ek 9.8. DT_2’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim LCV, CO emisyon miktarları (G_e)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	40%	60%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	26,71	0,28	26,98	20	0,48	0,28	0,76	20	10,79	0,45	11,25
30	30,16	0,43	30,59	30	0,54	0,43	0,97	30	12,23	0,58	12,82
40	37,05	0,55	37,61	40	0,55	0,55	1,11	40	15,04	0,66	15,71
50	38,47	0,70	39,17	50	0,59	0,70	1,29	50	15,67	0,78	16,44
60	39,06	0,83	39,89	60	0,61	0,83	1,44	60	15,96	0,87	16,82
70	51,93	0,98	52,91	70	0,68	0,98	1,65	70	21,16	0,99	22,15
80	61,95	1,13	63,08	80	0,74	1,13	1,87	80	25,23	1,12	26,35

Ek 9.9. DT_2’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı, toplam CO emisyon miktarları ($G_{\text{tun,CO}}$)

CO GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	70,00	ppm	Camb	1,00	ppm	Cadm-Camb	69,00	0,08	kg/m3	1,2000
										CO yoğunluk (kg/m3)
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qCOu	qCO	orta yük.	qCOu	qCO	ağır vasıta	qCOu	qCO	Qtotat-CO
km/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	m3/h
20	345,49	10,17	42.434,26	8,85	11,25	1.202,43	45,65	19,12	10.542,11	54.178,79
30	230,33	8,58	23.879,22	5,90	12,82	913,42	30,43	22,09	8.118,30	32.910,93
40	172,75	10,46	21.823,35	4,43	15,71	839,61	22,82	26,32	7.254,30	29.917,26
50	138,20	11,41	19.036,27	3,54	16,44	703,14	18,26	30,09	6.636,28	26.375,69
60	115,16	11,81	16.420,05	2,95	16,82	599,44	15,22	36,40	6.688,68	23.708,18
70	98,71	16,39	19.534,45	2,53	22,15	676,73	13,04	42,57	6.705,14	26.916,33
80	86,37	20,91	21.810,35	2,21	26,35	704,33	11,41	48,90	6.740,05	29.254,74

EK-9 (devamı). Doğu tüpü 2, pozitif eğim (DT_2.1) bölümü emisyon hesapları

Ek 9.13. DT_2'de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, NOX emisyon tablosu

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	0,85	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	6,60	8,70	11,70	15,90	27,70	13,49	4,5849
30	7,20	10,10	14,40	20,40	34,00	16,95	5,763
40	6,90	10,20	15,70	23,80	40,20	19,14	6,50845
50	6,50	10,40	17,10	27,20	41,40	21,39	7,27345
60	7,70	10,70	18,50	37,90	57,50	26,75	9,0933
70	9,00	16,60	29,60	48,60	73,60	37,68	12,8095
80	9,40	20,00	43,20	75,60	108,60	56,97	19,3698
fh	1,00						
ft	0,34						

Ek 9.14. DT_2'de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (G_e)

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	0,85	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	55,30	76,20	88,70	98,80	104,10	92,99	20,45835
30	48,50	75,20	92,70	103,10	111,00	97,12	21,3664
40	41,60	69,30	105,30	119,20	141,20	111,21	24,46565
50	33,10	64,20	111,80	129,80	167,10	119,45	26,279
60	24,50	62,20	122,90	182,00	247,50	148,02	32,56385
70	16,30	57,50	134,00	234,20	328,00	176,59	38,8487
80	16,30	57,50	145,10	286,50	408,40	205,20	45,1429
fh	1,00						
ft	0,22						
fm	1,00						

Ek 9.15. DT_2'de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim HGV, NO_x emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	20,46	1,87	22,33
30	21,37	2,83	24,20
40	24,47	3,77	28,23
50	26,28	4,70	30,98
60	32,56	5,64	38,20
70	38,85	6,57	45,42
80	45,14	7,51	52,65

EK-9 (devamı). Doğu tüpü 2, pozitif eğim (DT_2.1) bölümü emisyon hesapları

Ek 9.16. DT_2’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim PC, NO_x emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	1,31	0,28	1,58
30	1,50	0,43	1,92
40	1,76	0,55	2,32
50	1,83	0,70	2,54
60	2,12	0,83	2,95
70	2,40	0,98	3,38
80	3,07	1,13	4,20

otomobil/dizel (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	5,21	0,28	5,48
30	6,23	0,43	6,66
40	7,00	0,55	7,56
50	7,76	0,70	8,46
60	9,18	0,83	10,01
70	11,25	0,98	12,23
80	13,97	1,13	15,09

otomobil ortalama (NO _x)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	70%	30%	100%
km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	1,11	1,65	2,75
30	1,35	2,00	3,34
40	1,62	2,27	3,89
50	1,78	2,54	4,31
60	2,06	3,00	5,07
70	2,37	3,67	6,04
80	2,94	4,53	7,47

Ek 9.17. DT_2’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim LCV, NO_x emisyon miktarları (G_e)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	1,07	0,28	1,34
30	1,34	0,43	1,76
40	1,46	0,55	2,02
50	1,53	0,70	2,23
60	1,91	0,83	2,74
70	2,29	0,98	3,27
80	3,04	1,13	4,17

orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	4,58	0,28	4,86
30	5,76	0,43	6,19
40	6,51	0,55	7,06
50	7,27	0,70	7,98
60	9,09	0,83	9,92
70	12,81	0,98	13,79
80	19,37	1,13	20,50

orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (NO _x)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	0,54	2,92	3,45
30	0,70	3,71	4,42
40	0,81	4,24	5,04
50	0,89	4,79	5,68
60	1,10	5,95	7,05
70	1,31	8,27	9,58
80	1,67	12,30	13,96

Ek 9.18. DT_2’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı, toplam NO_x emisyon miktarları (G_{tun,NO_x})

NO _x GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	1,00	ppm	Camb	0,00	ppm	Cadm-Camb	1,00	0,0019	g/m3	1,9000
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			Nox yoğunluk kg/m3
hızı	otomobil	qNOu	qNO	oyt	qNOu	qNO	ağır vasıta	qNOu	qNO	Qtotale-NO
km/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	m3/h
20	345,49	2,75	500.624,88	8,85	3,45	16.094,95	45,65	22,33	536.511,29	1.053.231,12
30	230,33	3,34	405.322,26	5,90	4,42	13.721,09	30,43	24,20	387.554,15	806.597,49
40	172,75	3,89	353.528,52	4,43	5,04	11.749,41	22,82	28,23	339.142,59	704.420,52
50	138,20	4,31	313.797,26	3,54	5,68	10.583,19	18,26	30,98	297.737,77	622.118,21
60	115,16	5,07	307.207,01	2,95	7,05	10.947,23	15,22	38,20	305.944,92	624.099,16
70	98,71	6,04	313.567,76	2,53	9,58	12.751,80	13,04	45,42	311.807,17	638.126,72
80	86,37	7,47	339.359,07	2,21	13,96	16.265,71	11,41	52,65	316.260,01	671.884,79

EK-9 (devamı). Doğu tüpü 2, pozitif eğim (DT_2.1) bölümü emisyon hesapları

Ek 9.22. DT_2’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (m2/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	0,85	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	2,30	2,80	3,30	3,80	4,60	3,51	0,74
30	2,30	2,90	3,50	4,70	5,90	4,01	0,84
40	2,80	3,30	4,20	5,40	7,20	4,71	0,99
50	2,70	3,70	4,80	6,10	8,80	5,35	1,12
60	3,00	4,20	5,90	7,20	10,50	6,45	1,36
70	3,30	4,60	6,90	9,80	12,20	8,13	1,71
80	4,60	6,40	9,10	12,30	14,80	10,46	2,20
fh	1,00						
ft	0,21						

Ek 9.23. DT_2’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASİTA/DİZEL (HGV) (m2/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	0,85	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	4,30	5,60	6,50	7,40	8,50	6,88	6,26
30	4,10	5,60	6,80	8,40	9,90	7,48	6,81
40	3,90	5,80	8,00	10,50	12,90	9,06	8,25
50	3,70	5,80	8,60	11,90	14,90	10,00	9,10
60	3,70	6,00	9,30	14,30	19,30	11,43	10,40
70	3,80	6,30	10,10	16,70	23,60	12,91	11,74
80	3,70	6,60	12,30	19,40	28,00	15,32	13,94
fh	1,00						
ft	0,91						
fm	1,00						

Ek 9.24. DT_2’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim HGV, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	6,26	8,80	15,06
30	6,81	13,30	20,11
40	8,25	17,70	25,95
50	9,10	22,10	31,20
60	10,40	26,50	36,90
70	11,74	30,90	42,64
80	13,94	35,30	49,24

EK-9 (devamı). Doğu tüpü 2, pozitif eğim (DT_2.1) bölümü emisyon hesapları

Ek 9.25. DT_2’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim PC, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,19	1,30	1,49
30	0,19	2,00	2,19
40	0,23	2,60	2,83
50	0,23	3,30	3,53
60	0,32	3,90	4,22
70	0,36	4,60	4,96
80	0,58	5,30	5,88

otomobil/dizel (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,62	1,30	1,92
30	0,70	2,00	2,70
40	0,83	2,60	3,43
50	0,99	3,30	4,29
60	1,06	3,90	4,96
70	1,21	4,60	5,81
80	1,46	5,30	6,76

otomobil ortalama (bulanıklık)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,59	1,15	1,75
30	0,87	1,62	2,50
40	1,13	2,06	3,19
50	1,41	2,57	3,98
60	1,69	2,98	4,67
70	1,98	3,49	5,47
80	2,35	4,06	6,41

Ek 9.26. DT_2’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı birim LCV, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

hafif yüklü ticari araç/benzin (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,11	1,30	1,41
30	0,11	2,00	2,11
40	0,23	2,60	2,83
50	0,23	3,30	3,53
60	0,34	3,90	4,24
70	0,68	4,60	5,28
80	1,08	5,30	6,38

hafif yüklü ticari araç/dizel (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,74	1,30	2,04
30	0,84	2,00	2,84
40	0,99	2,60	3,59
50	1,12	3,30	4,42
60	1,36	3,90	5,26
70	1,71	4,60	6,31
80	2,20	5,30	7,50

hafif yüklü ticari araç ortalama (bulanıklık)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,57	1,22	1,79
30	0,85	1,71	2,55
40	1,13	2,15	3,28
50	1,41	2,65	4,06
60	1,70	3,15	4,85
70	2,11	3,78	5,89
80	2,55	4,50	7,05

Ek 9.27. DT_2’de, %0,85 eğimde, hıza bağlı, toplam bulanıklık emisyon miktarları ($G_{\text{tun, bulanıklık}}$)

GÖRÜŞ MESAFESİ İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
							K	0,007	m-1	
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qPMu	qPM	oyt	qPMu	qPM	ağır vasıta	qPMu	qPM	Qttotal-PM
km/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	m3/h
20	345,49	1,75	86.256,26	8,85	1,79	2.260,62	45,65	15,06	98.230,40	186.747,28
30	230,33	2,50	82.116,93	5,90	2,55	2.150,08	30,43	20,11	87.414,60	171.681,61
40	172,75	3,19	78.665,91	4,43	3,28	2.076,18	22,82	25,95	84.603,31	165.345,40
50	138,20	3,98	78.648,31	3,54	4,06	2.055,99	18,26	31,20	81.391,40	162.095,70
60	115,16	4,67	76.764,58	2,95	4,85	2.043,65	15,22	36,90	80.204,57	159.012,81
70	98,71	5,47	77.127,92	2,53	5,89	2.129,91	13,04	42,64	79.454,33	158.712,16
80	86,37	6,41	79.118,56	2,21	7,05	2.228,90	11,41	49,24	80.275,10	161.622,56

EK-9 (devamı). Doğu tüpü 2, pozitif eğim (DT_2.1) bölümü emisyon hesapları

Ek 9.28. DT_2'de, %0,85 eğimde, hıza bağlı, gerekli asgari taze hava miktarları

EMİSYON GİDERMEK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARLARI							
trafik	CO	TOPLAM	NO2	TOPLAM	BULANIKLIK	TOPLAM	DİZAYN DEĞERİ
hızı	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA
km/h	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/s
20	54.178,79	15,05	210.646,22	58,51	186.747,28	51,87	58,51
30	32.910,93	9,14	161.319,50	44,81	171.681,61	47,69	47,69
40	29.917,26	8,31	140.884,10	39,13	165.345,40	45,93	45,93
50	26.375,69	7,33	124.423,64	34,56	162.095,70	45,03	45,03
60	23.708,18	6,59	124.819,83	34,67	159.012,81	44,17	44,17

EK-10 (devamı). Doğu tüpü 2, negatif eğim (DT_2.2) bölümü emisyon hesapları

Ek 10.4. DT_2’de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	1,20	1,50	1,80	1,90	2,10	1,31	0,34
30	1,30	1,60	2,00	2,20	2,40	1,41	0,37
40	1,30	1,70	2,00	2,30	2,50	1,44	0,37
50	1,40	1,70	2,10	2,50	2,80	1,51	0,39
60	1,40	1,70	2,10	2,70	3,00	1,51	0,39
70	1,60	1,80	2,30	3,00	3,30	1,67	0,43
80	1,70	1,90	2,50	3,30	3,60	1,77	0,46
fh	1,00						
ft	0,26						

Ek 10.5. DT_2’de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASİTA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	11,40	17,80	22,30	26,20	30,60	13,64	9,82
30	10,10	18,30	23,90	30,60	37,80	12,97	9,34
40	8,70	18,80	26,90	37,30	48,10	12,24	8,81
50	6,20	19,30	29,40	43,20	56,80	10,79	7,77
60	6,10	19,80	34,90	53,30	62,30	10,90	7,84
70	6,10	20,30	40,30	63,10	67,80	11,07	7,97
80	6,10	20,70	45,80	73,30	77,20	11,21	8,07
fh	1,00						
ft	0,72						
fm	1,00						

Ek 10.6. DT_2’de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	9,82	1,87	11,69
30	9,34	2,83	12,17
40	8,81	3,77	12,58
50	7,77	4,70	12,47
60	7,84	5,64	13,48
70	7,97	6,57	14,54
80	8,07	7,51	15,58

EK-10 (devamı). Doğu tüpü 2, negatif eğim (DT_2.2) bölümü emisyon hesapları

Ek 10.7. DT_2'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, CO emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (CO)				otomobil/dizel (CO)				otomobil ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	70%	30%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	7,84	0,28	8,11	20	0,82	0,28	1,09	20	5,68	0,33	6,01
30	7,05	0,43	7,48	30	0,94	0,43	1,37	30	5,23	0,41	5,64
40	7,96	0,55	8,51	40	0,94	0,55	1,49	40	5,96	0,45	6,41
50	8,92	0,70	9,63	50	0,89	0,70	1,59	50	6,74	0,48	7,22
60	8,57	0,83	9,40	60	0,84	0,83	1,67	60	6,58	0,50	7,08
70	10,59	0,98	11,56	70	0,84	0,98	1,82	70	8,10	0,55	8,64
80	12,72	1,13	13,85	80	0,84	1,13	1,97	80	9,69	0,59	10,28

Ek 10.8. DT_2'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, CO emisyon miktarları (G_e)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	40%	60%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	20,80	0,28	21,07	20	0,34	0,28	0,62	20	8,43	0,37	8,80
30	22,34	0,43	22,77	30	0,37	0,43	0,79	30	9,11	0,47	9,58
40	23,60	0,55	24,16	40	0,37	0,55	0,93	40	9,66	0,56	10,22
50	23,96	0,70	24,66	50	0,39	0,70	1,09	50	9,86	0,66	10,52
60	25,50	0,83	26,33	60	0,39	0,83	1,22	60	10,53	0,73	11,26
70	28,83	0,98	29,81	70	0,43	0,98	1,41	70	11,92	0,85	12,77
80	33,56	1,13	34,69	80	0,46	1,13	1,59	80	13,88	0,95	14,83

Ek 10.9. DT_2'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam CO emisyon miktarları (G_{ün,CO})

CO GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	70,00	ppm	Camb	1,00	ppm	Cadm-Camb	69,00	0,08	kg/m ³	1,2000
trafik	otomobil		orta yüklü ticari			ağır vasıta			CO yoğunluk (kg/m ³)	
hızı	otomobil	qCOu	qCO	orta yük.	qCOu	qCO	ağır vasıta	qCOu	qCO	Qtotal-CO
km/h	sayısı	g/h,u	m ³ /h	sayısı	g/h,u	m ³ /h	sayısı	g/h,u	m ³ /h	m ³ /h
20	230,69	6,01	16.741,12	5,91	8,80	628,15	30,48	11,69	4.304,47	21.673,75
30	153,79	5,64	10.480,74	3,94	9,58	455,98	20,32	12,17	2.986,23	13.922,96
40	115,34	6,41	8.924,60	2,96	10,22	364,75	15,24	12,58	2.314,58	11.603,93
50	92,28	7,22	8.042,85	2,36	10,52	300,37	12,19	12,47	1.835,79	10.179,01
60	76,90	7,08	6.573,41	1,97	11,26	268,02	10,16	13,48	1.654,41	8.495,84
70	65,91	8,64	6.878,47	1,69	12,77	260,47	8,71	14,54	1.529,79	8.668,73
80	57,67	10,28	7.162,65	1,48	14,83	264,64	7,62	15,58	1.433,99	8.861,29

EK-10 (devamı). Doğu tüpü 2, negatif eğim (DT_2.2) bölümü emisyon hesapları

Ek 10.13. DT_2’de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, NO_x emisyon tablosu

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	6,60	8,70	11,70	15,90	27,70	7,34	2,4939
30	7,20	10,10	14,40	20,40	34,00	8,22	2,7931
40	6,90	10,20	15,70	23,80	40,20	8,06	2,7387
50	6,50	10,40	17,10	27,20	41,40	7,87	2,6741
60	7,70	10,70	18,50	37,90	57,50	8,75	2,975
70	9,00	16,60	29,60	48,60	73,60	11,66	3,9644
80	9,40	20,00	43,20	75,60	108,60	13,11	4,4574
fh	1,00						
ft	0,34						

Ek 10.14. DT_2’de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (G_e)

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	55,30	76,20	88,70	98,80	104,10	62,62	13,7753
30	48,50	75,20	92,70	103,10	111,00	57,85	12,7259
40	41,60	69,30	105,30	119,20	141,20	51,30	11,2849
50	33,10	64,20	111,80	129,80	167,10	43,99	9,6767
60	24,50	62,20	122,90	182,00	247,50	37,70	8,2929
70	16,30	57,50	134,00	234,20	328,00	30,72	6,7584
80	16,30	57,50	145,10	286,50	408,40	30,72	6,7584
fh	1,00						
ft	0,22						
fm	1,00						

Ek 10.15. DT_2’de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, NO_x emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	13,78	1,87	15,65
30	12,73	2,83	15,56
40	11,28	3,77	15,05
50	9,68	4,70	14,38
60	8,29	5,64	13,93
70	6,76	6,57	13,33
80	6,76	7,51	14,27

EK-10 (devamı). Doğu tüpü 2, negatif eğim (DT_2.2) bölümü emisyon hesapları

Ek 10.16. DT_2’de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, NO_x emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (NO _x)				otomobil/dizel (NO _x)				otomobil ortalama (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	70%	30%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	0,87	0,28	1,15	20	3,28	0,28	3,55	20	0,80	1,07	1,87
30	0,89	0,43	1,31	30	3,53	0,43	3,96	30	0,92	1,19	2,11
40	1,01	0,55	1,56	40	3,63	0,55	4,19	40	1,09	1,26	2,35
50	0,96	0,70	1,66	50	3,75	0,70	4,46	50	1,16	1,34	2,50
60	1,02	0,83	1,85	60	4,16	0,83	4,99	60	1,30	1,50	2,79
70	1,09	0,98	2,07	70	4,67	0,98	5,65	70	1,45	1,70	3,14
80	1,24	1,13	2,37	80	4,72	1,13	5,84	80	1,66	1,75	3,41

Ek 10.17. DT_2’de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, NO_x emisyon miktarları (G_e)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (NO _x)				orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (NO _x)				orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	40%	60%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	0,50	0,28	0,77	20	2,49	0,28	2,77	20	0,31	1,66	1,97
30	0,49	0,43	0,92	30	2,79	0,43	3,22	30	0,37	1,93	2,30
40	0,49	0,55	1,04	40	2,74	0,55	3,29	40	0,42	1,98	2,39
50	0,46	0,70	1,16	50	2,67	0,70	3,38	50	0,46	2,03	2,49
60	0,49	0,83	1,32	60	2,98	0,83	3,80	60	0,53	2,28	2,81
70	0,58	0,98	1,55	70	3,96	0,98	4,94	70	0,62	2,97	3,59
80	0,66	1,13	1,79	80	4,46	1,13	5,59	80	0,71	3,35	4,07

Ek 10.18. DT_2’de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam NO_x emisyon miktarları (G_{tun,NOx})

NO _x GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	1,00	ppm	Camb	0,00	ppm	Cadm-Camb	1,00	0,0019	g/m3	1,9000
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			Nox yoğunluk kg/m3
hızı	otomobil	qNOu	qNO	oyt	qNOu	qNO	ağır vasıta	qNOu	qNO	Qtotale-NO
km/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	m3/h
20	230,69	1,87	226.823,26	5,91	1,97	6.132,67	30,48	15,65	251.023,57	483.979,50
30	153,79	2,11	170.556,70	3,94	2,30	4.764,67	20,32	15,56	166.365,62	341.686,99
40	115,34	2,35	142.467,34	2,96	2,39	3.721,92	15,24	15,05	120.724,91	266.914,17
50	92,28	2,50	121.255,71	2,36	2,49	3.099,21	12,19	14,38	92.267,57	216.622,49
60	76,90	2,79	113.117,95	1,97	2,81	2.916,37	10,16	13,93	74.495,98	190.530,30
70	65,91	3,14	109.059,08	1,69	3,59	3.188,93	8,71	13,33	61.111,25	173.359,26
80	57,67	3,41	103.566,59	1,48	4,07	3.162,02	7,62	14,27	57.226,92	163.955,52

EK-10 (devamı). Doğu tüpü 2, negatif eğim (DT_2.2) bölümü emisyon hesapları

Ek 10.22. DT_2’de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (m2/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	2,30	2,80	3,30	3,80	4,60	2,48	0,52
30	2,30	2,90	3,50	4,70	5,90	2,51	0,53
40	2,80	3,30	4,20	5,40	7,20	2,98	0,62
50	2,70	3,70	4,80	6,10	8,80	3,05	0,64
60	3,00	4,20	5,90	7,20	10,50	3,42	0,72
70	3,30	4,60	6,90	9,80	12,20	3,76	0,79
80	4,60	6,40	9,10	12,30	14,80	5,23	1,10
fh	1,00						
ft	0,21						

Ek 10.23. DT_2’de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASİTA/DİZEL (HGV) (m2/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	4,30	5,60	6,50	7,40	8,50	4,76	4,33
30	4,10	5,60	6,80	8,40	9,90	4,63	4,21
40	3,90	5,80	8,00	10,50	12,90	4,57	4,15
50	3,70	5,80	8,60	11,90	14,90	4,44	4,04
60	3,70	6,00	9,30	14,30	19,30	4,51	4,10
70	3,80	6,30	10,10	16,70	23,60	4,68	4,25
80	3,70	6,60	12,30	19,40	28,00	4,72	4,29
fh	1,00						
ft	0,91						
fm	1,00						

Ek 10.24. DT_2’de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, bulanıklık emisyon miktarları (Ge)

ağır vasıta (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	4,33	8,80	13,13
30	4,21	13,30	17,51
40	4,15	17,70	21,85
50	4,04	22,10	26,14
60	4,10	26,50	30,60
70	4,25	30,90	35,15
80	4,29	35,30	39,59

EK-10 (devamı). Doğu tüpü 2, negatif eğim (DT_2.2) bölümü emisyon hesapları

Ek 10.25. DT_2'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,09	1,30	1,39
30	0,09	2,00	2,09
40	0,19	2,60	2,79
50	0,19	3,30	3,49
60	0,19	3,90	4,09
70	0,22	4,60	4,82
80	0,28	5,30	5,58

otomobil/dizel (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,45	1,30	1,75
30	0,49	2,00	2,49
40	0,51	2,60	3,11
50	0,55	3,30	3,85
60	0,59	3,90	4,49
70	0,67	4,60	5,27
80	0,73	5,30	6,03

otomobil ortalama (bulanıklık)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,56	1,05	1,61
30	0,84	1,49	2,33
40	1,11	1,86	2,98
50	1,39	2,31	3,71
60	1,63	2,69	4,33
70	1,93	3,16	5,09
80	2,23	3,62	5,85

Ek 10.26. DT_2'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

hafif yüklü ticari araç/benzin (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,08	1,30	1,38
30	0,08	2,00	2,08
40	0,08	2,60	2,68
50	0,11	3,30	3,41
60	0,11	3,90	4,01
70	0,19	4,60	4,79
80	0,45	5,30	5,75

hafif yüklü ticari araç/dizel (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,52	1,30	1,82
30	0,53	2,00	2,53
40	0,62	2,60	3,22
50	0,64	3,30	3,94
60	0,72	3,90	4,62
70	0,79	4,60	5,39
80	1,10	5,30	6,40

hafif yüklü ticari araç ortalama (bulanıklık)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,55	1,09	1,64
30	0,83	1,52	2,35
40	1,07	1,93	3,01
50	1,36	2,36	3,73
60	1,60	2,77	4,37
70	1,91	3,23	5,15
80	2,30	3,84	6,14

Ek 10.27. DT_2'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam bulanıklık emisyon miktarları ($G_{tun, bulanıklık}$)

GÖRÜŞ MESAFESİ İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
							K	0,007	m-1	
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qPMu	qPM	oyt	qPMu	qPM	ağır vasıta	qPMu	qPM	Qtotat-PM
km/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	m3/h
20	230,69	1,61	53.007,87	5,91	1,64	1.387,72	30,48	13,13	57.159,49	111.555,07
30	153,79	2,33	51.152,90	3,94	2,35	1.321,68	20,32	17,51	50.825,90	103.300,48
40	115,34	2,98	49.092,73	2,96	3,01	1.269,31	15,24	21,85	47.580,07	97.942,12
50	92,28	3,71	48.854,14	2,36	3,73	1.258,81	12,19	26,14	45.521,63	95.634,57
60	76,90	4,33	47.520,42	1,97	4,37	1.231,01	10,16	30,60	44.413,50	93.164,92
70	65,91	5,09	47.948,89	1,69	5,15	1.241,83	8,71	35,15	43.735,19	92.925,91
80	57,67	5,85	48.199,06	1,48	6,14	1.295,95	7,62	39,59	43.097,67	92.592,69

EK-10 (devamı). Doğu tüpü 2, negatif eğim (DT_2.2) bölümü emisyon hesapları

Ek 10.28. DT_2’de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı, gerekli asgari taze hava miktarları

EMİSYON GİDERMEK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARLARI							
trafik	CO	TOPLAM	NO2	TOPLAM	BULANIKLIK	TOPLAM	DİZAYN DEĞERİ
hızı	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA
km/h	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/s
20	21.673,75	6,02	96.795,90	26,89	111.555,07	30,99	30,99
30	13.922,96	3,87	68.337,40	18,98	103.300,48	28,69	28,69
40	11.603,93	3,22	53.382,83	14,83	97.942,12	27,21	27,21
50	10.179,01	2,83	43.324,50	12,03	95.634,57	26,57	26,57
60	8.495,84	2,36	38.106,06	10,59	93.164,92	25,88	25,88
70	8.668,73	2,41	34.671,85	9,63	92.925,91	25,81	25,81

EK-11 (devamı). Doğu tüpü 3, (DT_3) bölümü emisyon hesapları

Ek 11.4. DT_3'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	1,20	1,50	1,80	1,90	2,10	1,31	0,34
30	1,30	1,60	2,00	2,20	2,40	1,41	0,37
40	1,30	1,70	2,00	2,30	2,50	1,44	0,37
50	1,40	1,70	2,10	2,50	2,80	1,51	0,39
60	1,40	1,70	2,10	2,70	3,00	1,51	0,39
70	1,60	1,80	2,30	3,00	3,30	1,67	0,43
80	1,70	1,90	2,50	3,30	3,60	1,77	0,46
fh	1,00						
ft	0,26						

Ek 11.5. DT_3'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	11,40	17,80	22,30	26,20	30,60	13,64	9,82
30	10,10	18,30	23,90	30,60	37,80	12,97	9,34
40	8,70	18,80	26,90	37,30	48,10	12,24	8,81
50	6,20	19,30	29,40	43,20	56,80	10,79	7,77
60	6,10	19,80	34,90	53,30	62,30	10,90	7,84
70	6,10	20,30	40,30	63,10	67,80	11,07	7,97
80	6,10	20,70	45,80	73,30	77,20	11,21	8,07
fh	1,00						
ft	0,72						
fm	1,00						

Ek 11.6. DT_3'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	9,82	1,87	11,69
30	9,34	2,83	12,17
40	8,81	3,77	12,58
50	7,77	4,70	12,47
60	7,84	5,64	13,48
70	7,97	6,57	14,54
80	8,07	7,51	15,58

EK-11 (devamı). Doğu tüpü 3, (DT_3) bölümü emisyon hesapları

Ek 11.7. DT_3'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, CO emisyon miktarları (Ge)

otomobil/benzin (CO)				otomobil/dizel (CO)				otomobil ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	70%	30%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	7,84	0,28	8,11	20	0,82	0,28	1,09	20	5,68	0,33	6,01
30	7,05	0,43	7,48	30	0,94	0,43	1,37	30	5,23	0,41	5,64
40	7,96	0,55	8,51	40	0,94	0,55	1,49	40	5,96	0,45	6,41
50	8,92	0,70	9,63	50	0,89	0,70	1,59	50	6,74	0,48	7,22
60	8,57	0,83	9,40	60	0,84	0,83	1,67	60	6,58	0,50	7,08
70	10,59	0,98	11,56	70	0,84	0,98	1,82	70	8,10	0,55	8,64
80	12,72	1,13	13,85	80	0,84	1,13	1,97	80	9,69	0,59	10,28

Ek 11.8. DT_3'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, CO emisyon miktarları (Ge)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	40%	60%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	20,80	0,28	21,07	20	0,34	0,28	0,62	20	8,43	0,37	8,80
30	22,34	0,43	22,77	30	0,37	0,43	0,79	30	9,11	0,47	9,58
40	23,60	0,55	24,16	40	0,37	0,55	0,93	40	9,66	0,56	10,22
50	23,96	0,70	24,66	50	0,39	0,70	1,09	50	9,86	0,66	10,52
60	25,50	0,83	26,33	60	0,39	0,83	1,22	60	10,53	0,73	11,26
70	28,83	0,98	29,81	70	0,43	0,98	1,41	70	11,92	0,85	12,77
80	33,56	1,13	34,69	80	0,46	1,13	1,59	80	13,88	0,95	14,83

Ek 11.9. DT_3'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam CO emisyon miktarları (G_{tun}, CO)

CO GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	70,00	ppm	Camb	1,00	ppm	Cadm-Camb	69,00	0,08	kg/m ³	1,2000
										CO yoğunluk (kg/m ³)
trafik	otomobil		orta yüklü ticari		ağır vasıta		taze hava toplam			
hızı	otomobil	qCO _u	qCO	orta yük.	qCO _u	qCO	ağır vasıta	qCO _u	qCO	Q _{total} -CO
km/h	sayısı	g/h,u	m ³ /h	sayısı	g/h,u	m ³ /h	sayısı	g/h,u	m ³ /h	m ³ /h
20	438,64	6,01	31.831,71	11,24	8,80	1.194,37	57,96	11,69	8.184,56	41.210,64
30	292,42	5,64	19.928,17	7,49	9,58	867,01	38,64	12,17	5.678,05	26.473,23
40	219,32	6,41	16.969,31	5,62	10,22	693,54	28,98	12,58	4.400,96	22.063,81
50	175,45	7,22	15.292,75	4,50	10,52	571,13	23,18	12,47	3.490,58	19.354,46
60	146,21	7,08	12.498,74	3,75	11,26	509,61	19,32	13,48	3.145,72	16.154,07
70	125,32	8,64	13.078,78	3,21	12,77	495,27	16,56	14,54	2.908,75	16.482,80
80	109,66	10,28	13.619,13	2,81	14,83	503,19	14,49	15,58	2.726,61	16.848,93

EK-11 (devamı). Doğu tüpü 3, (DT_3) bölümü emisyon hesapları

Ek 11.13. DT_3'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, NOX emisyon tablosu

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	6,60	8,70	11,70	15,90	27,70	7,34	2,4939
30	7,20	10,10	14,40	20,40	34,00	8,22	2,7931
40	6,90	10,20	15,70	23,80	40,20	8,06	2,7387
50	6,50	10,40	17,10	27,20	41,40	7,87	2,6741
60	7,70	10,70	18,50	37,90	57,50	8,75	2,975
70	9,00	16,60	29,60	48,60	73,60	11,66	3,9644
80	9,40	20,00	43,20	75,60	108,60	13,11	4,4574
fh	1,00						
ft	0,34						

Ek 11.14. DT_3'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (Ge)

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	55,30	76,20	88,70	98,80	104,10	62,62	13,7753
30	48,50	75,20	92,70	103,10	111,00	57,85	12,7259
40	41,60	69,30	105,30	119,20	141,20	51,30	11,2849
50	33,10	64,20	111,80	129,80	167,10	43,99	9,6767
60	24,50	62,20	122,90	182,00	247,50	37,70	8,2929
70	16,30	57,50	134,00	234,20	328,00	30,72	6,7584
80	16,30	57,50	145,10	286,50	408,40	30,72	6,7584
fh	1,00						
ft	0,22						
fm	1,00						

Ek 11.15. DT_3'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, NOX emisyon miktarları (Ge)

ağır vasıta (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	13,78	1,87	15,65
30	12,73	2,83	15,56
40	11,28	3,77	15,05
50	9,68	4,70	14,38
60	8,29	5,64	13,93
70	6,76	6,57	13,33
80	6,76	7,51	14,27

EK-11 (devamı). Doğu tüpü 3, (DT_3) bölümü emisyon hesapları

Ek 11.16. DT_3’de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, NOX emisyon miktarları (Ge)

otomobil/benzin (NOx)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	0,87	0,28	1,15
30	0,89	0,43	1,31
40	1,01	0,55	1,56
50	0,96	0,70	1,66
60	1,02	0,83	1,85
70	1,09	0,98	2,07
80	1,24	1,13	2,37

otomobil/dizel (NOx)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	3,28	0,28	3,55
30	3,53	0,43	3,96
40	3,63	0,55	4,19
50	3,75	0,70	4,46
60	4,16	0,83	4,99
70	4,67	0,98	5,65
80	4,72	1,13	5,84

otomobil ortalama (NOx)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	70%	30%	100%
km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	0,80	1,07	1,87
30	0,92	1,19	2,11
40	1,09	1,26	2,35
50	1,16	1,34	2,50
60	1,30	1,50	2,79
70	1,45	1,70	3,14
80	1,66	1,75	3,41

Ek 11.17. DT_3’de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, NO_x emisyon miktarları (Ge)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (NOx)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	0,50	0,28	0,77
30	0,49	0,43	0,92
40	0,49	0,55	1,04
50	0,46	0,70	1,16
60	0,49	0,83	1,32
70	0,58	0,98	1,55
80	0,66	1,13	1,79

orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (NOx)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	2,49	0,28	2,77
30	2,79	0,43	3,22
40	2,74	0,55	3,29
50	2,67	0,70	3,38
60	2,98	0,83	3,80
70	3,96	0,98	4,94
80	4,46	1,13	5,59

orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (NOx)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	0,31	1,66	1,97
30	0,37	1,93	2,30
40	0,42	1,98	2,39
50	0,46	2,03	2,49
60	0,53	2,28	2,81
70	0,62	2,97	3,59
80	0,71	3,35	4,07

Ek 11.18. DT_3’de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam NO_x emisyon miktarları (G_{tun,NOx})

NOx GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	1,00	ppm	Camb	0,00	ppm	Cadm-Camb	1,00	0,0019	g/m3	1,9000
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			Nox yoğunluk kg/m3
hızı	otomobil	qNOu	qNO	oyt	qNOu	qNO	ağır vasıta	qNOu	qNO	Qtotat-NO
km/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	m3/h
20	438,64	1,87	431.283,66	11,24	1,97	11.660,71	57,96	15,65	477.298,33	920.242,70
30	292,42	2,11	324.297,96	7,49	2,30	9.059,58	38,64	15,56	316.328,99	649.686,53
40	219,32	2,35	270.888,60	5,62	2,39	7.076,90	28,98	15,05	229.547,36	507.512,86
50	175,45	2,50	230.556,63	4,50	2,49	5.892,86	23,18	14,38	175.438,35	411.887,84
60	146,21	2,79	215.083,43	3,75	2,81	5.545,21	19,32	13,93	141.647,29	362.275,93
70	125,32	3,14	207.365,86	3,21	3,59	6.063,46	16,56	13,33	116.197,45	329.626,77
80	109,66	3,41	196.922,39	2,81	4,07	6.012,29	14,49	14,27	108.811,74	311.746,42

EK-11 (devamı). Doğu tüpü 3, (DT_3) bölümü emisyon hesapları

Ek 11.22. DT_3'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (m2/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	2,30	2,80	3,30	3,80	4,60	2,48	0,52
30	2,30	2,90	3,50	4,70	5,90	2,51	0,53
40	2,80	3,30	4,20	5,40	7,20	2,98	0,62
50	2,70	3,70	4,80	6,10	8,80	3,05	0,64
60	3,00	4,20	5,90	7,20	10,50	3,42	0,72
70	3,30	4,60	6,90	9,80	12,20	3,76	0,79
80	4,60	6,40	9,10	12,30	14,80	5,23	1,10
fh	1,00						
ft	0,21						

Ek 11.23. DT_3'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASİTA/DİZEL (HGV) (m2/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	4,30	5,60	6,50	7,40	8,50	4,76	4,33
30	4,10	5,60	6,80	8,40	9,90	4,63	4,21
40	3,90	5,80	8,00	10,50	12,90	4,57	4,15
50	3,70	5,80	8,60	11,90	14,90	4,44	4,04
60	3,70	6,00	9,30	14,30	19,30	4,51	4,10
70	3,80	6,30	10,10	16,70	23,60	4,68	4,25
80	3,70	6,60	12,30	19,40	28,00	4,72	4,29
fh	1,00						
ft	0,91						
fm	1,00						

Ek 11.24. DT_3'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	4,33	8,80	13,13
30	4,21	13,30	17,51
40	4,15	17,70	21,85
50	4,04	22,10	26,14
60	4,10	26,50	30,60
70	4,25	30,90	35,15
80	4,29	35,30	39,59

EK-11 (devamı). Doğu tüpü 3, (DT_3) bölümü emisyon hesapları

Ek 11.25. DT_3'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,09	1,30	1,39
30	0,09	2,00	2,09
40	0,19	2,60	2,79
50	0,19	3,30	3,49
60	0,19	3,90	4,09
70	0,22	4,60	4,82
80	0,28	5,30	5,58

otomobil/dizel (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,45	1,30	1,75
30	0,49	2,00	2,49
40	0,51	2,60	3,11
50	0,55	3,30	3,85
60	0,59	3,90	4,49
70	0,67	4,60	5,27
80	0,73	5,30	6,03

otomobil ortalama (bulanıklık)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,56	1,05	1,61
30	0,84	1,49	2,33
40	1,11	1,86	2,98
50	1,39	2,31	3,71
60	1,63	2,69	4,33
70	1,93	3,16	5,09
80	2,23	3,62	5,85

Ek 11.26. DT_3'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

hafif yüklü ticari araç/benzin (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,08	1,30	1,38
30	0,08	2,00	2,08
40	0,08	2,60	2,68
50	0,11	3,30	3,41
60	0,11	3,90	4,01
70	0,19	4,60	4,79
80	0,45	5,30	5,75

hafif yüklü ticari araç/dizel (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,52	1,30	1,82
30	0,53	2,00	2,53
40	0,62	2,60	3,22
50	0,64	3,30	3,94
60	0,72	3,90	4,62
70	0,79	4,60	5,39
80	1,10	5,30	6,40

hafif yüklü ticari araç ortalama (bulanıklık)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,55	1,09	1,64
30	0,83	1,52	2,35
40	1,07	1,93	3,01
50	1,36	2,36	3,73
60	1,60	2,77	4,37
70	1,91	3,23	5,15
80	2,30	3,84	6,14

Ek 11.27. DT_3'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam bulanıklık emisyon miktarları ($G_{tun, bulanıklık}$)

GÖRÜŞ MESAFESİ İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
							K	0,007	m-1	
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qPMu	qPM	oyt	qPMu	qPM	ağır vasıta	qPMu	qPM	Qttotal-PM
km/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	m3/h
20	438,64	1,61	100.789,61	11,24	1,64	2.638,62	57,96	13,13	108.683,54	212.111,76
30	292,42	2,33	97.262,56	7,49	2,35	2.513,05	38,64	17,51	96.640,80	196.416,41
40	219,32	2,98	93.345,34	5,62	3,01	2.413,48	28,98	21,85	90.469,16	186.227,98
50	175,45	3,71	92.891,67	4,50	3,73	2.393,51	23,18	26,14	86.555,21	181.840,39
60	146,21	4,33	90.355,73	3,75	4,37	2.340,65	19,32	30,60	84.448,20	177.144,58
70	125,32	5,09	91.170,43	3,21	5,15	2.361,23	16,56	35,15	83.158,45	176.690,11
80	109,66	5,85	91.646,10	2,81	6,14	2.464,14	14,49	39,59	81.946,28	176.056,52

EK-11 (devamı). Doğu tüpü 3, (DT_3) bölümü emisyon hesapları

Ek 11.28. DT_3'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı, gerekli asgari taze hava miktarları

EMİSYON GİDERMEK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARLARI							
trafik	CO	TOPLAM	NO2	TOPLAM	BULANIKLIK	TOPLAM	DİZAYN DEĞERİ
hızı	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA
km/h	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/s
20	41.210,64	11,45	184.048,54	51,12	212.111,76	58,92	58,92
30	26.473,23	7,35	129.937,31	36,09	196.416,41	54,56	54,56
40	22.063,81	6,13	101.502,57	28,20	186.227,98	51,73	51,73
50	19.354,46	5,38	82.377,57	22,88	181.840,39	50,51	50,51
60	16.154,07	4,49	72.455,19	20,13	177.144,58	49,21	49,21

EK-12 (devamı). Doğu tüpü 4, (DT_4) bölümü emisyon hesapları

Ek 12.4. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	1,20	1,50	1,80	1,90	2,10	1,31	0,34
30	1,30	1,60	2,00	2,20	2,40	1,41	0,37
40	1,30	1,70	2,00	2,30	2,50	1,44	0,37
50	1,40	1,70	2,10	2,50	2,80	1,51	0,39
60	1,40	1,70	2,10	2,70	3,00	1,51	0,39
70	1,60	1,80	2,30	3,00	3,30	1,67	0,43
80	1,70	1,90	2,50	3,30	3,60	1,77	0,46
fh	1,00						
ft	0,26						

Ek 12.5. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, CO emisyon tablosu

CO EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASİTA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	sonuç
V (km/h)	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO	qCO
20	11,40	17,80	22,30	26,20	30,60	13,64	9,82
30	10,10	18,30	23,90	30,60	37,80	12,97	9,34
40	8,70	18,80	26,90	37,30	48,10	12,24	8,81
50	6,20	19,30	29,40	43,20	56,80	10,79	7,77
60	6,10	19,80	34,90	53,30	62,30	10,90	7,84
70	6,10	20,30	40,30	63,10	67,80	11,07	7,97
80	6,10	20,70	45,80	73,30	77,20	11,21	8,07
fh	1,00						
ft	0,72						
fm	1,00						

Ek 12.6. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, CO emisyon miktarları (G_e)

ağır vasıta (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	9,82	1,87	11,69
30	9,34	2,83	12,17
40	8,81	3,77	12,58
50	7,77	4,70	12,47
60	7,84	5,64	13,48
70	7,97	6,57	14,54
80	8,07	7,51	15,58

EK-12 (devamı). Doğu tüpü 4, (DT_4) bölümü emisyon hesapları

Ek 12.7. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, CO emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (CO)				otomobil/dizel (CO)				otomobil ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	70%	30%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	7,84	0,28	8,11	20	0,82	0,28	1,09	20	5,68	0,33	6,01
30	7,05	0,43	7,48	30	0,94	0,43	1,37	30	5,23	0,41	5,64
40	7,96	0,55	8,51	40	0,94	0,55	1,49	40	5,96	0,45	6,41
50	8,92	0,70	9,63	50	0,89	0,70	1,59	50	6,74	0,48	7,22
60	8,57	0,83	9,40	60	0,84	0,83	1,67	60	6,58	0,50	7,08
70	10,59	0,98	11,56	70	0,84	0,98	1,82	70	8,10	0,55	8,64
80	12,72	1,13	13,85	80	0,84	1,13	1,97	80	9,69	0,59	10,28

Ek 12.8. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, CO emisyon miktarları (G_e)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (CO)				orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (CO)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	emisyon	bulanıklık	toplam	trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	miktarı	faktörü	emisyon	hızı	40%	60%	100%
km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h	km/h	g/h	g/h	g/h
20	20,80	0,28	21,07	20	0,34	0,28	0,62	20	8,43	0,37	8,80
30	22,34	0,43	22,77	30	0,37	0,43	0,79	30	9,11	0,47	9,58
40	23,60	0,55	24,16	40	0,37	0,55	0,93	40	9,66	0,56	10,22
50	23,96	0,70	24,66	50	0,39	0,70	1,09	50	9,86	0,66	10,52
60	25,50	0,83	26,33	60	0,39	0,83	1,22	60	10,53	0,73	11,26
70	28,83	0,98	29,81	70	0,43	0,98	1,41	70	11,92	0,85	12,77
80	33,56	1,13	34,69	80	0,46	1,13	1,59	80	13,88	0,95	14,83

Ek 12.9. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam CO emisyon miktarları (G_{tun,CO})

CO GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	70,00	ppm	Camb	1,00	ppm	Cadm-Camb	69,00	0,08	kg/m ³	1,2000
										CO yoğunluk (kg/m ³)
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qCOu	qCO	orta yük.	qCOu	qCO	ağır vasıta	qCOu	qCO	Qtotal-CO
km/h	sayısı	g/h,u	m ³ /h	sayısı	g/h,u	m ³ /h	sayısı	g/h,u	m ³ /h	m ³ /h
20	270,76	6,01	19.649,20	6,94	8,80	737,27	35,78	11,69	5.052,20	25.438,67
30	180,51	5,64	12.301,34	4,63	9,58	535,19	23,85	12,17	3.504,97	16.341,50
40	135,38	6,41	10.474,88	3,47	10,22	428,11	17,89	12,58	2.716,64	13.619,64
50	108,31	7,22	9.439,97	2,78	10,52	352,55	14,31	12,47	2.154,68	11.947,20
60	90,25	7,08	7.715,27	2,31	11,26	314,57	11,93	13,48	1.941,80	9.971,65
70	77,36	8,64	8.073,32	1,98	12,77	305,72	10,22	14,54	1.795,52	10.174,57
80	67,69	10,28	8.406,87	1,73	14,83	310,61	8,94	15,58	1.683,09	10.400,57

EK-12 (devamı). Doğu tüpü 4, (DT_4) bölümü emisyon hesapları

Ek 12.13. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, NO_x emisyon tablosu

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	6,60	8,70	11,70	15,90	27,70	7,34	2,4939
30	7,20	10,10	14,40	20,40	34,00	8,22	2,7931
40	6,90	10,20	15,70	23,80	40,20	8,06	2,7387
50	6,50	10,40	17,10	27,20	41,40	7,87	2,6741
60	7,70	10,70	18,50	37,90	57,50	8,75	2,975
70	9,00	16,60	29,60	48,60	73,60	11,66	3,9644
80	9,40	20,00	43,20	75,60	108,60	13,11	4,4574
fh	1,00						
ft	0,34						

Ek 12.14. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, NO_x emisyon tablosu

NO _x EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (g/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	sonuç
V (km/h)	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x	qNO _x
20	55,30	76,20	88,70	98,80	104,10	62,62	13,7753
30	48,50	75,20	92,70	103,10	111,00	57,85	12,7259
40	41,60	69,30	105,30	119,20	141,20	51,30	11,2849
50	33,10	64,20	111,80	129,80	167,10	43,99	9,6767
60	24,50	62,20	122,90	182,00	247,50	37,70	8,2929
70	16,30	57,50	134,00	234,20	328,00	30,72	6,7584
80	16,30	57,50	145,10	286,50	408,40	30,72	6,7584
fh	1,00						
ft	0,22						
fm	1,00						

Ek 12.15. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, NO_x emisyon miktarları (Ge)

ağır vasıta (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	13,78	1,87	15,65
30	12,73	2,83	15,56
40	11,28	3,77	15,05
50	9,68	4,70	14,38
60	8,29	5,64	13,93
70	6,76	6,57	13,33
80	6,76	7,51	14,27

EK-12 (devamı). Doğu tüpü 4, (DT_4) bölümü emisyon hesapları

Ek 12.16. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, NO_x emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	0,87	0,28	1,15
30	0,89	0,43	1,31
40	1,01	0,55	1,56
50	0,96	0,70	1,66
60	1,02	0,83	1,85
70	1,09	0,98	2,07
80	1,24	1,13	2,37

otomobil/dizel (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	3,28	0,28	3,55
30	3,53	0,43	3,96
40	3,63	0,55	4,19
50	3,75	0,70	4,46
60	4,16	0,83	4,99
70	4,67	0,98	5,65
80	4,72	1,13	5,84

otomobil ortalama (NO _x)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	70%	30%	100%
km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	0,80	1,07	1,87
30	0,92	1,19	2,11
40	1,09	1,26	2,35
50	1,16	1,34	2,50
60	1,30	1,50	2,79
70	1,45	1,70	3,14
80	1,66	1,75	3,41

Ek 12.17. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, NO_x emisyon miktarları (G_e)

orta yüklü hafif ticari taşıt/benzin (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	0,50	0,28	0,77
30	0,49	0,43	0,92
40	0,49	0,55	1,04
50	0,46	0,70	1,16
60	0,49	0,83	1,32
70	0,58	0,98	1,55
80	0,66	1,13	1,79

orta yüklü hafif ticari taşıt/dizel (NO _x)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	g/h	g/h	g/h
20	2,49	0,28	2,77
30	2,79	0,43	3,22
40	2,74	0,55	3,29
50	2,67	0,70	3,38
60	2,98	0,83	3,80
70	3,96	0,98	4,94
80	4,46	1,13	5,59

orta yüklü hafif ticari taşıt ortalama (NO _x)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m3/h	m3/h	m3/h
20	0,31	1,66	1,97
30	0,37	1,93	2,30
40	0,42	1,98	2,39
50	0,46	2,03	2,49
60	0,53	2,28	2,81
70	0,62	2,97	3,59
80	0,71	3,35	4,07

Ek 12.18. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam NO_x emisyon miktarları (G_{tun,NOx})

NO _x GAZINI TÜNELDEN UZAKLAŞTIRMAK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
Cadm	1,00	ppm	Camb	0,00	ppm	Cadm-Camb	1,00	0,0019	g/m3	1,9000
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			Nox yoğunluk kg/m3
hızı	otomobil	qNOu	qNO	oyt	qNOu	qNO	ağır vasıta	qNOu	qNO	Qtotat-NO
km/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	sayısı	g/h,u	m3/h	m3/h
20	270,76	1,87	266.224,48	6,94	1,97	7.197,97	35,78	15,65	294.628,60	568.051,05
30	180,51	2,11	200.183,92	4,63	2,30	5.592,34	23,85	15,56	195.264,81	401.041,07
40	135,38	2,35	167.215,19	3,47	2,39	4.368,46	17,89	15,05	141.695,90	313.279,54
50	108,31	2,50	142.318,91	2,78	2,49	3.637,57	14,31	14,38	108.295,28	254.251,75
60	90,25	2,79	132.767,55	2,31	2,81	3.422,97	11,93	13,93	87.436,60	223.627,12
70	77,36	3,14	128.003,62	1,98	3,59	3.742,87	10,22	13,33	71.726,82	203.473,31
80	67,69	3,41	121.557,03	1,73	4,07	3.711,29	8,94	14,27	67.167,74	192.436,06

EK-12 (devamı). Doğu tüpü 4, (DT_4) bölümü emisyon hesapları

Ek 12.22. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel LCV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT/DİZEL (LCV) (m2/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	2,30	2,80	3,30	3,80	4,60	2,48	0,52
30	2,30	2,90	3,50	4,70	5,90	2,51	0,53
40	2,80	3,30	4,20	5,40	7,20	2,98	0,62
50	2,70	3,70	4,80	6,10	8,80	3,05	0,64
60	3,00	4,20	5,90	7,20	10,50	3,42	0,72
70	3,30	4,60	6,90	9,80	12,20	3,76	0,79
80	4,60	6,40	9,10	12,30	14,80	5,23	1,10
fh	1,00						
ft	0,21						

Ek 12.23. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim dizel HGV, bulanıklık emisyon tablosu

BULANIKLIK EMİSYON FAKTÖRLERİ AĞIR VASITA/DİZEL (HGV) (m2/h)							
S (%)	-4	-2	0	2	4	-3,3	
V (km/h)	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	QPM	sonuc
20	4,30	5,60	6,50	7,40	8,50	4,76	4,33
30	4,10	5,60	6,80	8,40	9,90	4,63	4,21
40	3,90	5,80	8,00	10,50	12,90	4,57	4,15
50	3,70	5,80	8,60	11,90	14,90	4,44	4,04
60	3,70	6,00	9,30	14,30	19,30	4,51	4,10
70	3,80	6,30	10,10	16,70	23,60	4,68	4,25
80	3,70	6,60	12,30	19,40	28,00	4,72	4,29
fh	1,00						
ft	0,91						
fm	1,00						

Ek 12.24. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim HGV, bulanıklık emisyon miktarları (Ge)

ağır vasıta (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	4,33	8,80	13,13
30	4,21	13,30	17,51
40	4,15	17,70	21,85
50	4,04	22,10	26,14
60	4,10	26,50	30,60
70	4,25	30,90	35,15
80	4,29	35,30	39,59

EK-12 (devamı). Doğu tüpü 4, (DT_4) bölümü emisyon hesapları

Ek 12.25. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim PC, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

otomobil/benzin (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,09	1,30	1,39
30	0,09	2,00	2,09
40	0,19	2,60	2,79
50	0,19	3,30	3,49
60	0,19	3,90	4,09
70	0,22	4,60	4,82
80	0,28	5,30	5,58

otomobil/dizel (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,45	1,30	1,75
30	0,49	2,00	2,49
40	0,51	2,60	3,11
50	0,55	3,30	3,85
60	0,59	3,90	4,49
70	0,67	4,60	5,27
80	0,73	5,30	6,03

otomobil ortalama (bulanıklık)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,56	1,05	1,61
30	0,84	1,49	2,33
40	1,11	1,86	2,98
50	1,39	2,31	3,71
60	1,63	2,69	4,33
70	1,93	3,16	5,09
80	2,23	3,62	5,85

Ek 12.26. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı birim LCV, bulanıklık emisyon miktarları (G_e)

hafif yüklü ticari araç/benzin (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,08	1,30	1,38
30	0,08	2,00	2,08
40	0,08	2,60	2,68
50	0,11	3,30	3,41
60	0,11	3,90	4,01
70	0,19	4,60	4,79
80	0,45	5,30	5,75

hafif yüklü ticari araç/dizel (bulanıklık)			
trafik	emisyon	bulanıklık	toplam
hızı	miktarı	faktörü	emisyon
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,52	1,30	1,82
30	0,53	2,00	2,53
40	0,62	2,60	3,22
50	0,64	3,30	3,94
60	0,72	3,90	4,62
70	0,79	4,60	5,39
80	1,10	5,30	6,40

hafif yüklü ticari araç ortalama (bulanıklık)			
trafik	benzin	dizel	toplam
hızı	40%	60%	100%
km/h	m2/h	m2/h	m2/h
20	0,55	1,09	1,64
30	0,83	1,52	2,35
40	1,07	1,93	3,01
50	1,36	2,36	3,73
60	1,60	2,77	4,37
70	1,91	3,23	5,15
80	2,30	3,84	6,14

Ek 12.27. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı, toplam bulanıklık emisyon miktarları ($G_{\text{tun, bulanıklık}}$)

GÖRÜŞ MESAFESİ İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARI HESABI										
							K	0,007	m-1	
trafik	otomobil			orta yüklü ticari			ağır vasıta			taze hava toplam
hızı	otomobil	qPMu	qPM	oyt	qPMu	qPM	ağır vasıta	qPMu	qPM	Qtotal-PM
km/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	sayısı	m2/h,u	m3/h	m3/h
20	270,76	1,61	62.215,81	6,94	1,64	1.628,78	35,78	13,13	67.088,60	130.933,19
30	180,51	2,33	60.038,62	4,63	2,35	1.551,26	23,85	17,51	59.654,81	121.244,70
40	135,38	2,98	57.620,58	3,47	3,01	1.489,80	17,89	21,85	55.845,16	114.955,54
50	108,31	3,71	57.340,54	2,78	3,73	1.477,47	14,31	26,14	53.429,14	112.247,15
60	90,25	4,33	55.775,14	2,31	4,37	1.444,84	11,93	30,60	52.128,52	109.348,50
70	77,36	5,09	56.278,04	1,98	5,15	1.457,55	10,22	35,15	51.332,38	109.067,97
80	67,69	5,85	56.571,67	1,73	6,14	1.521,07	8,94	39,59	50.584,13	108.676,86

EK-12 (devamı). Doğu tüpü 4, (DT_4) bölümü emisyon hesapları

Ek 12.28. DT_4'de, %-3,3 eğimde, hıza bağlı, gerekli asgari taze hava miktarları

EMİSYON GİDERMEK İÇİN GEREKLİ TAZE HAVA MİKTARLARI							
trafik	CO	TOPLAM	NO2	TOPLAM	BULANIKLIK	TOPLAM	DİZAYN DEĞERİ
hızı	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA	TAZE HAVA
km/h	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/h	m3/s	m3/s
20	25.438,67	7,07	113.610,21	31,56	130.933,19	36,37	36,37
30	16.341,50	4,54	80.208,21	22,28	121.244,70	33,68	33,68
40	13.619,64	3,78	62.655,91	17,40	114.955,54	31,93	31,93
50	11.947,20	3,32	50.850,35	14,13	112.247,15	31,18	31,18
60	9.971,65	2,77	44.725,42	12,42	109.348,50	30,37	30,37
70	10.174,57	2,83	40.694,66	11,30	109.067,97	30,30	30,30
80	10.400,57	2,89	38.487,21	10,69	108.676,86	30,19	30,19

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KAÇAN, Özkan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 05.05.1984, Eminönü
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (543) 300 13 68
 e-mail : ozkankacan@gmail.com.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Kocaeli Üniversitesi / Makina	2007
Lise	İzzet Ünver Y.D.A. Lisesi	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-Halen	T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü	Tünel İşletme Şefi
2012-2013	FER YAPI A.Ş.	Mekanik Şefi
2009-2012	BEYAZ TEKNİK LTD.	Proje Mühendisi
2008-2009	ENKA TEKNİK	Saha Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Kaçan, Ö., Dinler, N. (2019). *Determination of The Effect of Ventilation Points During Fire in a Long Roadway Tunnel*, 4th International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2019), Antalya, Turkey, 779.

Kaçan, Ö. (2018). Karayolu Tünellerinde Tehlikeli Madde Taşımacılığı Risk Analizi, *Karayolları Bülteni*, 594, 26-37.



GAZİ GELECEKTİR..