

Metro Tünellerinde ve İstasyonlarında Havalandırma Sistemleri  
ve Marmaray Örneği

Serdar Sertel

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Mart 2010

Ventilation Systems in Subway Tunnels and Stations  
and the Case of Marmaray

Serdar Sertel

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

March 2010

Metro Tünellerinde ve İstasyonlarında Havalandırma Sistemleri  
ve Marmaray Örneği

Serdar Sertel

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Enerji-Termodinamik Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof.Dr. Kemal Taner

Mart 2010

## ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Serdar Sertel'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Metro Tünellerinde ve İstasyonlarında Havalandırma Sistemleri ve Marmaray Örneği" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof.Dr.Kemal Taner

**İkinci Danışman** : -

**Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Prof.Dr.Kemal Taner

**Üye** : Prof.Dr.Yaşar Pancar

**Üye** : Yrd.Doç.Dr. İrfan Üreyen

**Üye** : Yrd.Doç.Dr Korkut Arberk

**Üye** : Yrd.Doç.Dr Ümit Er

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve .....  
sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Dünyada sanayileşme ile başlayan ve hızla devam eden kent nüfusunun artışı şehir içi ulaşım sorununu da beraberinde getirmiştir. Kent içi ulaşım sorununa en etkin çözüm bir yer altı raylı ulaşım ağı olan metro sistemidir. Günümüzde metro sistemleri sadece bir taşımacılık türü olmaktan çıkıp daha iyi bir yaşam kalitesi sağlamada kentsel yapılandırma aracı ve temel faktör haline gelmiştir. Bu sebeple halkın kullanımı için hizmet verecek olan metro sistemlerinin daha çok tercih edilebilir hale getirilmesi gereklidir. Bunun için göz önüne alınması gereken pek çok faktör arasında en önemlilerinden birisi de yolcuların konforunu ve güvenliğini sağlayacak olan bir havalandırma sistemidir.

Bu çalışmanın temel amacı, bir metro sisteminin halka cazip hale getirilmesi için gereken havalandırma sisteminin ölçütlerinin belirlenmesidir. Bu kapsamda metro sistemi bir bütün olarak ele alınmış, inşa ve işletim aşamalarındaki farklar göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca İstanbul ve Türkiye için kent içi ulaşımında çok önemli bir konumda olan Marmaray Projesi havalandırma sistemi tasarımı irdelenerek modern bir metroda olması gereken güvenilir ve ekonomik bir havalandırma sisteminin tasarımı, inşası, işletmeye alınması ve işletilmesinde dikkate alınması gereken noktalar vurgulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Havalandırma ve konfor, metro sistemleri, doğal ve mekanik havalandırma, acil durum havalandırması, Marmaray projesi, SES ve CFD

## SUMMARY

Industrialization and consequent global urbanization yielded the severe problem of metropolitan transportation. The most effective solution to this problem seems to be the subway network systems. Moreover, subway systems are constructive means for urbanization and one of the basic factors for well being of people. So constructing of subway systems as more amenable equipments for service of people is a must. Hence, the ventilation system is one of the most important factors to be considered to fulfill the security and comfort of people in a subway system.

Main purpose of this study is to reveal the criteria needed to evaluate such ventilation systems to attract the people's interest and demand into subway systems. In this context, subway systems are considered as a whole by discriminating between construction and operation phases. Additionally, design of ventilation system of Marmaray Project -which is at a very important position both for İstanbul and Turkey- is scrutinized by emphasizing of the necessary items to be considered for a reliable and economic system, covering of construction, implementation and operation stages at the same time.

**Keywords:** Ventilation and comfort, subway systems, natural and mechanical ventilation, emergency ventilation, Marmaray project, SES and CFD

## TEŞEKKÜR

Lisans, yüksek lisans ve bu tez çalışmam sũresince desteğini ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım sayın Prof.Dr. Kemal TANER'e, teşviklerinden dolayı DLH Marmaray Bölge Müdürũ sayın Dr.Müh. Haluk İbrahim ÖZMEN'e ve çalışmamda karşılaştığım sorunların özũmüne değerli görüşleri ile katkıda bulunan sayın Prof.Dr. Attila İşlier'e teřekkũrlerimi bir borç bilirim.

Her zaman yanımda olan aileme ve desteklerini esirgemeyen arkadaşlarıma şükran duygularımı sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>v</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>v</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. HAVALANDIRMA VE KONFOR</b> .....	<b>2</b>
2.1 Hava, Isıl Konfor ve İç Hava Kalitesine Etki Eden Faktörler .....	2
2.2 Havalandırma .....	3
2.3 Havalandırmanın gerekliliği .....	4
<b>3. TÜNELLER VE METRO TÜNELLERİ</b> .....	<b>5</b>
3.1 Tünellerin Gelişimi.....	6
3.2 Tünel Çeşitleri .....	8
3.2.1 Yapım şekline göre tüneller.....	8
3.2.2 İşlevlerine göre tüneller .....	15
<b>4. METRO SİSTEMLERİ</b> .....	<b>21</b>
4.1 Dünyadaki İlk Metrolar .....	22
4.2 Tarihi İstanbul Metrosu (Tünel).....	24
4.3 İstanbul'daki Modern Metro Sistemleri .....	25
4.4 Marmaray Projesi .....	26
4.4.1 Projenin tarihçesi .....	27
4.4.2 Projenin hedefleri.....	29



## İÇİNDEKİLER (Devam)

	<u>Sayfa</u>
4.4.3 Projenin teknik özellikleri.....	30
4.5 Metro Sistemlerinin Gelişme ve Yaygınlaşma Potansiyeli .....	31
<b>5. METRO SİSTEMLERİNDE HAVALANDIRMA .....</b>	<b>33</b>
5.1. Tünel İnşaatı Sırasında Havalandırma .....	34
5.2. Tünel İnşası Sırasında Uygulanacak Havalandırma Sisteminin Tasarımı .....	38
5.3. Metro Sistemlerinin İşletim Sırasında Havalandırılması ve İlgili Kavramlar ...	42
5.3.1 Doğal havalandırma.....	44
5.3.2 Mekanik (zorlanmış) havalandırma.....	45
5.3.3 Acil durum havalandırması.....	49
5.3.4 İstasyonların iklimlendirilmesi.....	50
5.4 Metro Sistemlerinin İşletilmesi Sırasında Uygulanacak Havalandırma Sisteminde Tasarım Esasları.....	51
5.4.1 Normal işletim koşulları için tasarım esasları .....	52
5.4.2 Acil durum işletim koşulları için tasarım esasları .....	57
5.4.3 Isıl yüklerin analizi .....	64
5.4.4 Çevresel kontrol.....	67
<b>6. MARMARAY PROJESİ'NİN HAVALANDIRMA ÖLÇÜTLERİ AÇISINDAN İRDELENMESİ .....</b>	<b>69</b>
6.1 Marmaray Projesi BC1 Sözleşmesi Güzergâhı ve Tüneller .....	69
6.2 BC1 Güzergâhındaki İstasyon Yapıları.....	71
6.3 Marmaray Projesi BC1 Güzergâhı için Çevresel Kontrol Sistemi.....	72
6.3.1 Marmaray projesi havalandırma sistemi.....	73
6.3.2 Tasarım ölçütleri.....	75
6.3.3 Tasarım yöntemleri.....	77
6.3.4 SES programı analizi sonuçları .....	85
6.3.5 CFD programı analizi sonuçları.....	90

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>93</b>
<b>8. KAYNAKLAR DİZİNİ .....</b>	<b>95</b>
<b>9. EKLER</b>	

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
3.1 Jumbo aygıtıyla patlayıcıların yerleştirileceği lağım deliklerinin açılması .....	9
3.2 Özel delgi araçları ile tünel açma.....	10
3.3 Boru sürme yöntemiyle açılan bir tünel örneği.....	12
3.4 Şemsiyeleme yönteminde uygulanan zemin çivilerine örnek.....	13
3.5 Marmaray projesi batırma tüneli elemanlarının yerleştirilmesi .....	14
3.6 Çift ve tek hatlı demiryolu tüneli enkesitleri.....	15
3.7 Karayolu tünel örneği ve enkesiti .....	16
3.8 Kanal tüneli örneği.....	17
3.9 Hidrolik güç tünelleri en kesit örneği.....	18
3.10 Metro tüneli örneği.....	19
3.11 Paris metrosu tünel inşaatı .....	20
4.1 1861 yılında Londra Metrosu King Cross İstasyonu yakınında aç-kapa yöntemi ile inşa edilen tünel .....	22
4.2 İstanbul’da bulunan tarihi Tünel .....	25
4.3 Marmaray Projesi güzergahı ve projenin diğer raylı sistemlerle bağlantısı.....	25
4.4 İstanbul’da planlanan raylı sistemlerin tamamlanmasıyla oluşacak kent içi ulaşımında demiryolu kullanımı oranı (%) ve dünyadaki önemli kentlerle karşılaştırılması ....	32
5.1 Tünel inşası sırasında kullanılan bir havalandırma kanalı .....	37
5.2 Havalandırma tasarımı için semboller .....	38
5.3 Kanal ve vantilatör karakteristiklerinin kesişimleri .....	42
5.4 İki istasyon ve bir tünel parçasından oluşan sistemin tipik havalandırma düzeneği.....	44
5.5 Doğal ve mekanik havalandırmanın tercihli çalışma prensibi .....	46
5.6 Platform altı egzost sistemi yöntemleri.....	48
5.7 Acil durum havalandırma sistemi ve yolcu tahliyesi planı .....	50
5.8 BSİ değerlerine göre yaz şartlarında daha serin bir ortam isteyen yolcuların oranı	55
5.9 Isıl gücün zamanla değişimi ve yangın evreleri.....	60

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
6.1 Marmaray Projesi BC1 Sözleşmesi güzergahı.....	70
6.2 CFD analizi sırasında kullanılacak vagon tipi ve yangın bölgeleri için model.....	81
6.3 Üsküdar istasyonu CFD analizi için model.....	81
6.4 Sirkeci istasyonu CFD analizi için model.....	82
6.5 Yenikapı TCDD istasyonu CFD analizi için model.....	83
6.6 Yenikapı tüp istasyonu CFD analizi için model .....	84

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u><b>Çizelge</b></u>	<u><b>Sayfa</b></u>
3.1 Yıllara göre kişi başına düşen milli gelir bazında global ölçekte inşasına başlanan tünellerin sayısı .....	5
3.2 Yıllara göre kişi başına düşen milli gelir bazında global ölçekte inşasına başlanan tünellerin uzunlukları .....	6
5.1 Tünel inşaatı sırasında ortaya çıkan kirleticilerin MAC değerleri .....	35
5.2 SIA 196'ya göre tünel inşaatında çalışan iş makineleri için gerekli temiz hava miktarları .....	37
5.3 Metabolik oran, M, değerleri .....	54
5.4 Havalandırma etki katsayısı, $I_a$ , değerleri .....	54
5.5 Yalıtım katsayısı, $I_c$ , değerleri .....	55
5.6 Basınç değişimlerine karşı kulağın tepkisi .....	57
6.1 BC1 Sözleşmesi güzergahındaki istasyon yapıları .....	71
6.2 Güzergahtaki havalandırma yapıları için fan gereklilikleri .....	74

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
°C	Santigrat derece
\$	Amerika Birleşik Devletleri doları
m	Metre
km	Kilometre
dk	Dakika
sn	Saniye
O <sub>2</sub>	Oksijen
N <sub>2</sub>	Azot
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
CO	Karbonmonoksit
NO <sub>x</sub>	Azotoksitler
H <sub>2</sub> S	Hidrojen Sülfür
SO <sub>2</sub>	Kükürtdioksit
CH <sub>4</sub>	Metan
MAC	Hava için izin verilen en yüksek kirletici yoğunluğu
kW	Kilowatt

<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
HVAC	Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme
M.Ö	Milattan önce
yy	Yüz yıl
SFT	Daldırılmış yüzen tüneller
TBM	Tünel açma makinesi
DLH	Demiryolları, Limanlar ve Hava Meydanları inşaatı

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
BC1	Demiryolu Boğaz Tüp Geçişi, Tüneller ve İstasyonlar sözleşmesi
CR1	Gebze-Haydarpaşa, Sirkeci-Halkalı Banliyö Hatlarının İyileştirilmesi; İnşaat, Elektrik ve Mekanik Sistemler sözleşmesi
CR2	Gebze-Haydarpaşa, Sirkeci-Halkalı Banliyö Hatlarının İyileştirilmesi; Demiryolu Araçları İmali sözleşmesi
ÇKS	Çevresel kontrol sistemi
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Hızlı şehirleşmenin bir sonucu olarak ortaya çıkan kamu taşımacılığı gereksinimine yanıt verebilmek amacıyla karmaşık ulaşım sistemleri kurulmaktadır. Gerek kamulaştırma maliyetlerinin aşırı yüksek oluşu, gerekse planlamacıların şehir içinde yer üstünden giden raylı taşımacılık sistemlerini tercih etmemeleri, ulaşım amaçlı yer altı yapılarının inşasına olan talebi artırmaktadır [1].

Uzun yıllar ihmal edilen kent içi metro ulaşım sistemleri 1960'lı yılların ortasında yeniden ilgi odağı olmuştur. Bunun sonucu olarak pek çok kent alanında yeni metro sistemleri veya mevcut sistemlerde genişletmeler yapılması planlanmıştır. Bu aşamada mühendisler halkın yüksek beklentisini ve çevresel faktörleri dikkate alarak 40 yıl önceki tasarım yöntemlerinin yeterliliğini sorgulamaya başlamışlardır.

Yeni metro sistemleri için planlama yapılırken bir transit tünel tasarımında en kritik ve gerekli faktörün iyi tesis edilmiş bir çevresel kontrol sistemi olduğu ortaya çıkmıştır. Söz konusu bu sistem sıcaklık ve nem kontrolünü, hem normal şartlar hem de acil durum şartları için temiz havanın devir daimini ve yangın durumları için güvenlik gereksinimlerini kapsamaktadır. Havalandırma ve çevresel kontrol sistemleri için tasarım ve imalat teknikleri bir kaç on yıl önceye dayandığı için mühendisler bu tekniklerin sadece verimliliği ile değil maliyeti ile de ilgilenmişlerdir [2].

Bu çalışmada öncelikle havalandırma konusu incelenmiş daha sonra metro sistemlerinin yapımı için gerekli olan tüneller hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde metro sistemleri ve beşinci bölümde de metro sistemlerinde havalandırma hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Altıncı bölümde ise Marmaray Projesi havalandırma ölçütleri açısından irdelenmiş olup yedinci bölümde ulaşılan sonuçlar açıklanmıştır.



## BÖLÜM 2

### HAVALANDIRMA VE KONFOR

Havalandırma konusunun tartışılmasına geçmeden önce, havanın özellikleri ve ısı konfor kavramlarının ele alınması yararlı olacaktır.

#### 2.1 Hava, Isıl Konfor ve İç Hava Kalitesine Etki Eden Faktörler

Hava; içindeki değişik gazlar ( oksijen, azot, karbondioksit... vs.), su buharı ve partiküller ( toz, polen, tüy... vs.) ile atmosferi dolduran renksiz ve kokusuz bir gazdır. Havayı oluşturan gazların dağılım oranları aşağıdaki gibidir.

- % 78.084 Azot,
- % 20.9476 Oksijen,
- % 0.934 Argon,
- % 0.0314 Karbondioksit,
- % 0.0018.18 Neon,
- % 0.000524 Helyum,
- % 0002 Metan,
- % 0.0 ile % 0.0001 arasında Hidrojen,
- Xenon, Ozon ve diğer gazlar.

Eğer bir ortamın hava sıcaklığı, nemi, hızı ve radyant sıcaklığı uygun değerlerde ise ve buradaki insanlar oda sıcaklığının daha sıcak veya soğuk olmasını veya nemin daha fazla veya az olmasını gereksinmiyorlarsa bu ortamda ısı konfora ulaşılmış demektir. % 21 oksijen oranı taşıyan, bünyesinde insan sağlığı için zararlı gaz veya parçacıklar bulundurmayan hava, insan ve canlı yaşamı için ilk konfor şartını sağlamıştır. Sıcaklığın mevsimlere göre 18°C ila 28 °C arasında, oransal nemin ise % 40 ila % 60 arasında olması arzulanır [3].

Isıl konfor ve kapalı iç hacimlerdeki hava kalitesi,

- Aktivitelerinin, giysilerinin, kapalı iç hacimde kalma sürelerinin, ısı ve maddesel yüklerinin (örneğin koku) ve sayısal yoğunluklarının fonksiyonu olarak ortamda bulunanlar,
- Yüzey sıcaklıkları, hava sıcaklığı dağılımı, ısı kaynakları ve zehirli madde kaynaklarının fonksiyonu olarak hacmin kendisi,
- Hava sıcaklığı, hava hızı ve nemi, hava değişim oranı, havanın saflığı (koku ve asılı partiküller) ve hava hareketlerinin kontrolünün fonksiyonu olarak HVAC (Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme) sistemi,

gibi faktörlerden etkilenir [4].

## 2.2 Havalandırma

İnsan ömrünün büyük çoğunluğunun (ev, ofis, fabrika, alışveriş merkezleri, toplu ulaşım araçları vs.) kapalı hacimlerde geçtiği düşünülürse bu hacimlerde ve birimlerde konfor şartlarının sağlanması ve korunması için yapılacak en uygun işlem havalandırma ve havalandırma ile tozsuz, kokusuz ve yüksek oksijenli bir solunum havası sağlanmış olacaktır. Uygulanabilecek diğer sistemler (oksijen enjeksiyonu gibi ) yüksek maliyetli ve karmaşık olmasına karşılık tam bir havalandırma da sağlamaz.

En basit şekliyle kullanılmış havanın, yeni ve temiz hava ile değiştirilmesi olarak ifade edilen havalandırma tanımlanan amaca kısmen hizmet etse dahi,

- Yaşanılan birimin kapı-pencerelerinin açılması,
- Vantilatörler ile içeriye temiz hava basılması,
- Aspiratörler ile içerideki kirli havanın dışarıya atılması,

havalandırma olarak algılanmamalıdır. Kirli havanın kontrolsüz olarak dışarıya atılması veya temiz havanın kontrolsüz olarak içeriye basılması, beraberinde başka ciddi sorunlar da yaratabilir. Gerçek bir havalandırmadan bahsedilebilmesi için, havalandırılan hacimdeki basınç kontrol edilmeli, içeriden dışarıya veya dışarıdan içeriye kontrolsüz hava akımları-kaçakları önlenmeli, ısı kaybı ve kazançlarına izin verilmemelidir [3].

### **2.3 Havalandırmanın gerekliliği**

Kapalı hacimlerdeki hava kullanıldıkça yukarıda bahsedilen doğal karışım oranlarını kaybeder ve canlılar için taşıdığı konfor şartlarından uzaklaşır. Böyle durumlarda, sıcaklığın artması ile terleme, düşmesi ile üşüme, nemin artması ile cilt solunumunun yavaşlaması, nemin azalması ile cilt kuruluğu, oksijen oranının azalması ile nefes alma zorluğu ve benzer sorunlar yaşanmaya başlar. İhtiyaç duyulan oksijen normal solunum hızı ile sağlanamadığı için solunum ve kan dolaşımı hızlanır, kan basıncı yükselir, baş ağrısı ve yorgunluk sorunları başlar. Bu sorunlar, solunan havanın içindeki oksijen oranının % 21 in altına düşmesinin sonucudur. Çözüm ise, ortamdaki havanın oksijen oranının tekrar % 21 seviyesine yükseltilmesidir. Kullanım sonucu oksijen oranı azalmış ve kirlenmiş hava atmosfere atılır, yerine dışarıdan, yüksek oksijenli ve kirlenmemiş ( gerekli filtre sistemlerinden geçirilerek ) taze hava alınır. İnsan sağlığının ve verimliliğinin en önemli koşullarından birisi budur. Bu durum tüneller ve metro istasyonları gibi kapalı alanlarda daha da önem kazanmaktadır [3].

### BÖLÜM 3

#### TÜNELLER VE METRO TÜNELLERİ

Metro sistemlerinin başlıca bileşenini oluşturan tüneller zemin ve kaya ortamlarda açılan iki ucu açık, yataya yakın eğimli, uygun ulaştırma yapıları vasıtası ile arasında doğal zorluklar ve tehlikeler olan iki yerleşim biriminin kesintisiz bir şekilde bağlantısını sağlayan yer altı yapılarıdır [1].

Tüneller yolların yeryüzünden geçirilmesinin teknik ya da ekonomik olarak uygun olmadığı durumlarda dağlık arazi, nehirler ve denizler gibi doğal engelleri, izin verilen güvenli ve elverişli ulaştırma sistemiyle, iklim şartlarından da etkilenmeyecek şekilde aşmaya yararlar. Tünellerin amacı devamlı olarak güvenli ve verimli bir şekilde uygun koşullu bir ulaştırma sağlamaktır.

Yolcu ve yüklerin devamlı kesintisiz taşınıyor olması bir toplumun gelişmesi ve sosyal olarak refaha ermesi için gerekli bir durumdur. Bir ülkenin refahı ile tünel sayıları ve uzunlukları arasında kuvvetli bir korelasyon vardır. (Çizelge 3.1 ve 3.2)

Çizelge 3.1 Yıllara göre kişi başına düşen milli gelir bazında global ölçekte inşasına başlanan tünellerin sayısı [5]

	1999	2000	2001	2002	2003	2004
<b>Milli gelir&gt;9386\$</b>	174	201	241	244	283	363
<b>9386\$&gt; Milli gelir &gt;3036\$</b>	8	33	19	35	11	19
<b>3036\$ &gt;Milli gelir&gt;766\$</b>	27	53	51	139	37	17
<b>Milli gelir&lt;766\$</b>	11	13	16	8	11	3
<b>Toplam</b>	220	300	327	426	342	402

Çizelge 3.2 Yıllara göre kişi başına düşen milli gelir bazında global ölçekte inşasına başlanan tünellerin uzunlukları (m) [5]

	1999	2000	2001	2002	2003	2004
<b>Milli gelir&gt;9386\$</b>	801	840	1039	1080	931	1208
<b>9386\$&gt; Milli gelir &gt;3036\$</b>	34	144	62	89	86	81
<b>3036\$ &gt;Milli gelir&gt;766\$</b>	236	408	442	404	225	163
<b>Milli gelir&lt;766\$</b>	97	123	125	47	76	9
<b>Toplam</b>	1168	1515	1668	1620	1318	1461

### 3.1 Tünellerin Gelişimi

Gelişmiş toplumlarda ulusun günlük yaşamının önemli bir parçasını oluşturan tünellerin, ilkçağlardan beri kullanılmakta olduğu bilinmektedir. Eski topluluklar bile yaşamlarını sürdürebilmek, günlük uygulamalarını devam ettirebilmek, gelişebilmek ve değişik toplumlarla yakınlaşabilmek için tünellere ihtiyaç duymuşlardır.

Kâgir kaplamalı ilk tünel örneğinin M.Ö. 200 yıllarında yapılmış olduğuna dair kalıntılar vardır. Fırat nehri altında açılmış olan bu tünel tuğla kaplamalı ve kemerlidir. Tünel yaklaşık 3,80 m eninde ve 4,80 m yüksekliğinde olup uzunluğu 960 m'yi bulmaktadır. Daha sonraları galeri açmanın bir savaş tekniği olarak da kullanıldığı görülmektedir. Mısırlılar ve Romalılar ise daha çok su getirmek amacı ile tüneller açmışlardır. Yunanlılar zamanında ilk tünelin M.Ö. 687'de Sakız Adasında açılmış olduğu tespit edilmiştir [6].

Bütün bu tünellerin açılmasında, elde bulunan olanaklara göre uygulanan yöntemler çok ilkel olmuştur, buna rağmen yüzlerce hatta binlerce yıllık bu tüneller günümüzde hala ayakta durmaktadır ve bu yapılar o zamanın becerisi hakkında düşündürücü fikirler vermektedir. Bu fikirler bugün bile tünel inşaatının gelişmesinde rol oynamaktadır. Örneğin 1556 yılında Alman bilim adamı ve madenciliğin babası

olarak bilinen George Bauer tarafından yazılan “De Re Metallica” adlı eserde izah edilen yöntem uzun zaman kullanılmıştır.

17. yüzyılda gelişmeğe başlayan kanal taşımacılığı tünelciliğin önemli bir aşama kaydetmesine neden olmuştur. Endüstri devriminin başlaması da tünellerin gelişmesinde hızlı bir ivme sağlamıştır, özellikle ulaştırma uygulamalarındaki gelişmeler 18. yy ve 19. yy süresince İngiltere’de meydana gelen endüstriyel gelişim kanallarının ve dolayısıyla tünellerin gelişimini etkilemiştir. Demiryolları ve kayda değer birçok mühendislik uygulamalarındaki gelişmeler de, tünellerin gelişimine katkıda bulunmuştur. Avrupa’daki tünel inşasına ait bu gelişmeler Amerika’ya da geçerek 1818 yılında Pennsylvania da Schuylkill kanalı üzerinde ilk tünele başlanmıştır. 1820’ de biten bu tünel 5,49 m genişliğinde 6,10 m yüksekliğinde ve 250 m uzunluğundadır.

Bu gelişmeler ışığında mühendisler daha zor koşullar altında açılması gereken tüneller hakkında çalışmalara başlamış ve bu noktada su altı tünellerinin ilk örnekleri yapılmaya başlamıştır. Bu çalışmalardan ilki 1823-1843 yılları arasında Thames nehri altında açılan tünel olup tünel açma yöntemlerinde önemli bir gelişmeye neden olmuştur. Fransız mühendis Brunel’in patentini aldığı “Bukliye” metodu ilk defa burada uygulanmıştır. Bu yapı 4,20 m ve 4,80 m çaplarında bir ikiz tünel olup halen Londra Greenwich’de hizmettedir.

Sulu zeminlerde kuyu ve galeri açmak için basınçlı havadan faydalanma yöntemine ait patenti ise Brunel’in çağdaşı Lord Cohrane de 1830 tarihinde almıştır. Fakat bu şekilde tünel açma ilk defa ancak 1839’da Hersent tarafından Fransa’nın Chalannes-sur-Loire bölgesinde, daha sonra da 1879 yılında Anvers’de (Belçika) uygulanmıştır.

1880 yılında bir deniz altı tüneli açma hazırlığı olarak Manş denizi altında iki keşif galerisi açılmıştır. F.Beamont tarafından icat edilen basınçlı hava makinesi 2,05 m çaplı delici ile az sert ve homojen kalker zemini günde 21 m’lik hızla delmeyi başarmıştır.

Fakat büyük tünellerin artışı ancak demiryollarının gelişmesi ile beraber olmuştur. Demiryollarında uygulanan eğimlerin küçük, yarıçapların ise büyük olması nedeni ile daha teknolojik örneğin Batırılmış Tünel diye adlandırılan (Immersed Tunnel) veya Daldırılmış Yüzen Tüneller (SFT) gibi tünellerin uygulanmasını zorunlu kılmıştır. İlk demiryolu tünelinin 1826'da Fransa'da St. Entienne-Terre Noire hattı üzerinde açılmış olduğu bilinmektedir [7].

Türkiye'de ulaşım amaçlı olarak açılan ilk tüneller de 19 yüzyıl sonlarında açılan Anadolu-Bağdat demiryolu ve İstanbul Tüneli olarak bilinmektedir.

## **3.2 Tünel Çeşitleri**

Tüneller, yapım şekillerine göre ve işlevlerine göre olmak üzere iki ana başlıkta incelenebilir. Yapım şekline göre tüneller, tünellerin nasıl bir toprak parçasında nasıl inşa edilmesi gerektiğiyle ilgili, işlevlerine göre tüneller ise tünellerin ne amaçla ve ne şekilde kullanılacağına dair bir sınıflandırmadır.

### **3.2.1 Yapım şekline göre tüneller**

Yapım şekline göre tüneller kayaç zeminlerde açılan tüneller, yumuşak zeminlerde açılan tüneller ve su altında yapılan tüneller şeklinde sınıflandırılabilir.

#### **3.2.1.1 Kayaç zeminlerde açılan tüneller**

Kaya zeminlerde inşa edilen tünellerde genellikle delme-patlatma yöntemi ya da değişik tipteki delgi aygıtları kullanılmaktadır. Kaya zeminlerin kendini taşıyabilir özellikte olması nedeniyle bu tip zeminlerde inşa edilen tünellerde, genellikle stabilite sorunlarıyla karşılaşılmamaktadır.

Klasik yöntem adıyla da anılmakta olan delme-patlatma yöntemi ile tünel inşası yüz yılı aşkın süredir önemli bir değişiklik yapılmadan hemen her türlü kayaç koşullarında kullanılmaktadır.

Bu yöntemle tünel inşasında aşağıdaki sıra izlenmektedir:

1. Kararlaştırılmış bir plana göre önceden aynada patlayıcıların yerleştirileceği lağım delikleri açılmaktadır. Eğer jumbo adlı delgi aygıtı lağım deliklerinin açımında kullanılacaksa aynaya yaklaştırılmakta ve kazı için hazırlanmaktadır. (Şekil 3.1)
2. Açılan deliklere daha önceden hesaplanmış miktarda patlayıcılar yerleştirilmektedir.
3. Deliklerde bulunan patlayıcılar ateşlenmekte ve patlatmadan meydana gelen gazların giderilmesi için havalandırma yapılmaktadır.
4. Düşme ihtimali olan kayaç parçaları düşürülmekte, gerekli durumlarda yeni açılan kısma destek yapıldıktan sonra çıkan kazı malzemesi taşınmaktadır [8].



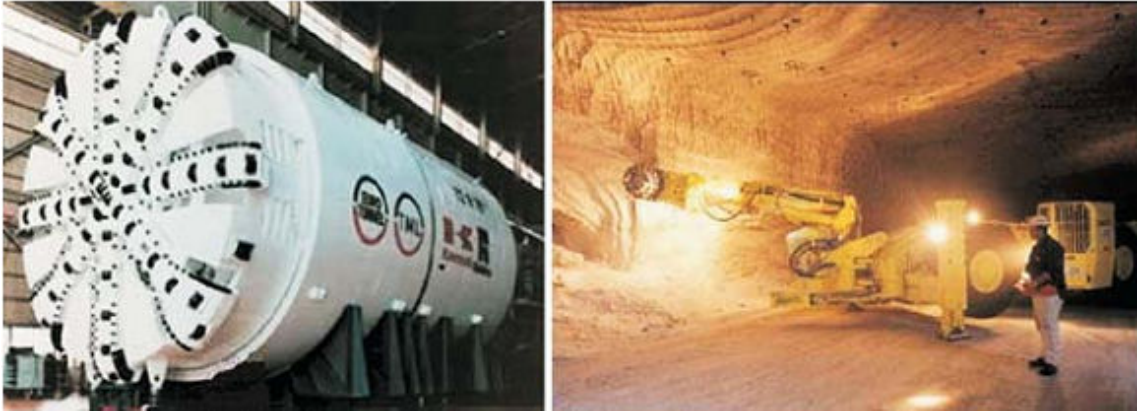
Şekil 3.1 Jumbo aygıtıyla patlayıcıların yerleştirileceği lağım deliklerinin açılması [8]



Özel delgi açma aygıtlarının yaklaşık 50 yıl önce geliştirilmesi ile tünel açımında yeni bir devir başlamıştır ve bu aygıtlar sayesinde kazı hızı geleneksel yöntemlere göre artmıştır. Özel delgi aygıtlarıyla tünel açma, tam kesitte ve yarım kesitte tünel açma olmak üzere iki kısımda incelenebilir.

Tam kesitte tünel açan aygıtlara genel olarak tünel açma makinesi (TBM) denmektedir. Bu aygıt ön yüzüne çeşitli cins ve sayıda kesiciler yerleştirilmiş dönen bir kafa ile içinde gerekli parçaların ve kumanda bölümünün bulunduğu silindirik bir gövdeden ibarettir (Şekil 3.2a).

Diğer bir tünel açma aygıtı da kollu tünel açma aygıtıdır. Bu aygıt kayacı, bir kol üzerinde dönen küçük bir kafaya yerleştirilmiş kesiciler yardımıyla yontmaktadır. Tam kesitte tünel açma aygıtına göre daha az enerjiye ihtiyaç duymakta ve maliyetleri de daha düşük olmaktadır. Tam kesitte tünel açma aygıtından farklı olarak bu aygıt dairesel olmayan kesitlerde de kullanılmaktadır (Şekil 3.2b).



a) Tam kesit açan TBM

b) Kollu tünel açma makinesi

Şekil 3. 2 Özel delgi araçları ile tünel açma [8]

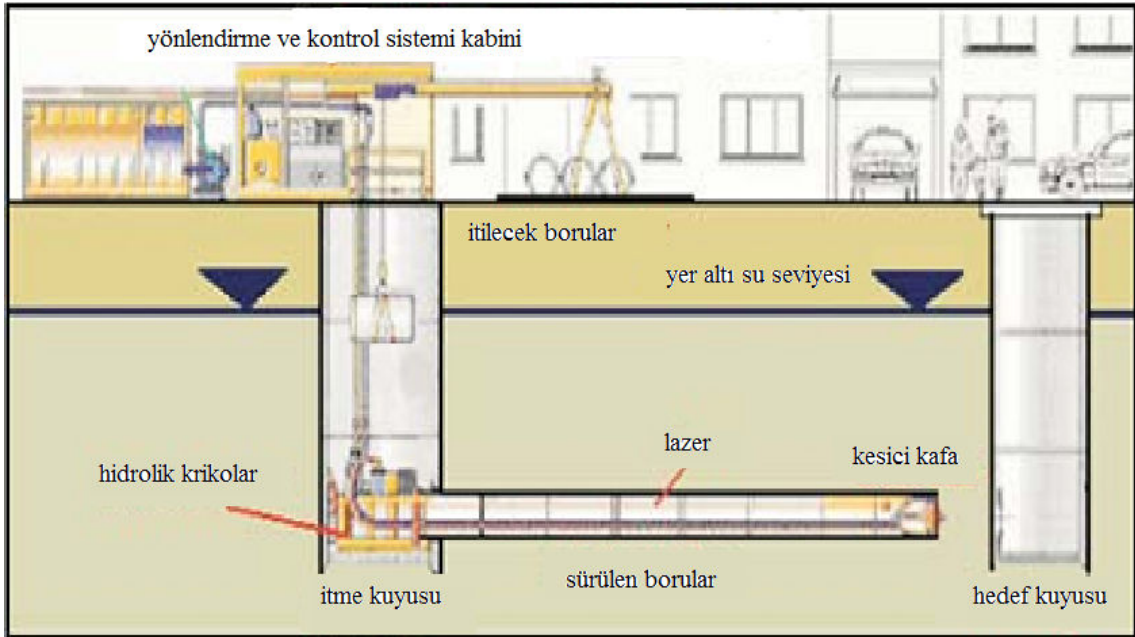
### 3.2.1.2 Yumuşak zeminlerde açılan tüneller

Alt geçitler, gömme depolar, yer altı otoparkları, içme suyu ve kanalizasyon tünelleri gibi yer altı yapılar genellikle sığ derinliklerde ve yumuşak zeminlerde açılmaktadırlar. Bu zeminler düşük taşıma güçlü ve genellikle suya doymuş zeminlerdir. Bu nedenle bu tür zeminlerde tünel açma, özel tekniklerin geliştirilmesini ve genellikle zeminlerin iyileştirilmesini gerektirmektedir.

Bu sebeple zemin iyileştirme yöntemleriyle tünel çevresi stabilitesinin sağlanması ve yeraltı su seviyesinin düşürülmesi gerekmektedir. Stabilitiyi sağlamak ve su sızıntılarını önlemek için enjeksiyon, zemini dondurma, denetimli drenajla zemin suyu seviyesinin düşürülmesi ve basınçlı hava yardımıyla suyun denetim altına alınması gibi işlemler yapılmaktadır.

Yumuşak zeminlerde tünel açma yöntemlerinden ilki kalkanla tünel açma yöntemidir. Kalkan (bukliye) esas olarak çelik bir silindir şeklindedir. Bu aygıt tünel boşluğunu çevreleyerek, zemine destek sağlamak suretiyle kaplamanın yapımına destek gerektirmeden izin vermektedir. Tünel kazısında tam kesit halinde ilerlemeyi sağlayan bu aygıt, yapılmış olan son kaplama kenarından destek alarak ileri doğru solucan hareketine benzer bir hareketle itilmekte ve keskin ucu sayesinde zemine gömülerek kazının yapılmasını sağlamaktadır [8].

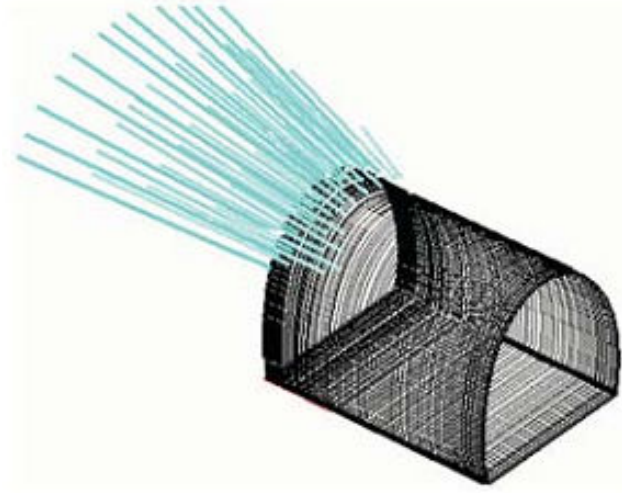
Bir diğer yumuşak zeminde tünel açma yöntemi ise boru sürmeyle açmadır. Bu yöntemde dışarıda imal edilmiş borular, krikolar yardımıyla arka arkaya zemine sürülmektedir. Boru sürme yöntemi, kanalizasyon ve su şebekelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntemde öncelikle boru dönecek yerde giriş ve çıkışta iki adet kuyu açılmakta, giriş kuyusuna yan duvarlardan destek alacak şekilde yerleştirilen kriko yardımıyla, kuyuya indirilen borular zemine itilmektedir (Şekil 3.3). Kazı işi itme işleminden önce ya da sonra çeşitli araçlarla yapılabilir.



Şekil 3.3 Boru sürme yöntemiyle açılan bir tünel örneği

Başka bir yumuşak zeminde tünel açma yöntemi olan aç-kapa yöntemi genellikle örtü kalınlığı 10 m'den az olan kanalizasyon, içme suyu ve altgeçit tünellerinin inşasında kullanılmaktadır. Bu yöntemde zemin, büyük bir hendek şeklinde kazılmakta, tünelin kaplaması yapıldıktan sonra üzeri tekrar örtülmektedir.

Yumuşak zeminde tünel açma yöntemlerinden son olarak şemsiyeleme (boru kemer) yönteminden bahsedilebilir. Bu yöntemde tünel aynasının stabilitesini sağlamak amacıyla zemin çivisi adıyla bilinen destekleme elemanları, tünel aynasında önceden belirlenen çapta ve uzunlukta delikler delinerek zemine uygulanmaktadır (Şekil 3.4). Delinen deliklere uygun kalınlıkta ve uzunlukta çelik donatı ya da yeterli çekme dayanımına sahip fibreglaslar yerleştirilmekte ve etrafı uygun kıvamda çimento enjeksiyonuyla doldurulmaktadır. Bu sayede oluşturulan ön kemer altından kazı yapılarak tünel inşası gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.4 Şemsiyeleme yönteminde uygulanan zemin çivilerine örnek

### 3.2.1.3 Su altında yapılan tüneller

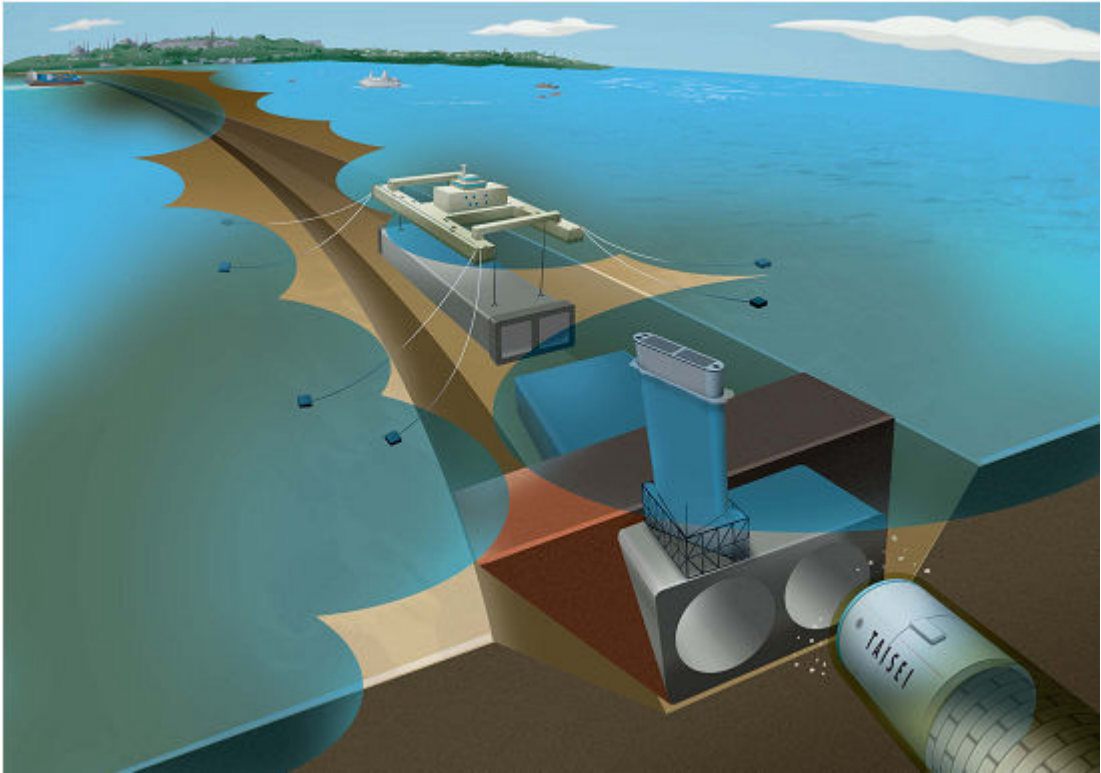
Su altında yapılan tüneller batırılmış tüneller ve daldırılmış yüzen tüneller olarak sınıflandırılabilir.

Tüp tünel ya da batırılmış tünel adıyla anılan tüneller bir su yolu engelini aşmak için köprülere ve derinden geçen geleneksel tünellere bir seçenek olmakla birlikte karakteristik olarak kanalları ve kanal tarzındaki doğal engelleri alttan geçmede en kısa yol olarak gözükmektedir [8].

Batırılmış tüneller, karada inşa edilen tüplerin batırılarak indirildikten sonra deniz tabanında açılan ve tabanı düzlenmiş bir hendeğe dizilerek yerleştirilmesi ve daha sonra üstlerinin örtülmesi şeklinde inşa edilmektedir [9]. Bu nedenle, deniz kenarında genellikle uzunluğu 100 m'yi geçen tüplerin inşa edileceği deniz seviyesinin altında geniş bir yapım alanına gereksinim vardır. Tüplerin deniz tabanına yerleştirilmesinden önce, tüp tünel yüksekliğinin 1,3-1,7 katı derinlikte ve oldukça geniş bir hendeğin kazılması ve tabanının düzlenmesi gerekmektedir. Tüpler inşa edildikten sonra yüzdürülerek tünel inşa alanına getirilmekte, vinçlerden ve harita mühendisliği ilkelerinden yararlanılarak ve dalgıç kullanılarak deniz tabanına batırılıp indirilmekte ve

dizilerek birbirlerine eklenmektedir. Marmaray projesi boğaz geçişi için yapılan tüneller de bu sistemle inşa edilmiştir (Şekil 3.5).

Deniz altı geçişinde kullanılan diğer bir tip de daldırılmış yüzen tünellerdir. Suyun kaldırma kuvvetinden faydalanılarak yapı, uygun bir derinlikte desteklenmektedir. Tüpe benzer yapı çelik ya da betonarme olarak üretilmekte ve üretilen parçalar kolonlar, halatlar ya da dubalar sayesinde belirli seviyede yüzer halde tutulmaktadır.



Şekil 3.5 Marmaray projesi batırma tüneli elemanlarının yerleştirilmesi

Yapımları bu şekilde farklılık gösteren tüneller işlevlerine göre de farklı bir şekilde sınıflandırılabilir.

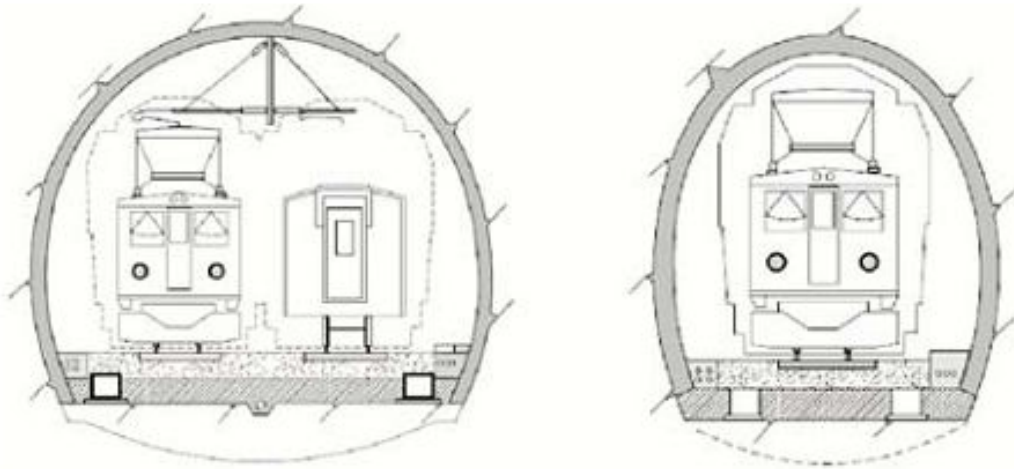
### 3.2.2 İşlevlerine göre tüneller

Tünelin inşa edileceği altyapının çeşidi bu sınıflandırmanın oluşumundaki en önemli ölçüttür. İşlevlerine göre tüneller demiryolu tünelleri, karayolu tünelleri, yaya tünelleri, kanal (akarsu) tünelleri, hidrolik güç tünelleri ve metro tünelleri olarak sıralanabilir.

#### 3.2.2.1 Demiryolu tünelleri

Demiryollarında karayolundakinden farklı olarak sürtünme katsayısı düşük olduğu için %1,2'den fazla eğimlere izin verilmemektedir [5]. Tüneller tek hatlı demiryollarında 4,5 ila 6 m genişlikte (yaklaşık enkesit alanı 50 m<sup>2</sup>), çift hatlı demiryollarında ise 8 ila 9 m'lik bir genişlikte (yaklaşık enkesit alanı 80 m<sup>2</sup> - 100 m<sup>2</sup>) olacak şekilde açılırlar.

Yükseklikler havalandırma tesisleri bakımından elverişli, araçların üzerinde en az 1,20 m bir boşluk kalacak biçimde, tek hatlı demiryollarında daha çok sepet kulbu şeklinde, çift hatlarda ise tam kemer şeklinde inşa edilirler.(Şekil 3.6) Buna karşılık, satha çok yakın olarak geçilmesi durumunda dikdörtgen şekline de gidilmiştir [10].



Şekil 3.6 Çift ve tek hatlı demiryolu tüneli enkesitleri [8]

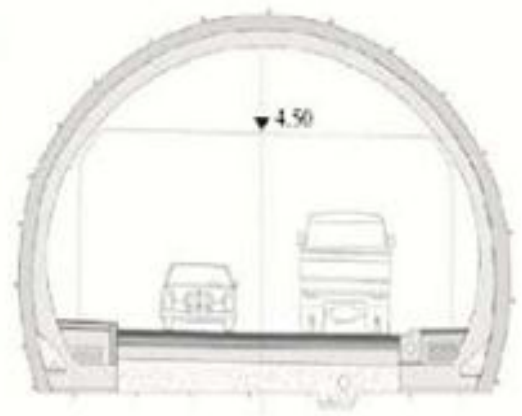


### 3.2.2.2 Karayolu tünelleri

Karayolu tünelleri, demiryolu tünellerine nazaran güzergâh geometrisi açısından çok daha esneklerdir. Bunlar genellikle  $\pm\%2$ 'lik bir eğime göre projelendirilmektedir. Trafik hacmi düşük ise söz konusu eğim  $\pm\%4$ 'e kadar çıkmaktadır. Daha yüksek eğimler havalandırma ve görüş güvenliği açısından uygun değildir [5]. Uzun tünellerde havalandırma ve yangın güvenliği projenin en önemli öğelerinin başında yer alır.

Karayolu enkesiti günlük trafik hacmine bağlıdır. Şehirlerarası yol tünellerinde genel olarak 6 m'lik bir otoyolu ile yan taraflarda 1 m'lik iki yaya yolu bulunur. Şehir içlerinde olduğu gibi, trafiği fazla olan tüneller daha geniş olur. Bu tüneller yalnız bir yöndeki trafiğe, bazen de gidiş ve geliş olmak üzere her iki yöndeki trafiği de barındırabilir (Şekil 3.7).

Karayolu tünelleri genel olarak tam kemer, sepet kulbu veya elips şeklinde olup nehir altından geçtikleri takdirde çok defa bukliye ile açıldıklarından daire şeklinde olurlar. Eğer tünel satha çok yakın ise o zaman dikdörtgen kesit tercih edilerek üzeri betonarme döşeme ile kapatılır. Tünelin havalandırması büyük kesit gerektiriyorsa tam kesit tercih edilir [10].



Şekil 3.7 Karayolu tünel örneği ve enkesiti [8]

### 3.2.2.3 Yaya tünelleri

Yaya tünelleri genişliği 3 m'den, yüksekliği ise insana ezilme hissi vermemesi bakımından 2.50 m'den daha küçük tutulmamalıdır. Şekilleri ise dikdörtgen veya tercihen kemerli ve daire şeklinde olabilir. Bu tünellerde bazen bisikletliler için ayrı bir şerit de yapılabilir.

### 3.2.2.4 Kanal (Akarsu) tünelleri

Nehir ulaşım sistemlerinde kullanılan kanal tünelleri için enkesit şekli tüneli kullanacak olan teknelerin cinsine göre değişir (Şekil 3.8). Örneğin Fransa'daki Oise-Aisne kanalı üzerindeki Bray-en-Laonnois tüneli tam kemer şeklinde olup, genişliği 8 m, yüksekliği ise 8.50 m dir. Yine Marsilya civarındaki Rove tüneli ise sepet kulbu şeklinde yapılmış olup genişliği ise 22 m, yüksekliği de su üstünde kalan kısmı 9.90 m olmak üzere, 15.40 m'dir.

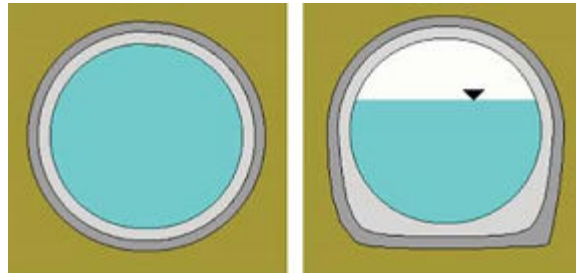


Şekil 3.8 Kanal tüneli örneği [8]



### 3.2.2.5 Hidrolik güç ve su tünelleri

Baraj çıkışlarına açılan bu tünellerin güzergâh geometrileri diğer tünellere nazaran daha esnektir ve genelde sağlam zeminde açılırlar. Hidrolik güç tünel kesit alanları düşüm yüksekliği, su debisi ve enerji kayıpları gibi faktörlere bağlı olup  $10 \text{ m}^2$  ila  $30 \text{ m}^2$  arasında değişir (Şekil 3.9).



a) Basınçlı

b) Basınçsız

Şekil 3.9 Hidrolik güç tünelleri enkesit örneği [8]

### 3.2.2.6 Metro tünelleri

Metro tünellerinin enkesitleri hatta çalıştırılacak araçların maksimum kapasitesine (araç ticari hızı, koltuk sayısı, konfor derecesi, araç sayısı, araç kapı sayıları ve genişlikleri, istasyon uzunluğu vs.), tren dizilerinin takip aralıklarına, sinyalizasyon ve ücret toplama sistemlerine bağlıdır (Şekil 3.10). Tek ve çift hatlı metro tünelleri için tipik enkesit alanı  $35 \text{ m}^2$  'dir [5]. Yangın güvenliği en üst düzeyde olmalıdır. Metro sistemlerinde yangın güvenliği konusuna ilerideki bölümlerde ayrıntılı olarak değinilecektir.

Metro tünellerinin şekil ve boyutları şehirlere göre birbirinden farklılık gösterir. Örneğin Paris'deki metro tünelleri genel olarak kemerli ve çift hatlıdır. (Şekil 3.11) Bunun yanında bir, üç ve dört hatlı kısımlar da mevcuttur. Tek hatlı olanlarda genişlik

4.30 m dir. Yükseklik ise 4.70 m olup 2.15 m yarıçaplı tam kemer şeklinde yapılmışlardır [6].



Şekil 3.10 Metro tüneli örneği [8]

Çift hatlılarda genişlik 7.10 m iken yükseklik 5 m dir. Kemer, elips şeklinde olup, bunun yüksekliği de 2.07 m'dir. Üç ve dört hatlılar ise sırası ile 10 m ve 12.90 m genişliktedirler. Kemerler genellikle üç merkezli sepet kulbu şeklindedir.

İstasyonlar genel olarak kemerli ve iki hatlıdır. Fakat bir, üç, dört ve beş hatlı olanları da vardır. Bunların bir kısmı kemerli bir kısmı da çelik veya betonarme döşeme ile kapatılmışlardır. İki hatlı kemerli istasyonlar 14.14 m genişlikte, 5.90 m yükseklikte olup uzunlukları 75 ila 105 m'dir. Tek hatlı istasyonlarda genişlik en az 7,30 m olup, üç-dört hatlılarda ise 22.50 m'yi bulmaktadır. Nehir altındaki bukliye tünelleri ise daire kesitli, genel olarak çift hatlı ve dış çapları da 7.78 m'dir.



Şekil 3.11 Paris metrosu tünel inşaatı (1902-1910) [11]

Londra'daki tüp şeklindeki tüneller ise bukliye ile açılmış olup, daire çapları 3.30 m ila 3.70 m arasındadır. Fakat bu genişlik çok az olduğu için havalandırma, kanalizasyon ve bakım personeli için hiç pay bırakmamaktadır. İstasyonlar ise yine bukliye ile açılmış olup tek hatlıdır ve dış çap 6.50 m istasyon uzunlukları ise 106 m'dir.

## **BÖLÜM 4**

### **METRO SİSTEMLERİ**

Kentlerin belirli bölgelerini genellikle yer altında açılmış tünellerle birbirine bağlayan ve kendilerine ait yollar üzerinde elektrikle işletilen süratli trenlere metro araçları, bunların işlediği tünellere ve istasyonlara da metro sistemleri denir [12]. Metro ihtiyacı şehirlerin kalabalıklaşması sonucu ortaya çıkmış ve trafik akışına büyük kolaylık getirmiştir. Şehir taşımacılığının yer altına doğru gelişmesiyle hem yerden kazanılmış, hem de şehir gürültü seviyesi büyük ölçüde düşürülmüştür.

Metro sistemleri yollardaki trafik tıkanıklığına çözüm getirdiği gibi, diğer taşıma biçimlerinin sınırlı olduğu kentlerde ulaşım sorununun çözümüne de yardımcı olur. Örneğin 400-600 kişi taşıyabilen bir metro treni yerine aynı sayıda insan karayoluyla taşınmak istenirse bunun için yaklaşık 6 otobüs ya da 100 otomobil gerekir.

Metro gibi büyük bir yatırımın giderlerini, satılacak metro biletlerinin geliriyle kısa sürede karşılama olanağı olmadığından metro yapımı için gerekli parayı genellikle hükümet ya da kent belediyesi sağlar.

Bir kentte metro yapılması planlanırken kentteki nüfus artışı, araç sayısı, insanların boş zamanlarını değerlendirme ve yolculuk alışkanlıkları gibi etkenler de göz önüne alınır. Ayrıca metro sisteminin kentler arası trenlerle, banliyö trenleriyle, karayolu, denizyolu ve havayolu ulaşım sistemleriyle bağlantısı da sağlanır. Metro sistemlerinin verimli olabilmesi için metro araçlarının birbirine yakın istasyonlar arasında kısa aralıklarla ve hızlı bir şekilde çalışması gerekir [13].

Metro sistemleri, günümüzde artık sadece taşımacılık altyapıları sağlama rolünü üstlenmekle kalmayıp aynı zamanda üzerinden taşımacılık politikasının geliştirildiği ve yaşam kalitesini iyileştirmede temel faktör haline gelen kentsel bir yapılandırma aracı olma yolundadır [14].

#### 4.1 Dünyadaki İlk Metrolar

Dünyanın ilk metrosunun inşaatına Londra’da 1860’da başlanmış ve 1863 senesinde tamamlanmıştır. Metro inşaatından sonra metro üzerine gelen yollar yeniden düzenlenmiştir. İnşaat tekniği olarak şehir zemini kazılıp metro düzenlendikten sonra tekrar üzerinin kapatılması yani aç-kapa tekniği kullanılmıştır (Şekil 4.1). 1866 senesinde, şehrin güneyinde başlanan metro bölümünün inşasında ise 3,2 m çapındaki çelik boruların yer altından hidrolik krikolar yardımıyla yatay olarak ileri doğru itilip, içerisinin basınçlı su ve hava ile boşaltılmasına dayanan boru sürme yöntemi uygulanmıştır. Londra’nın toprak yapısı killi olduğu için bu yöntem başarılı olmuştur.



Şekil 4.1 1861 yılında Londra Metrosu King Cross istasyonu yakınında aç-kapa yöntemi ile inşa edilen tünel [15]

İlk tasarıya göre bu tünellerde kablolu işletme uygulanması düşünülmüşse de daha sonra bu karar değiştirilerek elektrikli çalışma yöntemine geçilmiştir. 1900 yılında Londra’ya gelen Charles Tyson Yerkes adlı ABD’li bir demiryolu yapımcısı, şehrin

tünel ağını genişletme ve daha önceki buharlı bölümleri de elektrikliye dönüştürme işini üstlenmiş ve böylece buharlı lokomotifler 1905 yılında yerini tamamen elektrikli lokomotiflere bırakmıştır. Bugün Londra metrosunda toplam demiryolu uzunluğu 408 kilometreye ulaşmış olup sistemde 273 istasyon bulunmaktadır..

İngiltere'den sonra Avrupa'daki ilk büyük metro 1896'da Macaristan'ın başkenti Budapeşte'de açılmıştır. Kazarak açma metodu ile yapılan metronun yan tarafları duvar, üst tarafı çelik kolonlarla örtülüdür. Metronun toplam uzunluğu 31.7 kilometredir. Toplam 40 istasyonu bulunan bu sisteme 12 yeni metro istasyonunun daha eklenmesi planlanmaktadır. Sistem bu haliyle günlük 1.27 milyon kişi tarafından kullanılacaktır

Önceleri İstanbul'daki Tünele benzer şekilde halat sistemiyle çalışmakta olan 10.4 km boyundaki Glasgow Metro su, 1935 senesinde elektrikli trene çevrilmiştir.

Paris Metro su, dünyanın üçüncü büyük yer altı demiryoludur. Paris Metro sunun en büyük özelliği dairesel ulaşım la şehrin her noktasının metro dan istifade edebilmesidir. Paris Metro su dünya metroları içinde en kalabalık olanıdır. Metro inşası 1898'de başlamış ve 1900'de 14 kilometresi tamamlanmıştır. Paris'de kullanılan yöntemde önce metro güzergâhı üstünde belli noktalarda düşey çukurlar kazılmakta, bunlarla istenen derinliğe inildikten sonra tünellerin iki yana doğru açılmasına başlanmaktaydı. Bu yöntem faal bir şehrin trafiğini aksatmadan metro inşaatı için geçerlidir.

New York Metro su dünyanın en geniş ve ayrıntılı metrosudur. İnşası 1870'de başlamış, 1966 senesinde 390 kilometreye ulaşmıştır. New York metrosu Paris Metro su yapısındadır. Kabloları, metro içinde kanallardan gider. Trenler 550 volt doğru akımla çalışır. Trenlerin metro seferleri elektronik sinyal sistemleriyle elde edilir. Herhangi bir tehlike durumunda trenler sinyal sistemleri aracılığıyla otomatik olarak durdurulabilir.

San Francisco Metrosu şehir altında ve tüp tünel olarak San Francisco Körfezinde yer alır. Tren programları bilgisayarlı sistemle yönetilir. Böylece tren seferleri yolcu miktarına göre otomatik olarak ayarlanabilir.

Moskova Metrosu 1931-1935 seneleri arası kadın erkek 75.000 işçinin çalışmasıyla yapılmıştır. Metro inşa tekniği Paris metrosunda olduğu gibidir. Dünyanın en ünlü metrolarından biri olan Moskova metrosunun 197 km'lik toplam uzunluğunun 177 km'si yeraltındadır ve 123 istasyonu vardır [16].

Tokyo metrosu toplam 181 km uzunluğundadır ve 9 hattan oluşmaktadır. Dünya üzerinde faaliyette bulunan diğer önemli metro sistemleri Berlin, Rotterdam, Boston, Washington, Toronto, Montreal, Tokyo, Kyoto, Osaka, Nagaya şehirlerindedir. Küçük çaplı metrolar Avrupa şehirlerinin hemen hepsinde mevcuttur [12].

#### **4.2 Tarihi İstanbul Metrosu (Tünel)**

İstanbul'da Beyoğlu ile Galata'yı birbirine bağlayan Tünel, Abdülaziz Han zamanında yaptırılmış olup Türkiye'nin ilk metrosudur (Şekil 4.2). 1874 yılında kazısı biten Tünel 17 Ocak 1875'te hizmete açılmıştır. 626 m uzunluğunda 6,60 m genişliğinde olan Tünel, elektrik kullanılmaya başlandığı zamana kadar gaz lambaları ile aydınlatılmıştır. Kullanılan araçların iki yanları açık olup, yolcular ayakta gidip gelmekteydi. İlk açıldığı zamanlarda tünel ile günde yaklaşık 25.000 yolcu taşınmaktaydı.

Vagonlar, yukarı çelik halatla çekilmekte ve kazaya meydan verilmemek üzere sık sık kontrol edilmektedir. Kablo kopması sonucu 1876, 1902, 1918, 1921, 1943 yıllarında kazalar meydana gelmiştir. 1971 yılında tünel baştan sona yenileştirilerek, elektrikli hâle getirilmiştir. 350 beygir gücündeki elektrikli sistemiyle Galata'dan Beyoğlu'na 573 metrelik mesafeyi 90 saniyede aşan Tünel, 16 metre boyunda iki vagonuyla bir seferde 170 kişiyi taşır. Günde 174 sefer yapılır ve vagonların sürati saatte 21 kilometredir [17].



Şekil 4.2 İstanbul'da bulunan tarihi Tünel [18]

### 4.3 İstanbul'daki Modern Metro Sistemleri

İstanbul'da günümüzde tarihi tünel dışında gerçek anlamda metro olarak tanımlanabilen ve M2 olarak adlandırılan bir tek sistem mevcuttur. Bu tanımlamaya gidilmesinin sebebi yer altından kesintisiz ulaşımı sağlayan sistemin sadece bu olmasıdır. M1 olarak adlandırılan ve kısmen yer altında çalışan diğer metro sistemi ise aslında hafif raylı bir sistemdir. Bu iki metro sistemi ve diğer raylı sistemlerin gösterildiği harita Ek 1'de verilmiştir.

Yapımına 1992 yılında başlanan ve Taksim - 4.Levent arasında hizmet veren metro (M2), 16 Eylül 2000 tarihinde hizmete girmiştir. 31 Ocak 2009 da hattın kuzeyinde Atatürk Oto Sanayi ve güneyinde Şişhane uzantıları hizmet vermeye başlamıştır. İşletmeye ait bazı bilgiler aşağıda verilmiştir [19].

- Hat uzunluğu: 14.5 km
- İstasyon sayısı: 10
- Araç sayısı: 34



- Sefer Süresi Şişhane-Taksim: 2 dk. / Taksim-4.Levent:12 dk / 4.Levent Atatürk Oto Sanayi: 7 dk
- Günlük yolcu sayısı: 195.000 yolcu/gün
- Günlük sefer sayısı: 394
- Sefer sıklığı pik saatte: 4.5 dk

1989 yılından bu güne yolcu taşımaya devam eden Aksaray - Havalimanı Hafif Metro hattı (M1), hizmet verdiği bölge ve güzergah üzerinde günlük 240.000 yolcu ile taşıyıcı aks konumuna gelmiştir. 1. etabında Aksaray - Kartaltepe arasında hizmet veren Metro, 18 Aralık 1989 tarihinde Esenler, 31 Ocak 1994 tarihinde Otogar ve daha sonrasında 2. etabı oluşturan Terazidere, Davutpaşa, Merter, Zeytinburnu ve Bakırköy istasyonlarında açılması ile potansiyelini arttırmıştır. Zaman içinde yapılan yatırımlarla yeni istasyonlar sisteme dahil edilmiş, son olarak da 13 Aralık 2002 tarihinde Dünya Ticaret Merkezi ve Havalimanı istasyonları da açılmıştır. İşletmeye ait bazı bilgiler aşağıda verilmiştir [20].

- Hat uzunluğu: 19.6 km
- İstasyon sayısı: 18
- Araç sayısı: 80
- Sefer Süresi: 32 dk
- Günlük yolcu sayısı: 240.000 yolcu/gün
- Günlük sefer sayısı: 416
- Sefer sıklığı pik saatte: 5 dk

#### **4.4 Marmaray Projesi**

Ulaştırma Bakanlığına bağlı Demiryolları, Limanlar, Hava Meydanları (DLH) İnşaatı Genel Müdürlüğü tarafından yürütülen proje ile Avrupa ve Asya kıtaları, İstanbul Boğazı altından demiryolu ile birbirine bağlanacaktır. Halkalı'dan Gebze'ye

kadar olan banliyö hatlarının iyileştirilmesini, demiryolu boğaz tüp geçişini ve banliyö hatları üzerinde çalışacak araçların alımını kapsayan proje ile İstanbul kent içi ulaşım probleminin çözümüne katkıda bulunulması ile yolcu ve yük trenlerinin Avrupa'dan Asya'ya kolay bir şekilde geçirilerek mevcut taşıma kapasitesinin artırılması hedeflenmektedir. Yaklaşık 3 milyar \$ bedelindeki Marmaray Projesi dünyadaki en büyük ulaştırma altyapı projelerinden birisidir. Finansmanı Japonya Uluslararası İşbirliği Bankası ve Avrupa Yatırım Bankası tarafından sağlanan proje dört sözleşmeden oluşmaktadır [21]:

- Mühendislik ve Müşavirlik Hizmetleri
- Demiryolu Boğaz Tüp Geçışı, Tüneller ve İstasyonlar İnşaatı (BC1 Sözleşmesi)
- Gebze-Haydarpaşa, Sirkeci-Halkalı Banliyö Hatlarının İyileştirilmesi; İnşaat, Elektrik ve Mekanik Sistemler (CR1 Sözleşmesi)
- Gebze-Haydarpaşa, Sirkeci-Halkalı Banliyö Hatlarının İyileştirilmesi; Demiryolu Araçları İmali (CR2 Sözleşmesi)

#### 4.4.1 Projenin tarihçesi

İstanbul Boğazının altından geçecek bir demiryolu tüneli ile ilgili ilk düşünce, 1860 yılında ortaya atılmıştır. Fakat boğazın altından geçirilmesi planlanan tünelin boğazın en derin bölümlerinden geçeceği yerlerde, eski teknikler kullanılarak, tünelin deniz dibinin üzerinde veya altında inşa edilmesi mümkün olmayacağı için tünel, tasarım kapsamında deniz dibi üzerine inşa edilen sütunların üzerine yerleştirilen bir tünel olarak planlanmıştı [22].

Marmaray Projesi çerçevesinde, İstanbul Boğazının geçilmesinde kullanılacak olan batırma tüp tüneli tekniği (immersed tube) 19. yüzyılın sonlarından itibaren geliştirilmiştir. İlk batırma tüp tüneli, 1894 yılında kanalizasyon amaçlı olarak ABD'de inşa edilmiştir. Söz konusu teknik kullanılarak trafik amaçlı olarak yapılan ilk tüneller de yine Birleşik Devletlerde inşa edilmiştir. Bunlardan ilki, 1906-1910 yıllarında inşa

edilen Michigan Merkezi Demiryolları tünelidir. Avrupa'da, bu tekniği ilk uygulayan ülke Hollanda olmuştur ve Rotterdam'da inşa edilen Maas Tüneli 1942 yılında hizmete açılmıştır. Asya'da bu tekniği ilk uygulayan ülke Japonya olup, Osaka'da inşa edilen iki tüplü karayolu tüneli (Aji Nehri Tüneli) 1944 yılında hizmete açılmıştır. Buna karşılık bu tünellerin sayısı, 1950'li yıllarda sağlam ve etkisi kanıtlanmış bir endüstriyel teknik geliştirilene kadar sınırlı düzeyde kalmıştır; bu tekniğin geliştirilmesinden sonra ise birçok ülkede geniş ölçekli projelerin yapımına başlanabilmiştir.

İstanbul'da doğu ile batı arasında uzanan ve İstanbul Boğazının altından geçen bir demiryolu toplu ulaşım bağlantısının inşa edilmesine yönelik istek, 1980'li yılların başlarında giderek artmış ve bunun sonucunda 1987 yılında ilk geniş kapsamlı fizibilite etüdü gerçekleştirilmiş ve raporlanmıştır. Bu çalışma sonucunda, bu tür bir bağlantının teknik olarak uygulanabilir ve maliyet açısından da verimli olduğu belirlenmiş ve bugün projede görülen güzergâh, bir dizi teklif arasından en u olarak seçilmiştir (Şekil 4.3).

1987 yılında ana hatlarıyla belirlenmiş olan proje, izleyen yıllar içerisinde tartışılmış ve 1995 yılında, daha detaylı etüt ve çalışmaların gerçekleştirilmesine ve 1987 yılındaki yolcu talebi tahminleri dahil olmak üzere fizibilite etütlerinin güncellenmesine karar verilmiştir. Bu çalışmalar, 1998 yılında tamamlanmış ve elde edilen sonuçlar, daha önceden elde edilmiş olan sonuçların doğruluğunu göstermiş ve projenin İstanbul'da çalışan ve yaşayan insanlara birçok avantaj sunacağını ve şehirdeki trafik sıkışıklığıyla ilgili olarak hızla artan sorunları azaltacağını ortaya çıkarmıştır.



Şekil 4.3 Marmaray Projesi güzergahı ve projenin diğer raylı sistemlerle bağlantısı [23]

#### 4.4.2. Projenin hedefleri

Bu proje ile, İstanbul'da 1984 yılından bu yana gerçekleştirilen kapsamlı bilimsel çalışmalar sonucunda kentteki mevcut yapımı devam eden ve planlanan raylı sistemlerle bütünleşecek bir “Boğaz Demiryolu Geçişi” nin projesi ile mevcut Banliyö Demiryolu hatlarını İstanbul Boğazı altında bir tüp tünelle birleştiren bir proje ortaya çıkmıştır.

Bu sayede;

- İstanbul Metrosu ile Yenikapı'da entegrasyon sağlanarak, Yenikapı – Taksim – Şişli – 4 Levent – Ayazağa'ya yolcuların güvenilir, hızlı ve konforlu bir toplu taşıma sistemi ile seyahat etmesi sağlanacak,

- Kadıköy-Kartal arasında inşa edilecek olan hafif raylı sistem ile Kadıköy'deki İbrahim Ağa istasyonunda entegrasyon sağlanarak yolcuların güvenilir, hızlı ve konforlu bir toplu taşıma sistemi ile seyahat etmesi sağlanacak,
- Kent ulaşımı içinde raylı sistemlerin payı artacak,
- En önemlisi Avrupa ile Asya'yı demiryolu ile birbirine bağlayarak Asya ve Avrupa yakaları arasında yüksek kapasiteli ve kesintisiz toplu taşıma imkânı sağlanacak,
- Tarihi ve kültürel çevrenin korunmasına katkı sağlanacak,
- Boğazın genel yapısında bir değişikliğe yol açılmayacak, deniz ekolojik yapısı korunacak,
- Marmaray projesinin hizmete girmesi ile Gebze-Halkalı arasında 2-10 dakikada bir sefer yapılacak ve bir yönde saatte 75.000 yolcu taşıma kapasitesi sağlanacak,
- Yolculuk süreleri kısıllanacak,
- Mevcut boğaz köprülerinin yükü hafifletilecek,
- İş ve kültür merkezlerine kolay, rahat ve çabuk ulaşım sağlayarak kentin değişik noktalarını birbirlerine yaklaştıracak ve kentin ekonomik yaşamına da canlılık katacaktır [24].

#### 4.4.3 Projenin teknik özellikleri

- Projenin güzergah uzunluğu: 76,3 km
- Güzergahın yer altındaki kısmı (Ayrılıkçeşme-Yedikule arası): 13,558 km
- Proje güzergahındaki toplam istasyon sayısı: 37 yer üstü, 3 yer altı olmak üzere 40 adet
- Diğer demiryolu ulaşım sistemlerine aktarma için uyumlu istasyon sayısı: Kadıköy İbrahimağa, Üsküdar, Sirkeci ve Yenikapı olmak üzere 4 adet
- Şehirlerarası trenlerin transfer istasyonu sayısı: 8
- Gebze-Ayrılıkçeşme ve Kazlıçeşme-Halkalı arası (yer üstü kısmı) hat sayısı: 3

- Ayrılıkçeşme-Kazlıçeşme (yer altı tüp geçit) arası hat sayısı: 2
- Tek yönde saatte taşınacak yolcu sayısı: 75.000
- Batırma tünelin güzergahı: Sarayburnu-Salacak arası
- Batırma tünelin uzunluğu: 1.387 m
- Batırma tünelin en derin noktası: 60.46 m (Dünyanın en derin batırma tüneli)
- Hat üzerindeki minimum kurb yarıçapı: 300 m
- Maksimum düşey hat eğimi: %1,8
- Proje hızı: 100 km/saat
- Platform uzunluğu: 225 m
- İstasyonlar arası ortalama mesafe: 1,9 km
- Bütün güzergahta tren işletme süre aralığı: 2 dk
- Batırma tünel elemanı: 11 adet (Elemanlar değişik boyutlardadır)
- Batırma tünel yüksekliği: 8,6 m
- Batırma tünelin genişliği: 15,3 m

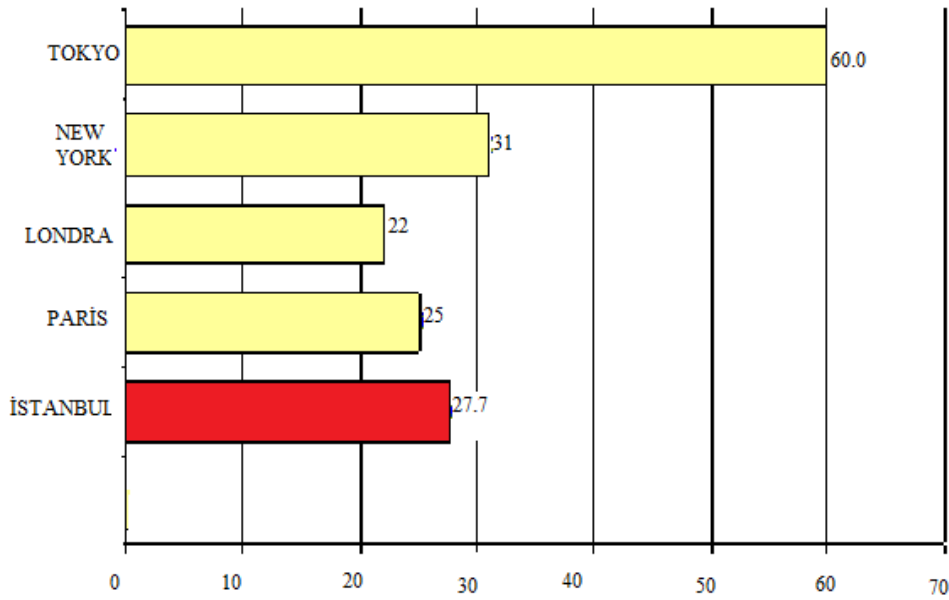
#### 4.5 Metro Sistemlerinin Gelişme ve Yaygınlaşma Potansiyeli

Günümüzde dünyanın pek çok kentinde metro sistemi bulunmasına karşın metro sistemlerinin gelişim potansiyeli doyma noktasından uzaktır. 2015 yılına kadar nüfusunun bir milyonu aşması beklenen 300'ü Asya'da olmak üzere toplam 560 kent henüz metro sistemine sahip değildir [14].

Kent içi ulaşımda demiryolu kullanımında Tokyo %60 ile birincidir. Bu oran New York'da %31, Paris'de %25, Londra'da %22 iken İstanbul'da hâlihazırda %3,9'dur. Mevcut projelerin (Marmaray ve diğer raylı sistem projeleri) tamamlanmasıyla birlikte bu oranın %27.7 mertebesine çıkararak Paris ve Londra gibi dünya kentlerini geride bırakacağı öngörülmektedir (Şekil 4.5)

Geçmiş verilere ve tahmin edilen gelecekteki sosyal, kültürel ve ekonomik gelişmelere dayanarak; gelecek yıllar için araçlı yolculuklar bazında kişi başına düşen

yolculuk miktarı oranları tahmin edilmiştir. 2000 yılında İstanbul'da kişi başına düşen araçlı yolculuk miktarı 1.00 iken; bu değerin 2010 yılına kadar hızlı bir artış içinde olacağı, 2010 yılından sonra ise daha yavaş bir ivme ile artışını sürdüreceği ve 2030 yılında 1.30 seviyesine ulaşacağı tahmin edilmektedir. Bu şu anlama gelmektedir; 2000 yılında İstanbul'un nüfusu yaklaşık 10 milyondur ve kentte hergün 10 milyon araçlı yolculuk yapılmaktadır.



Şekil 4.4 İstanbul'da planlanan raylı sistemlerin tamamlanmasıyla oluşacak kent içi ulaşımında demiryolu kullanımı oranı (%) ve dünyadaki önemli kentlerle karşılaştırılması

2015 yılında İstanbul nüfusunun 13,3 milyon ve araçlı yolculuk oranınının 1.20 olması tahmin edilmektedir. Bu da günlük yaklaşık 16 milyon araçlı yolculuk demektir. 2030 yılı için ise nüfus tahmini 19 milyon ve araçlı yolculuk oranı 1.30 tahminine göre günlük araçlı yolculuk miktarı 24,7 milyon seviyesinde olacaktır. Görüldüğü üzere nüfus artışının yanında hareketliliğin de artması ile 2030 yılında İstanbul'da beklenen günlük araçlı yolculuk miktarı 2000 yılına göre % 150 oranında bir artış gösterecektir. Marmaray Projesi artan yolcu talebini karşılayabilecek önemli bir alternatiftir.

## **BÖLÜM 5**

### **METRO SİSTEMLERİNDE HAVALANDIRMA**

Günümüzün yüksek performanslı, klimalı metro araçları yüksek miktarlarda enerji tüketmekte ve tükettikleri enerjinin ısıya dönüşmesi sonucu metro sisteminin yer altı kısımları için büyük bir ısı kaynağı haline gelmektedirler. Bu sebeple tüketilen enerji gücünün ve açığa çıkan enerjinin en aza indirgenmesinin sistemin işletim maliyetine ve konforuna önemli ölçüde etkisi vardır. Çevresel kontrol sistemi (ÇKS), normal işletim sırasında sistemde uygun bir çevre sağlar, yangın durumunda ise yolcuların güvenli çıkışlarına yardımcı olur. Metro araçları tarafından üretilen yüksek miktardaki ısı uygun bir şekilde kontrol edilmezse yolcuları rahatsız edebilir, donanım ömrünü kısaltabilir ve bakım masraflarını arttırabilir. Tropik iklimlerde çevresel kontrol daha kritik bir hal alır [25].

Sıcaklık, nem, hava hızı, hava basıncı değişimleri ve hava basıncı değişim oranı ÇKS performansını belirlemede ihtiyaç duyulan koşullardır. Bu koşullar günün saatlerinden (sabah, gece veya durgun saatler), trafik durumlarından (normal, sıkışık veya acil durum) ve sistemin kısımlarından (tüneller, istasyon platformları, girişler ve merdivenler) etkilenirler.

Günümüzün oldukça karmaşık hale gelmiş metro havalandırma sistemleri, değişik açılardan sınıflandırılabilir. Fakat en genel anlamda tünellerin inşası sırasında yapılan havalandırma ve metro sistemi halkın kullanımına açıldıktan sonra işletim sırasında yapılan havalandırma olarak iki ana açıdan incelenmesi mümkündür. Zira inşa aşamasındaki faktörler ile işletim aşamasındaki faktörler aynı değildir. Örneğin inşa sırasında tünel içinde pek çok dizel motorlu araç bulunabilmektedir. Bu araçların oluşturduğu kirleticilerin etkisi, işletim sırasında elektrikle çalışan araçların meydana getirdiği zararlı etkilerden oldukça farklıdır.



### 5.1. Tünel İnşaatı Sırasında Havalandırma

İnşa sırasında havalandırma, tünelin püskürtme, delme veya batırma tünel yöntemleriyle yapılıp yapılmadığına bakılmaksızın her tünel için gereklidir. Geçici havalandırma olarak da ifade edilebilen tünel inşası sırasında havalandırma, tünel çalışanlarına uygun ve güvenli bir çalışma ortamı sağlamak için mutlaka yapılmalıdır. İnşaat esnasında hava ile taşınan ve yanıcı olan pek çok zehirli gaz, toz ve duman ortaya çıkmaktadır. Bu kirleticiler sadece havalandırma ile ortadan kaldırılabilir. İnşa sırasında kullanılan geçici havalandırma sistemleri çoğunlukla bitmiş tünelde kullanılan kalıcı havalandırma sistemlerinden farklıdır. Bunun sebebi amaçlanan havalandırma sisteminin ve fan kapasitelerinin genellikle uyumlu olmamasıdır. Buna rağmen beton kaya kanalları veya şaftlar (havalandırma bacaları) gibi kalıcı havalandırma sisteminin bazı bölümleri eğer uygun tasarlanırlarsa hem geçici hem de kalıcı havalandırma için kullanılabilirler.

İnşaat çalışmalarında kullanılacak havalandırma için pek çok gereklilik vardır. Genel anlamda, bütün çalışma alanlarında tehlikeli ve zararlı maddelerin engellenmesi için yeterli miktarda temiz hava sağlanmak zorundadır [26].

İnşa aşamasında yapılan havalandırmanın amacına ulaşabilmesi için ortamdaki oksijen seviyesinin istenen seviyede tutulması, havanın temizlenmesi ve tozun kaldırılması gerekmektedir.

Havadaki oksijen miktarı hacmen %21'nin altına düşmemelidir. Hacmen %18'in altında nefes almak imkânsızdır ve koruyucu maske kullanılmalıdır. Oksijen yetersizliği aşağıdaki sebeplerle meydana gelir:

- İçten yanmalı motorlar
- Nefes alıp verme
- Odun ve kömür vb. maddelerin oksidasyonu
- Zemin suyunda Oksijen'in ( $O_2$ ) Azottan ( $N_2$ ) daha fazla çözünmesi

Oksijen kaybı yanında bir başka sorun da havadaki kirleticiler olmaktadır. Başlıca kirleticiler şunlardır:

- Kaya kazısı ve püskürtme beton işleminden kaynaklanan tozlar
- İçten yanmalı motorlar
- Püsküren dumanlar
- Kayadan gaz çıkışı
- Radon bozunma ürünleri

İzin verilen maksimum hava kirliliği oranını ifade eden MAC (Maximum Allowable Concentrations) değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Bu değerler m<sup>3</sup> hava başına kabul edilebilir kirletici madde miktarını ifade eder. MAC değerleri için günde 8 saat ve haftada 42 saate kadar olan ölçümler esas alınmaktadır.

Çizelge 5. 1 Tünel inşaatı sırasında ortaya çıkan kirleticilerin MAC değerleri [27]

<b>KİRLETİCİLER</b>	<b>MAC DEĞERLERİ</b>
CO <sub>2</sub>	5000 cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
CO	30 cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub>	5 cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	5 cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> S	10 cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
İnce Toz	4 mg/m <sup>3</sup>
İnce Kuvarz	0.125 mg/m <sup>3</sup>
Asbest Lifleri	10.000 lif/m <sup>3</sup>

Zerre çapı 5 µm den küçük olan ince SiO<sub>2</sub> tozu akciğerde birikebilir ve akciğer dokusuna zarar vererek ölümcül bir hastalık olan silikoza yol açabilir. Radon sebebiyle

ortaya çıkan radyoaktivite ve radonun parçalanmış ürünleri  $m^3$  hava başına 1000 ila 3000 Becquerel <sup>1</sup> arasında olmalıdır.

TBM ile açılan tünellerde makinenin içinde sürekli şekilde patlayıcı ve zehirli gazların (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S ve CH<sub>4</sub>-metan gazı) oranını takip eden gaz dedektörleri bulundurulmalıdır. Özellikle sığ tünel kazılarında yerleşim alanlarından geçilirken doğalgaz borularının güzergâhının önceden saptanması önemlidir. Tünel açılırken zeminde meydana gelen yer değiştirmeler ile bu boru hatlarından TBM'in içine doğru bir gaz sızıntısı olabilir. TBM'in içine sızan metan gazının hacimsel oranı %4 ila %14 arasında ise hava ile karışımı patlayıcı özellik gösterir. Ayrıca TBM'in içinde açık alevle yapılan kaynak işlemlerinde metan patlaması olabilir. Böyle bir patlama sonucu meydana gelecek basınç ile makine içindeki personel, araç ve gereçlerde çok ciddi hasarlar ortaya çıkabilir. Bu sebeple tüneldeki metan oranı çok dikkatli şekilde izlenmelidir [28].

Tünel inşası sırasında havalandırma yapılması amacıyla, ortama temiz hava sağlanması ve özellikle püskürtme beton işlemi esnasında ortaya çıkan kirli havanın dışarıya atılması için havalandırma kanalları kullanılır. Bu kanallar sentetik veya çelik levhalardan yapılmış uç uca birbirine eklenebilir tüplerdir (Şekil 5.1). Kesit alanları, tünel kesit alanlarının 1/60 ila 1/30'u kadar olmalıdır. Temiz hava gereksinimi hesaplanırken havalandırma kanallarındaki kayıplar da dikkate alınmalıdır. Eskimiş kanallarda ilk verilen temiz havanın 2/3'üne kadar kaçaklar görülebilir.

Temiz hava gereksiniminin hesap edilebilmesi için kazı, yükleme ve taşıma yapan tüm dizel motorlu araçlar dikkate alınmalıdır. Geniş tünel inşa sahalarında kullanılan 1000 kW 'lık toplam dizel motor gücü başına 4000  $m^3/dk$  temiz hava gerekir. İngiliz standardı BS6164 ise,  $m^2$  tünel kesiti başına 9  $m^3/dk$  ve ek olarak 1 kW dizel motor gücü başına 1.9  $m^3/dk$  temiz hava tedarikini gerekli kılmaktadır. Tünel inşasında çalışanlar açısından bakılırsa da gerekli temiz hava miktarı kişi başına 2.0  $m^3/dk$ 'dır.

---

<sup>1</sup> Radyoaktivitenin SI ölçü sistemindeki birimidir. Becquerel ya da sembol olarak Bq olarak da geçmektedir. Radyoaktiviteyi keşfeden Henri Becquerel'in adına ithafen konmuştur. 1 Bekerele bir atom çekirdeğinin bir saniyede bozunması sonucu ortaya çıkan radyoaktivite değeridir.



Şekil 5.1 Tünel inşası sırasında kullanılan bir havalandırma kanalı [27]

İsviçre Standardı SIA 196, inşaat sırasında havalandırma için iş makineleri açısından Çizelge 5.2’de verilen temiz hava şartlarını gerekli kılar.

Çizelge 5.2 SIA 196’ya göre tünel inşaatında çalışan iş makineleri için gerekli temiz hava miktarları (değerler 1 kW dizel motor gücü başınadır) [27]

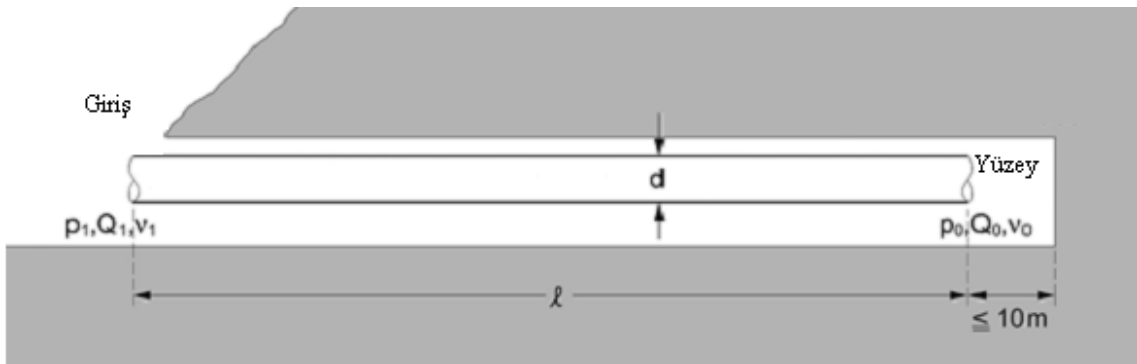
	<b>Kazma ve yükleme makineleri</b>	<b>Nakliye ve beton makineleri</b>
<b>Egzost gazı filtrelemesi olmayan dizel motorları</b>	6 m <sup>3</sup> /dk	3 m <sup>3</sup> /dk
<b>Filtreli ve emisyon limitleri 10mg/m<sup>3</sup> olan dizel motorları</b>	4 m <sup>3</sup> /dk	2 m <sup>3</sup> /dk

Delme ve püskürtme işlemlerinde zehirli püskürtme gazları oluşur. Bu sebeple püskürtmeden sonra 15-20 dakika süreyle çalışmaya geri dönülmemelidir. Bu sırada gereken temiz hava miktarı patlayıcı kg başına yaklaşık  $2 \text{ m}^3/\text{dk}$ 'dır. Tünelde gereken ortalama hava hızı ise en az  $0.3 \text{ m/s}$ ' dir. Genellikle temiz hava kazının yapıldığı yerden alınır bu yüzden en kirli hava tünel girişi yakınlarındadır.

Havalandırmanın, püskürtme betonun ve yeni kazılmış zeminin rutubetini azalttığı unutulmamalıdır. Bu durum da toprağın kohezyonunun azalmasına yol açar. Eğer kazı desteklenmezse toprağın kohezyonunun azalması yüzeyde çökmelere neden olabilir.

Kazı ve beton dökme işlemleri ayrıca, kaldırılması gereken çok miktarda toz oluşturur. Kuru toz ayırma işlemi, hava filtrelemesi ile yapılır. Toz, kaynağına olabildiğince yakın ortadan kaldırılmalı ve yayılmasının azaltılması için bölme duvarlarından yararlanılmalıdır.

## 5.2. Tünel İnşası Sırasında Uygulanacak Havalandırma Sisteminin Tasarımı



Şekil 5.2 Havalandırma tasarımı için semboller [27]

Şekil 5.2'de havalandırma kanalının çapı  $d$  ve uzunluğu da  $l$  sembolleri ile gösterilmektedir. Giriş ve çıkışlardaki basınç farkları az olduğu için havanın sıkıştırılabilirliği ihmal edilebilir bu yüzden havanın yoğunluğu  $\rho$  sabit olarak alınabilir. Ortalama hava hızı  $v$  dir. Vantilatör, kanal içinde aerodinamik engeller sebebiyle oluşacak kayıplara karşı  $p_1$  basıncını üretebilmelidir. Newtonyen akışkanların tam gelişmiş akışlarında, akışkan sürtünmeleri sebebiyle oluşan basınç düşümleri Darcy-Weisbach eşitliği ile aşağıdaki gibi yazılır [29].

$$\frac{dp}{dx} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} v^2 \quad (5.1)$$

$$Q = \pi \frac{d^2}{4} v \quad (5.2)$$

Eşitlik (5.2)'den hava hızı  $v$  çekilerek eşitlik (5.1)'de yerine konulursa,

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} v^2 = \frac{8\lambda l \rho}{\pi^2} \frac{Q^2}{d^5} \quad (5.3)$$

eşitliği elde edilir.

Kanal kalitesi (sürtünme) katsayısı  $\lambda'$  nın değerleri 0.015 ile 0.024 arasında değişir. Vantilatördeki basınç artışı  $\Delta p$ , hava debisi  $Q$ 'nun karesi ile orantılıdır. Kanaldaki kayıplar sebebiyle  $Q_1$ ,  $Q_0$ 'a eşit değildir. Özgül sızıntı katsayısı  $f$  (birim kanal alanı başına kayıp) ile çıkış hızı  $v_L$  arasındaki süreklilik denklemi eşitlik (5.4)'deki gibi yazılır.

$$\frac{\pi}{4} d^2 \frac{dv}{dx} = f \pi d v_L \quad (5.4)$$

Çıkış hızı  $v_L$  Bernoulli'ye göre  $\sqrt{p - p_0}$  ile orantılıdır. Burada  $p - p_0$  kanal içindeki basınç farkıdır. Kayıp katsayısı  $\xi$  hesaba katılarak<sup>1</sup>,

$$v_L = \sqrt{\frac{2(p - p_0)}{\rho(1 + \xi)}} \quad (5.5)$$

eşitliği elde edilir.

Eğer kanal düşük bir basınca sahipse  $v_L$ ' nin yönü içe doğrudur. Sonuç olarak basınç ve hız değişimleri için aşağıdaki diferansiyel denklemler elde edilir.

$$\frac{dp}{dx} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} v^2 \quad (5.1)$$

$$\frac{dv}{dx} = \lambda \frac{4f}{d} \sqrt{\frac{2(p - p_0)}{\rho(1 + \xi)}} \quad (5.6)$$

---

<sup>1</sup> Kanalın kalitesine göre  $f/\sqrt{(1 + \xi)}$ 'nin değerleri  $5 \cdot 10^{-6}$  ile  $20 \cdot 10^{-6}$  arasında değişir.

$d, l, \lambda, Q_0$  (gerekli temiz hava miktarı) ve  $p_0$  (havalandırma kanalının sonundaki basınç, 0 olarak alınabilir) değerleri verildiğinde,  $Q_1 / Q_0$  ve  $p_1 / (\frac{\rho}{2} v_1^2)$  değerleri diyagramlardan alınabilir [27].

Vantilatör basıncı,  $p_1$  basıncı ile vantilatöre girişteki ve hava kanalındaki basınç kayıplarının toplanması ile bulunur. Bu kayıplar  $\xi_i \frac{\rho}{2} v^2$  denklemi ile tanımlanır.

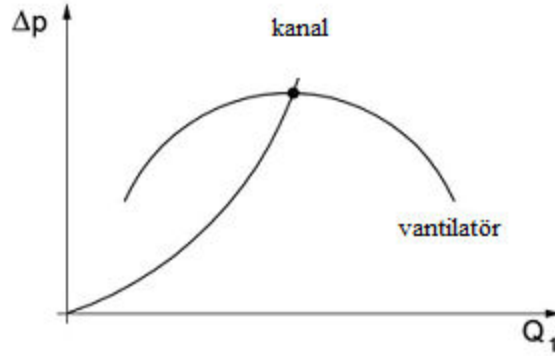
Vantilatör basıncının bulunması ile vantilatör tarafından harcanan güç aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$N = \frac{1}{\eta_v \eta_M} Q_1 p_{vant}. \quad (5.7)$$

Burada  $\eta_v$  vantilatör verimi ve  $\eta_M$  ise motor verimidir.

Kanalın aerodinamik yapısı, kanala giren  $Q_1$  debisi ve  $p_1$  basıncı arasındaki ilişkiyi belirler. Bu ilişki kanal karakteristiği olarak adlandırılan bir paraboldür. Vantilatörün aerodinamiği ise  $Q_1$  ile  $p_1$  arasında bir diğer ilişkiyi gösteren vantilatör karakteristikleri olarak adlandırılan başka bir parabolde gösterilir. İki karakteristiğin kesişimi  $Q_1$  ile  $p_1$ 'in çalışma değerlerini verir (Şekil 5.3). Bu grafikler ile uygun havalandırma sistemi tasarlanır ve değişik durumlara uyarlanır. Örneğin tünellerde çalışma devam ettikçe çalışma yüzeyinin girişe olan uzaklığının artması ile havalandırma kanalının uzunluğu değişir ve bu durum da çalışma karakteristiklerinin değişmesine yol açar. Kazı ilerledikçe periyodik aralıklarla ilgili düzeltmeler yapılmalıdır [27].





Şekil 5.3 Kanal ve vantilatör karakteristiklerinin kesişimleri

### 5.3. Metro Sistemlerinin İşletim Sırasında Havalandırılması ve İlgili Kavramlar

Metro sistemlerinin işletilmesindeki havalandırmada normal, sıkışık trafik ve acil durum olmak üzere üç ayrı koşul dikkate alınmaktadır. İşletilen trenlerin tarifelere uygun şekilde çalışmalarını halinde işletme "normal" olarak tanımlanmakta ve bu durumda yolcular araçlardan istasyonlara ve istasyonlardan araçlara rahatça geçmektedirler [30]. Normal işletim sırasında tren yolundaki ve istasyonlardaki hava hareketini tren hareketlerinin piston etkisi sağlar. Geçmiş yıllarda yapılan çoğu sistemde, bu hava hareketi metro tesisinde gereken ortam şartlarını sağlamakta yeterli olmaktaydı. Buna rağmen yüksek hızlara çıkabilen yeni yüksek performanslı transit metro araçları, ivmelenme ve frenleme sistemlerinin etkisiyle piston etkili havalandırmayı yapamayacak kadar yüksek ısı üretebilmektedir. Buna ek olarak metro trenlerinde ve istasyonlarında artan klima kullanımı da tünel ortamındaki sıcaklığı arttırmaktadır. Bugün dünyada tasarlanan ve yapılan yeni sistemlerin pek çoğunda istasyon tesislerinin soğutulması ele alınmaktadır [26].

“Sıkışık durum” gecikmelerin veya işletim problemlerinin trenlerin normal çalışmasına engellemesi sonucu ortaya çıkan durumdur. Trenler istasyonlarda veya tünellerde önceden belirlenmiş noktalarda bekletilir. Gecikmeler çoğunlukla 30 sn ila 20 dk arasındadır. Daha uzun gecikmeler genelde acil durum kapsamına girer. Yolcuların tehlikeye maruz kalması ve yolcu tahliyesi sıkışık durumlarda meydana

gelmez. Bu durumda yolcuların treni terk etmemesi nedeniyle yolcu konforu için, tren içindeki klima sistemlerinin düzgün çalışmasının devamı sağlanmalıdır [25]. Ayrıca bu koşullar havalandırma ve soğutma gereksinmesini sağlayacak piston etkisini büyük ölçüde ortadan kaldıracaktır ve bir mekanik havalandırmayı gerekli kılacaktır.

Metro havalandırma sistemlerinin diğer bir yönü de “acil durum” koşullarıdır. Acil durum koşulları genellikle trenlerin bir kaza nedeniyle durmasından ileri gelir. En ciddi tehlike durumu, tünel içinde durmuş ve yanan bir trenin bulunmasıdır. Bu durumdaki bir tren trafiğin akışını aksatacağı gibi içindeki yolcuların tahliyesini de şart kılar.

Tehlike halinde havalandırmanın esas gayesi yolculara emniyetli bir tahliye yolu ve yangınla mücadele ekibinin de girişini güvenli bir şekilde sağlayabilmek için yangın sırasında oluşan ısıyı ve dumanı atmaktır.

Acil bir durum meydana geldiğinde trenlerin durdurulması veya yavaşlatılması piston etkili havalandırmanın kesilmesine yol açar. Bu durum mekanik bir havalandırma sisteminin tünele dahil edilmesini gerekli kılar.

Bir metro tüneli sisteminde ortamı kontrol edebilmek için ulaşılmaması gereken hedefler, yolcular için olduğu kadar işletme ve bakım personeli için de uygun bir ortam sağlamak ve teçhizatların sıcaklığının yüksek değerlere çıkmasının engellenmesi ve ömrünün uzatılmasıdır. Bu hedefler istasyonlardaki ve tren yolundaki bütün halka açık ve kapalı yerler için geçerli olmalıdır. Ayrıca dumanın, kokunun ve buharın kontrol edilmesi gereği de göz önünde bulundurulmalıdır.

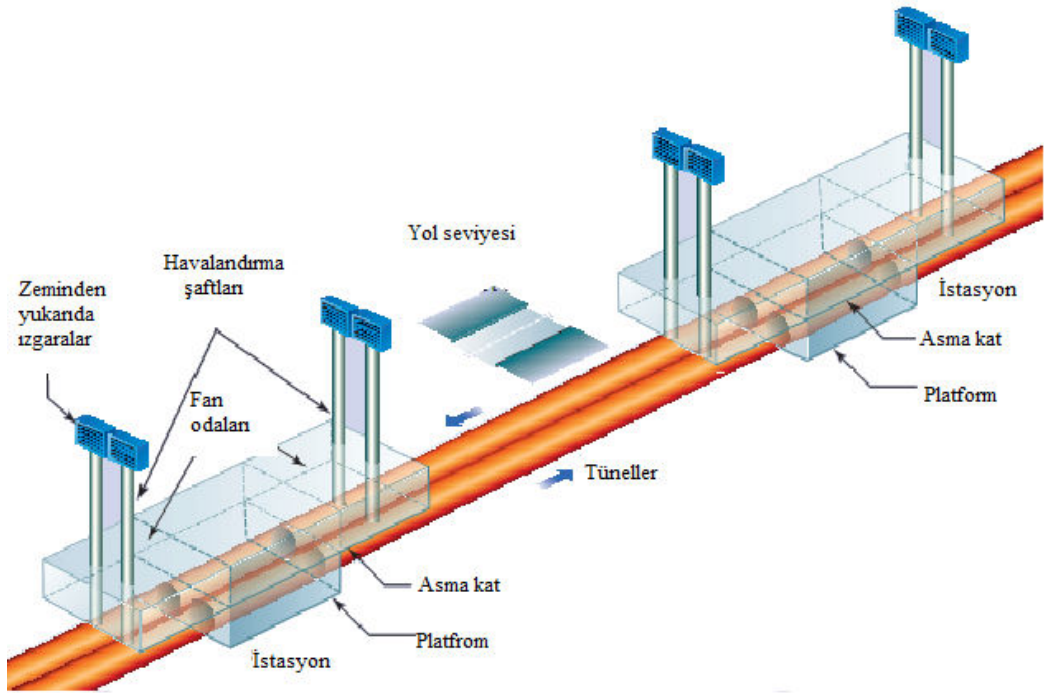
Metro sistemlerinde tünellerin havalandırılması konusu son 20 yıldır daha geniş anlamda ele alınmaktadır. Günümüzde normal ve acil durumlarda tünel ve istasyon ortamı için havalandırma işlemleri iç içe geçmiş bulunmaktadır. İstasyon ortamı, bağlantı tünellerinde meydana gelen olaylardan ciddi bir şekilde etkilenir.

Bu işletme koşullarına bağlı olarak, doğal ve mekanik havalandırma yanında acil durum havalandırması söz konusu olmakta; istasyonların iklimlendirilmesi de, bu kapsamda ele alınmaktadır.

### 5.3.1 Doğal havalandırma

Metro sistemlerinde doğal havalandırma, temel olarak trenlerin tren yolunun büyük kısmını doldurması ve önüne kattığı havayı tren hareketi yönünde ittirmesidir [25]. Trenin bu etkisi sızdıran bir piston benzetilebilir.

Genellikle istasyonların iki ucunda dış havaya açık ve yaklaşık tünel enkesiti alanına sahip düşey shaftlar oluşturulmaktadır (Şekil 5.4). İstasyona yaklaşan trenin önünde oluşan pozitif basınç; tünel ve istasyon içindeki sıcak ve kirli havayı yakın shaft, istasyon giriş/çıkışları ve diğer açıklıklardan dışarı atmaktadır. İstasyondan hareket eden trenin arkasında oluşan negatif basınç ise aynı açıklıklardan temiz havanın içeri alınmasını sağlamaktadır.



Şekil 5.4 İki istasyon ve bir tünel parçasından oluşan sistem için havalandırma düzeni [31]

Metro sistemindeki tünellerde veya istasyonlarda paralel iki hat arasında bir duvar yoksa veya duvarlar arasında boşluk bulunmaktaysa iki tren birbirinin hava hareketini engelleyip doğal havalandırmada bir kısa devreye yol açabilir. Böyle bir kısa devre net havalandırmayı düşürür ve istasyon girişlerinde ve platformlarında hava hızlarını artırır. Bu durum en yoğun işletim saatlerinde ve en yüksek ortam sıcaklığında istenmeyen ısı artışlarına sebep olabilir.

Doğal havalandırmada oluşabilecek kısa devreyi ortadan kaldırmak için havalandırma şaftları, genel olarak tünel ve istasyonların kesişim bölgeleri yakınında yer alacak şekilde tasarlanır. İstasyonlara gelen tünellerde (yaklaşım tünelleri) yer alan, havanın bir kısmının tren tarafından itilerek atıldığı şaftlara genel olarak çıkış veya tahliye şaftı denir. İstasyonlardan giden tünellerde (uzaklaşma tüneli) bulunan şaftlara besleme veya tedarik şaftı denilmekte olup, istasyondan uzaklaşan trenin arkasında oluşan negatif basıncın etkisiyle dış ortam havası istasyon girişlerinden değil de bu şaftlardan istasyona girer. Böylece iki trenin zıt etkisi ortadan kaldırılmış olur.

Tünel uzunluğuna göre istasyonlar arasında veya su altı geçişleri için girişler arasında ilave havalandırma şaftları konulabilir. Bu yapılar, yüksek maliyetleri nedeniyle en uygun verimlilikle tasarlanmalıdırlar. Eğimler ve dirsekler nedeniyle oluşacak iç direnç en aza indirgenmeli ve şaft kesit alanı tek hatlı bir tünelin kesit alanına yaklaşık eşit olmalıdır [25].

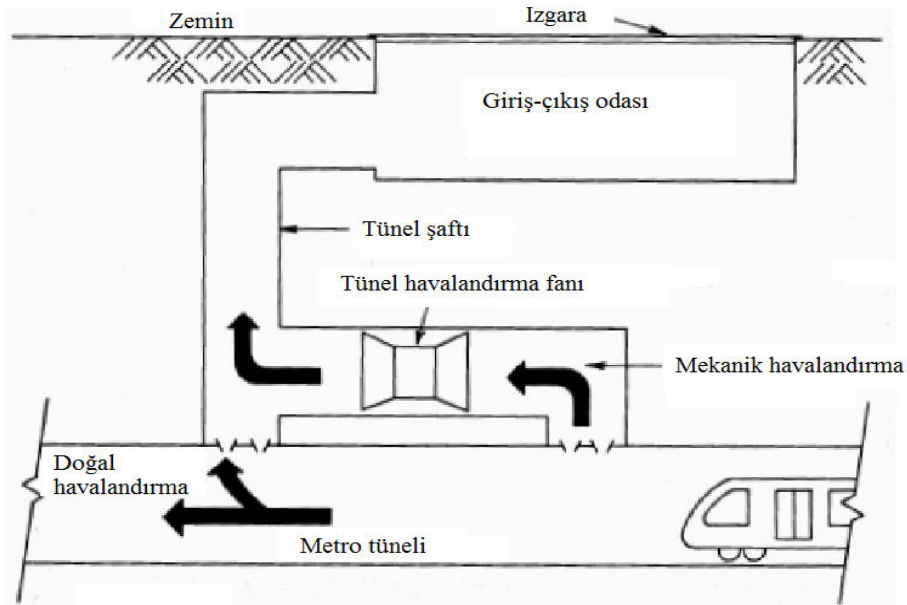
### **5.3.2 Mekanik (zorlanmış) havalandırma**

Mekanik havalandırmada hava değişimi ve hareketi için fan veya fanlardan yararlanır. Metro sistemlerinde mekanik havalandırmanın görevleri:

- Piston etkili havalandırmayı desteklemek ve tamamlamak,
- Isınmış havayı sistemin dışına atmak,
- Serin dış ortam havasını sisteme almak,

- Egzost için dış ortam havasını tedarik etmek,
- Çalışma saatleri dışında ortamdaki doğal ısı yutucuların yeniden işlerlik kazanmasını sağlamak,
- Tünel ve istasyon arasındaki hava akımını azaltmak,
- Acil durumlarda istasyonlardaki veya tünellerdeki yolcular için dış ortam havasını sağlamak,
- Sistemi yangın durumunda dumandan arındırmak ve yangınla mücadele ekibinin sisteme güvenli girişini sağlamaktır.

Mekanik havalandırma için en uygun maliyetli tasarım, sistemin elemanlarının iki veya daha fazla işlevinin olmasıyla sağlanabilir. Örneğin doğal havalandırma için kullanılan bir havalandırma şaftı aynı zamanda acil durumlar için kullanılabilir. Bu koşul, bir fanın istenildiği zaman bypass edilebilecek şekilde paralel olarak şafta eklenmesi ile mümkün olmaktadır (Şekil 5.5).



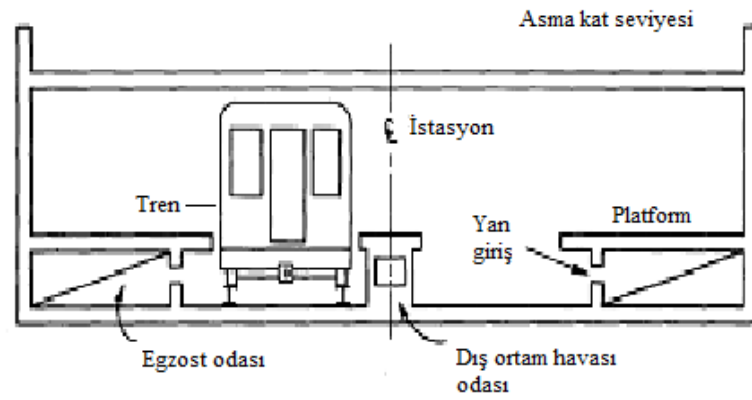
Şekil 5.5 Doğal ve mekanik havalandırmanın tercihli çalışma prensibi [25]

Şaftın konumuna ve durumuna bağlı olarak, bypass damperi açık olan ve fan damperi kapalı olan şaft, çıkış veya besleme şaftı olarak hizmet verebilir. Fanın çalışması ve bypass damperinin kapalı olması durumunda ise yani mekanik havalandırmaya geçilmesi ile hava, fanın çalışma yönüne göre, tedarik edilebilir veya dışarı atılabilir.

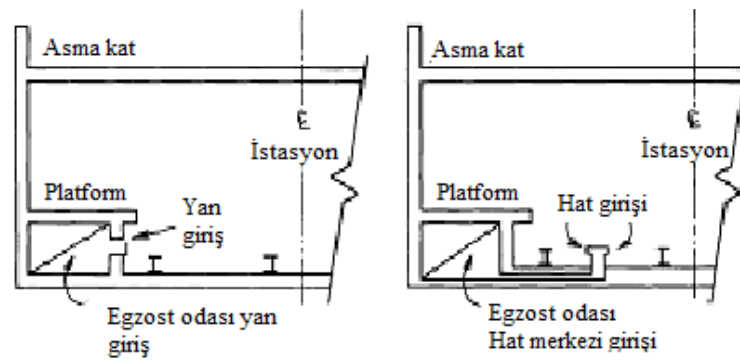
Acil durum şartları dışında fanların çalışma şekli (hava tedarik etme veya dışarı atma) önceden belirlenmelidir. Metro istasyonları iklimlendirilmemişse, metrodaki sıcak hava dışarıdaki daha serin hava ile sık sık yer değiştirmelidir. Eğer istasyonlar dış ortam sıcaklığından daha düşük sıcaklığa iklimlendirilmiş ise daha sıcak olan dış ortam havasının alınması sınırlı ve kontrollü olmalıdır.

İstasyon ısını, ısının ana kaynağı olan tren altından dışarı atan direkt bir havalandırma sistemi de platform altı egzost (PAE) sistemidir ve değişik uygulama yöntemleriyle birlikte Şekil 5.6'da gösterilmektedir. Yapılan testler, PAE sisteminin ısınmış havanın platform alanlarına akışını azaltmanın yanında trenin altında bulunan frenleme sistemleri ve iklimlendirme yoğuşturucularının oluşturduğu ısının kayda değer miktarlarda azaltılmasını sağladığını da göstermektedir. Bu sistemlerde genelde egzost için alınan dış ortam havası hava akımına karşı pozitif bir kontrol sağlamak için tren yolu seviyesinden sisteme girmelidir (Şekil 5.6a).

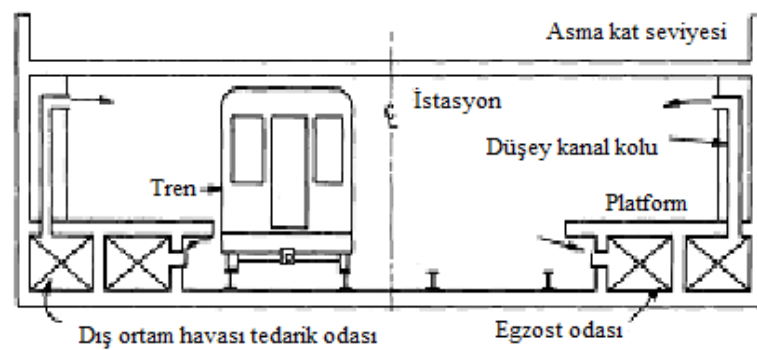
Egzost için dış ortam havasını kullanmayan bir PAE sistemi Şekil 5.6b'de gösterilmektedir. Bu yöntem en az verimli olandır ve ısınmış tünel havasının istasyona doğru akmasına yol açabilir. Dış ortam havasının platform üstündeki tavandan alınması ile gerçekleştirilen uygun maliyetli bir sistem Şekil 5.6c'de gösterilmektedir. Bu sistemin Şekil 5.6a'da gösterilen sistem kadar ısı atma etkisi olmasa da dış ortam havasının kullanılmaması sonucu sıcak tünel havasının istasyon konfor şartlarını olumsuz etkilemesi sorununa yol açmaz.



a)



b)



c)

Şekil 5.6 Platform altı egzost sistemi yöntemleri: a) Dış ortam havasının hat seviyesinden alındığı durum b) Dış ortam havası tedarikinin bulunmadığı durum c) Dış ortam havasının tavan seviyesinden alındığı durum [25]

### 5.3.3 Acil durum havalandırması

Bir metro yangını sırasında mekanik havalandırma, kontrol stratejisinin en önemli kısmını oluşturur. Çünkü hava tedarikinin artması ile tutuşma sıcaklığı düşürülerek yangının ilerlemesi yavaşlatılır. Ayrıca yolcu tahliyesinin güvenli bir şekilde sağlanması ve yangınla mücadele ekibinin yangına müdahalesinin kolaylaşması için dumanın yayılma yönü mekanik havalandırma ile kontrol edilebilir [25].

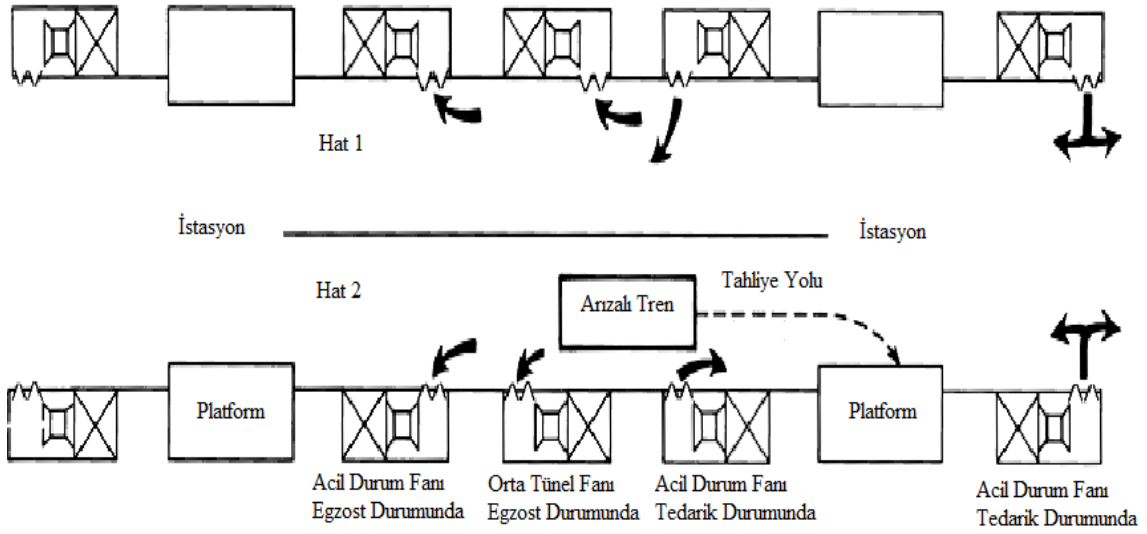
Acil durum havalandırması metro sistemi içerisinde trenin arızalanabileceği veya yangının ortaya çıkabileceği her nokta için geçerli ve yeterli bir havalandırma sağlayabilmelidir. Bu yüzden acil durum havalandırma fanları hemen hemen tamamen çift yönlü çalışabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Böylece yanan bir trenin yakınındaki fanlar birlikte çalışarak hava akımını ve duman kontrolünü sağlayabilirler. Bir tren iki istasyon arasında arızalanıp durduğunda veya yandığında, dış ortam havası en yakın istasyondan tedarik edilir ve kirlenmiş hava zıt yönden dışarı atılır. Daha sonra yolcular Şekil 5.7’de gösterildiği gibi tünel içindeki yürüme yollarından en kısa mesafeden tahliye edilirler.

Metro sisteminde acil bir durum ile karşılaşıldığı zaman aşağıdaki adımlar uygulanır:

1. Bütün acil durum konuları çabucak değerlendirilir.
2. Durum hakkında kontrol merkezi ile iletişime geçilir.
3. Trenin bulunduğu yer tespit edilir.
4. Duman kontrolünü sağlamak için çalıştırılacak, durdurulacak ve ters yönde çalıştırılacak fanlar hızlı bir şekilde düzenlenir.

Tünelin ortasındaki ve istasyon tren yolundaki havalandırma fanları acil durum havalandırması için kullanılabileceğinden bu fanlar uzun süre yüksek sıcaklıklara dayanabilmeli ve çift yönlü çalışma kapasitesine sahip olabilmelidirler.





Şekil 5.7 Acil durum havalandırma sistemi ve yolcu tahliyesi planı

### 5.3.4 İstasyonların iklimlendirilmesi

Yüksek tren hızları ve sık tren seferleri, istasyonlardaki ısı kazancı miktarını artırır. Bu durum özellikle sıcak iklimlerde daha büyük konfor sorunlarına yol açabilir ve sadece havalandırma ile istenen konfor şartları sağlanamayabilir. Bu durum istasyonlar için bir iklimlendirme sistemini gündeme getirmektedir. Her ne kadar ayrı bir iklimlendirme sistemi maliyeti arttıracaksa da uzun vadede kazançlar sağlayacaktır.

Bu kazançlar,

- Havalandırma için tasarlanan hava akımı debilerinin düşmesi,
- Yolcular için çevresel şartların iyileştirilmesi ve metro sistemini daha çok yolcunun tercih etmesi,
- Ekipman ömrünün artması,
- Ekipmanların ve yapıların bakım masraflarının azalması,

olarak sıralanabilir [25].

Soğutma dağıtım tesisatını çoğunlukla platform seviyesinin konumu belirler. Trenin konumu, yüksek yoğunluktaki yolcu yükü veya çok güçlü bir aydınlatma sebebiyle yüksek tavanlarda oluşan bölgesel sıcak alanların, bölgesel soğutmaya ihtiyaçları vardır. Fakat trenin uzunluğu platform uzunluğuna eşitse ve tavan yüksekliği platformdan 3-3.5 m kadar mesafe ile sınırlandırılmışsa ısı kaynaklarının yalıtılması ve bölgesel soğutma yapılması genellikle makul değildir.

Eğer metro istasyonu iklimlendirilmişse, istasyon basıncının nötr veya tünele göre biraz yüksek bir basınçta tutulması fayda sağlayacaktır. Bu sayede tünel ortamından istasyona hava akımını azaltmak için atılan hava akımı ile dışarıdan alınan temiz hava akımı denge oluşturacaktır.

Çok sıcak olmayan iklimlerdeki metro istasyonlarında yolcuların kullanmadığı alanlar ise elektronik odalar hariç havalandırma ile soğutulabilir. Haberleşme ve sinyalizasyon donanımlarının konulduğu alanlara elektronik oda denmektedir [32]. Bu odalarda bilgisayar sistem odaları özelliğinde ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme koşulları sağlanmalıdır. Yaz-kış sabit sıcaklık, nem kontrolü, pozitif basınç ve düşük toz oranı bu odalar için belli başlı koşullardır.

#### **5.4 Metro Sistemlerinin İşletilmesi Sırasında Uygulanacak Havalandırma Sisteminde Tasarım Esasları**

Metro sistemlerinin işletilmesi sırasında uygulanacak havalandırma sistemi için tasarım sürecinde dikkate alınacak hususlar sırası ile işletim koşulları, ısıl yüklerin analizi ve çevresel kontrol olarak belirlenebilir.

Bir metro sistemi normal ve acil durum işletim koşullarını yerine getirecek şekilde tasarlanmalıdır. Normal işletimde tasarım esasları olarak yılın değişik zamanları için sıcaklık ve nem sınırları, ortam havasında oluşan kirletici maddelerin atılması için gereken en düşük havalandırma debisi, sistemde bulunan kişileri etkileyen hava hızı

sınırları ve hava basıncı değişim oranlarının belirlenmesi dikkate alınır. Acil durumlar ise dumanın veya yangının ortaya çıktığı metro kısımlarında en kısa tahliye sürelerinin ve fanlardan kaynaklı en düşük ve en yüksek tünel hava hızlarının dikkate alınmasını gerektirir [25].

Daha sonra ısı yüklerinin analizi aşamasına geçilir. Analiz aşamasında ısının nerede ve nasıl ortaya çıkacağı, doğal ve/veya mekanik havalandırmanın istenen ortam şartlarını en uygun olarak nasıl sağlayacağı araştırılmalıdır.

Ortam kontrolü ise, metro sisteminde istenen şartların sağlanabilmesi için kullanılan yöntemler ile ilişkilidir.

#### **5.4.1. Normal işletim koşulları için tasarım esasları**

Normal işletim koşulları tasarımında ele alınacak temel konu yolcuların ve çalışanların konforudur. Söz konusu konfor için metro ortamında dikkate alınması gereken faktörler sıcaklık, nem, hava hareketi, gürültü ve titreşimdir. İnsanların ortama tahammül edebilme kapasitesi; yaş, meslek, sağlık, ortama alışabilme ve insanlardaki doğal çeşitliliğin bir fonksiyonudur. En kritik madde ise ısı faktördür [26].

Normal işletimde sıcaklık yanında en yüksek hava hızı, ani basınç değişimi ve gaz parçacıkları ve koku bileşenlerini kapsayan hava kalitesi de göz önünde bulundurulmalıdır.

##### **5.4.1.1. Isıl konfor**

Isıl konfor, normal işletim için ortam koşullarını belirlemede birincil faktördür ve yolcuların konforu üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Yolcuların dış ortamdan istasyona girişleri sırasında maruz kaldıkları ısı ortamının kalitesi özellikle önemlidir fakat bu kalite düzeyinin tek bir değere göre oluşturulması neredeyse imkânsızdır. Standart ofis ortamı ölçütlerinin uygulanması çok maliyetli olacaktır. Bu sebeple

sıcaklığın, nemin, aktivitenin ve hava hızının yolcu konforu üzerindeki etkisi, ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating Air Conditioning Engineers) tarafından açıklanan bir modele göre Bağlı Sıcaklık İndeksi (BSİ) adı verilen bir değer hesaplanmasıyla belirlenebilir.

BSİ, konfor değişkenlerinin yolcunun konforu üzerindeki etkilerini kısa zaman süreleri için tespit ettiğinden tasarım mühendisi bu verilere dayanarak en uygun istasyon tasarım sıcaklığını seçebilir. Böylelikle seçilen bu sıcaklık, yolcunun rejim halinde hissedeceği konfordan çok, anlık sürelerde hissettiği konfora dayanmış olur ve daha gerçekçi bir havalandırma sistemi tasarımı yapılabilir.

BSİ asıl olarak İngiliz birim sistemine göre oluşturulmuştur. SI birim sistemine çevrilerek, klima tesisatı olmayan bir istasyon modelinde bir yolcunun yaz günü BSİ değerleri eşitlik (5.8) ile bulunur [29].

$$BSİ = \frac{M(I_c + I_a) + 3.58 \times [(T_1 \times 1.8) - 61]}{234.3} \quad (5.8)$$

Eşitlik (5.8)'de,

BSİ: Bağlı sıcaklık indeksi

M: Metabolik oran (W/m<sup>2</sup>) (değerler Çizelge 5.3'de verilmiştir)

I<sub>a</sub>: Havalandırma etki katsayısı (m<sup>2</sup>.°C/W) (hava akımının yalıtım etkisi, değerler Çizelge 5.4'de verilmiştir)

I<sub>c</sub>: Yalıtım katsayısı (m<sup>2</sup>. °C/W) (yolcunun giyiniklik durumu, değerler Çizelge 5.5'de verilmiştir)

T<sub>1</sub>: Dış ortam kuru hava sıcaklığı ( °C)

olarak ifade edilirler.

Çizelge 5.3 Metabolik oran,  $M$ , değerleri [33]

AKTİVİTE VEYA KONUM	$M$ (W/m <sup>2</sup> )
Bazal	47.3
Oturarak dinlenirken	63
Ayaktayken veya rastgele yürüyüş sırasında	123
3.2 km/h hızla yürürken	123
4.8 km/h hızla yürürken	170.3
İstasyon girişinde	170.3
Bilet satış alanında	170.3
Platformda	123
Tren içerisinde	88.3

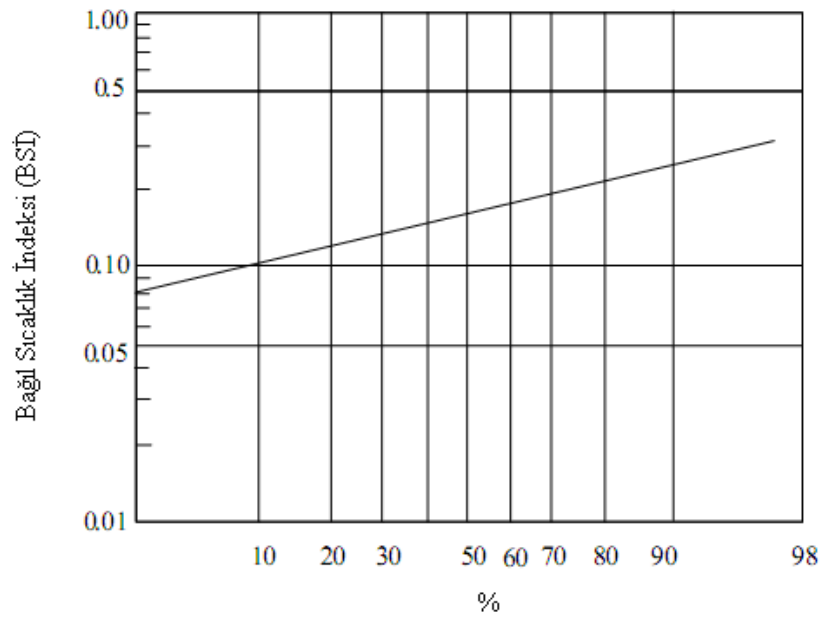
Çizelge 5.4 Havalandırma etki katsayısı,  $I_a$ , değerleri [30], [33]

AKTİVİTE VEYA KONUM	$I_a$ (m <sup>2</sup> . °C/W)
1,2 m/s hızla yürürken (Rüzgâr yönünde)	0.18
1,2 m/s hızla yürürken (Rüzgâra ters yönde)	0.24
Durduktan hemen sonra (Hava akımı varsa)	0.26
Durduktan hemen sonra (Hava akımı yoksa)	0.32
Durduktan 6 dk sonra (Hava akımı varsa)	0.40
Durduktan 6 dk sonra (Hava akımı yoksa)	0.60
Otururken	0.54
İstasyon girişinde	0.25
Bilet satış alanında	0.30
Platformda	0.40
Tren içerisinde	0.45

Çizelge 5.5 Yalıtım katsayısı,  $I_C$ , değerleri [30], [33]

AKTİVİTE VEYA KONUM	$I_C$ ( $m^2 \cdot ^\circ C/W$ )
1,2 m/s hızla yürürken	0.35
Durduktan 6 dk sonra (Hava akımlı ortamda)	0.40
Durduktan 6 dk sonra (Hava akımsız ortamda)	0.60
İstasyon girişinde	0.35
Bilet satış alanında	0.35
Platformda	0.40
Tren içerisinde	0.50

Bulunan BSİ değerlerinin Şekil 5.8'deki grafikten okunmasıyla insanların yaz şartları altında çevresindeki sıcaklığı algılaması hakkında niteleyici bir fikir edinilebilir. BSİ 0 ile 0.5 arasında değişim gösterir ve örneğin 0.4 BSİ'de yolculardan %99'u daha serin bir ortam arzu ederken 0.1 BSİ'de yolcuların yaklaşık %10'u serin bir ortam isteyecektir.



Şekil 5.8 BSİ değerlerine göre yaz şartlarında daha serin bir ortam isteyen yolcuların oranı [33]

#### 5.4.1.2. Hava Kalitesi:

Bir metro sistemindeki hava kalitesi yolcuların konfor ve sağlığı üzerinde etkilidir. Hava kalitesindeki bozulma rahatsız edici olabilir (duman ve koku olarak) ve solunum sistemiyle bağlantılı hastalıklara yol açabilir. Bu kirlilik unsurlarının çoğu uygun havalandırma yöntemleri ile atılabilir ve potansiyel zararlar en aza indirgenebilir.

Bazı partiküllerin, gaz halindeki kirleticilerin ve koku maddelerinin dışarıdan sisteme girmesi uygun yerlere yapılan havalandırma şaftları ile önlenabilir. Trenlerin çalışması sonucu oluşan demir ve grafit tozları gibi partikül maddeler düzenli olarak temizlenmelidir. Fakat elektrikli donanımlardan oluşan ozon ve insanların solunumundan dolayı ortaya çıkan CO<sub>2</sub> gibi gaz kirleticileri temizlemenin en geçerli yolu dış ortam havası ile uygun bir havalandırma yapılmasıdır. Genel kabullere göre bu kirleticileri ortadan kaldırmak için tünellere ve istasyonlara kişi başı en az 0.0035 m<sup>3</sup>/s dış ortam havası sağlanmalıdır [25].

#### 5.4.1.3. Hava hızı:

Trenin tüneldeki hareketi tünellerde ve istasyonlarda bir piston etkisi oluşturur. Çoğu durumda bu hava akımı, tünellerde uygun bir hava ortamı sağlamak için yeterlidir. Buna rağmen havanın bu hızının özellikle istasyon platformundaki yolcular için sakıncalı olduğu durumlar da mevcuttur. Bu hava hızları trenlerin hareketine bağlı oldukları için istasyon ve tünellerdeki hava hızları da sabit değildir ve istasyonların platformlarında geçici karakterli yüksek hava hızları meydana getirirler. Yapılacak tasarımda bir istasyon platformu için hava hızı 5 m/sn'den fazla olmamalıdır.

Hava hızının sorun olabileceği bir diğer yer ise yürüme yolu üzerindeki havalandırma ızgaralarıdır. Burada düşey hava hızı 2.5 m/sn.'yi geçmemelidir. Ancak yaya alanı olmayan yerlerde bu hız 5 m/sn.'ye kadar çıkabilir [26].

#### 5.4.1.4. Basınç değişimleri:

Metro tüneline hava akımı oluşturan tren hareketi aynı zamanda basınç değişimlerine de yol açar. Bu basınç değişimleri yolcuları fizyolojik olarak etkiler.

Basınç değişimleri daha çok yolcu alanlarında hissedilir. Çizelge 5.5 değişik seviyelerdeki basınç değişimlerine kulağın verdiği tepkileri göstermektedir. Tasarım yapılırken bu durum göz önüne alınmalıdır.

Yüksek basınç değişimleri aynı zamanda akustik paneller ve fanlar gibi bazı donanımlara da ek yük binmesine ve bunların zamanla zarar görmesine sebep olur. Genel olarak, toplam basınçtaki değişim 700 Pa'dan fazla ise statik basınç değişim oranının 400 Pa/sn'nin altında kalmasına çalışılmalıdır [25].

Çizelge 5.6 Basınç değişimlerine karşı kulağın tepkisi [26]

Kulağın Tepkisi	Orta Kulak ile Ortam Hava sıArasındaki Basınç Farkı (kPa)
Kulağın tamamında algılanabilir duyu	0.414 - 0.689
Kulağın tamamında artan duyu	0,689 - 1,310
Kulağın tamamında belirgin duyu ve kulak tıkanıklığı	1,310 - 1,999
Kulakta çınlama ve uğuldama ile birlikte artan rahatsızlık, acı ve az miktarda baş dönmesi olasılığı	1,999 – 3,999

#### 5.4.2. Acil durum işletim koşulları için tasarım esasları

Bir metro sisteminde acil bir durum, genellikle, trenin durması, yolcuların treni terk etmesi ve tünel ortamına girmesi veya istasyonun tahliye edilmesi gibi olağandışı durumlar veya olaylar olarak tanımlanır. Bu durum ve olayları meydana getiren en büyük etken ise metro sisteminde ortaya çıkan bir yangındır.



Acil bir durumda esas olan insan hayatı olduğu için burada ısı konfor ve basınç değişimleri faktörleri göz önünde bulundurulmaz. Önemli olan kısa bir sürede yolcuların ve çalışanların sağlıklı bir şekilde tahliye edilmesi ve yangınla mücadele ekibinin yangına müdahalesinin kolaylaştırılmasıdır. Bu yüzden acil durum işletim koşulları için tasarım yapılırken dikkate alınacak faktörler yangının ısı gücü, hava sıcaklığı, hava hızı ve hava kalitesidir.

#### 5.4.2.1. Yangının ısı gücü

Kapalı bir mekânda meydana gelen bir yangında, yangının başlamasından tamamen sönmeye kadar gelişmekte olan yangın, tam gelişmiş yangın ve sönmekte olan yangın evreleri olmak üzere üç temel evrenin oluştuğu gözlenmektedir. Bu evrelerin süreleri ve bu evrelerde açığa çıkması beklenen ısı güç değerleri, tünel içerisinde yanmakta olan bir treni tahliye edecek olan yolcuların güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Gelişmekte olan yangın evresi yangının başladığı andan itibaren yangının tam gelişmiş bir yangın olarak kabul edildiği evreye kadar geçen süreç olarak tanımlanır. Gelişmekte olan bir yangın çok hızlı veya yavaş bir şekilde gelişebilir. Gelişme faktörünü etkileyen en önemli özellikler olarak yangının başlayış biçimi, yanan malzemelerin yanıcı özellikleri, ortamdaki oksijenin miktarı ve yanan bölgenin çevresiyle olan ilişkisi sıralanabilir. Yangının hızlı veya yavaş geliştiğini belirlemek için çevreye yaydığı enerjinin, yani ısı güç değerinin hesaplanması gerekir.

Gelişmekte olan bir yangının matematiksel olarak modellenmesi t-kare yöntemiyle belirlenebilmektedir [34]. Bu yöntemde açığa çıkan ısı güç, yangının gelişme faktörü ile geçen zamanın karesinin çarpılması ile bulunur.

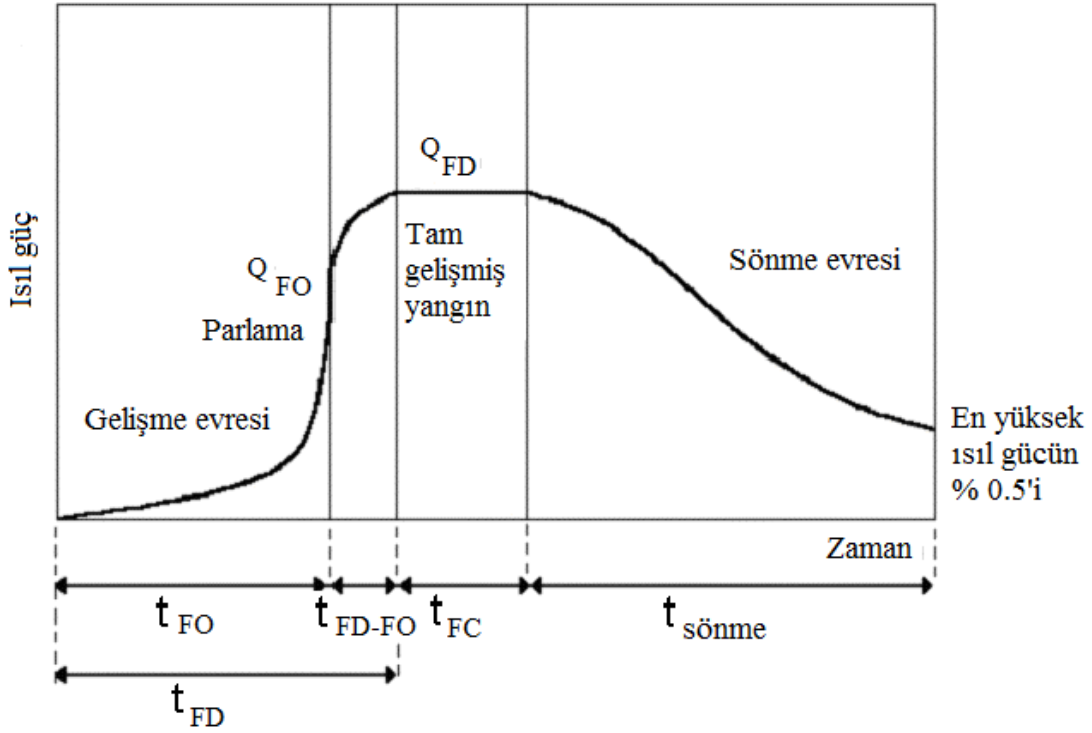
$$\dot{Q} = \alpha \times t^2 \quad (5.9)$$

Eşitlik (5.9)'da,  $\alpha$  yangının gelişme faktörünü,  $t$  ise yangının başladığı andan itibaren geçen zamanı belirtmektedir.

Gelişmekte olan yangın evresinden sonra tam gelişmiş olan yangın evresine geçişte parlama evresi gözlemlenmektedir. Bu evrede açığa çıkan ısı güç değeri yanan bölgenin yüzey kesit alan havalandırma açıklıkları gibi yüzeysel özellikleri ile iletkenlik katsayısına bağlıdır.

Tam gelişmiş yangın evresi parlama evresini takiben, ortamdaki yanıcı tüm maddelerin yangına karıştığına inanılan evredir. Bu evrede genellikle ortamdaki oksijen miktarı azdır ve bu evrenin uzunluğu yangına karışan maddelerin sahip olduğu enerjilere bağlı olarak belirlenir. Tam gelişmiş yangın evresinde açığa çıkan ısı güç, tüm yangın boyunca en yüksek değerine ulaşır ve bu evre sonuna kadar sabit değerde kaldığı kabul edilir.

Sönmekte olan yangın evresinde yangın ortamındaki yanıcı maddelerin tamamının yandığı ve açığa çıkan ısı gücün azaldığı kabul edilir. Bu evrenin başlangıcı, sıcaklığın yangın olayı boyunca yangın bölgesinde hissedilen en yüksek sıcaklığın % 80'ine düştüğü an olarak alınır. Yangının sönme evresi boyunca açığa çıkan ısı güç ile zaman arasında üstel bir ilişki vardır. Yangının tamamen söndüğü an ise yangın olayı boyunca açığa çıkan en yüksek ısı gücün, yüzde 0.5'i değerine düştüğü an olarak belirlenmektedir. Yangın evrelerinde zamana bağlı olarak ortaya çıkan ısı güç Şekil 5.9'da gösterilmektedir.



Şekil 5.9 Isıl gücün zamanla değişimi ve yangın evreleri [34]

Burada,

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

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

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

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

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

$Q_{FD}$  : Tam gelişmiş yangın evresinde açığa çıkan ısı güç olarak ifade edilmektedir.

#### 5.4.2.2. Hava sıcaklığı

Yolcuların ve tünelde çalışanların yangın durumunda çok yüksek sıcaklıklara maruz kalması zarar verici olabilir. NFPA 130 Standardında “Havalandırma sistemi, acil bir durumda yürüme yollarındaki hava sıcaklığı 60 °C’yi geçmeyecek şekilde tasarlanması gerekir” ifadesi bulunmaktadır [35]. Bu sıcaklık değeri yolcunun omuz veya baş seviyesindeki değerdir. Tavan seviyesi için değildir.

Yangın durumunda havalandırma sisteminin çalışmaya devam etmesi için de bazı tasarım şartları mevcuttur. Acil durum fanlarının, motorlarının ve bunların egzost edilen hava akımına maruz kalan bütün parçalarının 250 °C ortam sıcaklığına en az bir saat dayanabilecek şekilde tasarlanması gerekmektedir. Ayrıca kablolar, su boruları, kanallar, kutular, donanım muhafazaları ve dış kaplama yüzeylerinin bir saat süreyle 500 °C sıcaklığa dayanması ve bu sıcaklık değerine kadar alev almaması gerekmektedir [35].

#### 5.4.2.3. Hava hızı

Acil bir durum sırasında tünellerde ve istasyonlarda dumanı kontrol veya tahliye etmek için oldukça yüksek bir hava akımı gerekli olabilir. Bazı durumlarda tahliye edilen yolcular bu yüksek hızdan etkilenebilirler fakat aynı zamanda bu yüksek hızlı hava tahliye edilen yolculara yön bulma ve solunabilir hava sağlama konusunda yardımcı olur. Acil bir durumda 11 m/sn’lik hava hızı kabul edilebilir en yüksek değerdir [25].

Yangın sonucu oluşan duman, yüksek sıcaklığının etkisi ile hafifler ve tünel tavanına doğru yükselir. Fanların çalışma yönü ve varsa tünelin eğimi, dumanın hangi yöne gideceğini belirler [36]. Tahliye yönünün aksi yönde çalıştırılan fanlar yeterince güçlü değilse, tünel içindeki toplam basınç kaybını yenemezler ve oluşturdukları debi sıcak dumanı tahliye etmeyi başaramaz. Yani yanmakta olan trenden yayılan sıcak ve zehirli gazları, tünel içerisinde bir yöne doğru yönlendirmek ve dolayısıyla diğer yönde

yolcular için güvenli bir kaçış yolu sağlamak için gerekli olan en düşük hava hızı değeri olan ve “kritik hız” olarak tanımlanan hız sağlanamaz.

Bu sebeple kritik hızı sağlayacak fanların sisteme yerleştirilmesi için kritik hız değeri tasarım sürecinde hesaplanmalıdır. Kritik hız değeri, yangın yükü, ortam sıcaklığı, tünel kesit alanı, tünel eğimi, tünel yüksekliği gibi birçok parametreye bağlıdır. Kritik hız değeri, eşitlik (5.10) ve eşitlik (5.11)’in beraber çözülmesi ile bulunabilir [34].

$$V_c = K_1 K_g \left( \frac{gHQ}{\rho c_p A T_f} \right)^{1/3} \quad (5.10)$$

$$T_f = \frac{Q}{\rho c_p A V_c} + T_1 \quad (5.11)$$

Bu eşitliklerde;

$V_c$ : kritik hız (m/s),

$Q$ : yangın ısı gücü (W),

$T_f$ : yangın bölgesi sıcak hava sıcaklığı (K),

$T$ : ortam sıcaklığı (K),

$A$ : tünel kesit alanı (m<sup>2</sup>),

$\rho$  : havanın yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>),

$c_p$ : sabit basınçlı havanın özgül ısı katsayısı (J/kg.K),

$H$ : tünel yüksekliği (m),

$g$ : yer çekimi ivmesi (m/sn<sup>2</sup>) olarak gösterilmektedir.

$K_I$  birimsiz sabittir ve değeri 0.61'dir.  $K_g$  ise eğim düzeltme katsayısını göstermektedir. “ $gr$ ” simgesi yüzde cinsinden tünelin eğimini göstermektedir ve eşitlik (5.12)'de yerine konularak  $K_g$  birimsiz katsayısının değeri elde edilmektedir.

$$K_g = 1 + 0.0374 (gr)^{0.8} \quad (5.12)$$

$K_g$  değerinin kullanılması ile ilgili olarak dikkat edilmesi gereken nokta, eğer tünel içerisinde yangın olan bölgede havalandırma yönü yokuş yukarı veya düz ise  $K_g$  değeri 1 olarak alınır, eğer havalandırma yönü yokuş aşağı ise  $K_g$  için verilen denklem kullanılarak değer birden büyük bulunur.

Bunun gerekçesi, sıcak gazların tünelin tavanına doğru yükselecek olması, hatta eğimli olan tünellerde daha fazla yükselecek şekilde eğimi kullanarak yayılmasıdır. Dolayısıyla yokuş aşağı yapılacak olan havalandırma durumunda, yükselen sıcak gazları da yokuş aşağı süpürmek için daha yüksek havalandırma hızına ihtiyaç duyulmaktadır, bu da kritik hız için daha yüksek bir değer hesaplanmasını açıklamaktadır [34].

#### 5.4.2.4. Hava kalitesi

Bir metro tüneline ya da istasyonunda yangın durumunda hava kalitesi ani olarak bozulur. Yanma sonucu gazlar ve aerosoller ortaya çıkar. Bu maddeler insanları rahatsız etmenin yanında çoğu zaman da tehlikelidir. En yüksek hava akımını sağlamak için en iyi çözüm dumanı kontrol etmek ve temiz havayı tahliye edilen yolculara doğru yönlendirmektir.

Metro sisteminde çıkan bir yangın sırasında oluşacak en tehlikeli gaz karbon monoksit (CO)'dir. Acil durum havalandırma sistemi tasarımı sırasında CO'in yangın

sürecinde aşağıda belirtilen limit değerleri aşmaması gerektiği göz önünde bulundurulmalıdır. (Değerler m<sup>3</sup> hava başına cm<sup>3</sup> CO olarak verilmiştir)

- Yangın başladıktan birkaç saniye sonrası en fazla 2000 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>
- Yangın başladıktan sonraki ilk 6 dakika için ortalama olarak 1150 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> veya daha az
- Yangın başladıktan sonraki ilk 15 dakika için ortalama olarak 450 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> veya daha az
- Yangın başladıktan sonraki ilk 30 dakika için ortalama olarak 225 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> veya daha az
- Yangının sönmesi için kala süre zarfında ortalama olarak 50 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> veya daha az

Bu değerler 1000 m'den yüksek olan rakımlar için o rakımın hava şartlarına göre ayarlanmalıdır [37].

#### 5.4.3. Isıl yüklerin analizi

Bir metro sistemi için normal ve acil durum işletim koşullarına göre yapılacak tasarım belirlendikten sonra sistemde ısının nerede ortaya çıktığına ve hangi yöntemlerle ortadan kaldıracağına dair bir ısıl yük analizi yapılmalıdır.

Eğer metro tüneline insanlar ve makineler tarafından ortaya çıkan ısı zemin tarafından veya havalandırma ile yok edilemeyecek kadar büyük ise sistemdeki sıcaklık artar. Metro sistemine giren bütün elektrik enerjisi biçimleri ısıya dönüşür. Normal işletim sırasında metro sistemlerinde ısı oluşumuna sebep olan temel etkenler trenlerin frenleme ve ivmelenme hareketleri, trenlerin klimaları, istasyon ışıklandırması, insanlar, ekipmanlar ve havalandırma için dış ortamdan alınan havadır.

#### 5.4.3.1 Trenlerin frenlemesi sebebiyle oluşan ısı

Metro sisteminde ortaya çıkan ısının yaklaşık %50-60'ı tren işletimi sırasındaki frenlemeden kaynaklanır. Frenleme istasyon platformu yakınında meydana geldiği için ortam açısından en büyük sorun olmaktadır. Metro araçlarında, elektrik enerjisi cer motoru tarafından kinetik enerjiye dönüştürülmekte, rejeneratif olmayan fren sistemi kullanan metro araçlarında frenleme ile bu kinetik enerjisi ısıya dönüşerek ortama yayılmaktadır. Bu sebeple günümüzde rejeneratif fren sistemleri oldukça yaygın bir şekilde kullanılmakta ve daha da verimli hale getirilmeye çalışılmaktadır.

Rejeneratif frenleme sistemi, frenleme ile oluşan ısının ortama salınmak yerine yeniden kullanılmak üzere elektrik enerjisine dönüştürülmesi esasına dayanır. Volanlı elektrik depolama rejeneratif frenleme sisteminin alternatif bir şeklidir. Burada frenleme enerjisinin bir kısmı yüksek hızlı volanlarda daha sonraki kullanımlar için depolanır. Bu yöntemlerin kullanılması ile frenleme ile oluşan ısıda yaklaşık %25 gibi bir oranda azalma oluşmaktadır [25].

Frenleme sırasında oluşan ısıyı azaltmanın bir diğer yöntemi de istasyondaki tren yolu profili ile ilgilidir. Trenin istasyona yaklaştığı bölgede yukarı doğru hafif bir eğim trenin kinetik enerjisinin bir kısmını potansiyel enerjiye dönüştürür dolayısıyla istasyona giriş sırasında yapılan frenleme esnasında daha az ısı açığa çıkar. Bu yöntemle frenleme sırasında ortaya çıkan ısıda düz bir tren yolu profiline kıyasla yaklaşık %5 gibi bir azalma sağlanmış olur.

Bir metro istasyonunda frenleme ile açığa çıkan ısı eşitlik (5.13) ile hesaplanabilir [30].

$$Q_{Fc} = 0.5 \times m_t \times V_t^2 \times n/3600 \quad (5.13)$$

Burada,



$Q_F$  : Frenleme ile açığa çıkan ısı yük (Watt)

$m_t$  : Trenin ağırlığı (kg)

$V_t$  : Tren işletme hızı (m/sn)

$n$  : Bir saatte istasyondan geçen tren sayısıdır.

Eşitlik (5.13) ile hesaplanan ısı yük değerinin daha önce belirlenmiş tasarım şartları ile uygunluk göstermesi gerekmektedir.

#### 5.4.3.2 Trenlerin ivmelenmesi sebebiyle oluşan ısı

İşletilen pek çok trende ivmelenme sırasında cer motorlarına giden gerilimi ayarlamak için çeşitli direnç elemanları kullanılır. Elektrik gücü, bu direnç elemanlarından ve cereyanlı raydan (elektrik gücünün raylardan sağlandığı durumlarda) ısı olarak metro sistemine yayılır. İvmelenme esnasında bu ısılar ilave olarak cer motoru kayıplarından, dönen direnç elemanlarından ve aerodinamik dirençlerden de ısı yayılmaktadır. Bütün bu ivmelenmeden kaynaklı ısılar, metro sistemindeki toplam ısı yükünün %10 ila %20'sini oluştururlar [25].

Frenlemede olduğu gibi istasyondaki tren yolu profilinin uygun tasarımı ile bu yük azaltılabilmektedir. Bunun için frenlemede uygulanan yöntemin tersi olarak istasyondan çıkış tüneli aşağı doğru biraz eğimli inşa edilir. Böylece gereken kinetik enerji, trenin potansiyel enerjisinden olabildiğince fazla yararlanılarak daha düşük cer motor gücü ve dolayısıyla ortama daha düşük ısı salınımı ile sağlanmaktadır [31]. Bu yöntemle ivmelenme sırasında ortaya çıkan ısıda düz bir tren yolu profiline kıyasla yaklaşık %5 gibi bir azalma sağlanmış olur.

Ayrıca havalandırma tasarım gerekliliklerine göre frenleme ve ivmelenme sırasında ortaya çıkan ısının kaynağına en yakın noktadan dışarı atılması için sisteme platform altı egzost sistemi de dahil edilebilir.

#### 5.4.3.3 Trenlerin klima cihazları ve diğer etmenler sebebiyle oluşan ısı

Metro sisteminde işletilen pek çok yeni trende klima cihazı bulunmaktadır. Tren içi klima cihazı, yolcu ve ışıklandırmadan kaynaklı ısıyı tren dışına kondenser fanı ısısı ve kompresör ısısı olarak atmaktadır. Uzunluğu 15 m kadar olan kısa araçlar için klima kapasitesi genellikle 35 kW civarındadır. Uzunluk arttıkça bu kapasite 70 kW'a kadar çıkabilmektedir. Trenlerdeki klima sistemlerinden olan ısı kazancı sistemdeki toplam ısı kazancının %25 ila %30'unu oluşturur. Bu ısıyı atmak için tasarım şartlarına göre sisteme bir hat üstü egzost sisteminin eklenmesi faydalı olacaktır. Böyle bir tasarımın havalandırma verimliliğini yaklaşık %50 oranında arttırdığı bilinmektedir.

Sistemde ısı kazancı aynı zamanda insanlardan, ışıklandırmadan, dış ortam havasından ve çeşitli ekipmanlardan (bilet makineleri ve yürüyen merdivenler gibi) olmaktadır. Bu ısı kaynakları metro sistemindeki toplam ısı kazancının %10 ila %30'unu oluşturmaktadır.

Platform altı egzost sistemiyle dışarı atılan havaya eşit miktarda dış ortam havası havalandırma sırasında sisteme girmektedir. Bu da istasyon tasarım sıcaklığından daha yüksek dış ortam sıcaklığının olduğu durumlarda havalandırma verimini düşürmektedir. Kontrolsüz alınan dış havanın azaltılması için önerilen bir yöntem, platform altı egzost sistemi girişlerinin aksi yönde tamamlayıcı olarak tedarik edilen bir dış ortam havasının sağlanmasıdır. Böylece tamamlayıcı olarak tedarik edilen hava dış ortam havası ile istasyon ortamındaki havanın karışma oranını azaltacaktır. Fakat test sonuçları, bu yöntemin henüz tam olarak uygulanabilir olmadığını göstermektedir [25].

#### 5.4.4. Çevresel kontrol

Tünellere veya istasyonlara salınan ısı kısmen toprak zemine yayılır ve bir kısmı da trenlerin piston etkisi veya mekanik havalandırma (eğer kullanılıyorsa) ile ötelenir. Daha sonra şaftlardan ve istasyonlardaki girişlerden atmosfere verilir. Toprak sıcaklığı tren yolundaki hava sıcaklığından daha düşükse toprak ısı yutucu, tam tersi durumda ise ısı kaynağı olarak davranır.

Toprağın ısı yutucu olarak işlev görmesi trenlerin piston etkisi gibi bir doğal soğutma mekanizmasıdır. Soğutma, içerideki sıcak hava ile dışarıdaki soğuk havanın yer değiştirmesi sonucu tamamlanır.

Metro sisteminde sıcaklık artışının kontrolü, ortamı çevreleyen ısı yutucudan olan ısı kayıpları ile sisteme akan havanın dengelenmesi olarak tanımlanır [26]. Sistemden kazanılan ısı, ısı yutucudan ve havadan kaybedilen ısıdan büyük olduğunda sistemdeki sıcaklık artar. Böyle bir sıcaklık artışı ısı yutucuya doğru olan ısı akışını artırır. Sıcaklık artışını kontrol edebilmek için ilave hava akımına gereksinim duyulabilir. Hava akımının artması sıcaklık artışını azaltacaktır ama aynı zamanda ısı yutucunun soğutucu etkisini de azaltacaktır. Bu yüzden maksimum ısı kazancı ve maksimum dış ortam sıcaklığının uç değerlerinde ısı kazancı ve kayıplarının dengesizliği sistemdeki toplam sıcaklığı artırır. Isı kazancının ve dış ortam sıcaklığının daha düşük olduğu durumlarda, trenlerin piston etkisi ile oluşan normal hava akımı debileri sıcaklık artışları için istenen kontrolü sağlayabilir. Çoğunlukla bu kontrolü sağlamak için gereken hava akımı debisi aynı zamanda sistem havasının dışarıdaki hava ile yeniden geri kazanılması için de yeterlidir. Eğer sıcaklıktaki artış istenilen şekilde olmazsa mekanik havalandırma veya bir soğutucu cihaz ile soğutma işlemi düşünülmelidir.

Kullanılabilir ortam kontrolü ekipmanları ve bunların bir metro sisteminde kesin sonuç verecek uygulamaları için bir görüşe ihtiyaç vardır. Mühendis, çeşitli sistem görüşlerinin metro ortamı kontrolüne uygunluğunu ve bu sistemlerin metro inşasında ve işletimi sırasında uygulanabilirliğini dikkate almalıdır. Bu sistemler, istasyon platformu klimasına ek olarak tedarik ve dışarı atılma havalandırma sistemleri, ısyı ortadan kaldırmak için tren yolu veya platform altı dışarı atma sistemleri, tüneldeki hat boyunca havalandırma sistemlerini kapsamaktadır.

Bir metro sisteminde ısı problemini en çok tetikleyen unsur metro sisteminde çalışan trenler ve bu trenlerin ivmelenme ve frenleme hareketleridir. Bu sebeple bu trenlerin tasarımına daha fazla dikkat edilmelidir çünkü sadece trenin tasarımı metro sistemi ortamını da etkileyecektir.

## BÖLÜM 6

### MARMARAY PROJESİ'NİN HAVALANDIRMA ÖLÇÜTLERİ AÇISINDAN İRDELENMESİ

Marmaray Projesi, Bölüm 4'de bahsedildiği üzere dört sözleşmeden oluşmaktadır. Projenin demiryolu boğaz tüp geçişi, tüneller ve istasyonlar inşaatı ayağını oluşturan BC1 sözleşmesi bir yer altı demiryolu ulaşım sistemidir. Bu sebeple projenin metro sistemlerindeki havalandırma ölçütleri açısından incelenebilecek kısmı BC1 sözleşmesine dahil olan tüneller ve istasyonlardır.

#### 6.1 Marmaray Projesi BC1 Sözleşmesi Güzergâhı ve Tüneller

Marmaray BC1 sözleşmesi güzergâhı, Avrupa yakasındaki Kazlıçeşme TCDD istasyonu civarında başlayıp Aksaray-Sirkeci ekseninde devam ederek boğaz tüp geçişi ile Anadolu yakasındaki Üsküdar üzerinden geçmekte ve Ayrılıkçeşme civarında son bulmaktadır.

Güzergâh, Kazlıçeşme civarında bir hemzemin istasyon yapısıyla başlayarak Yedikule bölgesine kadar hemzemin ve köprü yapılarıyla devam etmektedir. Yedikule istasyonu civarında TBM ile açılacak olan paralel-ikiz ve prefabrik betonarme segmentli tünel inşaat yapıları başlamaktadır. TBM segmentli tüneller, Yedikule bölgesinde başlayıp Yenikapı aç-kapa yapısına kadar devam etmektedir. Yenikapı aç-kapa yapısı yaklaşık 700 m uzunluğundadır. Aksaray-Havaalanı ve Yenikapı-Taksim metro hatları için transfer yapılarını da kapsayan Yenikapı yeraltı istasyon yapısı bu bölümde yer almaktadır.

Yenikapı aç-kapa yapısından itibaren Sarayburnu bölgesine kadar tarihi yarım adayı baştan sona birleştirerek olan inşaat yapısı yine segmentli ikiz tünel yapısı olacaktır. Sirkeci bölgesinde delme tünel tekniği ile inşa edilecek olan yeraltı istasyonu bulunacaktır. Sirkeci yeraltı istasyonuna ulaşabilmek için Cağaloğlu civarında ve

Sirkeci gar sahası içerisinde yaya girişi yapıları bulunacaktır. Bu iki giriş yapısı arasında istasyona dikey ulaşım yapıları yer almaktadır [38].

Daha sonra güzergâh Sarayburnu civarında “Batırma Tüp” tekniği ile boğaz dibinde yerleştirilecek olan önceden imal edilmiş yapı elemanlarının Kızkulesi yakınından geçerek Anadolu yakasına kadar yerleştirilmesiyle devam edecek ve bu alanda yine segmentli ikiz tüneller Üsküdar meydanında yerleşecek olan aç-kapa diyafram duvar korumalı Üsküdar yeraltı istasyonu ile buluşacaktır. Üsküdar İstasyonu yapısından itibaren inşaat sistemi makas tünel bölgesiyle devam etmektedir. Daha sonra yine segmentli ikiz tünellerle güzergâh Bülbülderesi, Zeynep Kamil ve Karacaahmet güzergâhını izleyerek Ayrılıkçeşme’de yeryüzüne çıkmaktadır. Güzergâh yarma-dolgu ve hemzemin yapılarıyla devam edecek ve Söğütluçeşme öncesi mevcut Haydarpaşa-Gebze TCDD hatlarıyla birleşecektir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 Marmaray Projesi BC1 Sözleşmesi güzergâhı [38]

Bütün delme tünel bölgelerinde yaklaşık her 200 m de bir, batırma tüpte ise 150 m de bir, hatlar arasında acil durumlar ve servis için yaya geçiş pasajları yer alacaktır.

## 6.2 BC1 Güzergâhındaki İstasyon Yapıları

Modern istasyon binaları, her 90 saniyede bir 10 vagonlu trenlerin geleceği zirve saatlerdeki trafik yoğunluğunu karşılayacak ve İstanbul'un tarihi yapısına uyum sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. İstasyon binalarında yapılacak olan elektromekanik işler; yüksek gerilim kabloları, trafo merkezleri, acil durum jeneratörleri, aydınlatma sistemleri, güvenlik sistemleri, su temin ve tahliye sistemleri, sıhhi tesisat sistemi, tünel havalandırma ve yangın kontrol sistemleri, yürüyen merdivenler, asansörler ve yürüyen bantlardır. Proje kapsamında inşa edilecek olan istasyon yapıları Kazlıçeşme hemzemin istasyonu, Yenikapı Tüp ve Yenikapı TCDD istasyonları, Sirkeci ve Üsküdar istasyonlarıdır. Yenikapı istasyonları kazıklı tahkimat (sağlamlaştırma) ile hazırlanan kazı alanında, Üsküdar istasyonu diyafram su geçirimsiz tahkimatla açılacak kazı alanında inşa edilecektir. Sirkeci istasyonu ise derin tünel inşaat yöntemiyle inşa edilecek olup, istasyona ulaşım yapıları aç-kapa ve derin tünel yöntemleriyle yapılacaktır. BC1 Sözleşmesi güzergahında bulunan istasyonların uzunlukları ve inşa teknikleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Kazlıçeşme istasyonu bir hemzemin istasyon olduğu için havalandırma ölçütleri açısından incelenmeyecektir.

Çizelge 6.1 BC1 Sözleşmesi güzergahındaki istasyon yapıları [38]

İSTASYONLAR	UZUNLUK (m)	ÖZELLİKLER
Kazlıçeşme	230	Hemzemin İstasyon
Yenikapı (TCDD)	360	Yeraltı İstasyonu/Aç-kapa kazı yöntemi
Yenikapı (Tüp)	260	Yeraltı İstasyonu/Aç-kapa kazı yöntemi
Sirkeci	250	Yeraltı İstasyonu/Tünel açma yöntemi
Üsküdar	320	Yeraltı İstasyonu/Aç-kapa kazı yöntemi

### 6.3 Marmaray Projesi BC1 Güzergâhı için Çevresel Kontrol Sistemi

BC1 güzergâhı için çevresel kontrol sistemi Yenikapı tüp, Yenikapı TCDD, Sirkeci ve Üsküdar istasyonları ve bu istasyonların bağlantı tünelleri ile sistemin doğu ve batı girişlerindeki havalandırma yapılarını kapsamaktadır. Tünel havalandırma sistemi tasarımı için ölçütler, işveren şartnameleri ve acil durumlar için NFPA 130(2003) standartları temel alınarak Marmaray projesi BC1 sözleşmesinin yüklenici firması TGN'in (Taisei-Gama-Nurol) alt yüklenicisi Earth Tech California firması tarafından oluşturulmuştur.

Tren hareketlerinin, normal ve sıkışık işletim için ısı yüklerinin, fan işletiminin ve boyutlarının analizinin yapıldığı BC1 güzergâhı havalandırma sistemi tasarımı, Earth Tech firması tarafından normal, sıkışık ve acil durum işletim koşulları için SES (Subway Environmental Simulation) ve CFD (Computational Fluid Dynamics) bilgisayar programları kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar TGN firması tarafından İşverene bir rapor olarak sunulmuştur [39].

SES programı, normal ve sıkışık işletim koşulları için konfor şartlarını ve tünellerdeki yangınları analiz etmek ve istasyon yangın analizlerini yapan CFD programının sınır koşullarını belirlemek için kullanılmıştır. İstasyonlardaki geniş açık alanlar ve karmaşık hava akımları sebebiyle istasyondaki ısı ve duman dağılımının belirlenebilmesi için 3-boyutlu CFD analizlerinin yapılmasına ihtiyaç vardır.

SES ve CFD ile yapılacak analizlerin amacı, havalandırma sisteminin inşasına başlanmadan önce gerekli shaft ve damper boyutları, havalandırma fanlarının kapasiteleri ve çalışma şartları gibi çevresel kontrol faktörlerini bütün işletim koşulları için belirlemektir. Bu sayede maliyet ve zaman açısından tasarruf sağlanmaktadır. Yapılan analizler sonrasında olumsuz koşullar ile karşılaşılırsa alınacak tedbirler ile inşaat aşamasında geçmeden önce güvenli bir havalandırma sistemi oluşturulabilir. Bu tedbirlere örnek olarak;

- Daha güçlü fan seçimi,
- Daha fazla sayıda fan kullanımı,
- Mimari projede değişiklik,
- Fanların farklı kombinasyonlarda çalıştırılması verilebilir.

### 6.3.1 Marmaray projesi havalandırma sistemi

BC1 güzergâhında hem yolcu hem de yük trenleri çalışacağı için sistemde çalışacak trenler elektrik gücünü havai kataner sisteminden sağlayacaklardır. BC1 güzergâhında bulunan tüneller için havalandırma sistemi her istasyonun her iki ucunda yer alan tünel havalandırma fanları ve sistemin yer altına giriş bölgelerindeki (Batı girişi Avrupa yakasındaki Yedikule, doğu girişi Anadolu yakasındaki Ayrılıkçeşme bölgesi) özel havalandırma yapıları ile sağlanacaktır. Yedikule ve Ayrılıkçeşme girişlerindeki havalandırma yapılarında ve Yenikapı istasyonunun batı ucunda yer alan fanlar hava tedariki sırasında hava akımının istenen yere yönlendirilebilmesine olanak veren Saccardo lülelerini ihtiva edeceklerdir. Batı girişinde, Yenikapı tüp ile Sirkeci istasyonları arasında kalan makas tüneline ve Üsküdar istasyonu ile doğu girişi arasında yer alan makas tüneline jet fanları bulunacaktır.

Güzergâhtaki her istasyon, normal ve acil durum işletim koşullarında kullanılacak hat üstü ve platform altı egzost sistemine ve hat üstü egzost sistemi fan odalarına sahip olacaktır. Her fan odasında ise bir tanesi boşa kalmak üzere üç adet fan bulunacaktır.

Fanlar her hat için, hat üstü egzost sistemine direkt hava akımını, platform altı egzost sistemine ise tercihli hava akımını sağlayabilecektir. Bu sayede yangın durumunda hava akımının tamamı hat üstü egzost sistemi tarafından kullanılabilir.

Çizelge 6.2, her istasyon, havalandırma yapısı ve jet fan konumuna göre tünel havalandırma fanı gerekliliklerini göstermektedir.



Çizelge 6. 2 Güzergahtaki havalandırma yapıları için fan gereklilikleri [39]

Konum	Tünel havalandırma fan kapasitesi (adet × m <sup>3</sup> /sn)	Saccardo lülesi Var/Yok	20 °C için Toplam fan basıncı (Pa)	20 °C için Sistem basıncı (Pa)	Hat üstü ve platfrom altı egzost fan kapasitesi (m <sup>3</sup> /sn)
YVP	4 × 120	Var	2200	360	-
YNW	4 × 160	Var	2300	360	-
Yenikapı TCDD ist.	-	-	-	-	240
Yenikapı tüp ist.	-	-	-	-	180
YTE	4 × 120	Yok	1400	180	-
SKW	3 × 160	Yok	2400	750	-
Sirkeci ist.	-	-	-	-	180
SKE	3 × 160	Yok	2400	720	-
UKW	4 × 160	Yok	1800	540	-
Üsküdar ist.	-	-	-	-	240
UKE	4 × 120	Yok	1800	640	-
AVP	4 × 120	Var	2100	280	-
YPW EB (jet fan)	2 × 1020	-	-	-	-
X14 (jet fan)	2 × 1020	-	-	-	-
X15 (jet fan)	7 × 1020	-	-	-	-

Çizelge 6.2’de kullanılan kısaltmaların açıklamaları aşağıdadır.

YVP: Yedikule havalandırma binası tünel havalandırma fanı tesisatı

YNW: Yenikapı TCDD istasyonu tünel havalandırma fanı tesisatı

YTE: Yenikapı tüp istasyonu tünel havalandırma fanı tesisatı

SKW: Sirkeci istasyonu batı tarafı tünel havalandırma fanı tesisatı

SKE: Sirkeci istasyonu doğu tarafı tünel havalandırma fanı tesisatı

UKW: Üsküdar istasyonu batı tarafı tünel havalandırma fanı tesisatı

UKE: Üsküdar istasyonu doğu tarafı tünel havalandırma fanı tesisatı

AVP: Ayrılıkçeşme havalandırma binası tünel havalandırma fanı tesisatı

YPW EB: Yedikule havalandırma binası yanı batı girişi (doğu yönüne doğru)

X14: 14 nolu makas tüneli bölgesi- Sirkeci istasyonu yanı

X15: 15 nolu makas tüneli bölgesi- Üsküdar istasyonu yanı

### **6.3.2 Tasarım ölçütleri**

BC1 havalandırma sistemi tasarımında kullanılacak olan acil durum, normal ve sıkışık işletim koşulları analizleri ile basınç değişimleri ve CFD analizleri için işveren şartnamelerine göre aşağıdaki tasarım ölçütleri kullanılacaktır [40].

#### **6.3.2.1 Acil durum işletim koşulları analizi için ölçütler**

- Yolcu trenleri için yangın ısı gücü 20 MW alınmıştır.
- Yük trenleri için yangın ısı gücü 100 MW alınmıştır.
- Platform veya eşya yangını için yangın ısı gücü 1 MW alınmıştır.
- En düşük hava hızı, tünel yangınının çıktığı noktada dumanı istenen yöne göndermek için hesaplanmış kritik hız değerinde olmalıdır.
- Bir acil durumda tünellerdeki veya istasyonlardaki en yüksek hava hızı 11 m/sn olmalıdır.
- Kritik hızın sağlanamayacağı makas bölgeleri gibi kısa ve geniş kesit alanlı tünellerde en düşük hava hızı 0,82 m/sn olmalıdır.
- Yangının meydana gelmediği tünellerde en düşük hava hızı 0,82 m/sn olmalıdır.
- Acil durum fanları 250 °C sıcaklığa bir saatten fazla maruz kalmamalıdır.
- Tahliye yolundaki hava sıcaklığı 50 °C sıcaklığı geçmemelidir.

### 6.3.2.2 Normal işletim koşulları analizi için ölçütler

- Platformdaki ortalama hava hızı 3 m/sn'yi geçmemelidir.
- Platformdaki en yüksek hava hızı 5 m/sn'yi geçmemelidir.
- İstasyon platformunda ve giriş katında maksimum yaz hava sıcaklığı dış ortam hava sıcaklığından en fazla 3 °C yüksek olacaktır.
- Tünelde maksimum yaz hava sıcaklığı dış ortam hava sıcaklığından en fazla 5 °C yüksek olacaktır.
- Merdivenlerde ve yürüyen merdivenlerde ortalama hava hızı 1.8 m/sn'yi geçmeyecektir.
- Merdivenlerde ve yürüyen merdivenlerde en yüksek hava hızı 2.5 m/sn'yi geçmeyecektir.
- İstasyon girişlerinde en yüksek hava hızı 6 m/sn'yi geçmeyecektir.
- By-pass havalandırma şaftlarında (eğer uygulanabilirse) ortalama hava hızı 6 m/sn'yi geçmeyecektir.
- By-pass havalandırma şaftlarında (eğer uygulanabilirse) en yüksek hava hızı 11 m/sn'yi geçmeyecektir.

### 6.3.2.3 Sıkışık işletim koşulları analizi için ölçütler

- Aşırı hava koşullarında tünellerdeki ve istasyonlardaki ekipmanlar için en yüksek kuru termometre sıcaklığı 45 °C olacaktır.

### 6.3.2.4 Basınç değişimleri analizi için ölçütler

- Zamana göre basınç değişimi oranı dikkate alınmaksızın en yüksek hava basıncı değişimi 700 Pa olacaktır.
- Toplam hava basıncı değişimi 700 Pa'dan büyük olduğunda en yüksek hava basıncı değişimi oranı 425 Pa/sn olacaktır

### 6.3.2.5 CFD analizi için ölçütler

- Tahliye yolunda kabul edilebilir bir çevre sağlanmalıdır.
- Sıcaklıklar 50 °C'yi geçmemelidir.
- Görüş mesafesi 80 lx ile aydınlatılan işaret levhaları için en az 30 m olmalıdır.
- Duman tabakası yürüme yüzeyinin en az 2.5 m yukarısında olmalıdır.

### 6.3.3 Tasarım yöntemleri

Bilgisayarlı modelleme ile tasarım yöntemleri, SES programının çalıştırılması sırasında kullanılacak veriler ve kabullerden oluşmaktadır. Bu yöntemlerde, normal işletim için trenlerin tünellerde veya istasyonlarda durduğu noktalar, sıkışık işletim için fan çalışma şartları, acil durum işletimi içinse yangın boyut ve konumları, fan işletim koşulları ve tahliye yolu dikkate alınmıştır.

#### 6.3.3.1 Acil durum işletim analizleri

Bir tünel yangınında, tünel ara geçişlerinden diğer tünele duman geçişi kaçınılması gereken bir durumdur. Tünelde meydana gelen bir yolcu treni yangını için iki adet ara geçişin açık olacağı varsayılmış olup tüneller arasındaki basınç farkının yeterli seviyede kalması sağlanarak yangının meydana geldiği tünelden diğer tünele olan duman akışının en aza indirilmesi mümkündür. Yük treni yangınları sırasında tüneller arasındaki bütün ara geçişler kapalı olarak kabul edilmiştir.

Yük treni yangınları yolcu treni yangınlarına göre daha yüksek yangın ısı yükü potansiyeline sahiptir. Dolayısıyla yük treni yangınlarında havalandırma işlemi daha zordur. Yolcu trenlerinde ise daha fazla yolcu bulunduğu için tahliye zorluğu söz konusudur. Bu sebeple modellemeler sırasında bu iki farklılık göz önünde tutulmalıdır. Genellikle fanların işletimi yük treni yangınları esas alınarak modellenir.

Acil durum işletim koşulları için modelleme sürecinde en kötü durum senaryoları esas alınmıştır. Bu senaryolar belirlenirken,

- Tünel eğimi
- En yakın fandan olan uzaklık
- Fan işletimi ile birlikte kontrol edilemeyecek olan havalandırma şaftları veya açıklıklarının varlığı
- Yanan trenin tüneli tıkaması gibi faktörler göz önünde tutulmuştur.

En kötü durum senaryolarında genellikle tünel yangını senaryoları için yük treni, istasyon ve makas tünelleri yangınları içinse yolcu trenleri modellemeleri yapılır.

Modellemenin en önemli amacı havalandırma sistemiyle oluşturulacak hava akımının kritik hızı aşıp aşamayacağını göstermektir. Eğer hava akımı yeterliyse senaryo uygulanabilir, eğer geçmemişse fan kapasiteleri yeniden düzenlenir ve süreç yenilenir.

SES analizlerinde dikkate alınacak diğer faktörler yanan trenin konumu, yangının trenin neresinde ortaya çıktığı ve havalandırma yönüdür.

### **6.3.3.2 Normal işletim analizleri**

Normal işletim modellemelerinin amacı sistemde beklenen standart hava performanslarını, platformdaki yolcuların konforunu etkileyen yaklaşım tünellerindeki shaft sıcaklıkları ve hızını belirlemektir. Belirlenen bu değerlerin uygunluğuna ölçütlerle karşılaştırılarak karar verilir.

SES ile hat üstü egzost sisteminin modellenmesi de yapılmaktadır. BC1 güzergâhında hat üstü egzost fanları sadece egzost durumunda çalışacaklardır çünkü ısı ve dumanı atmamakla görevli oldukları için çift yönlü olmalarına gerek yoktur. Yaz hava koşullarında devamlı olarak çalıştırılacak kış hava koşullarında ise aktif

olmayacaklardır. Hat ve by-pass damperleri açık pozisyonda, fan damperleri ise kapalı pozisyonda kabul edileceklerdir. Bu sayede modelleme ile (eğer uygunsa) normal işletim sırasında mekanik havalandırma masraflarından kaçınmak için sadece doğal havalandırmanın yeterli olup olamayacağına da karar verilmesi sağlanmaktadır.

### **6.3.3.3 Sıkışık işletim analizleri**

Analizler yeterli hava akımının sağlanmasının en zor olduğu yaz mevsimi koşulları için yapılacaktır. Analizler sonucu ortaya çıkan değerler ölçütlerle karşılaştırılarak tasarımın doğruluğu kontrol edilebilir.

Sıkışık işletimde analiz yapılırken her senaryo için iki trenin iki istasyon arasındaki tünel bölümünde durduğu varsayılmıştır. Başka hiç bir trenin aynı tünel bölümünde işlemediği veya bulunmadığı kabul edilmiştir. Ayrıca hiç bir trenin bir tünel havalandırma fanına veya hat kesişimine yaklaşık 15 m'den fazla yakın olmadığı, sıkışık olmayan hattaki trenlerin normal çalıştığı varsayılmıştır.

### **6.3.3.4 Basınç değişimleri analizleri**

Basınç değişimleri için analizler en kötü durum senaryoları dikkate alınarak kış hava şartları için yapılmıştır. Bu en kötü durumlar trenlerin istasyonlarda durmadığı ve en yüksek tren işletim hızı olarak 100 km/saat hız ile çalıştıkları varsayılarak oluşturulmuştur. Sonuçlar seçilen noktalarda basınç değişimlerini belirlemekte kullanılmıştır. SES analizi ile bulunan basınç değerlerinin istasyonlardaki konfor şartlarını karşılayıp karşılamadıkları kontrol edilebilecektir.

### **6.3.3.5 CFD analizleri**

CFD analizleri, her istasyon için trenlerde çıkabilecek en kötü yangın durumları dikkate alınarak yapılmıştır. BC1 güzergahı için en kötü yangın durumu aracın orta kısmında ve istasyon yolcu merdivenlerine yakın bir yerde çıkan yangınlardır.

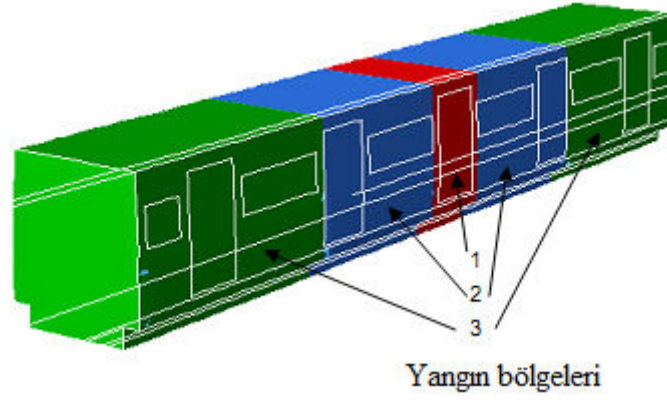
İlk analizler tam gelişmiş yangın ısı yüküne göre sürekli durum koşulları için yapılmaktadır. Sürekli durum koşulları için yapılan analizlerin sonucu incelenerek uygun ve güvenli bir tahliye yolunun sağlanıp sağlanmadığı belirlenir, eğer sağlanmış ise daha fazla analizin yapılmasına gerek olmayacaktır. Analiz sonuçlarına göre uygun ve güvenli tahliye şartları sağlanamamış ise alternatif havalandırma yöntemleri veya süreksiz durum koşulları için analizler yapılmalıdır.

### **6.3.3.6 Sistemde işletilecek trenlerin geometrik modelleri**

Sistemde işletilecek trenler her biri 22.5 m uzunluğunda ve her iki yanında 5 adet kapı bulunan 10 adet vagonun oluştuğu araçlardır. Her vagonun kapılar ile birbirinden ayrılan pek çok pencere bulunmaktadır. CFD analizi sırasında vagonların platform tarafındaki kapıların hepsinin açık olduğu kabulü yapılmıştır. Her vagon üç ayrı yangın bölgesine ayrılmıştır (Şekil 6.2).

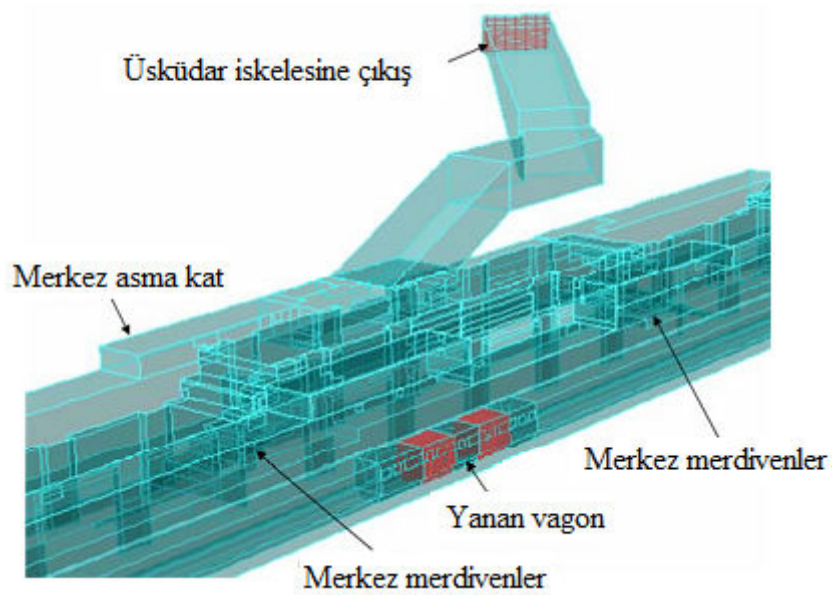
### **6.3.3.7 İstasyonların geometrik modelleri**

BC1 güzergahındaki istasyonların acil durum havalandırma sisteminin bilgisayar destekli tasarımı CFD programı ile yapılmıştır. İstasyonların CFD analizleri üç boyutlu geometrik modelleme esasına dayanır. Bu üç boyutlu modellemelerde platform, giriş kat, yüzeye çıkış noktaları, istasyonlardaki tünel havalandırma fanı bağlantıları ve istasyonların tünel ile olan bağlantılarının kısa bir bölümü mevcuttur.



Şekil 6.2 CFD analizi sırasında kullanılacak vagon tipi ve yangın bölgeleri için model

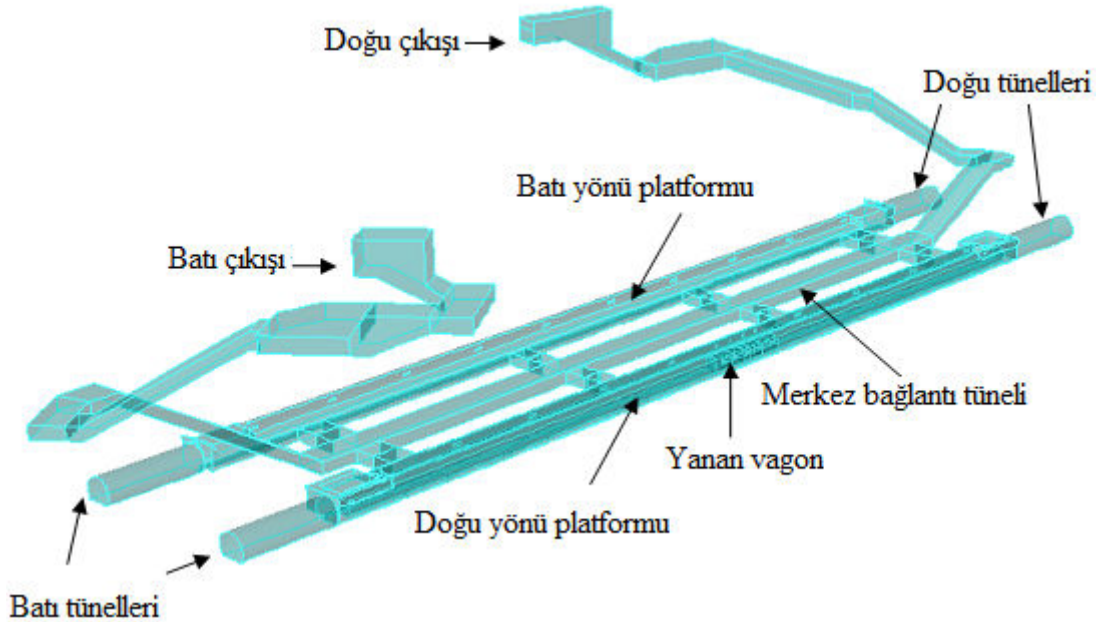
Üsküdar istasyonu aç-kapa yöntemiyle inşa edilen merkez platformun her iki yanında bulunan ve doğu-batı yönlerine doğru uzanan TBM delme tünellerinden oluşur. Üsküdar istasyonu için CFD analizinde trenin orta vagonunda çıkan bir yangın ele alınmıştır. Tren doğu yönünde işletimin yapıldığı hatta bulunmakta olup asma kata çıkan iki merdivenin ortasında konumlandırılmıştır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3 Üsküdar istasyonu CFD analizi için model [39]



Sirkeci istasyonu doğu ve batı yönü hatları için iki ayrı platforma sahiptir. Bu platformlara ulaşım, iki platform tüneli arasındaki merkez bağlantı tüneline dört ayrı yerde bulunan geçiş tünelleri ile sağlanır. Sirkeci istasyonu için CFD analizinde trenin orta vagonunda çıkan bir yangın ele alınmıştır. Tren doğu yönünde işletimin yapıldığı hatta bulunmakta olup merkez tüneline bağlantı sağlayan iki geçiş tüneli arasına konumlandırılmıştır (Şekil 6.4).

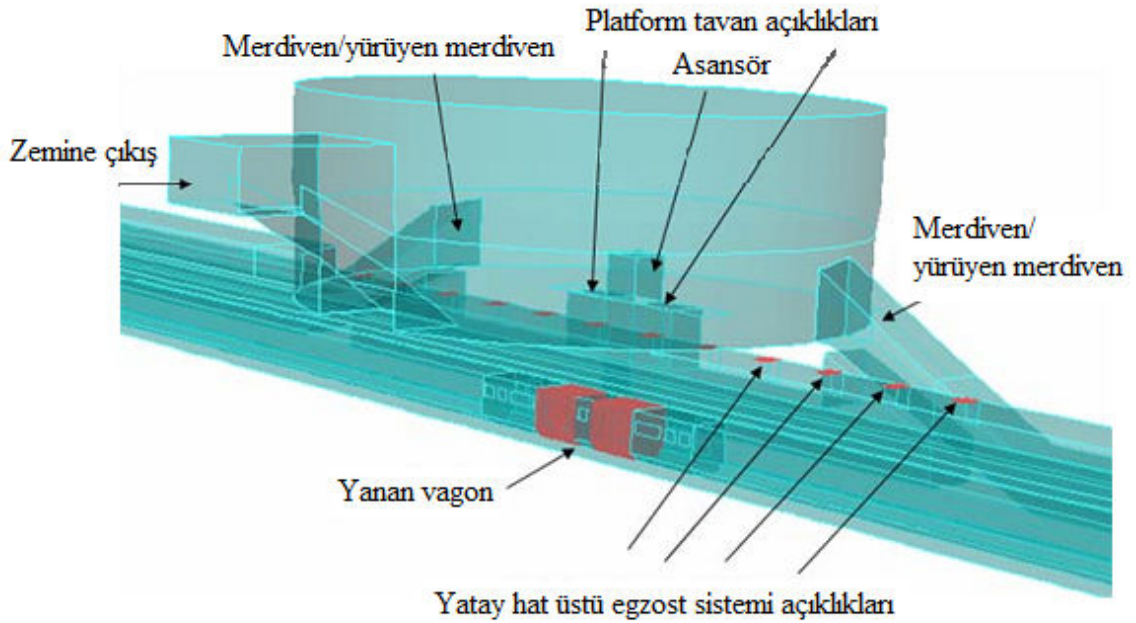


Şekil 6.4 Sirkeci istasyonu CFD analizi için model [39]

Yenikapı TCDD istasyonu, şehirlerarası trenlere transfer istasyonu olarak aç-kapa yöntemiyle inşa edilecek ve Marmaray projesinin bir istasyonu olan Yenikapı tüp istasyonu ile bağlantılı olacak bir istasyondur. İstasyon platformu sadece bir hata hizmet verecektir. Söz konusu bu tek hat diğer iki TCDD hattından beton ayırma duvarları ile ayrılmıştır. Fakat istasyon binasından bu TCDD hatlarına ulaşılabilir. Platform seviyesinden asma kata iki adet merdiven-yürüyen merdiven seti ile

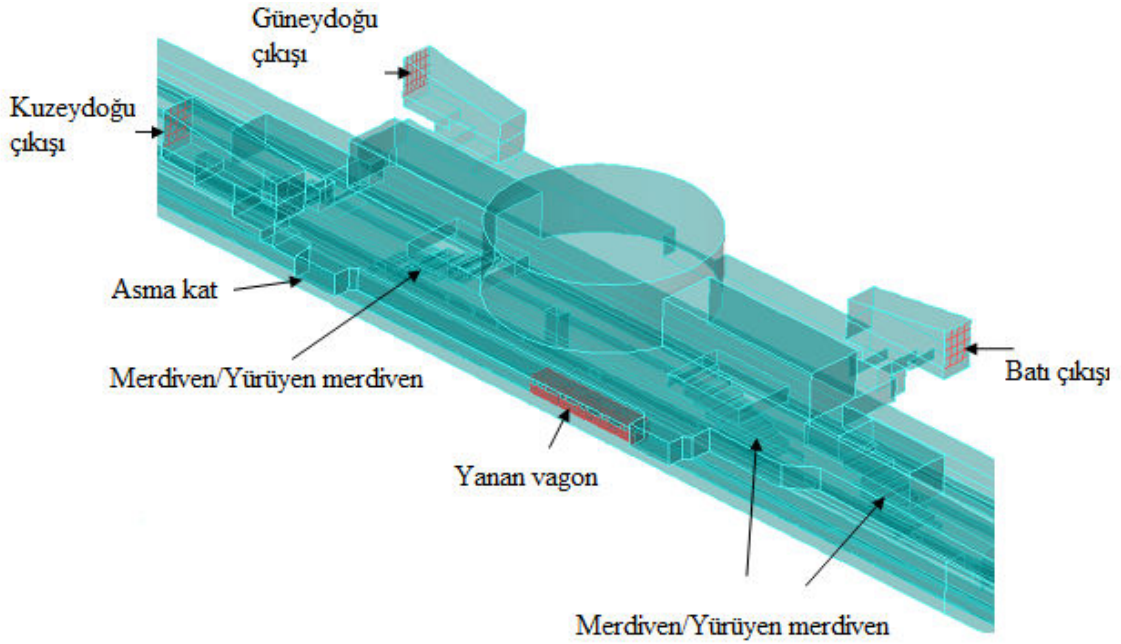
ulaşılacaktır. Platform tavanında bu merdivenlerin arasında bulunan noktalarda iki adet acil durum havalandırma açıklığı bulunacaktır. Asma kattan yürüyen bantlarla Yenikapı tüp istasyonuna bağlantı olacaktır.

Yenikapı TCDD istasyonu için CFD analizinde trenin orta vagonunda çıkan bir yangın ele alınmıştır. Tren tek hatta bulunmakta olup iki adet merdiven-yürüyen merdiven setinin arasına konumlandırılmıştır (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 Yenikapı TCDD istasyonu CFD analizi için model [39]

Yenikapı tüp istasyonu aç-kapa yöntemiyle inşa edilecek merkez platformun her iki yanında bulunun doğu ve batı yönlerine doğru uzanan TBM delme tünellerinden oluşur. Yenikapı tüp istasyonu için CFD analizinde trenin orta vagonunda çıkan bir yangın ele alınmıştır. Tren batı yönünde işletimin yapıldığı hatta bulunmakta olup asma kata çıkan iki merdivenin ortasında konumlandırılmıştır (Şekil 6.6).



Şekil 6.6 Yenikapı tün istasyonu CFD analizi için model [39]

### 6.3.3.8 CFD modelleme için sınır koşulları

Sınır koşulları her istasyondaki yangın senaryoları için oluşturulan havalandırma stratejilerine göre belirlenmiştir. Hat üstü egzost sistemi ve tünel havalandırma fanı sebebiyle oluşan hava akımları fan tesisatının kapasitesine göre tayin edilmiştir. Tünel bağlantı noktalarındaki hava akımları ise SES modellemeleri sonuçları esas alınarak CFD modellemeleri için sınır koşul olarak seçilmiştir.

Dış ortam koşulları yaz hava şartlarına temel alınarak oluşturulmuştur. Örnek olarak 31 °C kuru termometre sıcaklığı, 22.2 °C ıslak termometre sıcaklığı seçilmiştir. Hava özelliklerinin değerleri CFD programından edinilir.

### 6.3.4 SES programı analizi sonuçları

BC1 güzergâhı için acil durum, sıkışık ve normal işletim koşulları ile birlikte basınç değişimleri için yapılan SES programı analiz sonuçları aşağıda gösterilmektedir.

#### 6.3.4.1 Acil durum işletim koşulları için SES analizi sonuçları

Acil durum işletim koşulları için BC1 güzergâhındaki bazı noktalarda (başlangıç noktası Yedikule'deki batı girişi) değişik koşullar için bir dizi yangın senaryosu oluşturulmuştur. Aşağıda bu senaryolardan bazıları irdelenmektedir. Senaryoların SES programı sonuçları akış diyagramları olarak eklerde verilmiştir.

Birinci senaryo, güzergâhın batı girişi ile Yenikapı istasyonu arasında km 1+191'de ve %1.743 eğimli bir noktada batı yönüne gitmekte olan bir yük treninde çıktığı varsayılan bir yangın içindir. Yangın trenin ön kısmına yakın bir nokta için modellenmiştir. Havalandırma yönü Yenikapı'ya doğru olacak şekilde tasarlanmış bu sebeple de Yedikule havalandırma binasındaki fanlar Saccardo lülesine doğru tedarik modunda, Yenikapı havalandırma binasındaki fanlar ise egzost modunda çalışmaktadırlar. Yangına yakın olan Yedikule ve Yenikapı TCDD batı fan binalarındaki fanlardan biri arızalı olarak kabul edilmiştir. Hat üstü ve platform altı egzost sistemi fanları hem Yenikapı TCDD hem de Yenikapı tüp istasyonlarında düzgün bir şekilde çalışmaktadır. Damperler hava akımını yangının meydana geldiği hatta doğru gönderecek şekilde konumlandırılmıştır. Bu noktada tahliye yolu Yedikule havalandırma binasına ve batı girişine olacak şekilde düşünülmüştür. SES analizi sonuçlarına göre:

- Kritik hız: 3.5 m/sn
- Yedikule havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek havalandırma ile ulaşılabilecek hava hızı: 3.87 m/sn (Ek 2)
- Yenikapı TCDD havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek havalandırma ile ulaşılabilecek hava hızı: 3.97 m/sn (Ek 3)

Bu senaryo, yangının bir yolcu treninde çıktığı ve fan işletiminin buna göre en uygun hale getirildiği şekilde yeniden modellenmiştir. Sadece Yedikule ve Yenikapı TCDD istasyonlarındaki fanlar ile kritik hıza ulaşmak mümkün olmaktadır.

Yolcu treni için analiz sonuçlarına göre:

- Kritik hız: 2.7 m/sn
- Yedikule havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek havalandırma ile ulaşılabilecek hava hızı: 8.54 m/sn (Ek 4)

İkinci senaryo güzergâhın doğu girişi ile Üsküdar istasyonu arasında km 11+900'de ve %0.827 eğimli bir noktada batı yönüne gitmekte olan bir yük treninde çıktığı varsayılan bir yangın içindir. Yangın trenin ön kısmına yakın bir nokta için modellenmiştir. Havalandırma yönü doğu girişine doğru olacak şekilde tasarlanmış bu sebeple de Üsküdar batı ve doğu ile Sirkeci batı ve doğu havalandırma binalarındaki fanlar tedarik modunda, Ayrılıkçeşme havalandırma binasındaki fanlar ise egzost modunda çalışmaktadırlar. Yangına yakın olan Üsküdar doğu ve Ayrılıkçeşme fan binalarındaki fanlardan biri arızalı olarak kabul edilmiştir. Hat üstü ve platform altı egzost sistemi fanları çalışmamaktadır. 15 nolu makas tünelde bulunan jet fanlar ise çalışır vaziyettedir. Damperler hava akımını yangının meydana geldiği hatta doğru gönderecek şekilde konumlandırılmıştır. Bu noktada tahliye yolu Üsküdar istasyonuna olacak şekilde düşünülmüştür. SES analizi sonuçlarına göre:

- Kritik hız: 3.2 m/sn
- Üsküdar doğu havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek havalandırma ile ulaşılabilecek hava hızı: 3.64 m/sn (Ek 5)
- Ayrılıkçeşme havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek havalandırma ile ulaşılabilecek hava hızı: 3.78 m/sn (Ek 6)

Bu senaryo, yangının bir yolcu treninde çıktığı ve fan işletiminin buna göre en uygun hale getirildiği şekilde yeniden modellenmiştir. Sadece Üsküdar ve Ayrılıkçeşme havalandırma binalarındaki fanlar ile kritik hıza ulaşmak mümkün olmaktadır.

Yolcu treni için analiz sonuçlarına göre:

- Kritik hız: 2.5 m/sn
- Üsküdar doğu havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek havalandırma ile ulaşılabilecek hava hızı: 2.99 m/sn (Ek 7)

Üçüncü senaryo güzergâhın Sirkeci ve Üsküdar istasyonları arasında batırma tüp tünel kısmında km 7+423'de ve %1.74 eğimli bir noktada batı yönüne gitmekte olan bir yük treninde çıktığı varsayılan bir yangın içindir. Yangın trenin ön kısmına yakın bir nokta için modellenmiştir. Havalandırma yönü Üsküdar'a doğru olacak şekilde tasarlanmış bu sebeple de Sirkeci batı ve doğu havalandırma binalarındaki fanlar tedarik modunda, Ayrılıkçeşme ile Üsküdar batı havalandırma binalarındaki fanlar ise egzost modunda çalışmaktadırlar. Yangına yakın olan Üsküdar batı ve Sirkeci doğu fan binalarındaki fanlardan biri arızalı olarak kabul edilmiştir. Üsküdar istasyonundaki hat üstü ve platform altı egzost sistemi fanları çalışmaktadır. Havalandırma doğruya doğru olduğu için bu noktada tahliye yolu Sirkeci istasyonuna olacak şekilde düşünülmüştür. SES analizi sonuçlarına göre:

- Kritik hız: 3.4 m/sn
- Sirkeci doğu havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek havalandırma ile ulaşılabilecek hava hızı: 3.59 m/sn (Ek 8)
- Üsküdar batı havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek havalandırma ile ulaşılabilecek hava hızı: 3.75 m/sn (Ek 9)

Bu senaryo, yangının bir yolcu treninde çıktığı ve fan işletiminin buna göre en uygun hale getirildiği şekilde yeniden modellenmiştir. Sadece Üsküdar batı ve Sirkeci

doğu havalandırma binalarındaki fanlar ile kritik hıza ulaşmak mümkün olmaktadır. Üsküdar istasyonundaki hat üstü ve platform altı egzost sistemi fanları çalışmaktadır.

Yolcu treni için analiz sonuçlarına göre:

- Kritik hız: 2.7 m/sn
- Sirkeci doğu havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek havalandırma ile ulaşılabacak hava hızı: 4.67 m/sn (Ek 10)

#### 6.3.4.2 Sıkışık işletim koşulları için SES analizi sonuçları

Sıkışık işletim koşulları için de değişik şartlara göre bir dizi senaryo oluşturulmuştur. Senaryolar, en kötü durum şartlarını sağlamak üzere yaz hava koşulları için düzenlenmiştir. Aşağıda bu senaryolardan bazıları irdelenmektedir. Senaryoların SES programı sonuçları diyagramlar olarak eklerde verilmiştir.

İlk senaryoya göre, sıkışık duruma sebebiyet veren tren batı girişinden sisteme girmiş doğu yönünde devam ederken Yenikapı tüp istasyonunda arızalanmıştır. Söz konusu trenin arkasında aynı hat üzerinde 15 m aralıklarla iki tren daha beklemek zorunda kalmıştır. Fanlar çalışmazken yapılan analiz ile hava sıcaklığının kabul edilebilir sınır değer olan 45 °C'yi geçtiği görülmüştür. Bu sebeple aynı senaryo için Yenikapı TCDD, Yenikapı tüp ve Sirkeci batı havalandırma yapılarındaki fanların çalışır vaziyette olduğu yeni bir modelleme yapılmıştır. Yenikapı TCDD ve Sirkeci batı havalandırma yapılarındaki fanlar egzost modunda ve 144 m<sup>3</sup>/sn debide çalışacaklardır. Yenikapı tüp istasyonundaki fanlar ise tedarik modunda ve 216 m<sup>3</sup>/sn debide çalışacaktır. Hat üstü egzost fanları, Yenikapı tüp istasyonu hariç her istasyonda 180 m<sup>3</sup>/sn debiye sahiptir. Damperler, hava akımını olayın olduğu hatta doğru yönlendirecek şekilde ayarlanmışlardır. Bu modellemenin SES analizi sonucunda sıcaklıkların kabul edilebilir değer olan 45 °C'nin altında kaldığı görülmüştür (Ek 11).

İkinci senaryoya göre, sıkışık duruma sebebiyet veren tren güzergâhta batı yönünde devam ederken Sirkeci istasyonunda arızalanmıştır. Söz konusu trenin

arkasında aynı hat üzerinde 15 m aralıklarla iki tren daha beklemek zorunda kalmıştır. Fanlar çalışmazken yapılan analiz ile hava sıcaklığının kabul edilebilir sınır değer olan 45 °C'yi geçtiği görülmüştür. Bu sebeple aynı senaryo için Sirkeci batı ve doğu ile Üsküdar batı havalandırma yapılarındaki fanların çalışır vaziyette olduğu yeni bir modelleme yapılmıştır. Üsküdar batı ve Sirkeci batı havalandırma yapılarındaki fanlar egzost modunda ve sırasıyla 144 m<sup>3</sup>/sn ve 288 m<sup>3</sup>/sn debi değerlerinde çalışacaklardır. Sirkeci doğu havalandırma yapısındaki fanlar ise tedarik modunda ve 288 m<sup>3</sup>/sn debide çalışacaktır. Hat üstü egzost fanları, Sirkeci istasyonunda 90 m<sup>3</sup>/sn, diğer noktalarda 180 m<sup>3</sup>/sn debiye sahiptir. Damperler, hava akımını olayın olduğu hatta doğru yönlendirecek şekilde ayarlanmışlardır. Bu modellemenin SES analizi sonucunda sıcaklıkların kabul edilebilir değer olan 45 °C'nin altında kaldığı görülmüştür (Ek 12).

Üçüncü senaryoya göre, sıkışık duruma sebebiyet veren tren güzergahta batı yönünde devam ederken Üsküdar istasyonunda arızalanmıştır. Söz konusu trenin arkasında aynı hat üzerinde 15 m aralıklarla iki tren daha beklemek zorunda kalmıştır. Fanlar çalışmazken yapılan analiz ile hava sıcaklığının kabul edilebilir sınır değer olan 45 °C'yi geçtiği görülmüştür. Bu sebeple aynı senaryo için Sirkeci batı, Üsküdar doğu ve Ayrılıkçeşme havalandırma yapılarındaki fanların çalışır vaziyette olduğu yeni bir modelleme yapılmıştır. Ayrılıkçeşme ve Sirkeci batı havalandırma yapılarındaki fanlar egzost modunda ve sırasıyla 216 m<sup>3</sup>/sn ve 144 m<sup>3</sup>/sn debi değerlerinde çalışacaklardır. Üsküdar doğu havalandırma yapısındaki fanlar ise tedarik modunda ve 324 m<sup>3</sup>/sn debide çalışacaktır. Hat üstü egzost fanları, tüm istasyonlarda 180 m<sup>3</sup>/sn debiye sahiptir. Damperler, hava akımını olayın olduğu hatta doğru yönlendirecek şekilde ayarlanmışlardır. Bu modellemenin SES analizi sonucunda sıcaklıkların kabul edilebilir değer olan 45 °C'nin altında kaldığı görülmüştür (Ek 13).

#### **6.3.4.3 Normal işletim koşulları için SES analizi sonuçları**

İlk analiz yaz hava koşulları (31 °C kuru termometre sıcaklığı) ve yolcu sayısının en yoğun saatler için yapılmıştır. Analiz sonucunda, tüneller için hava sıcaklığının üst sınır değer olan 36 °C'yi Sirkeci istasyonu civarında bir kaç saniyelik



bölüm haricinde geçmediği görülmektedir. İstasyonlar için kabul edilebilir en yüksek istasyon hava sıcaklığı olan 34 °C ise hiç bir istasyon noktasında geçilmemiştir (Ek 14).

Diğer senaryoda ise normal yaz sıcaklık değerlerini aşan sıcaklık (38.5 °C) için bir SES analizi yapılmıştır. Burada bir önceki modele göre sıcaklıklar hariç diğer koşullar aynıdır. Kabul edilebilir sıcaklık değerleri ise tüneller için 43.5 °C, istasyonlar için ise 41.5 °C olarak verilmiştir. Güzergahda alınan yola karşılık en yüksek hava sıcaklığı değerleri olarak Ek 15’de verilen sonuçlara göre güzergâhın hiç bir noktasında hava sıcaklığının bu değerleri aşmadığı görülmektedir.

#### **6.3.4.4 Basınç değişimleri için SES analizi sonuçları**

Güzergahdaki çeşitli tünel, istasyon ve shaft yapıları için yapılan basınç değişimleri analizleri kabul edilen 700 Pa değerinin altında bulunmuştur.

En yüksek basınç değişimleri sisteme giriş ve çıkışlarda meydana gelmektedir. Hesaplamalar giriş-çıkış geometrileri, trenlerin aerodinamik karakteristikleri ve hız değerleri temel alınarak yapılmıştır. Sonuçlar Ek 16’de verilmiştir.

#### **6.3.5 CFD programı analizi sonuçları**

İstasyonlarda meydana gelen bir acil durumda tahliye yollarının yolcular için uygun şartları sağlaması gerekmektedir. Bunun sağlanması için de görüş mesafesi, sıcaklık ve havalandırma hızı gibi ölçütler dikkate alınır. BC1 güzergâhında bu ölçütlere göre tasarım sınır değerleri; görüş mesafesi için 30 m (ışıklı levhalar dikkate alınarak), sıcaklık için 50 °C ve havalandırma hızı için de 11 m/sn’dir. Ayrıca 15 dakikalık yangın gelişme süresi dikkate alındığında, tahliye süresi 11 dakika olarak belirlenmiştir.

### **6.3.5.1 Üsküdar istasyonu için CFD programı analizi sonuçları**

Üsküdar istasyonu için kararlı hale gelmiş bir yangının ortaya çıktığı hatta, 240 m<sup>3</sup>/sn debiye sahip hat üstü egzost sistemi fanı kullanılarak, en yüksek yangın gücü koşullarında yangının hemen yakını hariç bütün istasyon alanları için uygun tahliye koşulları sağlanmaktadır. Görüş mesafesi, sıcaklık ve hız değerlerini gösteren CFD sonuçları Ek 17'de verilmiştir.

### **6.3.5.2 Sirkeci istasyonu için CFD programı analizi sonuçları**

Sirkeci istasyonu için kararlı hale gelmiş bir yangının ortaya çıktığı hatta, 180 m<sup>3</sup>/sn debiye sahip hat üstü egzost sistemi fanının kullanıldığı duruma göre CFD analizi yapılmıştır.

Ek 18, Sirkeci istasyonu için görüş mesafesi, sıcaklık ve hız dağılımlarının CFD sonuçlarını göstermektedir. Görüş mesafesi analizleri, doğu yönü platformunda yanan bir vagonun yakını için yapılmıştır ve görüş mesafesinin tahliye yolunda alt sınır değer olan 30 m'nin altına düşmediği görülmektedir. Sıcaklık değerlerinin de tahliye sürecinde, üst sınır değer olan 50 °C'nin altında kaldığı görülmektedir. Ayrıca sonuçlardan tahliye yolunda havalandırma hızlarının 11 m/sn'yi geçmediği de anlaşılmaktadır.

### **6.3.5.3 Yenikapı TCDD istasyonu için CFD programı analizi sonuçları**

Yenikapı TCDD istasyonu için 180 m<sup>3</sup>/sn kapasiteli hat üstü egzost sisteminin duman kontrolü için tam olarak yeterli olmadığı ve platform alanında görüş mesafesinin 30 m'nin altına düştüğü CFD sonuçlarından görülmektedir. 240 m<sup>3</sup>/sn kapasiteli fanlar görüş mesafeleri açısından daha uygun sonuç vermektedir (Ek 19).

Bu iki fan kapasitesine göre de platform ve asma kat seviyeleri için kararlı durum koşullarında tahliye yollarında sıcaklık seviyeleri  $50^{\circ}\text{C}$ 'nin altında bulunmuştur (Ek 19).

Sonuçlar ayrıca asansör bölümünün batı kısmında bulunan platform tavan açıklıklarında yangının gelişimiyle birlikte oluşan hava hızlarını da göstermektedir. İstasyonda havalandırma sonucu oluşan hava hızlarının sınır değer olan  $11\text{ m/sn}$ 'in altında kaldığı görülmektedir (Ek 19).

#### **6.3.5.4 Yenikapı tüp istasyonu için CFD programı analizi sonuçları**

Yenikapı tüp istasyonu için CFD sonuçlarına göre, görüş mesafesi değerleri tahliye yolu boyunca uygun değerleri sağlamıştır. Bu değerler ışıklı levhalar için  $30\text{ m}$ 'dir (Ek 20).

Sıcaklık analizleri sonuçları da tahliye süresi boyunca sınır değer olan  $50^{\circ}\text{C}$ 'nin altında hesaplanmıştır. İstasyonda havalandırma sonucu oluşan hava hızlarının sınır değer olan  $11\text{ m/sn}$ 'in altında kaldığı görülmektedir (Ek 20)

## BÖLÜM 7

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bir metro sisteminde işletilen trenler sebebiyle oluşan piston etkisi, metro sistemini çevreleyen toprak parçasının ısı yutuculuk etkisi ve yer altı sularının etkisi gibi doğal havalandırma ve soğutma kaynakları mümkün olduğunca verimli kullanılmalıdır. Çünkü bu doğal havalandırma ve soğutma şekillerinin maliyeti, mekanik havalandırma maliyetinden oldukça düşüktür. Çeşitli tasarım hesapları ve özellikle bilgisayar programlı modelleme ile normal işletim sırasında mekanik havalandırma masraflarından kaçınmak için sistemde sadece doğal havalandırmanın yeterli olup olamayacağına karar verilmesi mümkün olmaktadır.

Bu sebeple havalandırma şaftlarındaki fan damperleri doğal ve mekanik havalandırma arasında tercihli çalışacak şekilde tesis edilmelidir. Fanlar çift yönlü olmalı yani hem tedarik hem de egzost işlemini gerçekleştirebilmelidir. Normal işletimde konfor ölçütlerini sağlamak üzere istasyonlarda hat üstü ve platform altı egzost sistemleri bulunmalıdır.

Sıkışık işletim durumu ortaya çıktığında sistemde istenen konfor şartlarının sağlanması için mekanik havalandırma devreye girmelidir. Çünkü trenlerin durması ile bozulan doğal havalandırma mekanizması, istenmeyen sıcaklık artışlarına sebep olacaktır. Bu da araç klimasını olumsuz yönde etkileyecektir.

Havalandırma sistemi tasarımı, sistemin herhangi bir tünel ve istasyon noktasında her an bir acil durum ile karşılaşılabilmesi ihtimali göz önüne alınarak yapılmalıdır. Sistemde ortaya çıkabilecek her türlü acil durum önceden belirlenmeli ve her zaman en kötü durum için tasarım yapılmalıdır. Eğer tasarım sırasında yapılan analizler sonucunda havalandırma sisteminin gereklilikleri karşılamadığı belirlenirse fanların konumlarının ve kapasitelerinin ayarlanması, tünel ve istasyon geometrilerinde değişiklikler gibi olası yöntemler ile bu gerekliliklerin sağlanması gerekmektedir.

Sistemdeki acil durum fanları kısa sürede kritik hızı aşmalı, tahliye sırasında daha önceden çok iyi analiz edilmiş tahliye planı zaman kaybetmeden uygulamaya geçirilmelidir.

Marmaray projesinde olacağı gibi hem yolcu hem de yük trenlerinin kullanıldığı metro sistemlerinde yolcu ve yük trenlerinde meydana gelecek yangınların ortaya çıkan ısı güçleri birbirinden farklı olacaktır. Genellikle yük trenlerinde çıkan yangınlar için ısı güçleri yolcu trenlerine göre daha yüksektir. Bu sebeple yük treni için acil durum havalandırma gereklilikleri sağlanıyorsa yolcu treni için de sağlanmış sayılır. Fakat yolcu trenleri için de tahliye gereklilikleri açısından risk faktörü daha yüksektir. Bu sebeple yangının sisteme vereceği maddi zarar, insan hayatı, yangınla mücadele ekibinin yangın mahalline ulaşımı gibi faktörler göz önüne alınarak uygun acil durum stratejileri geliştirilmelidir.

Metro sistemleri büyük maliyet, zaman ve iş gücü harcanarak inşa edilmiş ve halkın yoğun olarak kullanılmasının beklendiği yapılardır. Eğer hız ve erişim kolaylığı ile birlikte yolcuların konfor şartları ve güvenliği de sağlanmışsa beklenen potansiyel yolcu sayısına ulaşılabilir ve ekonomik anlamda başarıya ulaşılmış olur. Özellikle İstanbul gibi, özel otomobillerin toplu taşıma araçlarına tercih edildiği kentlerde metronun özel araçlarla rekabet etmesinin yolu, yolculara hızlı, güvenli ve rahat bir ulaşım sağlaması şartına bağlıdır.

Metro sistemi işletmeye açıldıktan sonra yapılacak olan genişletme çalışmaları sırasında da havalandırma sisteminin yeterliliği, güvenilirliği ve ekonomikliğinin kaybedilmemesi yönünde ayarlamalar ihmal edilmemelidir.

Metro sistemlerinde normal, sıkışık ve acil durum işletim koşulları kapsamında tasarım gerekliliklerini belirten ve uluslararası anlamda kabul görmüş bazı standartlar mevcuttur. Bu standartlar metro sistemleri ile bağlantılı pek çok yeni teknolojinin gelişimi sonucunda sık sık güncellenmektedir. Ülkemiz gibi pek çok ülke kendi standartlarını oluşturmak yerine mevcut olan bu standartları temel alarak standartlar hazırlamakta veya direkt olarak bu standartları kullanmaktadırlar. Böyle bir çalışmanın ülkemizde de yapılması yararlı olacaktır.

Tasarım ölçütleri standartlar ile belirlenmiş olan metro sistemlerinin tasarım analizleri, son yıllarda bilgisayar teknolojilerinin gelişmesi ve yaygınlaşması neticesiyle artık tamamen bilgisayar yazılımları ile yapılmaktadır. Bu sebeple çok daha hassas ve gerçekçi sonuçlar veren, zaman ve maliyetten kazanç sağlayan etkin bir metro sistemi çevresel kontrol yazılımı üzerinde çalışılması faydalı olacaktır.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] E.E. Çeçen, “Kent içi tünellerinde uygulanan şemsiye-kemer ve ayna donatılama tekniklerinin gerilme-deformasyon üzerine etkilerinin sayısal analizi”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2007.
- [2] Transportation Research Board, “Research pays off. Ventilation and Environmental Control in Subways”, U.S. Department of Transportation Urban Mass Transportation Administration Research Board TR News, vol.113, pp.16-17, November 1987.
- [3] IM Makine Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi, “Hava nedir? Konfor ve Konfor şartları, Havalandırma ve Temiz Hava ihtiyacı”, Ekim 2009, <http://www.immak.com.tr/webpdf/IAQ.1.pdf>.
- [4] ISISAN, *Klima Tesisatı*, ISISAN Yayınları, 2001.
- [5] “Tünel Dersi 1.Bölüm - Genel Giriş”, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2009.
- [6] M. Bozkurt, *Tüneller Ders Notları*, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul, 1983.
- [7] “Batırılmış Tüneller”, Eylül 2009, <http://www.odevsel.com/index.php?s=bat%C4%B1r%C4%B1lm%C4%B1%C5%9F+t%C3%BCneller>.
- [8] H.T. Öztürk, A. Durmuş, “Tünelere Toplu Bir Bakış ve Savunma Tünellerinin Türkiye için Önemi”, *İstanbul Bülten*, sayı 96, s.11-17, 2008.
- [9] Ö. Aydan, “İstanbul Boğazı Denizaltı Geçişi için Tip Tünel ile Kalkan Tünelin Uygunluğunun Karşılaştırılması”, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, sayı 54, s.1-17, Ocak 2001.
- [10] D. Osmanoğlu, “Tünellerde zemin iyileştirilmesi ve stabilitenin sonlu elemanlar yöntemi ile plaxis programında analiz edilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2007.
- [11] wikipedia, “Paris Métro”, Ekim 2009, [http://en.wikipedia.org/wiki/Paris\\_M%C3%A9tro](http://en.wikipedia.org/wiki/Paris_M%C3%A9tro)
- [12] bilgi, “Metro hakkında ansiklopedik bilgi”, Kasım 2009, <http://ansiklopedi.bilgi.com/metro>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [13] Temel Brittanica, “Metro”, Kasım 2009,  
<http://www.delinetciler.net/forum/bilgi-merkezi/76063-metro-metro-nedir-metro-hakkinda-detayli-bilgi.html>
- [14] UITP – Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği Metro Komitesi Resmi Pozisyon Belgesi, *Metro: Büyük şehirlerde sürdürülebilir gelişme için bir fırsat*, UITP, 2003.
- [15] wikipedia, “London Underground”, Ekim 2009,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/London\\_Underground](http://en.wikipedia.org/wiki/London_Underground)
- [16] Ö. Çeçen, “İstanbul metrosu koska tünelleri yüzey deformasyon analizleri”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2007.
- [17] İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri Genel Müdürlüğü, “Tünel”, Kasım 2009, <http://www.iETT.gov.tr/metin.php?no=46>
- [18] wikipedia, “İstanbul Tüneli (Metro)”, Kasım 2009,  
[http://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCnel\\_\(metro\)](http://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCnel_(metro))
- [19] İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Ulaşım San. ve Tic. A.Ş., “Şişhane-Atatürk oto sanayi hattı (M2)”, Kasım 2009,  
[http://www.istanbul-ulasim.com.tr/default.asp?menu\\_id=3&sayfa\\_id=1](http://www.istanbul-ulasim.com.tr/default.asp?menu_id=3&sayfa_id=1)
- [20] İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Ulaşım San. ve Tic. A.Ş., “AksarayHavalimanı hattı (M1)”, Kasım 2009,  
[http://www.istanbul-ulasim.com.tr/default.asp?menu\\_id=3&sayfa\\_id=2](http://www.istanbul-ulasim.com.tr/default.asp?menu_id=3&sayfa_id=2)
- [21] M. Akkaymak, “Avrupa-Asya ulaşım koridorları ve yeniden canlanan ipek yolu”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [22] DLH İnşaatı Genel Müdürlüğü Marmaray Projesi, “ Projenin tarihçesi”, Kasım 2009, <http://www.marmaray.com.tr/mr/marmaray-anasayfa>
- [23] H. İ. Özmen, “Zorluk derecesi yüksek bir ulaşım projesi: Demiryolu boğaz tüp geçişi”, *7.Ulaştırma Kongresi*, 19-21 Eylül 2007
- [24] DLH İnşaatı Genel Müdürlüğü Marmaray Projesi, “ Projenin hedefleri ”, Kasım 2009, <http://www.marmaray.com.tr/mr/marmaray-anasayfa>



## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [25] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), *Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications Handbook*, 1999.
- [26] T. R. Kuesel, E. H. King, J. O. Bickel, *Tunnel Engineering Handbook*, 2nd ed. Springer, 1995.
- [27] D. Kolymbas, *Tunneling and Tunnel Mechanics: A Rational Approach to Tunneling*, Springer, 2005.
- [28] “Tünel Dersi 11.Bölüm – Tünel Kazılarında Havalandırma”, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2009.
- [29] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), *Fundamentals Handbook*, 1999.
- [30] N. Eskin, “Bir metro istasyon modülünün havalandırma sistemi tasarımı”, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası Tesisat Mühendisliği Dergisi*, sayı 8, s.52-58, 1993.
- [31] M. Tabarra, D. A. Zadeh and S. Sadokierski, “Design of a modern subway ventilation system”, *Tunnels & Tunnelling International*, vol.29, pp. 48-50, November 2004.
- [32] E. Özbakır, “Yer altı raylı sistem istasyonlarında ısıtma, havalandırma klima tesisatı”, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası Tesisat Mühendisliği Dergisi*, sayı 97, s.23-29, 2007.
- [33] M. Abbaspour, M. J. Jafari, N. Mansouri, F. Moattar, N.Nouri and M. Allahyari, “Thermal comfort evaluation in Tehran metro using Relative Warmth Index”, *International Journal of Environment Science and Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 297-304, 2008.
- [34] O. C. Eralp, E. Musluoğlu, “Yeraltı toplu taşıma sistemlerinde acil durum havalandırması”, *6.Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, 2003*, s. 1-8.
- [35] *Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems*, NFPA 130 Standard, 2000.
- [36] A. Açıkgöz, M. Ö. Gelişli, E. Öztürk. (Nisan 2006). Metro tünellerinde yangın senaryosu analizleri. ANOVA Mühendislik, İstanbul. <http://www.anova.com.tr/upload/files/1236356598r9024.METRO.pdf>

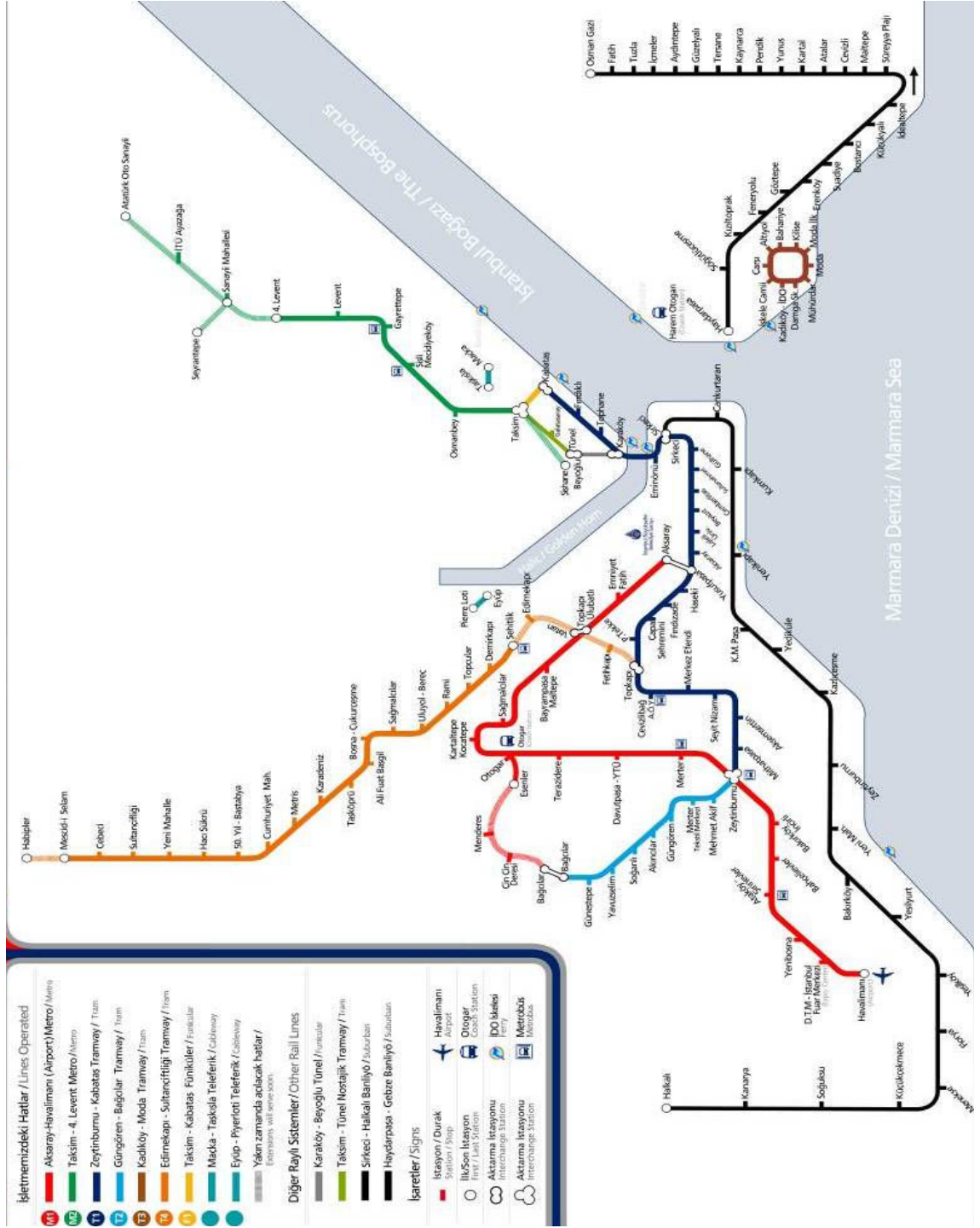
## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [37] *Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems*, NFPA 130 Standard, 2007.
- [38] A. Ünlütepe, “ Marmaray BC1 Projesi ve ölçme çalışmaları”, *Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu*, 2005, s. 201-212.
- [39] D. McKinney, “Detailed design report for tunnel ventilation analysis and design”, Taisei Kumagai Gama Nuro Joint Venture, Tech. Rep. TGN-BC1-30-01-00-00-0355#01-00, 2005.
- [40] T.C. Ulaştırma Bakanlığı Demiryollar, Limanlar ve Havameydanları İnşaatı (DLH) Genel Müdürlüğü, *Sözleşme BC1 Demiryolu Boğaz Tüp Geçişi, Tüneller ve İstasyonlar için İşveren'in Şartnameleri*, 2004.

## EKLER

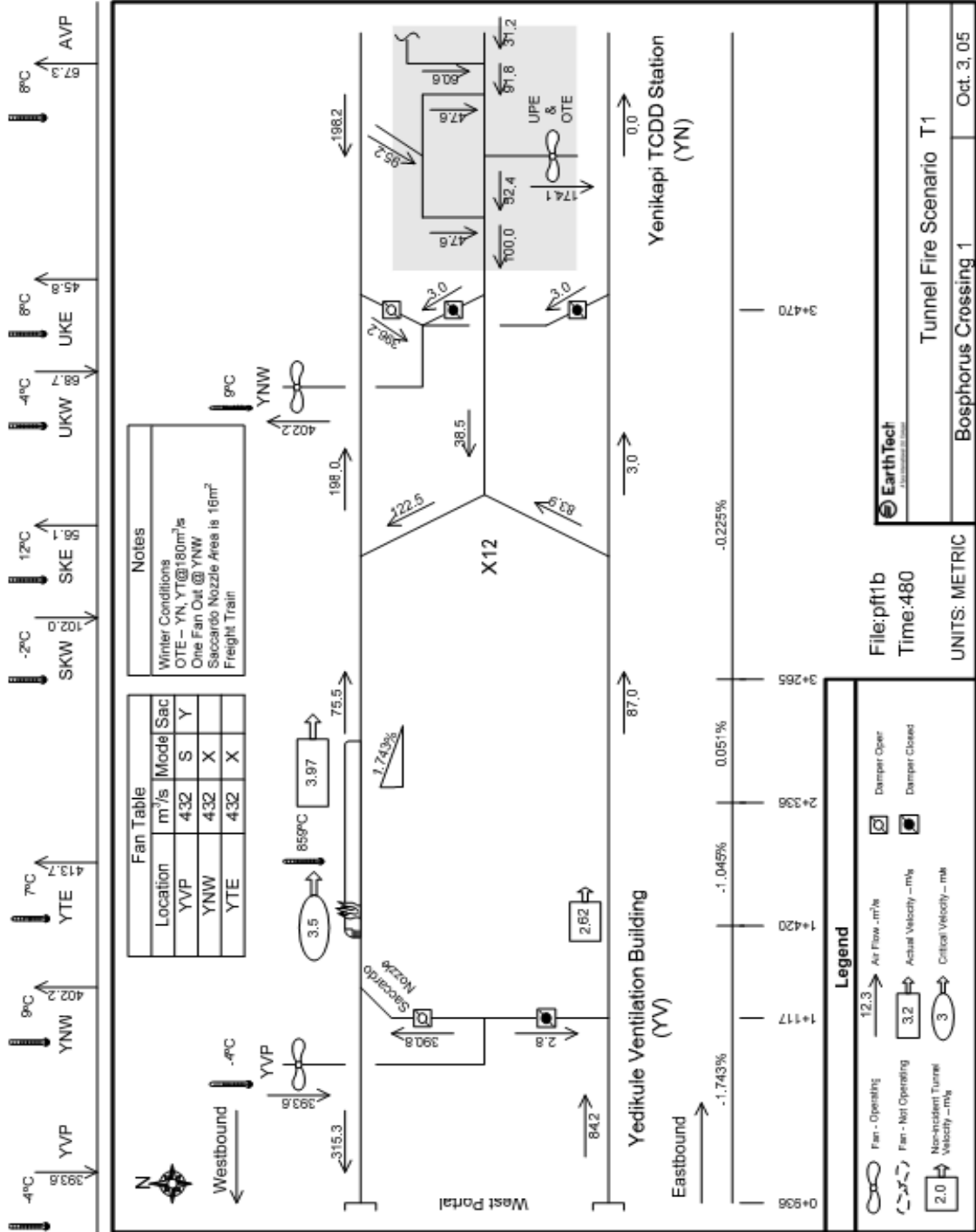
- Ek.1.** İstanbul'daki raylı sistemlerin haritası
- Ek.2.** Yedikule havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek güzergâhın batı girişi ile Yenikapı istasyonu arasında bulunan bir yük treninde çıkan yangın için yapılan SES analizi sonucu
- Ek.3.** Yenikapı TCDD havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek güzergâhın batı girişi ile Yenikapı istasyonu arasında bulunan bir yük treninde çıkan yangın için yapılan SES analizi sonucu
- Ek.4.** Yedikule havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek güzergâhın batı girişi ile Yenikapı istasyonu arasında bulunan bir yolcu treninde çıkan yangın için yapılan SES analizi sonucu
- Ek.5.** Üsküdar doğu havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek güzergâhın doğu girişi ile Üsküdar istasyonu arasında bulunan bir yük treninde çıkan yangın için yapılan SES analizi sonucu
- Ek.6.** Ayrılıkçeşme havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek güzergâhın doğu girişi ile Üsküdar istasyonu arasında bulunan bir yük treninde çıkan yangın için yapılan SES analizi sonucu
- Ek.7.** Üsküdar doğu havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek güzergâhın doğu girişi ile Üsküdar istasyonu arasında bulunan bir yolcu treninde çıkan yangın için yapılan SES analizi sonucu
- Ek.8.** Sirkeci doğu havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek güzergâhın Sirkeci ve Üsküdar istasyonları arasında batırma tüp tünel kısmında bulunan bir yük treninde çıkan yangın için yapılan SES analizi sonucu
- Ek.9.** Üsküdar batı havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek güzergâhın Sirkeci ve Üsküdar istasyonları arasında batırma tüp tünel kısmında bulunan bir yük treninde çıkan yangın için yapılan SES analizi sonucu
- Ek.10.** Sirkeci doğu havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek güzergâhın Sirkeci ve Üsküdar istasyonları arasında batırma tüp tünel kısmında bulunan bir yolcu treninde çıkan yangın için yapılan SES analizi sonucu
- Ek.11.** Batı girişinden sisteme giren ve doğu yönünde devam eden bir trenin Yenikapı tüp istasyonunda arızalanması ile oluşan sıkışık durum için SES analizi sonucu
- Ek.12.** Doğu girişinden sisteme giren ve batı yönünde devam eden bir trenin Sirkeci istasyonunda arızalanması ile oluşan sıkışık durum için SES analizi sonucu
- Ek.13.** Doğu girişinden sisteme giren ve batı yönünde devam eden bir trenin Üsküdar istasyonunda arızalanması ile oluşan sıkışık durum için SES analizi sonucu
- Ek.14.** Yaz şartlarında normal işletim koşulları için SES analizi sonuçları
- Ek.15.** Aşırı sıcak hava şartlarında normal işletim koşulları için SES analizi sonuçları
- Ek.16.** Basınç değişimleri için SES analizi sonuçları
- Ek.17.** Üsküdar istasyonu için CFD programı analizi sonuçları
- Ek.18.** Sirkeci istasyonu için CFD programı analizi sonuçları
- Ek.19.** Yenikapı TCDD istasyonu için CFD programı analizi sonuçları
- Ek.20.** Yenikapı tüp istasyonu için CFD programı analizi sonuçları

Ek.1. İstanbul'daki raylı sistemlerin haritası





**Ek.3.** Yenikapı TCDD havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek güzergâhın batı girişi ile Yenikapı istasyonu arasında bulunan bir yük treninde çıkan yangın için yapılan SES analizi sonucu



File:pf11b  
Time:480



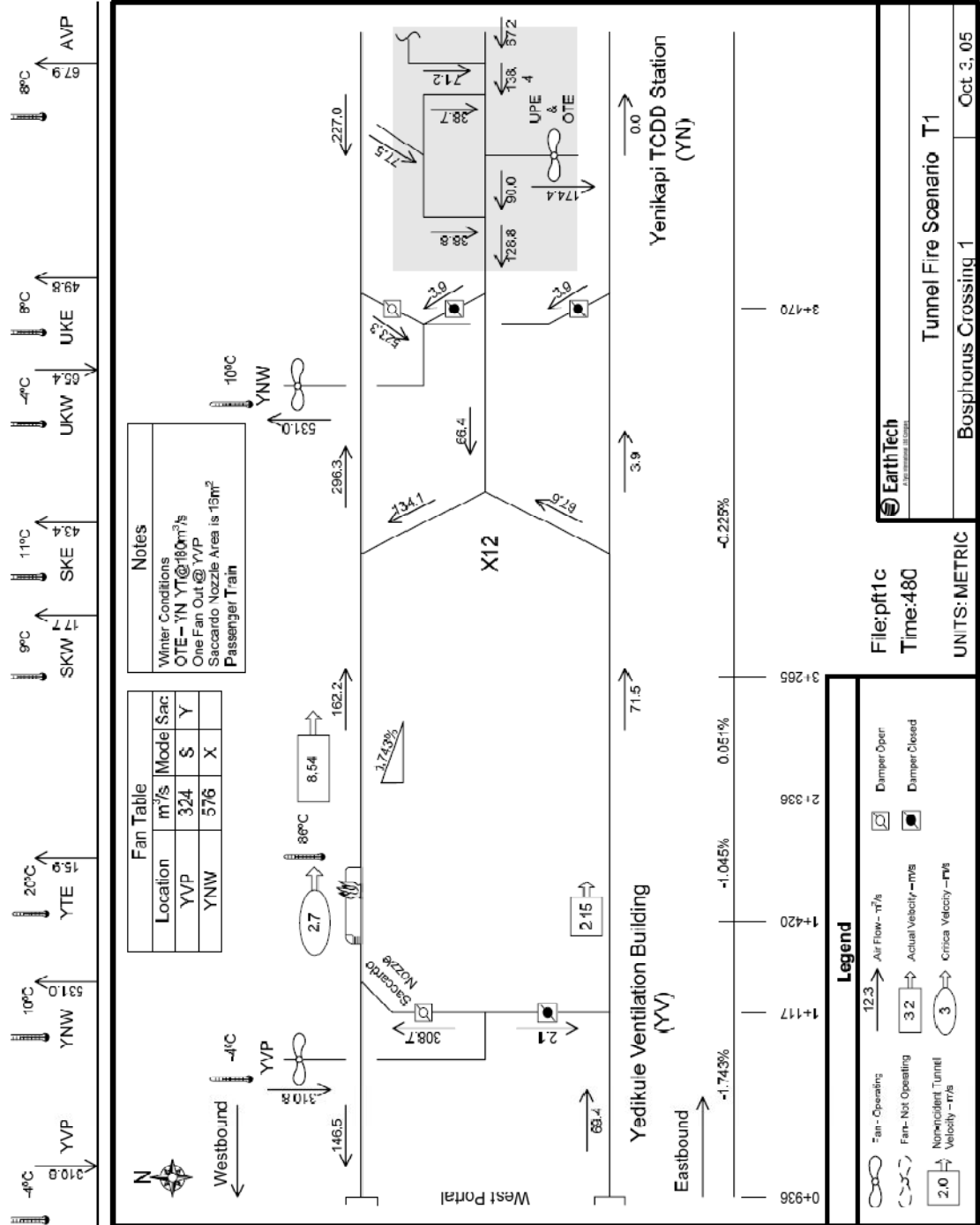
Tunnel Fire Scenario T1

Bosphorus Crossing 1

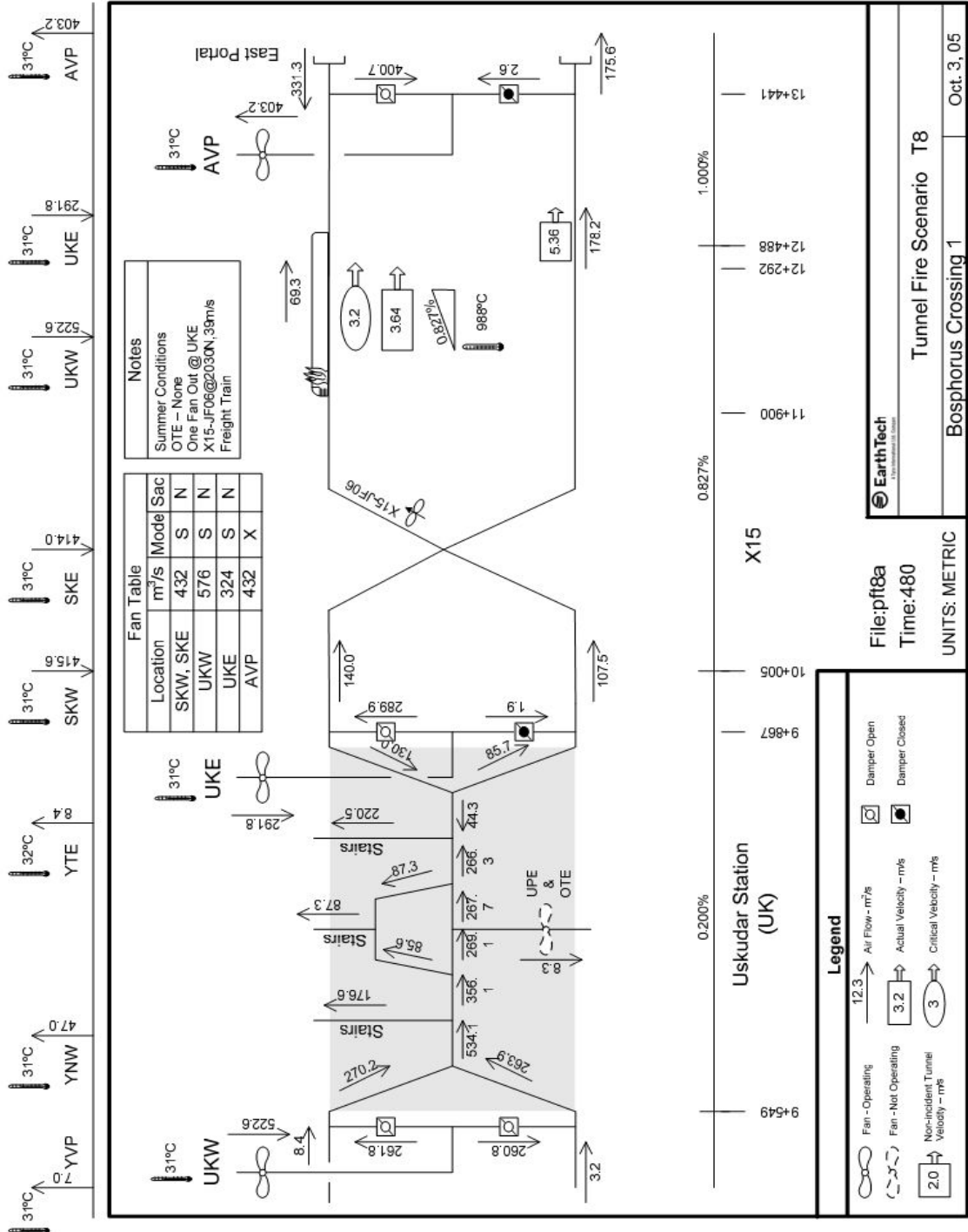
Oct. 3. 05

UNITS: METRIC

**Ek.4.** Yedikule havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek güzergâhın batı girişi ile Yenikapı istasyonu arasında bulunan bir yolcu treninde çıkan yangın için yapılan SES analizi sonucu



**Ek.5.** Üsküdar doğu havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek güzergâhın doğu girişi ile Üsküdar istasyonu arasında bulunan bir yük treninde çıkan yangın için yapılan SES analizi sonucu

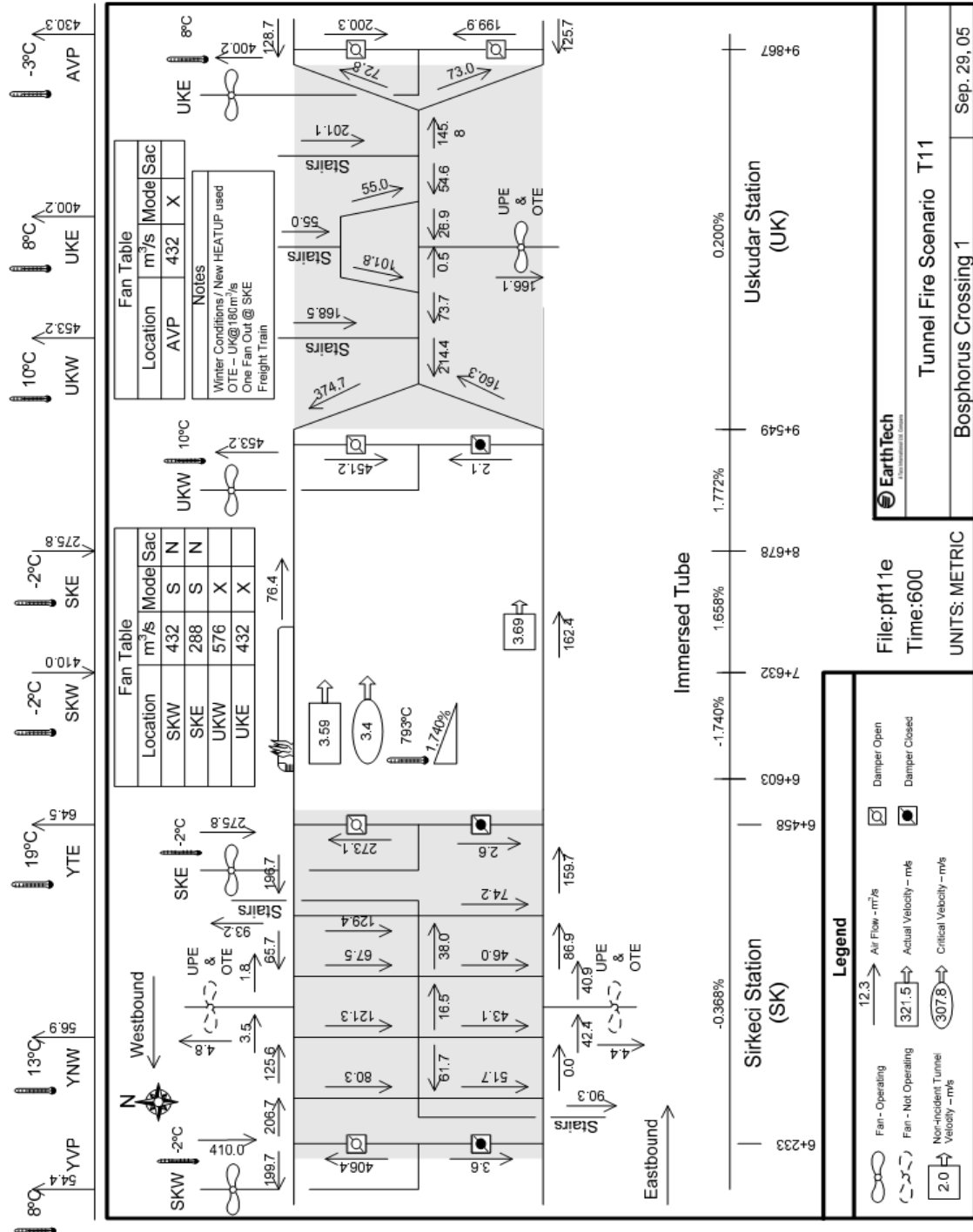




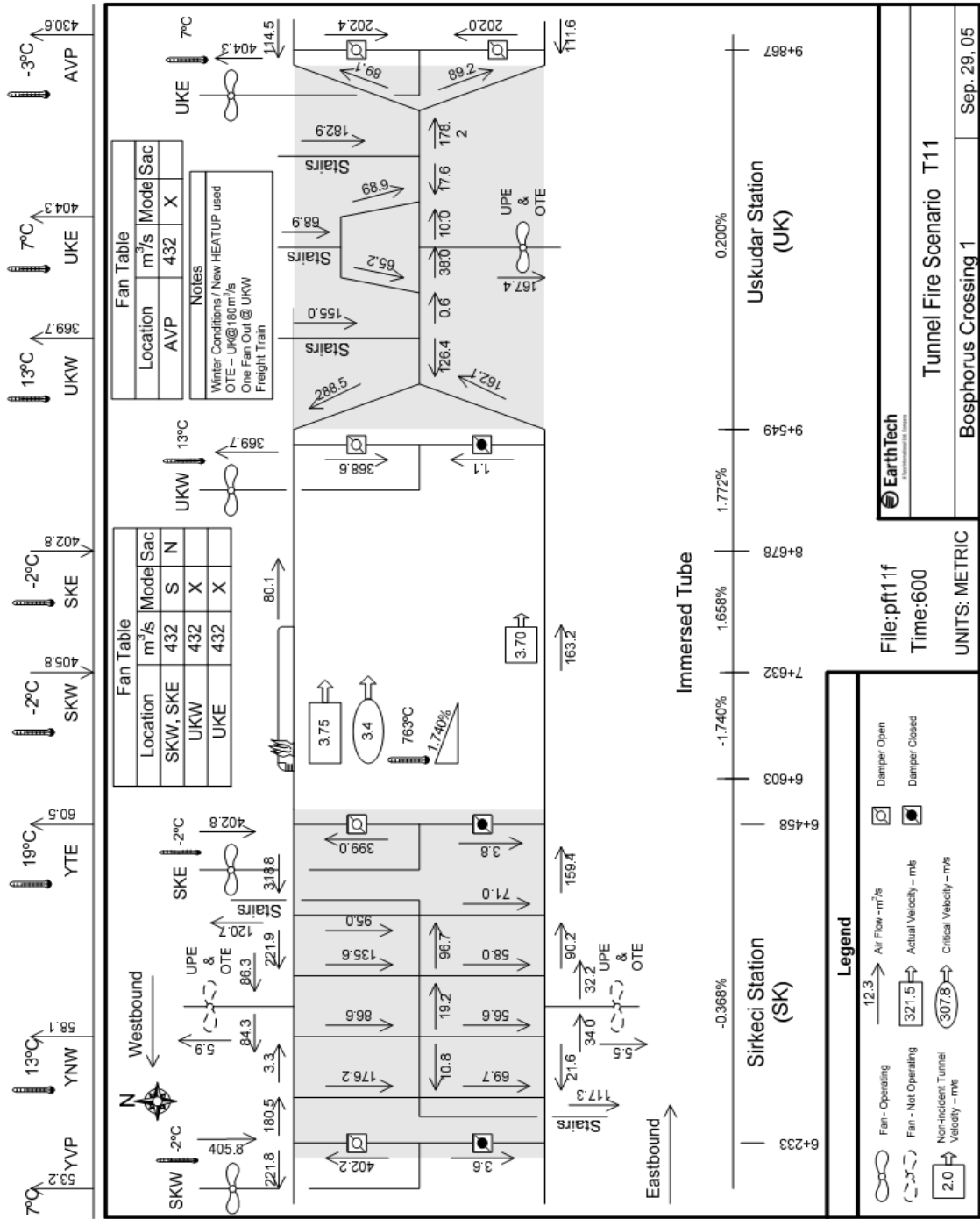




**Ek.8.** Sirkeci doğu havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek güzergâhın Sirkeci ve Üsküdar istasyonları arasında batırma tüp tünel kısmında bulunan bir yük treninde çıkan yangın için yapılan SES analizi sonucu

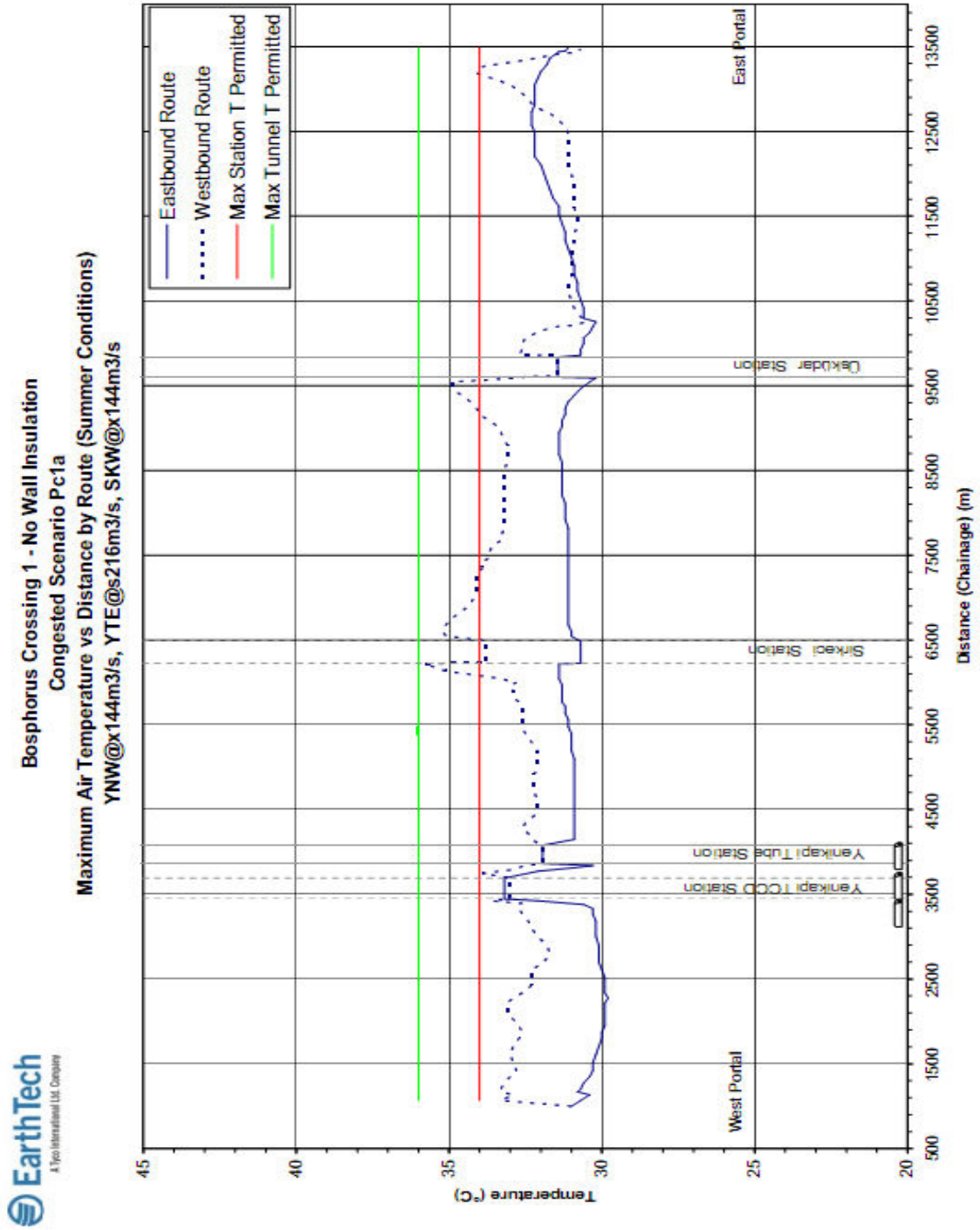


**Ek.9.** Üsküdar batı havalandırma binasında bir fan arızalı kabul edilerek güzergâhın Sirkeci ve Üsküdar istasyonları arasında batırma tüp tünel kısmında bulunan bir yük treninde çıkan yangın için yapılan SES analizi sonucu

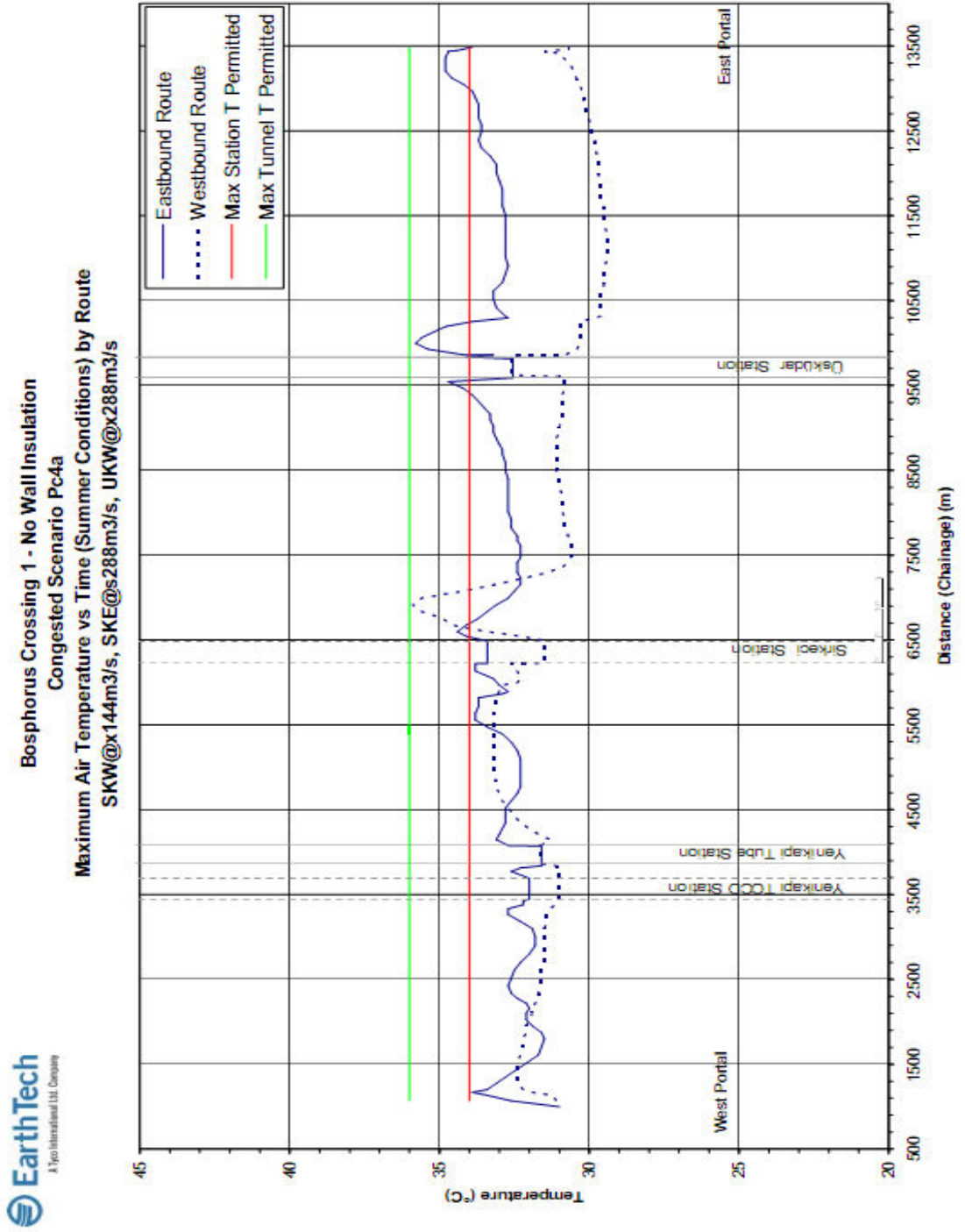




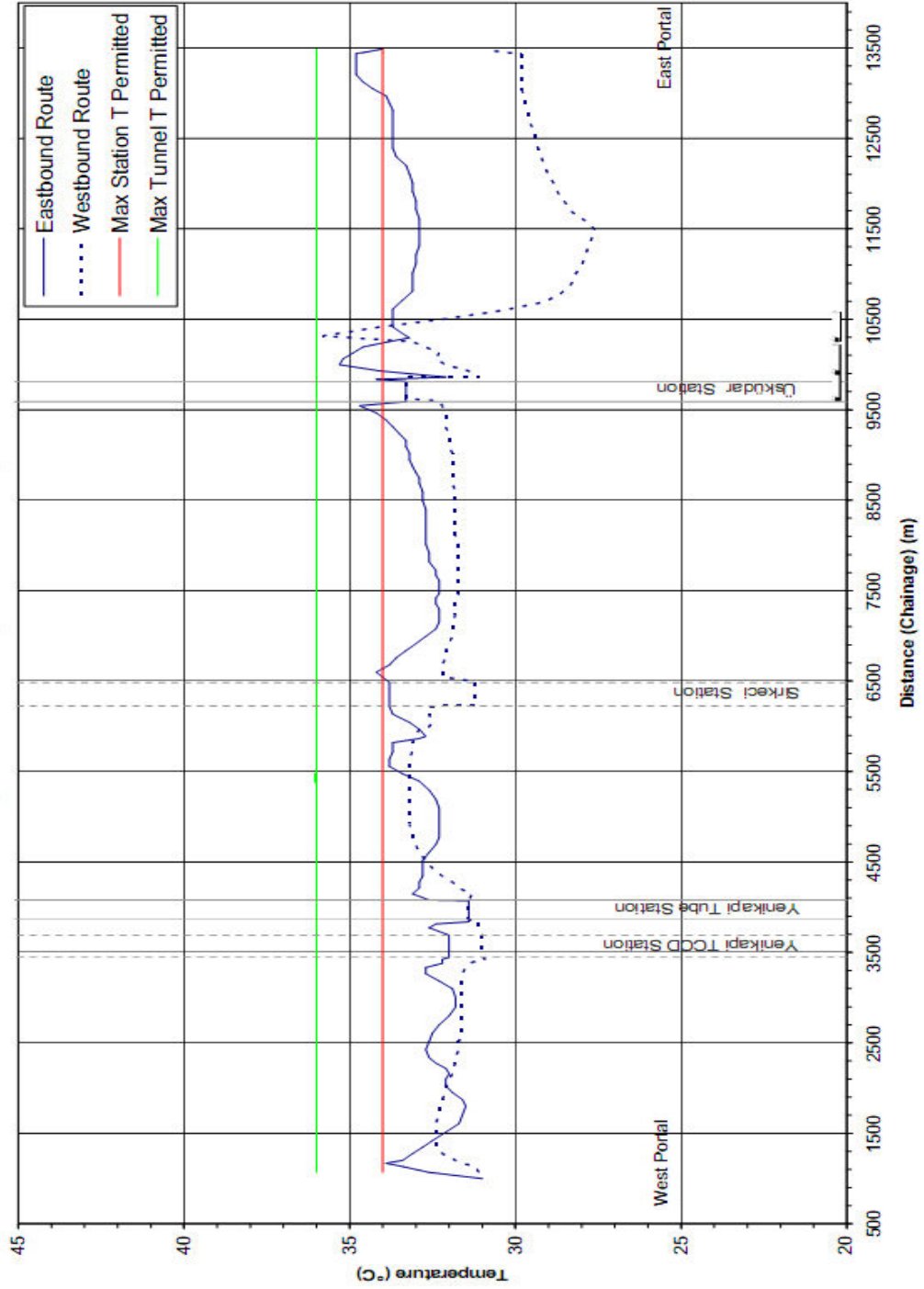
Ek.11. Batı girişinden sisteme giren ve doğu yönünde devam eden bir trenin Yenikapı tüp istasyonunda arızalanması ile oluşan sıkışık durum için yapılan SES analizi sonucu



Ek.12. Batı girişinden sisteme giren ve doğu yönünde devam eden bir trenin Sirkeci istasyonunda arızalanması ile oluşan sıkışık durum için yapılan SES analizi sonucu



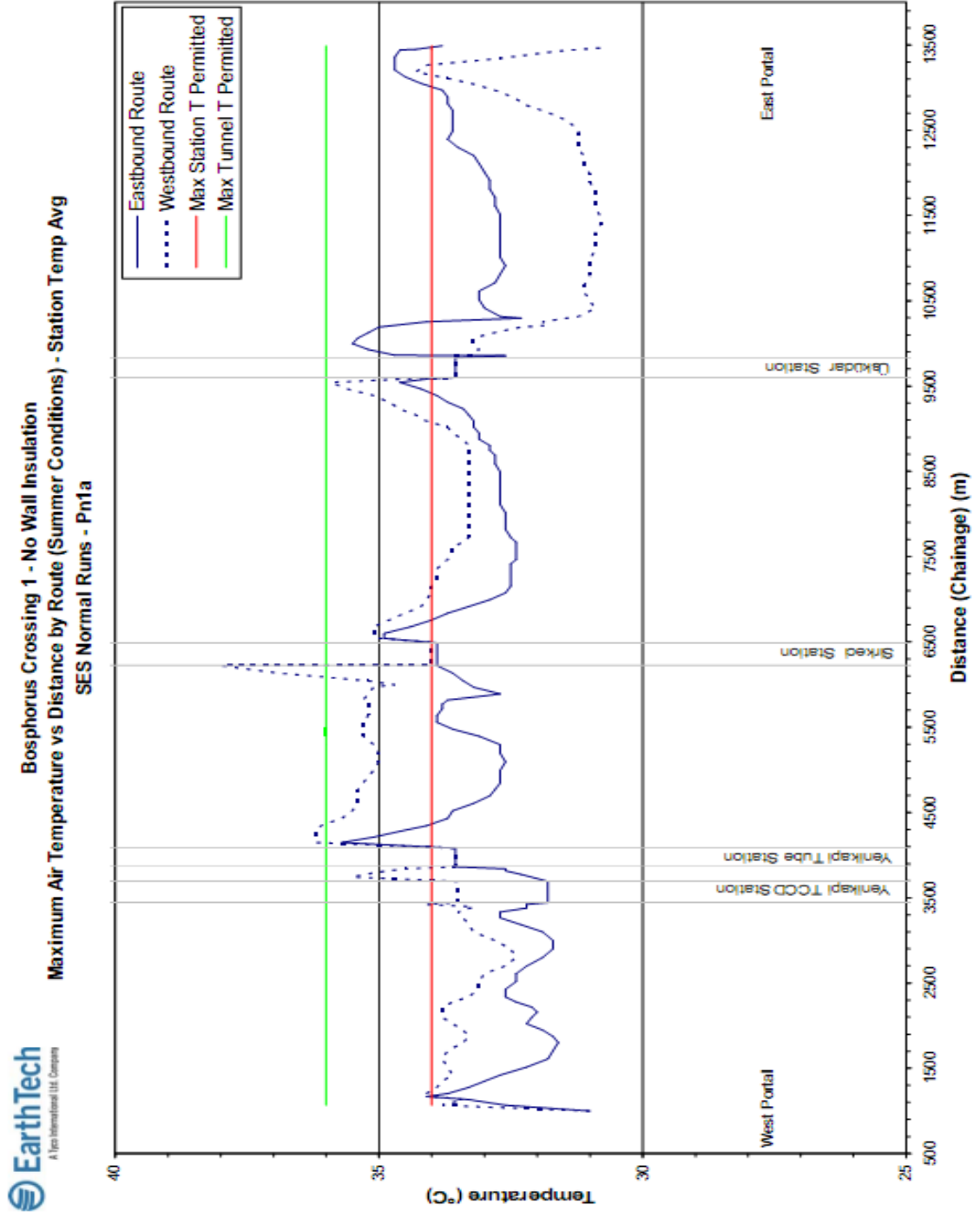
**Bosphorus Crossing 1 - No Wall Insulation**  
**Congested Scenario Pc6a**  
**Maximum Air Temperature vs Time (Summer Conditions) by Route**  
**SKW@x144m3/s, UKE@s324m3/s, AVP@x216m3/s**



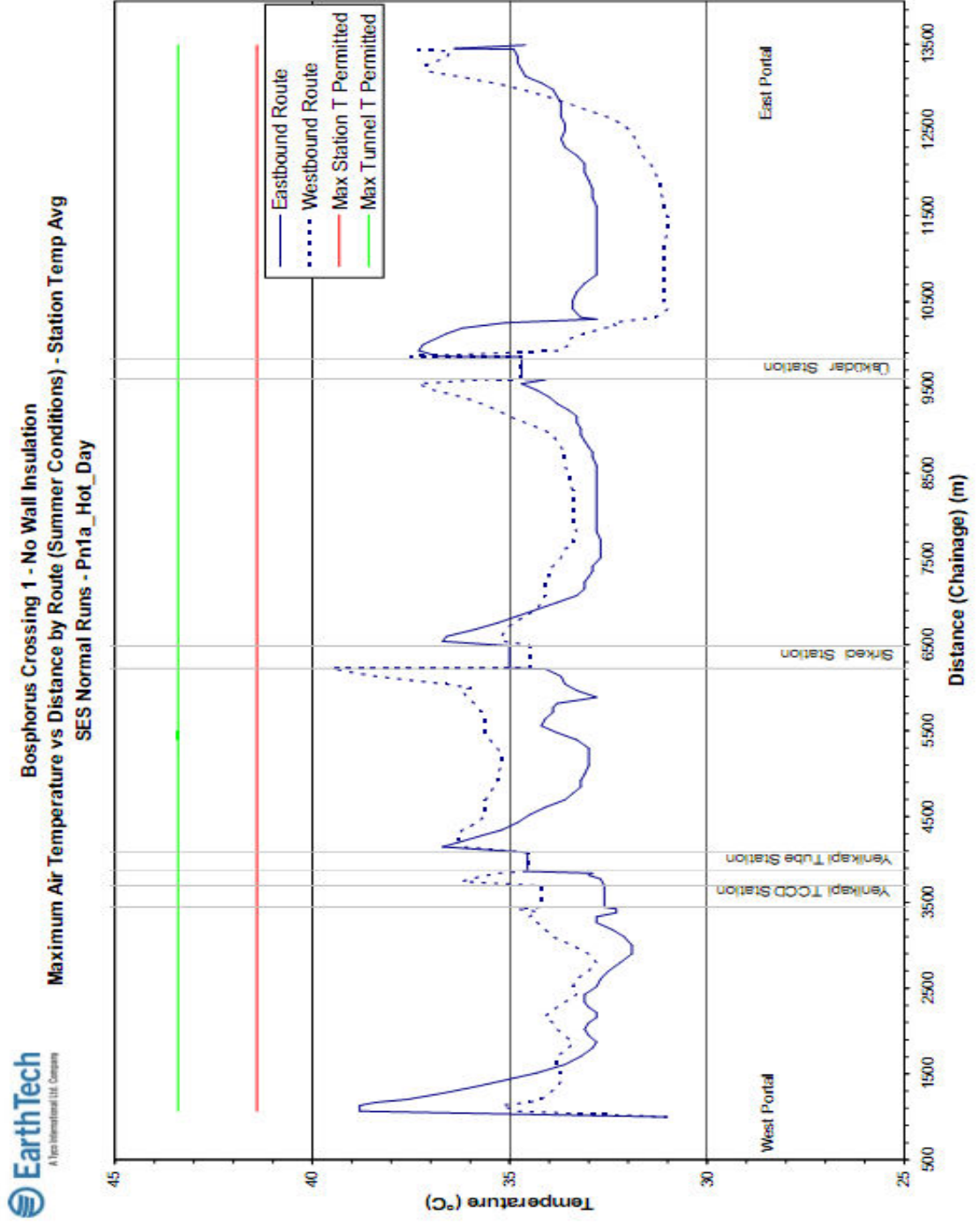
**Ek.13.** Batı girişinden sisteme giren ve doğu yönünde devam eden bir trenin Üsküdar istasyonunda arızalanması ile oluşan sıkışık durum için yapılan SES analizi sonucu



Ek.14.Yaz şartlarında normal işletim koşulları için SES analizi sonuçları



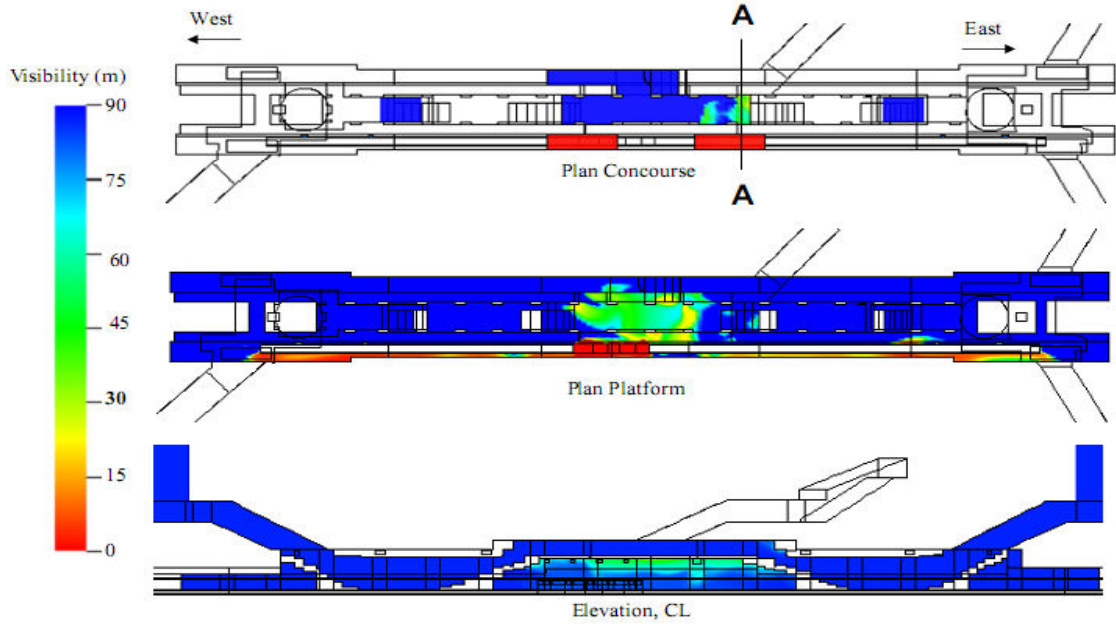
Ek.15.Aşırı sıcak hava şartlarında normal işletim koşulları için SES analizi sonuçları



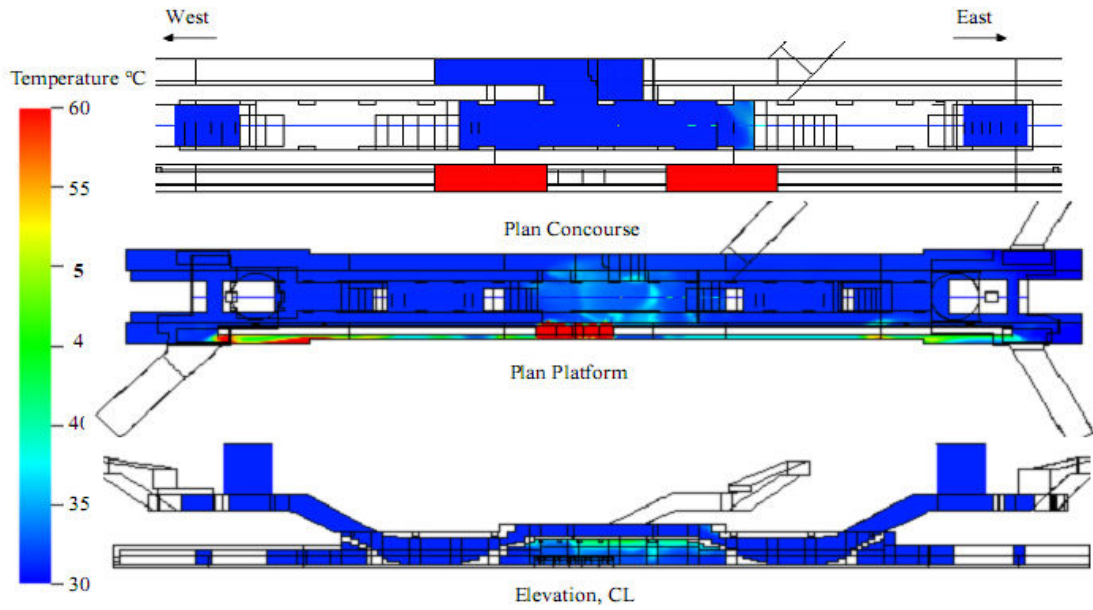
Ek.16.Basınç değişimleri için SES analizi sonuçları

Area	Section	Location	Maximum Pressure (Pa)	Minimum Pressure (Pa)	Pressure Change (Pa)	Allowable Range (Pa)
YPW	Tunnel	EB Track	203.0	-271.1	474.1	700
YPW	Tunnel	WB Track	0.0	-81.3	81.3	700
YVP	Tunnel	EB Track W of YVP	45.6	-165.5	211.1	700
YVP	Tunnel	WB Track W of YVP	239.5	-198.2	437.7	700
YVP	Shaft	YVP	42.5	-133.3	175.8	700
YVP	Tunnel	EB Track E of YVP	69.8	-264.4	334.3	700
YVP	Tunnel	WB Track E of YVP	65.9	-316.4	382.3	700
YN	Shaft	YNW	162.4	-139.3	301.7	700
YN	Station	E End YN	80.9	-74.5	155.4	700
YN	Station	W End YN	85.4	-66.8	152.2	700
YT	Station	E End YT	68.6	-42.8	111.5	700
YT	Station	W End YT	73.2	-39.1	112.4	700
YT	Shaft	YTE	126.8	-73.5	200.3	700
SK	Shaft	SKW	99.9	-65.3	165.2	700
SK	Station	EB Track @ SKE	130.4	-12.5	142.9	700
SK	Station	WB Track @ SKE	132.5	-44.7	177.2	700
SK	Station	EB Track @ SKW	128.0	-66.9	194.9	700
SK	Station	WB Track @ SKW	182.0	-56.4	238.4	700
SK	Shaft	SKE	95.2	-26.6	121.8	700
UK	Shaft	UKW	45.0	-71.7	116.8	700
UK	Station	WB Track @ UKW	64.6	-7.1	71.7	700
UK	Station	EB Track @ UKW	58.2	-17.3	75.5	700
UK	Station	WB Track @ UKE	73.1	-32.6	105.7	700
UK	Station	EB Track @ UKE	79.9	-6.2	86.1	700
UK	Shaft	UKE	81.6	-62.9	144.6	700
AYR	Tunnel	EB Track W of AYR	38.7	-71.8	110.6	700
AYR	Tunnel	WB Track W of AYR	78.9	-94.3	173.2	700
AYR	Shaft	AYR	0.4	-51.5	51.8	700
APE	Tunnel	EB Track E of AYR	0.0	-30.6	30.6	700
APE	Tunnel	WB Track E of AYR	121.2	-139.0	260.1	700

Ek.17. Üsküdar istasyonu için CFD programı analizi sonuçları

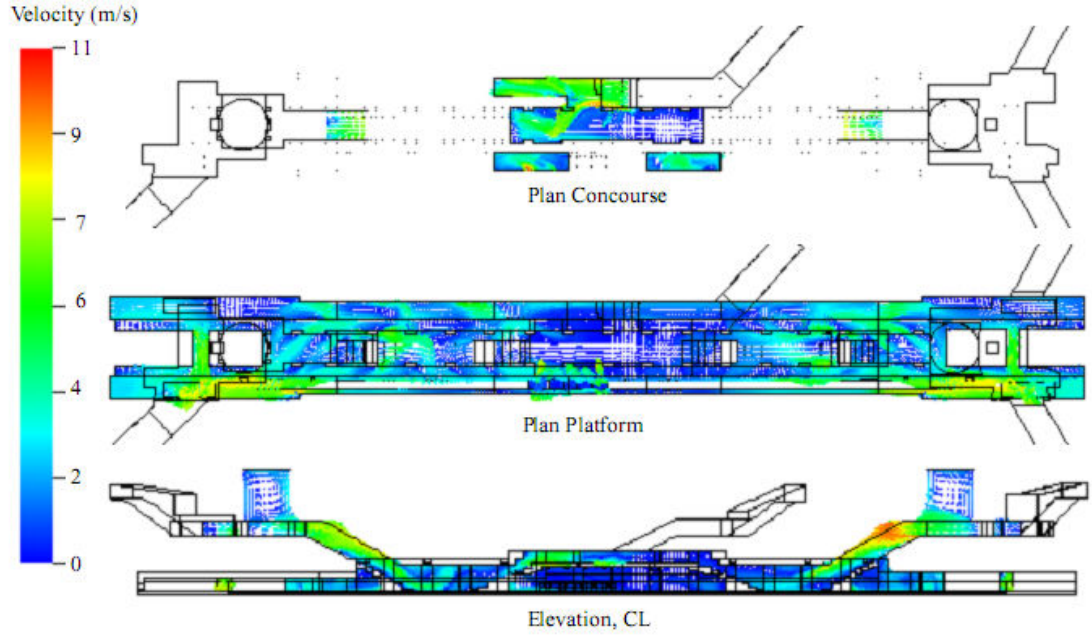


a) Görüş mesafesi analizi



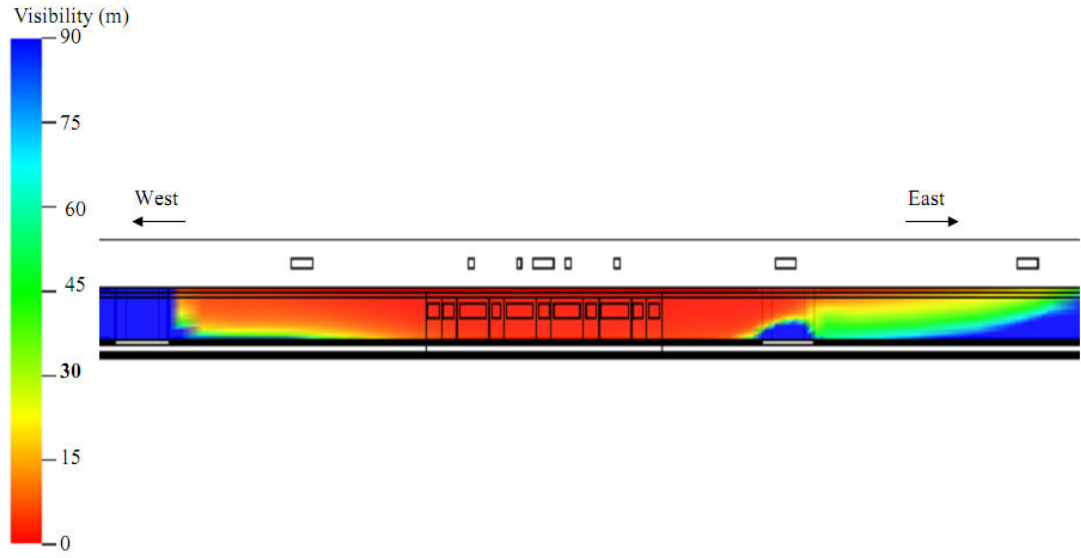
b) Hava sıcaklığı analizi

Ek.17. Üsküdar istasyonu için CFD programı analizi sonuçları (devam)

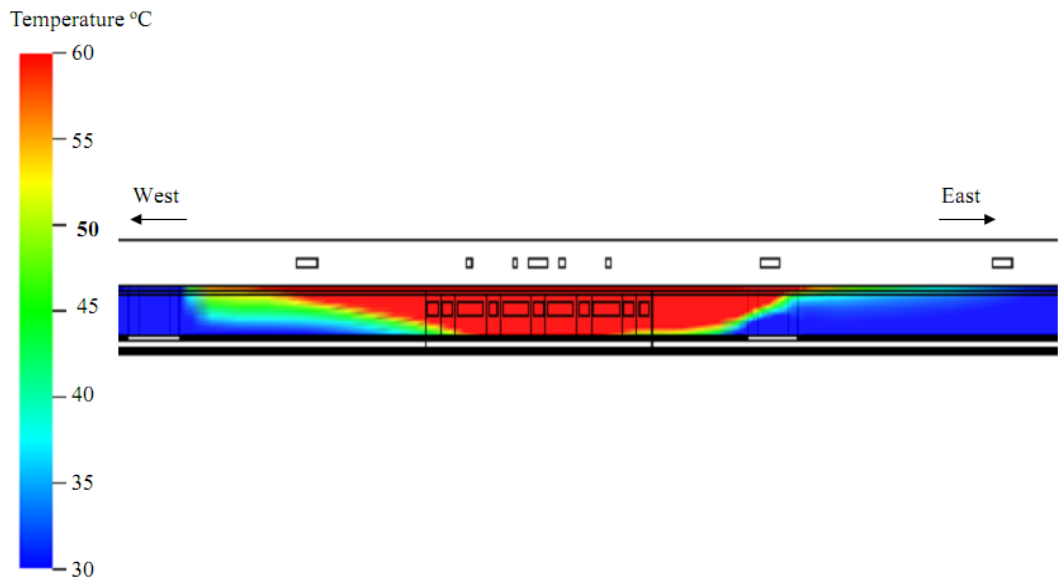


c) Hava hızı analizi

**Ek.18.** Sirkeci istasyonu için CFD programı analizi sonuçları

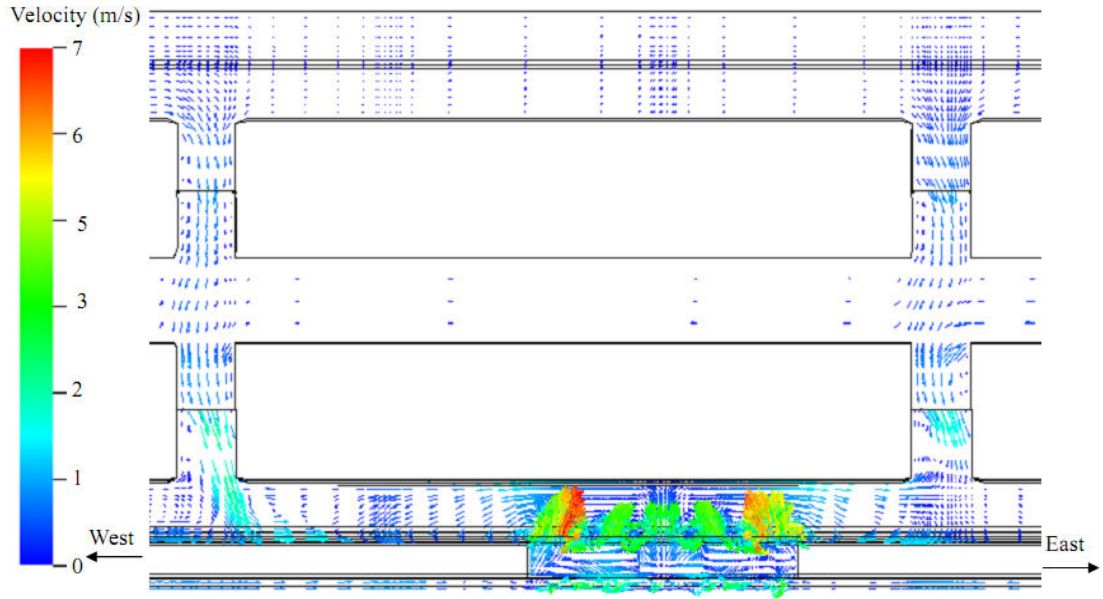


a) Görüş mesafesi analizi



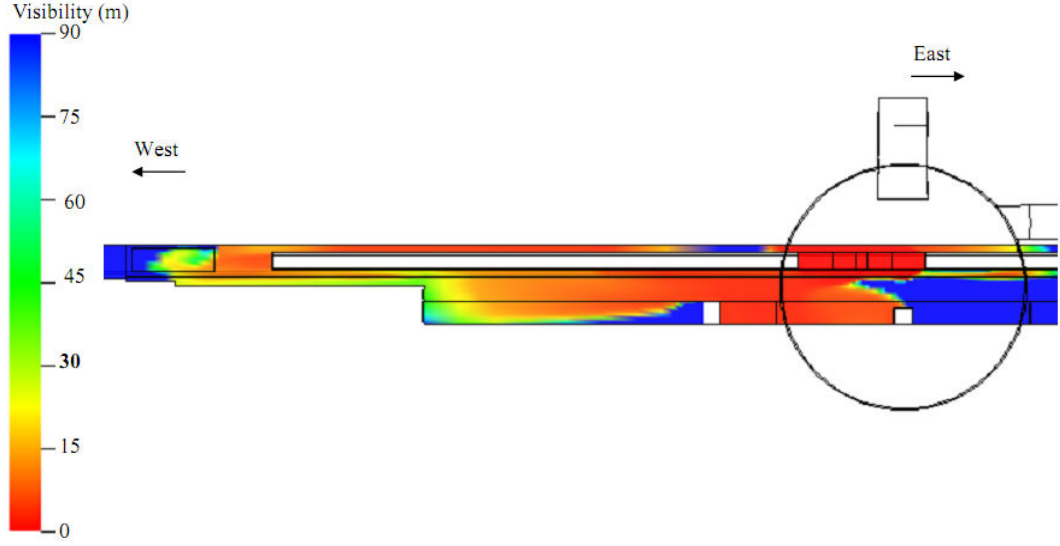
b) Hava sıcaklığı analizi

Ek.18. Sirkeci istasyonu için CFD programı analizi sonuçları (devam)

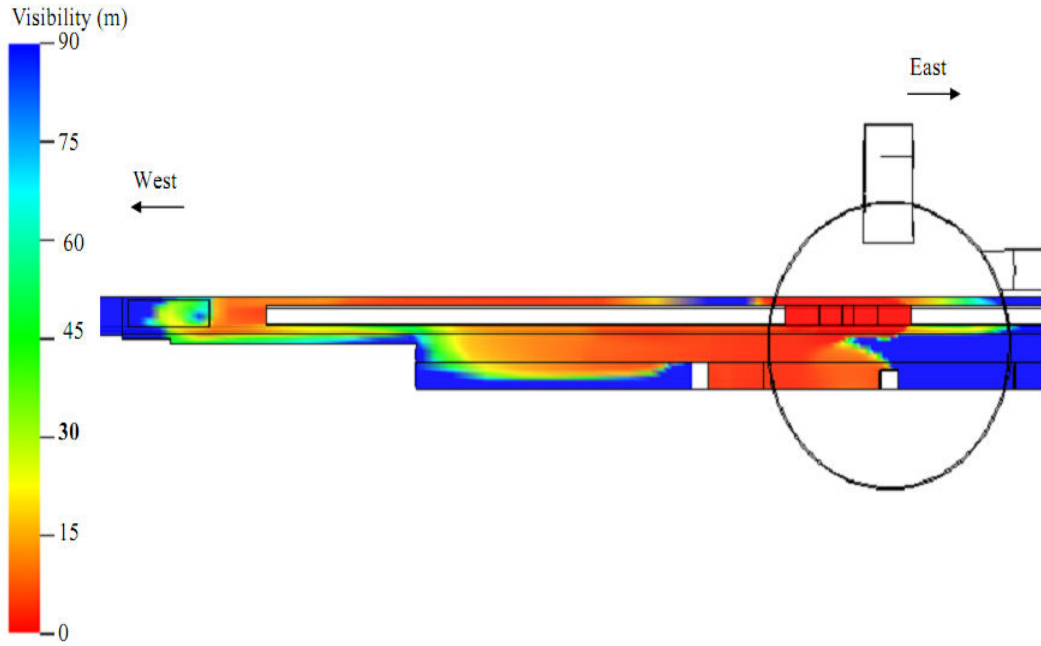


c) Hava hızı analizi

**Ek.19.** Yenikapı TCDD istasyonu için CFD programı analizi sonuçları



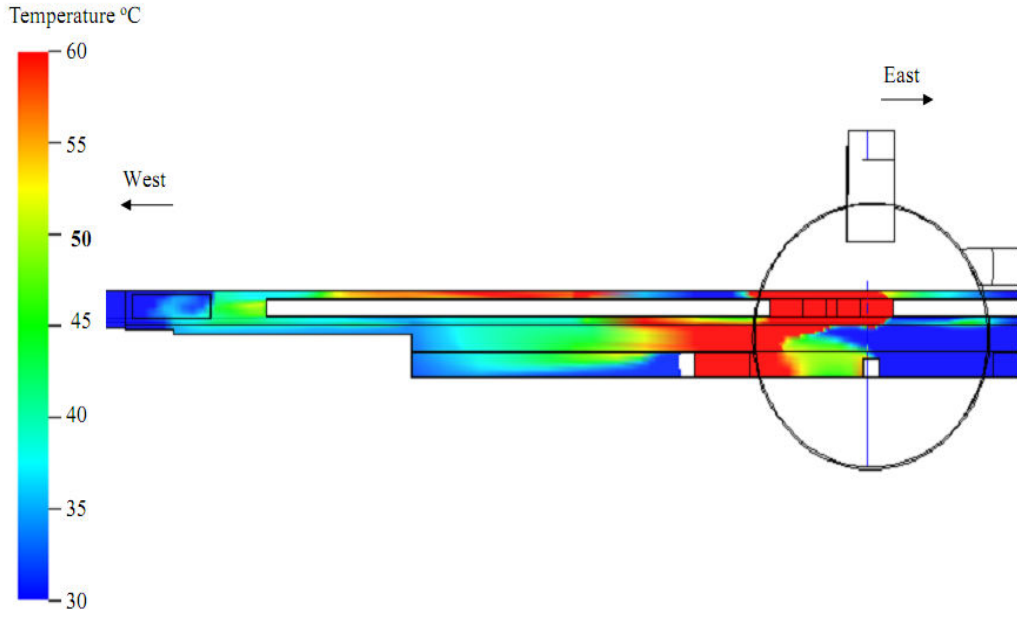
a) 180 m<sup>3</sup>/sn debili hat üstü egzost sistemi fanları ile görüş mesafesi analizi



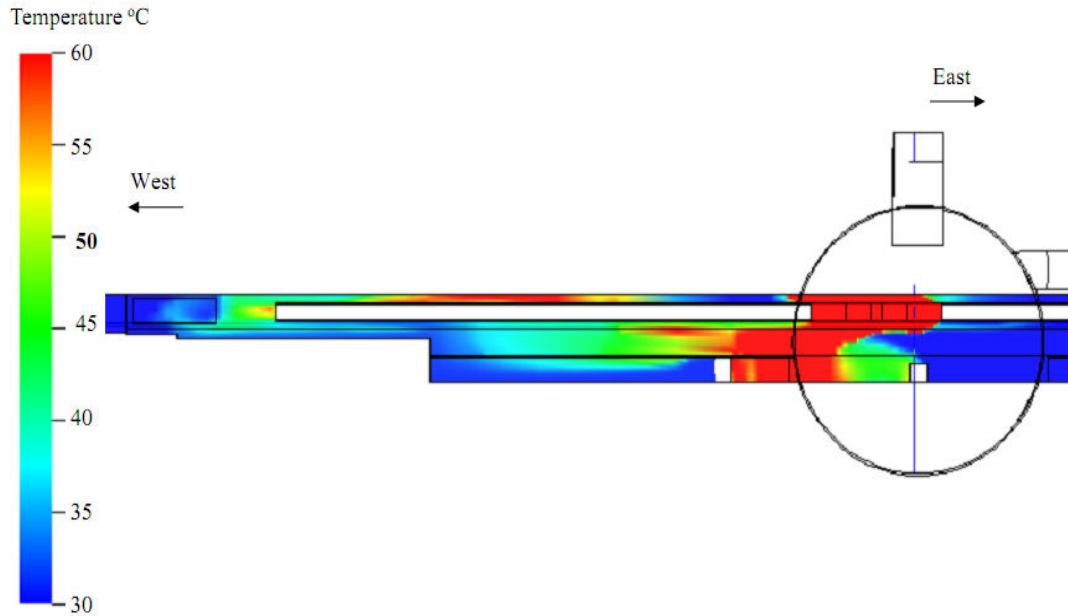
b) 240 m<sup>3</sup>/sn debili hat üstü egzost sistemi fanları ile görüş mesafesi analizi



**Ek.19.** Yenikapı TCDD istasyonu için CFD programı analizi sonuçları (devam)

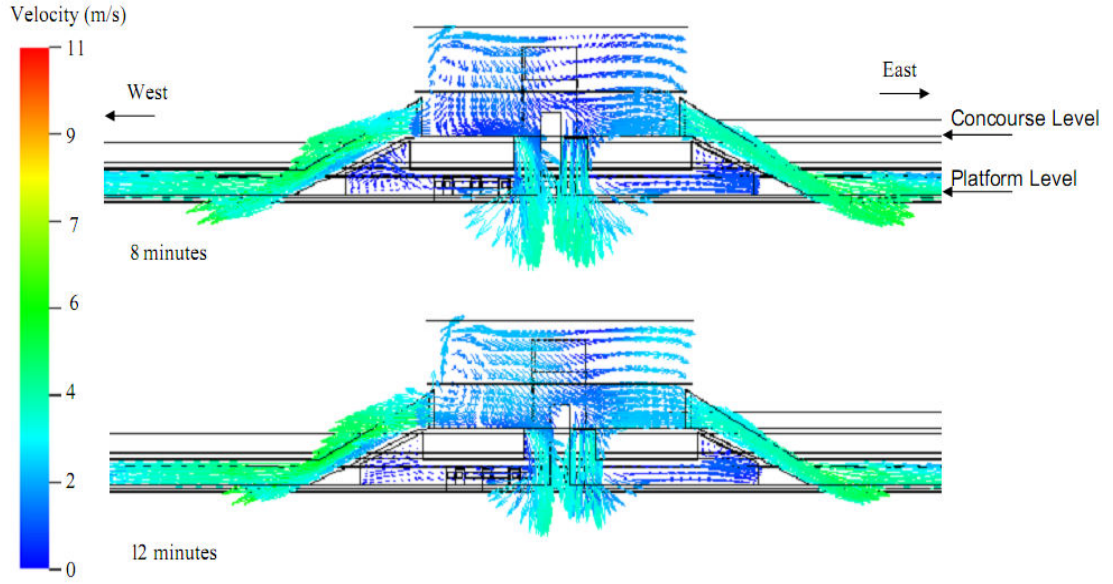


c) 180 m<sup>3</sup>/sn debili hat üstü egzost sistemi fanları ile hava sıcaklığı analizi



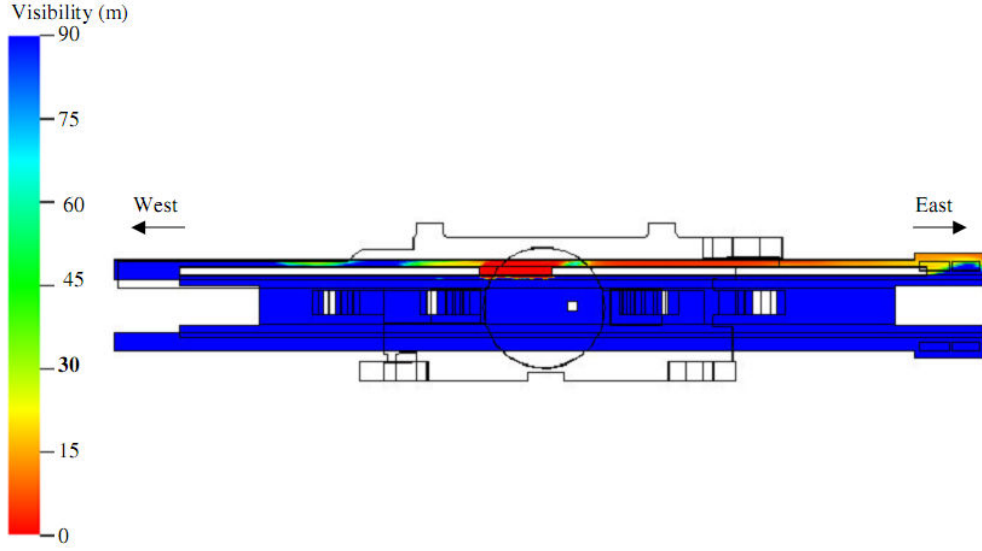
d) 240 m<sup>3</sup>/sn debili hat üstü egzost sistemi fanları ile hava sıcaklığı analizi

**Ek.19.** Yenikapı TCDD istasyonu için CFD programı analizi sonuçları (devam)

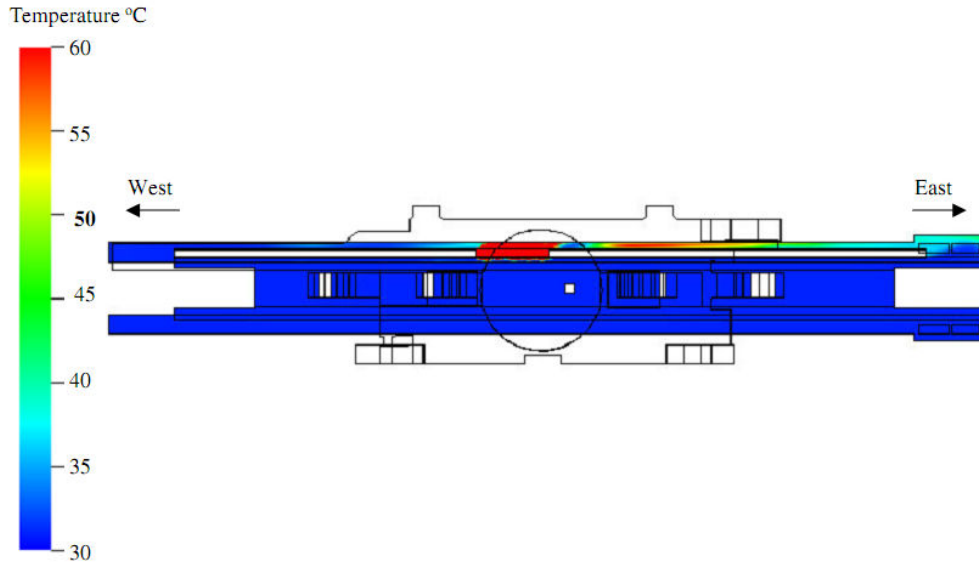


e) Hava hızı analizi

**Ek.20.** Yenikapı tp istasyonu için CFD programı analizi sonuçları

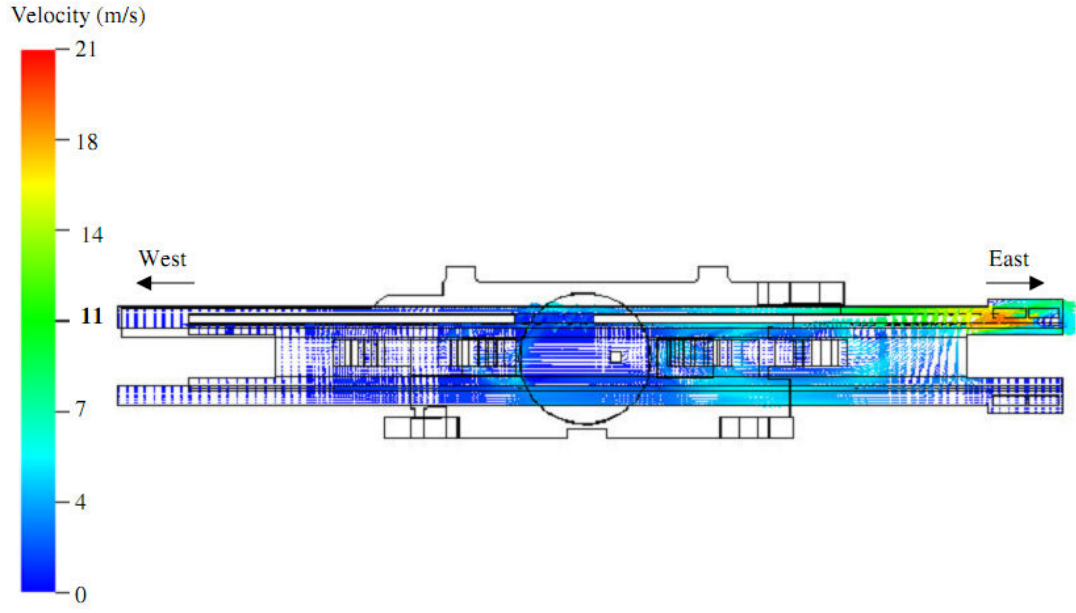


a) Görüş mesafesi analizi



b) Hava sıcaklığı analizi

**Ek.20.** Yenikapı tp istasyonu için CFD programı analizi sonuçları (devam)



c) Hava hızı analizi