



## Gaziantep banliyö projesi (Gaziray) raylı sistem hattı tünellerinde olası tren yangını durumunda tünel acil durum havalandırma sisteminin simülasyonu

Çiğdem Avcı Karataş<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Transportation Engineering, Faculty of Engineering, Yalova University, 77200, Yalova, Turkey

### MAKELE BİLGİSİ

#### Makale Geçmişi:

Gele 07 Haziran 2023

Düzeltilme 20 Haziran 2023

Kabul 10 Temmuz 2023

Çevrimiçi mevcut

#### Anahtar Kelimeler:

Raylı sistemler

Tüneller

Yapısal yangın güvenliği

Gaziray

Simülasyon

CFD Modelleme

Risk analizi

### ÖZET

Raylı sistemler, hızlı, güvenli ve çevre dostu bir toplu taşıma seçeneği olarak dünya genelinde aktif olarak kullanılmaktadırlar. Gaziantep banliyö projesi (Gaziray) Raylı Sistem Hattı, Türkiye'nin Gaziantep şehrinde, toplu taşıma ihtiyacını karşılamak amacıyla planlanan bir proje olarak büyük önem taşımaktadır. Raylı sistem hatlarında, tren yangınları gibi potansiyel olası tehlikelerin dikkate alınması ve yangının etkilerinin değerlendirilmesi çok önemlidir. Yangınlar, trenlerin elektrikli ve mekanik bileşenlerinde, örneğin; elektrik kablolarının aşırı ısınması, fren sistemlerinde arızalar, yakıt sızıntıları gibi sebeplerle çeşitli nedenlerle ortaya çıkabilmektedirler. Bu tür yangınlar, tünellerde, tünelin duvar, tavan, taban ve diğer yapısal elemanlara zarar verebilecek özellikte tehlikeli sonuçlara yol açabileceğinden, tünel yapısının yangından etkilenme seviyesi ve böylelikle yangının tünel yapısına verdiği zararın dikkatlice değerlendirilmesi gerekmektedir. Yangın sonrası, tünelin kullanılabilirliğini, güvenliğini ve yapısal bütünlüğünü etkileyen yapısal hasarlar, tünelin onarım maliyetlerini ve işletme süreçlerini de etkileyebilmektedir. Tünel yangınlarının etkilerini değerlendirmek için yangın testleri, modelleme ve benzetimler/simülasyonlar gibi yöntemler kullanılmaktadır. Yangın testleri, gerçek yangın senaryolarını taklit ederek tünel yapısının yangına karşı tepkisini belirleyebilmekte, modelleme ve simülasyonlar ise tünel yapısının yangından etkilenme seviyesini belirlemektedir. Bu çalışmanın amacı, Gaziray Raylı Sistem Hattında bulunan tünellerde meydana gelebilecek olası tren yangını durumunda, tünel yapısının yangından etkilenme seviyesi ve bu etkinin değerlendirilmesidir. Kritik hız; yangın esnasında ortaya çıkan duman ve yanma ürünü zehirli gazların ters katmanlaşmadan istenilen yöne itilmesi için gerekli olan minimum hava hızıdır. Çalışmada, yapısal bütünlüğün bozulmadan, çevresel kontrol sistemlerinin çalışmasına olanak sağlayarak ve insan tahliye yönünün ters yönünde kritik hava hızı sağlanarak; gerekli havalandırma stratejisi ve kapasitesinin belirlenmesi hedefi gerçekleştirilmiştir.

2023 JIENS Tüm hakları saklıdır.

## Simulation of the tunnel emergency ventilation system in the event of a potential train fire in the tunnels of the Gaziray Railway System Line

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received

Received in revised form

Accepted

Available online

#### Keywords:

Railway systems

Tunnels

Structural fire safety

Gaziray

Simulation

CFD Modeling

Risk analysis

### ABSTRACT

Rail systems are actively used worldwide as a fast, safe, and environmentally friendly public transportation option. The Gaziray Rail System Line is a project of great importance planned to meet the public transportation needs in Gaziantep, Turkey. In rail system lines, it is crucial to consider potential hazards such as train fires and evaluate the effects of fire. Fires can occur for various reasons in the electrical and mechanical components of trains, such as overheating of electrical cables, malfunctions in braking systems, fuel leaks, and so on. Such fires can cause dangerous consequences that can damage the tunnel's walls, ceiling, floor, and other structural elements, so the level of the tunnel's susceptibility to fire and the damage it causes to the tunnel structure must be carefully evaluated. Structural damages that affect the tunnel's usability, safety, and integrity after a fire can also affect repair costs and operational processes. Methods such as fire tests, modelling, and simulations are used to assess the effects of tunnel fires. Fire tests can determine the tunnel structure's response to fire by simulating real fire scenarios, while modelling and simulations determine the level of the tunnel structure's susceptibility to fire. The purpose of this study is to evaluate the level of damage to the tunnel structure and its effects in the event of a possible train fire in the tunnels of the Gaziray Rail System Line. The critical speed is the minimum airspeed required to push smoke and toxic combustion products in the desired direction without stratification during a fire. The study aims to determine the necessary ventilation strategy and capacity to provide critical airspeed in the opposite direction of human evacuation while enabling the environmental control systems to operate without compromising the structural integrity.

2023 JIENS All rights reserved.

## I. GİRİŞ

Toplu taşıma sektöründe özellikle büyük şehirlerdeki trafik sorunlarını çözmeye, raylı sistemler önemli bir rol oynamaktadır. Raylı sistemler, insanları ve yükleri hızlı, güvenli, konforlu ve çevre dostu bir şekilde taşımak için kullanılan toplu taşıma araçları olup, modern şehirlerin ulaşım ihtiyaçlarını karşılamak için son derece önemli bir ulaşım bileşenidir. Raylı sistemlerin birçok avantajı bulunmaktadır. Bu sistemler, öncelikle, bu sistemler yüksek hızlı ve düzenli bir hizmet sunarken, kara yolu trafiği sorunlarından kaynaklanan gecikmelerin ve zaman kayıplarının önüne geçmektedirler. Ayrıca, bu sistemlerin düşük maliyetli işletme ve bakım maliyetleri bulunmaktadır. Çevreye duyarlı bir ulaşım seçeneği olmaları nedeniyle raylı sistemler, aynı zamanda, karbon ayak izini azaltmaya yardımcı olmaktadır. Farklı türlerde raylı sistemler mevcuttur; hafif raylı sistemler, metro hatları, tramvaylar ve tren hatları, vb. Her bir tür, farklı özellikleri ve avantajları ile birbirinden farklıdır. Örneğin, hafif raylı sistemler, düşük maliyetli bir seçenek olarak bilinirken, metro hatları yüksek kapasiteli ve yüksek hızlı bir hizmet sunmaktadır.

Raylı sistem tünelleri/demiryolu tünelleri, modern şehirlerde toplu taşıma araçlarının güvenli bir şekilde seyahat etmesini sağlayan kritik bir altyapı bileşenidir. Tünellerin bir ülkenin ulaşım altyapı ağının ayrılmaz bir bileşeni olduğu, bu nedenle tünellerin iyi durumda çalışmasının yaşamı, çevreyi tehdit edebilecek her türlü etkiye karşı düzenli olarak kesintisiz olarak sürekli bakımlarının yapılması gerekmektedir. Tünellerin tasarımı ve inşası zorlu bir süreç olup şehirlerde trafik akışını düzenlemek ve toplu taşıma hizmetlerini daha güvenli ve verimli hale getirmek için önem arz etmektedir. Demiryolu ve karayolu tünelleri arasında dikkate alınması gereken önemli farklılıklar bulunmaktadır [1]. Tünelin uzunluğu, derinliği, eğimi ve yönü gibi faktörler, inşaat maliyetleri ve tünelin dayanıklılığı açısından önemliken, tünellerin tasarımı, tünelin içindeki hava kalitesini ve havalandırma sistemlerini de dikkate almaktadır. Tünellerdeki yangın riski, hava kalitesi ve güvenliği açısından önemli bir faktördür ve bu nedenle tünellerde yangın önleme ve söndürme sistemleri dikkatle tasarlanmalıdır.

Tüneller, kaza ve olağanüstü yük olayları gibi istisnai yüklemeye olaylarına maruz kalabileceği 120 yıl boyunca hizmet vermek üzere tasarlanmıştır [2]. Tünel hattı boyunca meydana gelebilecek risk seviyesi en yüksek kazalardan biri olan yangın insan kaynaklı bir felakettir [3-8]. Yangın durumunda, tünel içindeki sıcaklık çok kısa bir süre içinde hızlı bir şekilde artabilmektedir. Bir yangın tarafından üretilen ısı, doğrudan yangın kaynağında 1200 °C'ye, tünelin üst kısmındaki havada 900 °C'ye ve en sıcak duman bölümlerinde 500–600 °C'ye kadar ulaşabildiği gözlemlenmiştir [9, 10]. Kaplama ve zeminin (özellikle yer altı suyu mevcutsa) ısı akış özellikleri, kaplamadaki gerçek sıcaklık dağılımını büyük ölçüde etkileyecektir. Yanma, ısı, yakıt ve oksijenin doğru oranlarda birleşmesiyle başlayan bir reaksiyondur. Kontrolsüz yanma ise yangın olarak adlandırılır. Yanma sırasında, alevin, yakıtın ve çevrenin etkileşimi esasen doğrusal değildir. Malzeme tünel gibi kapalı bir ortamda yanarsa, iki ana parametre yangın gücünü ve yangın hızını etkileyecektir. Bunlardan ilk parametre; kapalı ortamın ısınmasıdır. Bu durum, kapalı ortamda yükselen sıcak hava birikmesine neden olacaktır. Böylece, yüzeyler ve sıcak gaz tabakası ışınım yoluyla yakıt yüzeyine ısı transferi yaparak yanmayı hızlandıracaktır. İkinci parametre; ortam havasının girebileceği sınırlı alanlardan dolayı yanma için gereken oksijenin kısıtlanmasıdır. Böylece, maddenin yanma hızı ve çevreye verdiği ısı miktarı azalacak ve gazın yanma hızı artacaktır. "Kapalı alan yangını" terimi, kapalı bir alanda meydana gelen yangın için kullanılan bir terimdir. Tünelde meydana gelen yangınlar kapalı alan yangınları olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 1). Tünellerin kapalı yapısı, raylı sistem araçlarının doğal engellerden

etkilenmesini ve hava koşullarından zarar görmesini önlerken, diğer taraftan, olası bir yangın durumunda meydana gelebilecek tüm olumsuzluklara karşın gerekli tedbirlerin alınması son derece önemlidir.



Şekil 1. Bolu Dağı Tüneli içerisindeki yangın [11]

Tünel yangınlarına karşı yangın algılama ve alarm sistemleri 1960'lardan bu yana kullanılmaktadır, ancak özellikle 1999–2001 yılları arasında Avrupa'da meydana gelen tünel kazaları, tünel güvenlik sistemlerinin önemini artırmıştır. Özellikle son yıllarda, teknolojinin gelişmesiyle birlikte, olası bir yangını erken teşhis edebilen ve acil durum yönetimini eşzamanlı olarak sağlayabilen yangın algılama sistemleri üretilmiş ve kullanılmaktadır [12]. Öte yandan tünel yangınlarının erken teşhisi ve kontrolü, tünel yangın direnci ve teknik altyapının iyileştirilmesi gibi konularda gerekli çalışmalar hızlandırılmıştır [13-17]. Tünel güvenliği konusu, dünya çapında meydana gelen bir dizi büyük yangın nedeniyle de acil eylem planı içerisine alınmıştır. 1996, 2006 ve 2008 yıllarında üç büyük önemli yangın geçiren “*The Channel Tunnel*”-Fransa [18], yaşanan bu yangınlardan dolayı önemli yapısal hasarlar almıştır. Diğer demiryolu tünel yangınları arasında “*The Summit Tunnel*”-İngiltere yangını (1984), “*The Great Belt Tunnel*”-Danimarka TBM yangını (1994), Daegu metrosu-Güney Kore yangını (182 ölü), ve 2000 yılında Avusturya'nın Kaprun'daki föniküler demiryolu tünel yangını (155 ölü) yer almaktadır [19]. Meydana gelen bu yangınlara yanıt olarak, tünel yangını güvenliği konularının araştırılarak, yeni uygulama konuları önermek için bir dizi uluslararası girişimler başlatılmıştır [20].

Tünel yangınlarıyla ilgili olarak birçok araştırma yapılmış ve bu konuda literatür oldukça geniş bir yelpazede sunulmaktadır [21-29]. Ingason vd. [7], yangınlar sırasında tüneldeki hava akışı, sıcaklık, basınç ve duman üretimi gibi faktörleri inceleyerek, tünel yangınlarına karşı alınacak önlemleri belirlemişlerdir. Kodur ve Naser [30]

çalışmalarında, köprüler ve tüneller gibi kritik ulaşım altyapılarında yangın sorununu ele alan yapılan son araştırmaları incelemişler ve bu yapıların performansını etkileyen kritik faktörleri çalışma kapsamında tartışmışlardır. Köprü ve tünellerdeki yangın tehlikelerini azaltmak için önerilen ana stratejileri sunarak, pratik bir vaka çalışması aracılığıyla uygulanabilirliklerini göstermişlerdir. Demiryolu tünellerinde yangınların risk ve sonuçlarını değerlendirmede normal olarak kullanılan kriterleri ve "en kötü senaryo" yangınların evrimini tanımlayan uygun zaman-sıcaklık eğrilerinin seçimini gözden geçiren çalışmalarında Tarada ve King [1], püskürtme yangın koruma malzemeleri, çimento kaplamaları ve polipropilen liflerin eklenmesi vb. alternatif yangın koruma yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları incelemişlerdir ve ayrıca, sabit yangın söndürme sistemleri konusu ve bunların pasif yangın koruma önlemlerine bir alternatif veya ek olarak görülebilecekleri konusu tartışılmıştır.

Tüneli yangınlarında, risk değerlendirmesi için kullanılan modelleme teknikleriyle yangının boyutu hakkında bilgi edinilmesi ve tahliye prosedürleri ve güvenlik önlemlerinin geliştirilerek oluşabilecek hasarların minimize edilmesi hedeflenmektedir. Son yıllarda tünel yüzey sıcaklıklarının analizi, duman ve zararlı gaz etkileri/çeşitleri, yapı malzemelerinin davranışının modellenmesi ve yangın söndürme sistemleri konusunda ilerleme kaydedilmiştir. Tünel yangınlarının en önemli güvenlik yönlerinden biri, tasarım aşamasında duman yoğunluğunun/dispersiyonunun doğru tahmin edilebilmesidir [31]. Birçok tünel projesine yangın güvenliği açısından katkı sağlayan "Computational Fluid Dynamics" (CFD) analizi, yangın durumunda ısı ve duman emisyonlarının, kirlenmiş/zehirli gazların dağılımı ve yoğunluğunun hesaplanması, duman besleme elemanlarının ve rüzgârın etkilerinin de hesaba katılması için kullanılmaktadır. Bir tünelden yangın çıktığında, duman havalandırma hava akışının yönünde geniş bir alana yayılır ve yangın olayı sırasında tahliye ortamı yeterince güvenli olmayabilir. Bir tüneldeki havalandırma ekipmanı değiştirildiğinde, yeni havalandırma ekipmanının güvenliği ve ekonomik verimliliği önceden değerlendirilmelidir [32]. Ancak, deney yaparak yeni havalandırma ekipmanının doğrulanması maliyetli ve kullanışlı olmaması nedeniyle uygun değildir. Bu nedenle, sayısal bir simülasyon gerçekleştirerek bir tünelden yangın çıktığında tahliye durumunu tahmin etmek ve tünelin tahliye güvenliğini incelemek faydalı olabilmektedir [33, 34]. Yamamoto vd. [35] çalışmalarında, "Fire Dynamics Simulator" (FDS) [36, 37] yangın simülasyon yazılımını kullanarak, olası yangını yeniden oluşturmuşlardır. FDS bir tür akışkanlar dinamiği yazılımı olup, bu yöntemle; (i) tünel içi alev yayılması, (ii) yangının büyümesi, (iii) nesnelere arasındaki (gaz-katı) ısı transferi, (iv) tünelde kullanılan yangın söndürme sistemlerinin aktivasyonu ve (v) geliştirilen sistemle yangının söndürülmesi gibi konularda doğru tahminler yapılabilmektedir [25, 26, 32, 38]:

FDS programı hesaplarını her sayısal ızgaradaki her ayırık zaman adımında, her bir sayısal ızgara hücresi içindeki sıcaklık, yoğunluk, basınç, hız ve kimyasal bileşimi şeklinde gerçekleştirmektedir. Aynı zamanda, program kapalı katı yüzeylerin sıcaklığını, ısı akısını ve kütleli kayıplarını da hesaplamaktadır. FDS kodu, yangın akışı ile yönlendirilen CFD temelinde formüle edilmiştir [10].

Smokeview (SMW), üç boyutlu (3D) modelleme, zamanla değişen yangınların sayısal hesaplaması ve duman yayılmasının görselleştirilmesi sağlamaktadır. SMV, FDS ve "Consolidated Fire and Smoke Transport" (CFAST) [39] simülasyonlarının çıktılarını görüntülemek için kullanılan bir görselleştirme programıdır. Geliştirilen yazılım, sadece tünel yangın modellemesi için değil, aynı zamanda tüneldeki toksik gaz akışını ve insanların tahliyesini de kapsamaktadır. Tünel yangını: yanma maddesi ve yanma yöntemi gibi birçok bilinmeyen içerir karmaşık bir süreçtir. Önceki deneyimlere ve tam ölçekli yangın testlerine dayanarak, yangının büyüme ve azalma hızları,

ateşleme yerleri ve yangın boyutu vb. gibi bazı varsayımlar yapılabilmektedir. Bu analiz yöntemleriyle, tünelin yangın davranışını incelenerek, elde edilen veriler, tünelde olası bir yangın durumunda alınacak önlemleri belirlemek için kullanılabilir. Böylelikle, yolcuların güvenli şekilde tahliyesi için acil çıkış merdivenleri ve havalandırma açıklıklarının yeterliliği de belirlenebilir.

Gaziantep banliyö projesi (Gaziray) Raylı Sistem Hattı, Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) ile Gaziantep Büyükşehir Belediyesi arasında ortak bir girişim olup, Türkiye'nin Gaziantep şehrinde hizmet veren çevre dostu bir toplu taşıma sistemidir. Gaziantep şehir merkezinden yaklaşık 25 km uzaklıktaki Gaziantep-Nizip ilçesi arasında, raylı sistem kullanarak banliyö taşımacılığı hizmeti sunan bir ulaşım projesidir. Projenin amacı, kentsel ulaşımı kolaylaştırmak ve trafiği azaltmak için modern bir toplu taşıma sistemi sağlamaktır. Toplam uzunluğu 25.532 km olan hatta ve Gaziray hattı üzerinde tamamı engelli erişimine uygun olan ikisi yer altında olmak üzere toplam 16 istasyonu olan hat, 5 Kasım 2022'de hizmete girmiştir (Tablo 1). İZBAN, Marmaray ve Başkentray'dan sonra Türkiye'nin dördüncü banliyö treni sistemidir [40]. Hattın tüm araçları elektrikle çalışmakta ve çevreye hiçbir zararlı gaz salınımı yapmamaktadır. Hattın işletmesi, enerji tasarrufu sağlamak amacıyla akıllı sistemler kullanılmaktadır. Hat, modern bir güvenlik sistemi ile donatılmıştır. Tüm istasyonlarda "Closed-Circuit Television" (CCTV) kameralar, yangın algılama ve söndürme sistemleri, acil durum anonsları ve acil durum çıkışları bulunmaktadır. Ayrıca, hattın güvenliğini sağlamak için her vagonun kapıları ve pencereleri alarm sistemleri ile donatılmıştır.

**Tablo 1.** Gaziray istasyon bilgileri [40]

Sıra	İstasyon	İlçe	Tür	İstasyonlar arası uzaklık	İlk istasyona olan uzaklık
1	Başpınar		Hemzemin	0+00 km	Başlangıç
2	OSB-3		Hemzemin	0+73 km	0+73 km
3	OSB-4		Hemzemin	1+01 km	1+74 km
4	Dülük		Hemzemin	2+37 km	4+11 km
5	Stadyum		Hemzemin	3+27 km	7+38 Km
6	Beylerbeyi		Hemzemin	0+91 km	8+29 km
7	Fıstıklık		Hemzemin	0+93 km	9+22 km
8	Selimiye	Şehitkamil	Hemzemin	1+64 km	10+86 km
9	Adliye		Yeraltı	1+85 km	12+71 km
10	Topraklık		Yeraltı	1+71 km	14+42 km
11	Mücahitler		Hemzemin	0+83 km	15+25 km
12	Gaziantep Garı		Hemzemin	1+07 km	16+32 km
13	Göllüce		Hemzemin	2+02 km	18+34 km
14	Seyrantepe		Hemzemin	2+13 km	20+47 km
15	Mustafa Yavuz		Hemzemin	0+79 km	21+26 km
16	Taşlıca		Hemzemin	2+28 km	23+54 km

Gaziray Raylı Sistem Hattı, yer altında 3.634,000 km uzunluğunda bir güzergaha sahip olup projesinde iki adet yer altı istasyonu bulunmaktadır (Adliye ve Topraklık İstasyonları). Tünel yapısı aç-kapa şeklinde tasarlanmıştır ve her iki uçta da yüzeye açık portallar mevcuttur. Aç-kapa tünel yapısında 14 adet 4.8 m<sup>2</sup> (1.2 x 4 m) havalandırma açıklığı yer almaktadır. Ayrıca, tünelde 9 adet acil çıkış merdiveni de bulunmaktadır. Gaziray Raylı Sistem Hattı boyunca yer alan tünellerden, yolcuların tamamının, "National fire protection association" (NFPA) 130 [41] kurallarına uygun olarak, 4 dakika içinde perondan tahliye edilebileceği ve 6 dakikada güvenli bir noktaya ulaşabileceği varsayılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, Gaziray Raylı Sistem Hattında bulunan tünellerde meydana gelebilecek olası tren yangını durumunda, tünel yapısının yangından etkilenme seviyesi ve bu etkinin değerlendirilmesidir. Kritik hız; yangın esnasında ortaya çıkan duman ve yanma ürünü zehirli gazların ters katmanlaşmadan istenilen yöne itilmesi için gerekli olan minimum hava hızıdır. Yapısal bütünlüğün bozulmadan,

çevresel kontrol sistemlerinin çalışmasına olanak sağlayarak ve insan tahliye yönünün ters yönünde kritik hava hızı sağlanarak; gerekli havalandırma stratejisi ve kapasitesinin belirlenmesi hedefi çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. “Subway Environmental Simulation” (SES) [42] paket programı kullanılarak, hat bilgisi, tren ve yangın bilgileri tanımlanarak, yangın bölgesinde tünel içyapısının ulaştığı süreye bağlı sıcaklık tayin gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, öncelikle tünelde yer alan havalandırma açıklıklarına yerleştirilecek tünel havalandırma fanlarının efektif kullanılmasının mümkünlüğü irdelenmiştir. Bunun yanında tünellere yerleştirilen jet fanların kullanımı değerlendirilmiştir. CFD simülasyonu sınır değerleri, bu çalışmada verilen fan adet kapasiteleri kullanılarak hazırlanan SES simülasyonu analizinden alınmıştır. CFD simülasyonu ile zamana bağlı olarak sıcaklık, görüş mesafesi ve hava hızı dağılımları gösterilerek, sunulan bu araştırma makalesi ile belirlenen havalandırma fan kapasitelerin yeterliliği incelenerek değerlendirilmiştir.

## II. MODELLEME

### 2.1 Trenlerin Modellenmesi

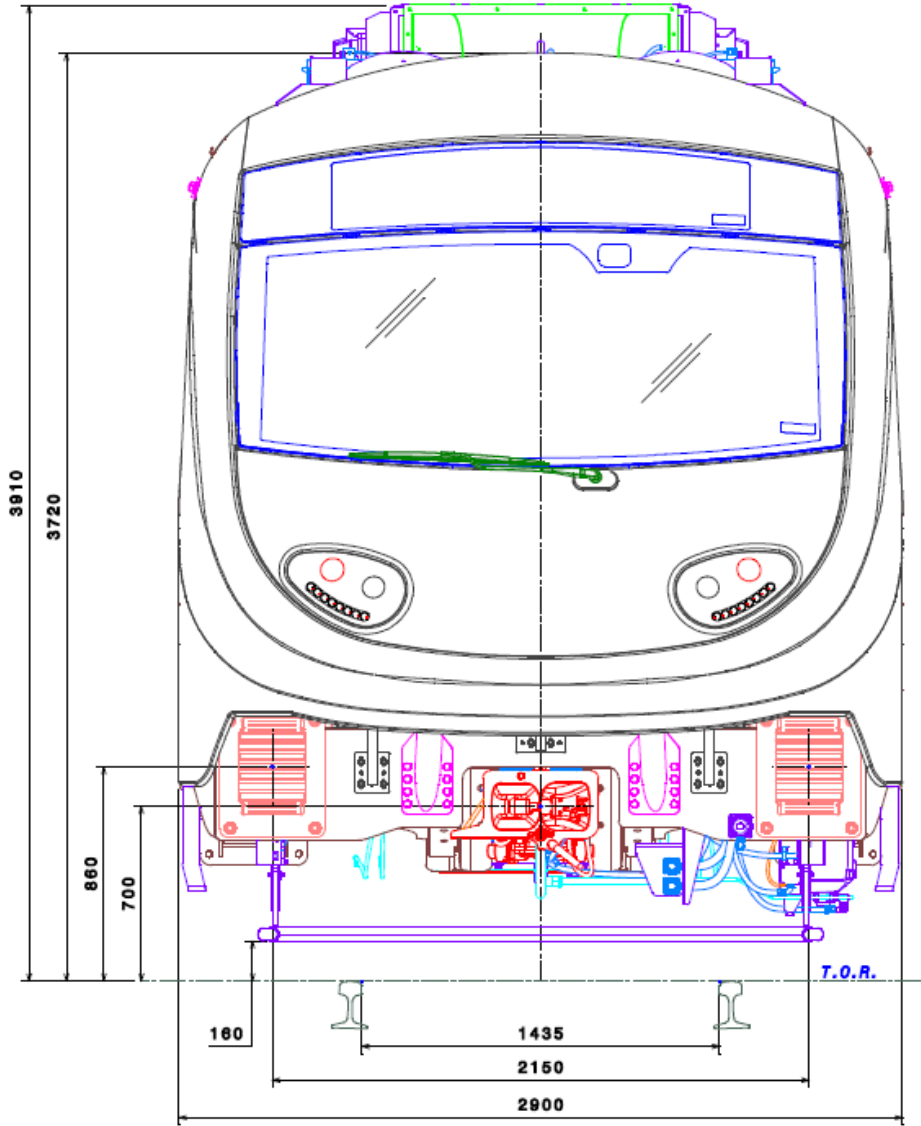
Tünel havalandırma sistemi kapasitelerinin belirlenmesi için yapılan yangın simülasyonlarında, yolcu ve yük trenlerinin, simülasyon yapılabilmesi için belirlenen tünel, makas veya geceleme hattı bölgelerinde sabit durdukları varsayılmaktadır. Tek boyutlu olarak modellenen trenler, bu bölgelerde, zamana bağlı olmayan ısı kaynakları olarak düşünülmektedir. Simülasyonlarda kullanılan trenlere ait özellikler Tablo 2’de ve araç ön görünümü Şekil 2’de verilmiştir.

### 2.1 Analiz Programı

Bu çalışmada, tünel havalandırma simülasyonları SES v4.1 programı [42] kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SES programı tek boyutlu bir analiz programı olup, metro ve yeraltı ulaşım sistemlerinin tünel havalandırması tasarımlarına yardımcı olmak amacıyla kullanılan bir paket programdır. SES programının tek boyutlu analiz diye nitelendirilmesinin sebebi ise, hava hızı ve sıcaklığı gibi parametrelerin tünellerin eninde ( $y$  – doğrultusunda) ve düşey yönde ( $z$  – doğrultusunda) değişmediği, sadece tünel boyunca ( $x$  – doğrultusunda) değiştiğinin varsayılmasıdır. Tünelin eni ve yüksekliği genelde tünellerin boyuna oranla çok daha kısa olduğu için parametrelerin hacimsel olarak değiştiği varsayılmaktadır. Dolayısıyla, 3D analizlere göre, SES programı basitleştirilmiş sonuçlar verebilmektedir. SES programının 3D analizlere karşı bir başka avantajı ise, uzun bir tünel sistemini bir arada çözebilmesinin mümkün olabilmesi ve zamansal tasarruf sağlanmaktadır.

**Tablo 2.** Yolcu ve yük trenlerinin özellikleri

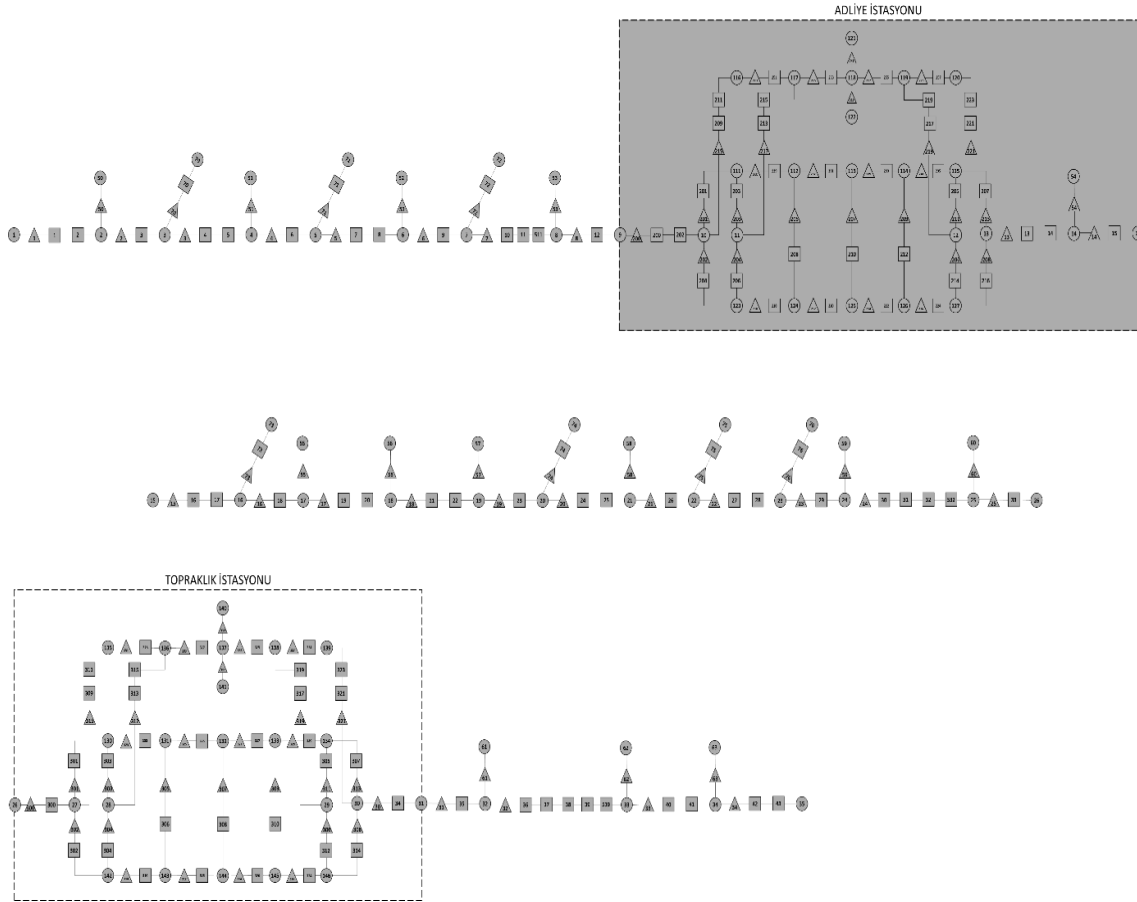
Özellik	Değer
Yolcu treni yangın yükü	12 Mw
Yük treni yangın yükü	100 Mw
Konvektif ısı katsayısı	0.8
Konvektif ısı transferi (yolcu treni)	9,6 Mw
Konvektif ısı transferi (yük treni)	80 Mw
Tren kesit alanı	10.7 m <sup>2</sup>
Tren uzunluğu (yük treni)	460 m
Tren uzunluğu (yolcu treni)	180 m
Tren çevre uzunluğu	-
Trenin yüzeysel sürtünme katsayısı (yolcu treni)	0.023
Trenin yüzeysel sürtünme katsayısı (yük treni)	0.1
Sürüklenme katsayısı (yolcu treni)	0.55
Sürüklenme katsayısı (yük treni)	0.56

**Şekil 2.** Araç ön görünümü

### III. TÜNEL HAVALANDIRMA SİSTEMİ TASARIMI

#### 3.1 SES Modeli

Simülasyon modelinin oluşturulması aşamasında, tünel ve istasyon mimari projeleri basitleştirilerek, bu alanlar SES programında kullanılacak olan tek boyutlu elemanlar halinde ifade edilmiştir. Ray üstü kot değerlerinin, demiryolu hatlarında belirli sınırlarla sınırlanmasının ana nedenleri, yolcu konforunu ve seyir güvenliğini sağlamaktır. EN 13848-Hat Geometrik Kalitesi şartnamesi [43], hat profilinde meydana gelen kot değişikliklerinin belirli bir hat uzunluğu boyunca sınırlamaları konusunda öneriler sunmaktadır. Hat profilindeki değişiklikler, tren hızına, değişimin büyüklüğüne ve bu değişimin meydana geldiği hat uzunluğuna bağlı olarak hat üzerinde farklı kuvvetlerin oluşmasına neden olur. Bu değişikliklerin sınırlanması, yolcu konforunu etkileyen titreşimleri azaltmayı ve seyir güvenliğini sağlamayı amaçlamaktadır. Tünel kesitleri ve ray üstü kot değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir. Tablodaki değerler ortalama deniz seviyesine göre yükseklik değerleri olup, Gaziantep ili merkez rakım değeri ~850 m olması durumu göz önünde bulundurulmuştur. Senaryo oluşturulurken tünelin, 15.827,700 km konumundan, hattın Mücahitler istasyonu yönüne doğru değişken olmak üzere 15.827,700 km~15.920,000 km arası M-M ve N-N kesitleri dikkate alınmıştır. Hazırlanan simülasyon modelinin ağ şeması mimik diyagramı (MD) Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. SES simülasyon modelinin ağ şeması MD



**Tablo 3.** Tünel kesitleri ve ray üstü kot değerleri

Kesitler	Ray üstü kot değerleri (m)
C-C	1.086,100
D-D	979,600
E-E	882,300
F-F	803,600
G-G	819,000
H-H	915,00
I-I	1.008,100
J-J	763,100
K-K	757,600
L-L	757,600
M-M	757,600
N-N	757,600
O-O	757,600
P-P	753,400
R-R	752,300
S-S	752,800

### 3.2 Sıcaklık Kriterleri

Yolcuların bulunduğu alanlar ve tahliye güzergahında, NFPA 130, Tablo B.2.1.1'e [41] göre 60 °C den düşük olması durumu dikkate alınarak tünel tahliye yönünde maksimum sıcaklık 50 °C olarak belirtilmiş olsa da NFPA 130 standardı gereğince, tahliye yollarında insanların maruz kalınan sıcaklığa bağlı olarak belirli bir süre içerisinde tahliyeyi sürdürebilmesi mümkündür. Bu çalışmada, Tablo 4'te belirtilen aralıklar göz önünde bulundurmuş olup dumansız bir sıcaklık koşulu olduğu dikkate alınmıştır.

**Tablo 4.** Acil durum tahliye esnasında süreye bağlı maksimum maruz kalınan süresi

Maruz kalınan sıcaklık (°C)	Maruz kalınan süre (dakika)
80	3.8
75	4.7
70	6.0
65	7.7
60	10.1
55	13.6
50	18.8
45	26.9
40	40.2

#### 3.2.1. Yapısal sıcaklık kriterleri

Sıcaklık-süre bazlı grafikler, genellikle iki bileşenden; i) sıcaklık süresi eğrisi, ii) malzeme performans eğrisi, oluşmakta olup, yapının yangın durumunda sıcaklığa maruz kalma süresini ve yapının bu sıcaklık profil seviyelerine karşı gösterdiği performansı gösteren bir araçtır. Bu grafik, yangın mühendisliği ve yapısal tasarım alanlarında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Değerler, genellikle ısı yayılımına dayalı yangın testlerinden elde edilen verilere dayanmaktadır. Yapının sıcaklık-süre bazlı performansı, malzemelerin yangın sırasında yapının işlevselliğini sürdürme kapasitesini belirlemektedir.

### 3.3 Hava Hızı Kriterleri

Amerika Birleşik Devletleri hava bürosu tarafından, rüzgâr kuvvetini göstermek için kullanılan Beaufort ölçeği, 0'dan 12'ye kadar kademelendirilmiş bir tablodur ve Subway Environmental Design Handbook'ta, Tablo 2.13'te verilmektedir [44]. Beaufort ölçeğinde tavsiye edilen acil durumdaki maksimum hava hızı 2500 fpm (12.700 m/s)

olarak ifade edilmektedir. Normal koşulların üst limiti, 2200 fpm (11.176 m/s) hava hızı acil durum koşullarında alt limit olarak kabul edildiği için, acil durum koşullarında insanların maruz kalacağı maksimum hava hızı 11 m/s olarak kabul edilmiştir. Tahliye süresi boyunca havalandırma tasarımının, yolcu tahliyesini mümkün kılmasıyla birlikte tünel çeperine gelen sıcaklığın yapı formuna zarar vermemesi ve formunu en az 1 saat boyunca koruyabilmesi, havalandırma sisteminin işlevini yerine getirme olanağı sağlayacaktır. Yolcu güvenliği mutlak öncelik olmasıyla birlikte tesisin kısa bir süre sonra yeniden işletilebilir olması amaçlanarak, yapı güvenliğinin korunması dikkate alınmıştır. Bu çalışmada ele alınan konuya ilişkin hava hızı kriterleri Tablo 5’te verilmektedir.

**Tablo 5.** İstasyon ve tünel bölgesi yangın durumu hava hızı kriterleri

Konum	Minimum	Ortalama	Azami
Platform (yatay)	-	3 m/s	11 m/s
Merdivenler	-	1.8 m/s	11 m/s
Tüneller	0.75 m/s	-	11 m/s
İstasyon girişi	-	-	11 m/s
Havalandırma bacaları	-	5 m/s	11 m/s
Kaldırım ızgaraları	-	2.5 m/s	11 m/s
Kaldırımdan 3 m ve daha yuksekteki menfezler	-	5 m/s	11 m/s

### 3.4 Yangın Senaryoları

Acil durum havalandırma sistemi, tünelde veya istasyonda yangın gibi olası bir acil durum koşulunda yolcuların güvenli bir biçimde tahliye edilmesini ve itfaiyenin yangınla mücadele ekipleri ile arama kurtarma ekiplerinin müdahalelerini yapabilecek ortam koşullarını sağlamak için tasarlanmaktadır. Yapısal formun, sıcaklık karşısında dayanımı bu sistemlerin sağlıklı çalışabilmesi için önemlidir. Acil durum havalandırma sisteminin kapasitesine; (i) tünel içi tren yangını senaryosu ve (ii) istasyon içi tren yangını senaryosu olmak üzere toplam iki tip senaryo etki etmektedir:

İşletim sırasında, olası bir tren yangınının gerçekleşmesi durumunda, eğer tren halen hareket edebilir durumda ise, ilk tercih bu trenin bir sonraki istasyona kadar gitmesini sağlamak ve yolcu tahliyesini burada gerçekleştirmektir. Fakat bazı durumlarda, yanmakta olan tren tünelde hareketsiz kalabilmektedir. Bu durumda insanlar; yangının tüneldeki konumuna ve yanan vagonun trendeki konumuna göre en yakın istasyon, tünel portalı veya acil kaçış merdivenlerine doğru yürümesi ve tahliyesi gerekmektedir. Trende yangın çıkması ve yanan trenin tünelde durması çok küçük bir olasılık olsa da sonuçları can ve mal güvenliği açısından büyük olacağından, uluslararası standartlar gereğince dikkate alınması zorunlu kılınmıştır.

Bu makale kapsamında verilen yangın senaryosu çalışmalarında, yangının yalnızca bir trende ortaya çıktığı ve işletmede olan diğer trenlerin yangın bölgesinden uzaklaştığı varsayımı yapılmıştır. Yangının konumuna göre, portalda olan yangın vakasının dışındaki trenler tünelde ise yangından uzaklaşarak en yakın istasyonda tahliyenin gerçekleştiği veya tünel dışına çıktığı kabulü yapılmaktadır. Ayrıca henüz tünele giriş yapmamış trenlerin ise hareket doğrultusunu ters istikamete doğru yönlendirdiği ve yangından uzaklaştığı kabulü yapılmıştır. Tünel içi araç yangınlarında en kritik senaryo, özellikle kesit alanın, hat eğiminin ve yangın yükünün yüksek olduğu konumlarda meydana gelmektedir. Tünel içi tren yangınlarında, tünel havalandırma fanları devreye girerek; “itme-çekme” prensibi ile dumanı bir yönde iterken, yolcular/personeller diğer yönde dumandan etkilenmeden tünelden çıkabilmesi hedeflenmektedir. Yanan vagonun trendeki konumu ve tahliye yönü havalandırma fanlarının yönünü etkilemektedir. Tünel acil durum havalandırma simülasyon analizinde; yük treni yangın yükü (Tablo 2, 100 Mw),

yolcu treni yangın yükünden (Tablo 2, 12 Mw) fazla olması sebebiyle öncelikle yük treni dikkate alınmıştır. Yük treni yangın senaryo simülasyon analizleri, tünel havalandırma fanlarının kapasitesini belirlemede yeterli olsa da ilave olarak yolcu treni için de simülasyon analizleri yapılmıştır. Tünel havalandırma senaryoları, üç bölgeye; (i) Tünel Portalı-Adliye, (ii) Adliye-Topraklık ve (iii) Topraklık-Tünel Portalı, ayrılmış ve her bir bölge için tahliye yönlerine göre iki farklı senaryo olmak üzere, yük ve yolcu trenleri için ayrı ayrı toplam 6 senaryo oluşturulmuştur. Analiz edilen yangın senaryoları Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 6.** Yangın senaryoları

Senaryo No	Tren	Bölge	Konumu (km)	Tahliye yönü
SN-01	Yük	Tünel Portalı-Adliye	13.900	Tünel Portalı
SN-02	Yük	Tünel Portalı-Adliye	13.453	Adliye
SN-03	Yük	Adliye-Topraklık	15.209	Adliye
SN-04	Yük	Adliye-Topraklık	14.775	Topraklık
SN-05	Yük	Topraklık-Tünel Portalı	15.708	Tünel Portalı
SN-06	Yük	Topraklık-Tünel Portalı	16.196	Topraklık
SN-07	Yolcu	Tünel Portalı-Adliye	13.900	Tünel Portalı
SN-08	Yolcu	Tünel Portalı-Adliye	13.453	Adliye
SN-09	Yolcu	Adliye-Topraklık	15.209	Adliye
SN-10	Yolcu	Adliye-Topraklık	14.775	Topraklık
SN-11	Yolcu	Topraklık-Tünel Portalı	15.708	Tünel Portalı
SN-12	Yolcu	Topraklık-Tünel Portalı	16.196	Topraklık

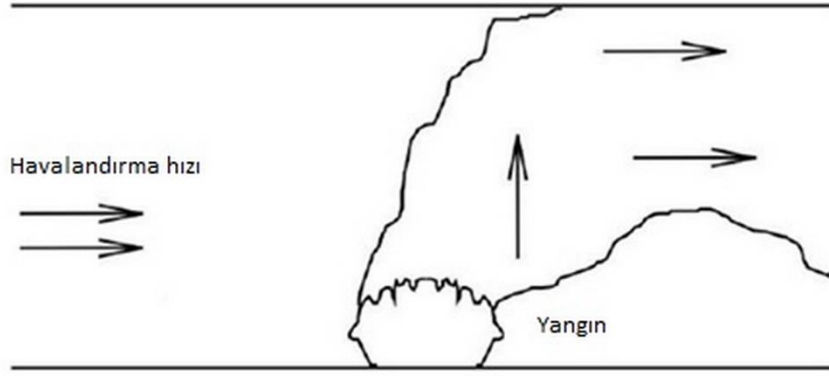
Bu çalışmada, yanan trenin bulunduğu bölgedeki fanların, yüksek ısı sebebiyle iptal durumu SN-13 ve SN-18 arasındaki senaryolarda irdelenmiştir. Yangın bölgesine denk gelen fanların hizmet dışı tutularak, diğer fanlarla sağlanan hava hızları da detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

### 3.5 Havalandırma Fanları

Tünel havalandırma sistemi, yangının tren üzerindeki yerine ve trenin tünel içerisindeki yerine bağlı olarak dumanı her iki yönde de (tersinir) itebilme kapasitesine sahip olmalıdır. Dolayısıyla, tünel havalandırma fanları tersinir olmalı ve emme yönündeki hava debi değeri ile basma yönündeki hava debi değerleri olabildiğince birbirine eşit performansta olmalıdır. Çalışmada, jet fanların verimliliği %90 olarak ve havalandırma fanları 1 saat ve 250 °C sıcaklığa kadar dayanıklı olduğu kabulü yapılmıştır.

### 3.6 Kritik Hız

Tünel içerisinde oluşabilecek olası bir tren yangını durumunda, trenden duman ve zehirli gazlar tüm tünele yayılacak şekilde açığa çıkmaktadır. Eğer tünel havalandırma sistemleri, trenden yayılan dumanı tünel içerisinde bir yöne doğru yönlendirmede yeterli olamazsa, duman ve gazlar tüm tüneli sararak yolcuların güvenliğini tehdit edebilmektedirler. Kritik hız, trenden yayılmakta olan sıcak ve zehirli gazları, tünel içerisinde sadece bir yöne doğru yönlendirmek için, dolayısıyla diğer yönde yolcular için güvenli bir kaçış yolu sağlamak için, gerekli olan en düşük hava hızı değeridir (Şekil 4). Fanlı/Cebri havalandırma ile kritik hızın sağlanması durumunda, dumanın geri katmanlaşması oluşmayacaktır.



Şekil 4. Kritik hızın sağlanması durumundaki duman ve sıcak gazın dağılımı

Kritik hız değeri; ( $V_c$ ), yangın yükü; ( $Q$ ), ortam sıcaklığı; ( $T$ ), tünel kesit alanı; ( $A$ ), tünel eğimi; ( $grade$ ), tünel yüksekliği; ( $H$ ), ve tren kesit alanı gibi birçok değişkene bağlıdır. Eş. (1) bağıntısıyla verilen kritik hız değeri kritik hız ve yangın bölgesindeki duman sıcaklığı denklemlerinin eş zamanlı olarak çözülmesi sonucunda elde edilir:

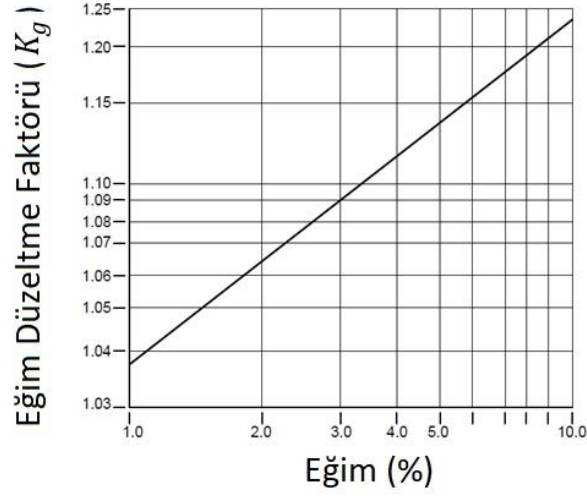
$$V_c = K_1 K_g \left( \frac{g H Q}{\rho C_p A T_f} \right)^{1/3} \quad (1)$$

Burada,  $K_1$  = birimsiz sabit olup değeri 0.606'dır.  $K_g$  = eğim düzeltme katsayısını,  $C_p$  = sabit basınçlı havanın özgül ısı katsayısını,  $T_f$  = yangın bölgesi duman sıcaklığını göstermektedir.  $T_f$  ve  $K_g$ 'nin formülleri aşağıda Eş. (2) ve Eş. (3) bağıntılarıyla verilmektedir:

$$T_f = \frac{Q}{\rho C_p A V_c} + T \quad (2)$$

$$K_g = 1 + 0.0374(grade)^{0.8} \quad (3)$$

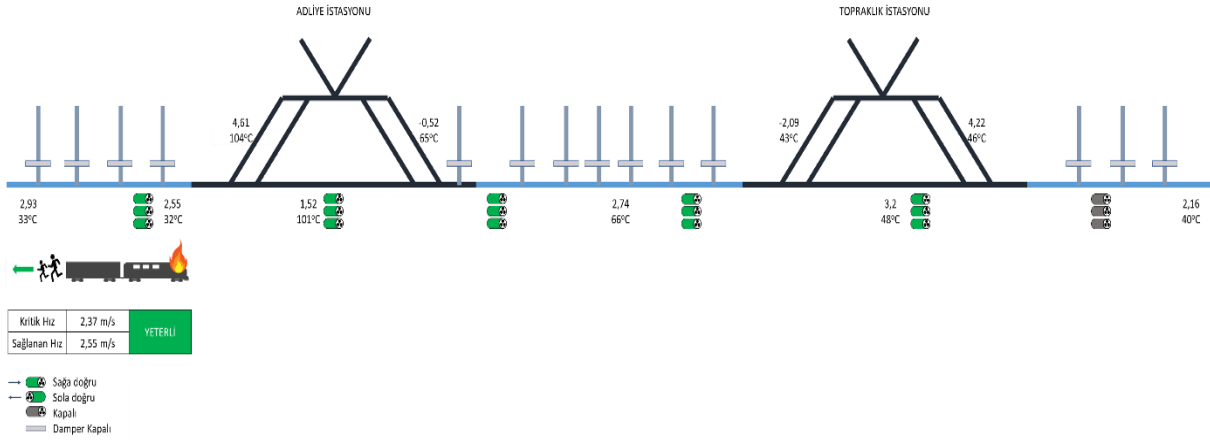
Burada,  $\rho$  = havanın yoğunluğunu,  $grade$  = yüzde cinsinden tünelin eğimini vermektedir. Eğer tünel içerisinde yangın olan bölgede havalandırma yönü yokuş yukarı veya tünel eğimi düz (= %0) ise  $K_g = 1$ 'dir. Havalandırma yönü yokuş aşağı ise  $K_g$  değişkeni için Eş. 3 denklemini kullanılarak 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. Şekil 5'te eğim düzeltme katsayısının eğimle değişim grafiği verilmektedir [45].



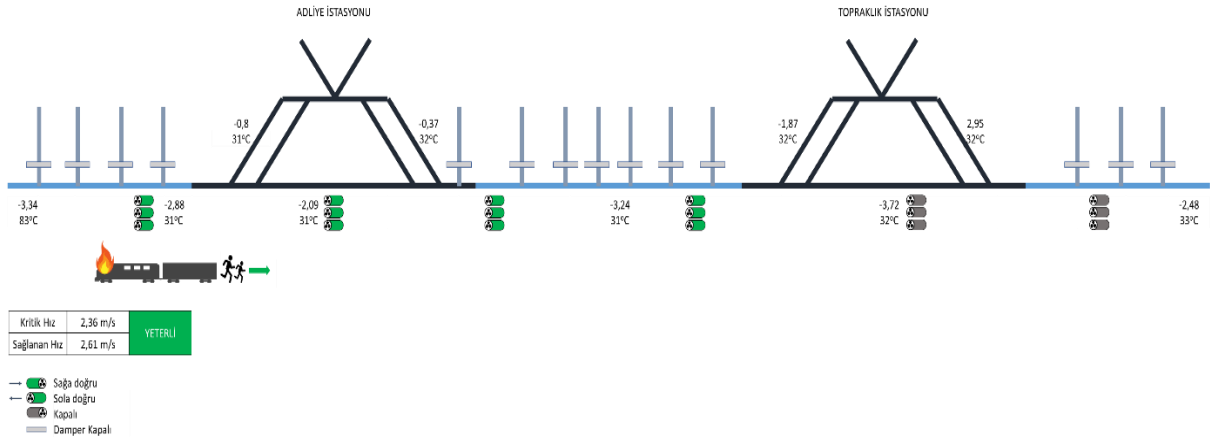
Şekil 5. Eğim düzeltme katsayısının eğimle değişim grafiği [45]

#### IV. ANALİZ BULGULARI VE TARTIŞMA

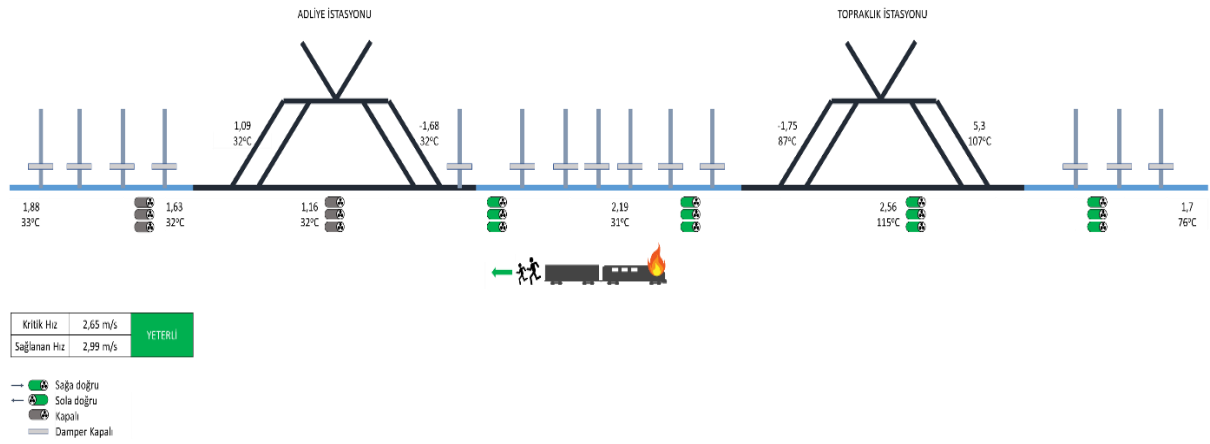
Başarılı/geçerli senaryo sonuçlarının elde edildiği nihai fan adedi ve kapasitesi ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçları bu bölüm kapsamında incelenmiştir. Sonuçlarda belirli bölgeler için hava hızı ve sıcaklık bilgisi verilmiştir. Acil kaçış yönünün tersi yönünde kritik havalandırma hızı sağlanması durumunda, jet fan kapasiteleri yeterli görülmüştür. Böylece, tahliye yönüne doğru, duman ve sıcak gazların ilerlemesi mümkün olmayacaktır. Tahliye yönünde yer alan acil kaçış merdivenleri için bu bölgelere duman yönelimi olmaması sebebiyle ilave bir basınçlandırma gereksinimi bulunmamaktadır. Normal işletme ve trafik sirkülasyonunun fazla olduğu sıkışık işletme durumlarında tünel sıcaklıklarını bertaraf etmek adına ve tünellerde oluşan kirli havanın veya yangınla mücadele sonunda tünellerde kalan soğuk dumanın deşarj edilmesi için tünel havalandırma fanlarının (TVF) shaftlarına toplamda 36 m<sup>3</sup>/s kapasiteli aksiyel fanlar yerleştirilerek bu aşamalarda çalıştırılacaktır. Üstün performanslı bir hava akışı işlemi yerine getirerek, ortamdaki havanın kontrolünü en iyi biçimde sağlayan aksiyel fanlar, ilgili alanda aktive olduklarında, basınç farkının yardımıyla eksel yönde bir hava dengesi oluştururlar. Ele alınan makale çalışmasında, elde edilen analiz sonuçlarındaki yangın konumuna ve tahliye yönlerine göre havalandırma ekipmanlarının pozisyonları Tablo 7' de verilmektedir. Yangın bölgesinde fanların iptal olması durumunda yük treni kritik hız analizi yangın senaryolarına göre sonuçları Şekiller 6–17 arasında verilmekte olup havalandırma tasarımı için yolcu tahliyesini ve oluşan hava gazlarına ait sıcaklık ve hız bilgilerini göstermektedirler.



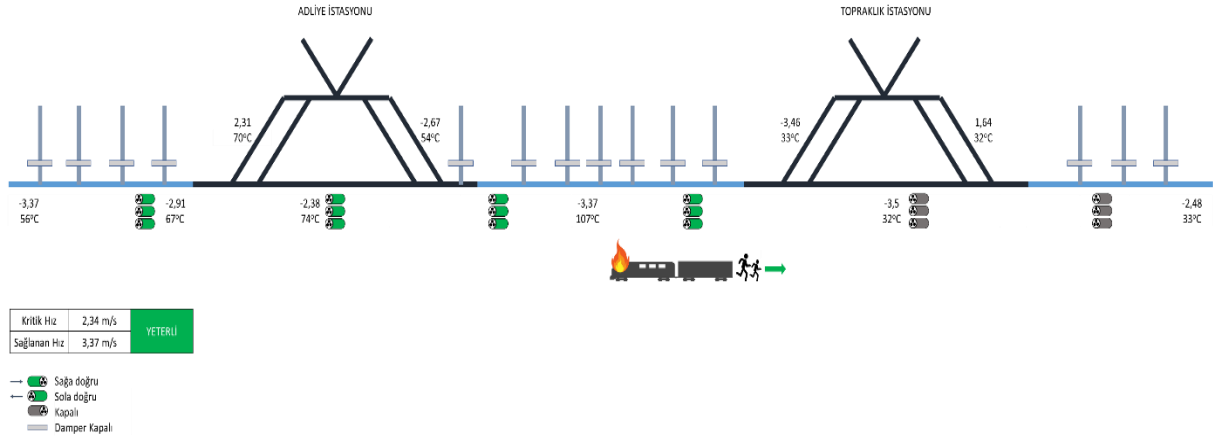
Şekil 6. SN-01: Tünel Portalı - Adliye İstasyonu Arası Yük Treni Yangını - Tahliye Yönü: Tünel Portalı



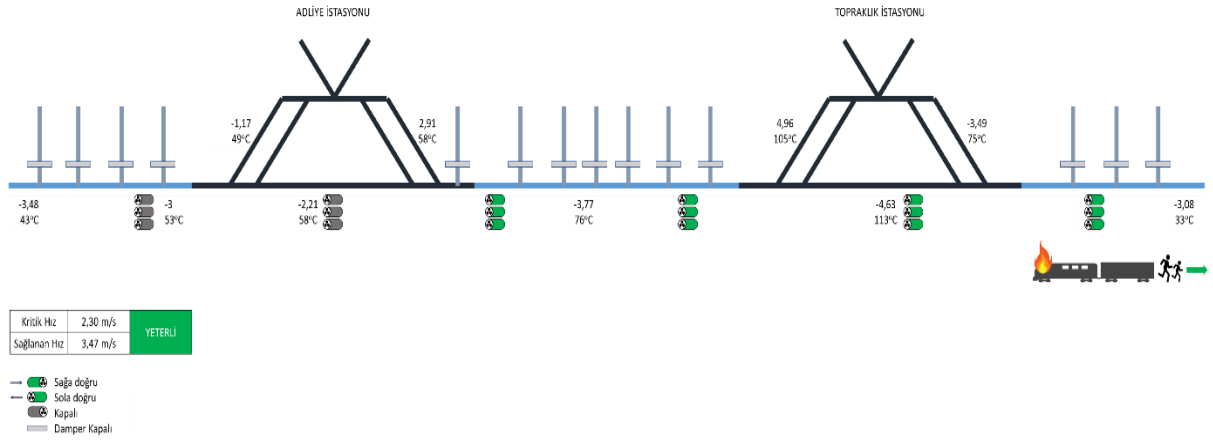
Şekil 7. SN-02: Tünel Portalı - Adliye İstasyonu Arası Yük Treni Yangını - Tahliye Yönü: Adliye İstasyonu



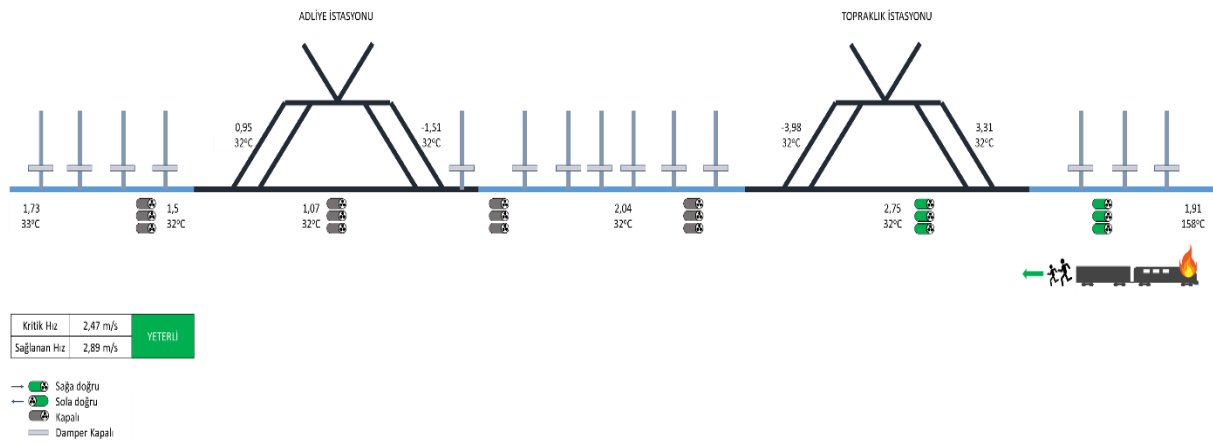
Şekil 8. SN-03: Adliye – Topraklık İstasyonları Arası Yük Treni Yangını - Tahliye Yönü: Adliye İstasyonu



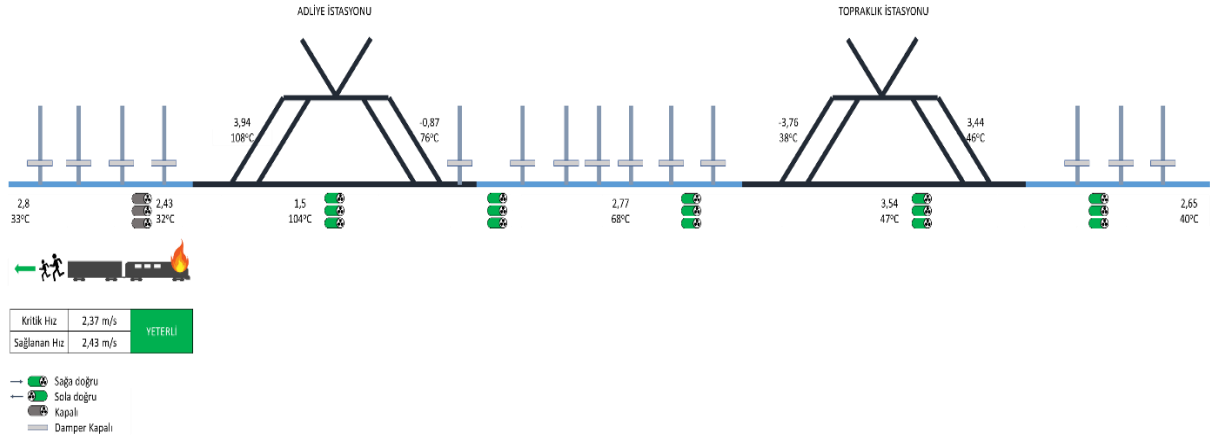
Şekil 9. SN-04: Adliye – Topraklık İstasyonları Arası Yük Treni Yangını - Tahliye Yönü: Topraklık İstasyonu



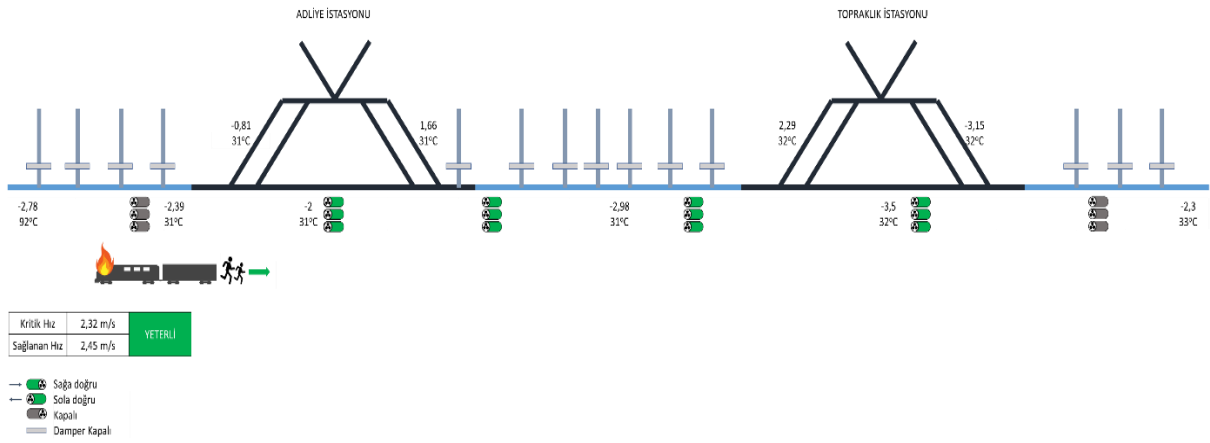
Şekil 10. SN-05: Topraklık İstasyonu - Tünel Portalı Arası Yük Treni Yangını - Tahliye Yönü: Tünel Portalı



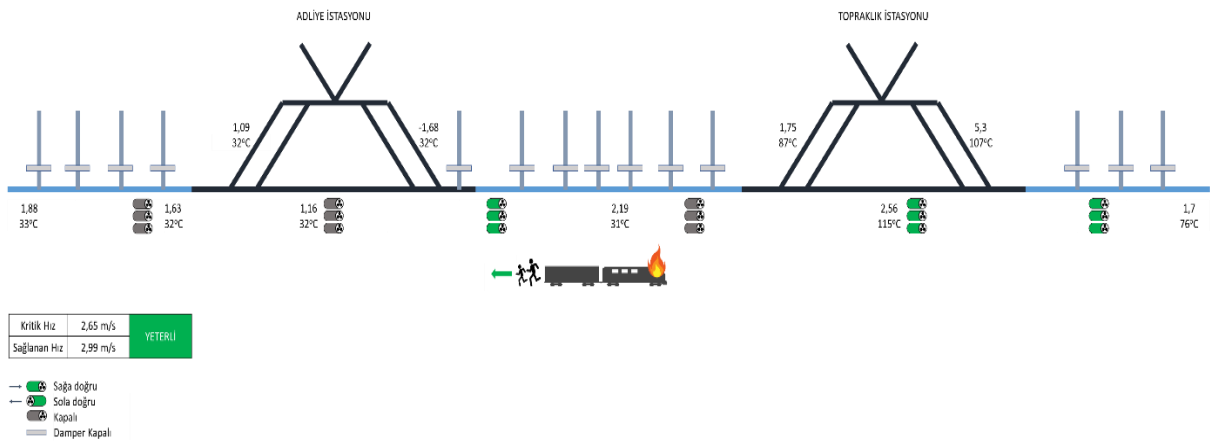
Şekil 11. SN-06: Topraklık İstasyonu - Tünel Portalı Arası Yük Treni Yangını - Tahliye Yönü: Topraklık İstasyonu



Şekil 12. SN-07: Tünel Portalı - Adliye İstasyonu Arası Yolcu Treni Yangını - Tahliye Yönü: Tünel Portalı

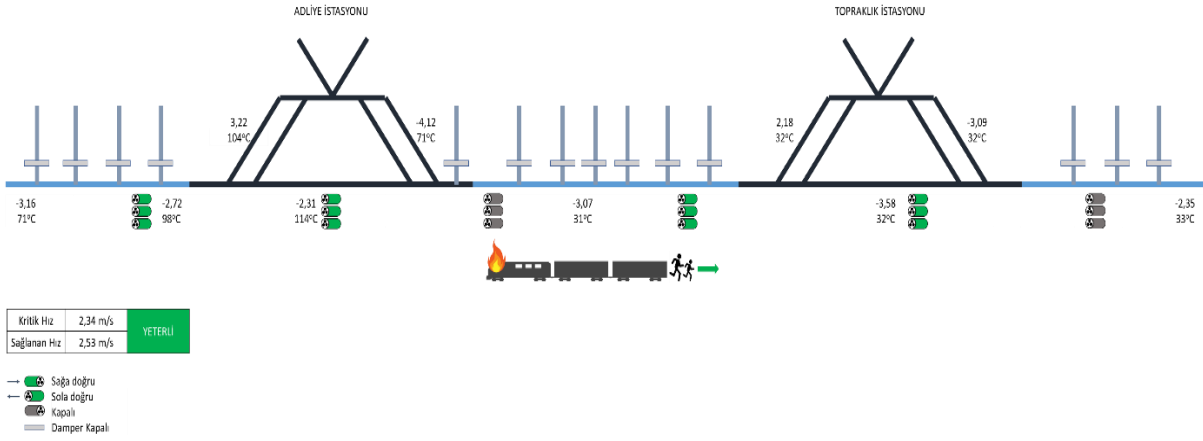


Şekil 13. SN-08: Tünel Portalı - Adliye İstasyonu Arası Yolcu Treni Yangını - Tahliye Yönü: Adliye İstasyonu

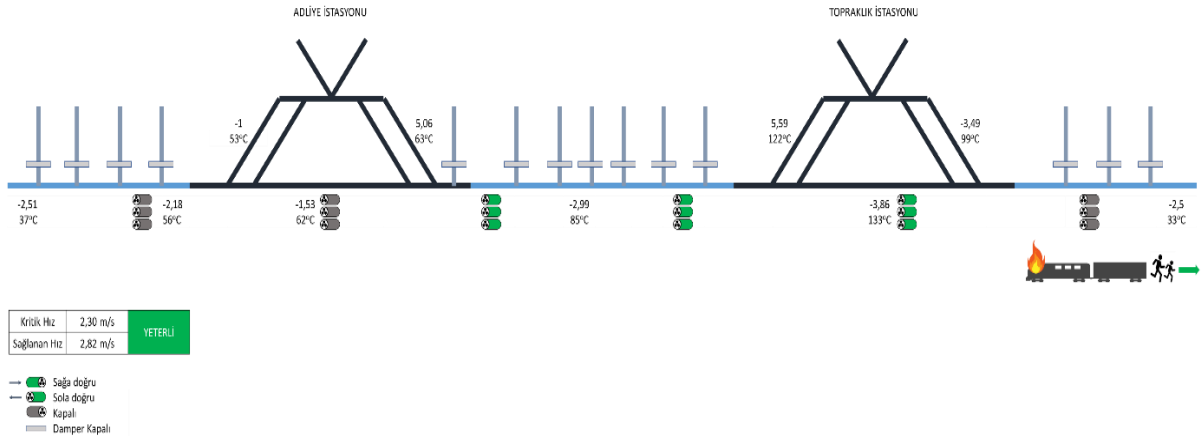


Şekil 14. SN-09: Adliye – Topraklık İstasyonları Arası Yolcu Treni Yangını - Tahliye Yönü: Adliye İstasyonu

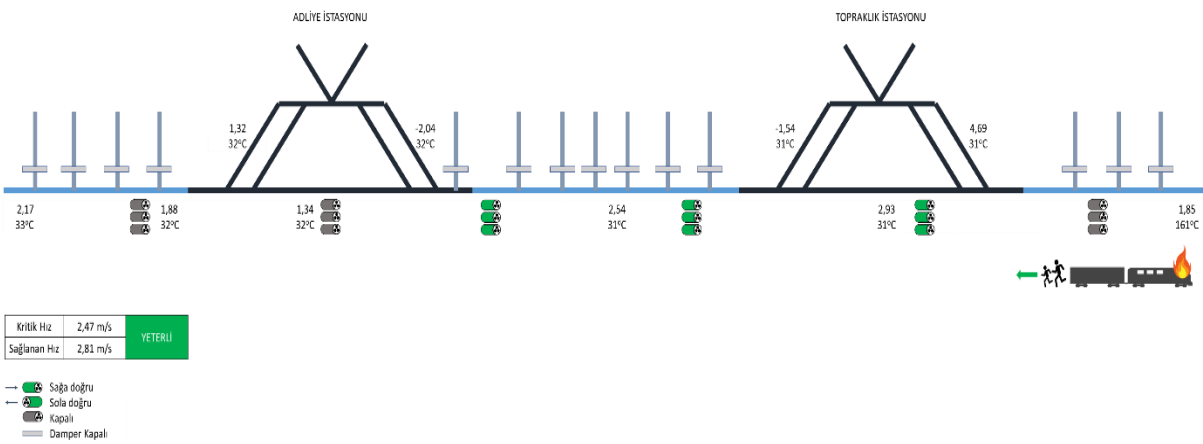




Şekil 15. SN-10: Adliye – Topraklık İstasyonları Arası Yolcu Treni Yangını - Tahliye Yönü: Topraklık İstasyonu



Şekil 16. SN-11: Topraklık İstasyonu - Tünel Portalı Arası Yolcu Treni Yangını - Tahliye Yönü: Tünel Portalı



Şekil 17. SN-12: Topraklık İstasyonu - Tünel Portalı Arası Yolcu Treni Yangını - Tahliye Yönü: Topraklık İstasyonu

**Tablo 7.** Yangın senaryoları ve oluşturulan havalandırma stratejileri

Yangın Konumu	Tünel Portalı–Adliye İstasyonu		Adliye İstasyonu–Topraklık İstasyonu		Topraklık İstasyonu–Tünel Portalı	
	Tünel Portalı	Adliye İstasyonu	Adliye İstasyonu	Topraklık İstasyonu	Topraklık İstasyonu	Tünel Portalı
Yolcu/Personel Tahliye Yönü	←	→	←	→	←	→
Havalandırma açıklıklarındaki damperler	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı
Jet Fan-01-02-03	→	←	—	←	—	—
Jet Fan-04-05	→	←	—	←	—	—
Jet Fan-06	→	←	—	←	—	—
Jet Fan-07-08-09	→	←	→	←	—	←
Jet Fan-10-11-12	→	—	→	←	→	←
Jet Fan-13-14	→	—	→	—	→	←
Jet Fan-15	→	—	→	—	→	←
Jet Fan-16-17-18	→	—	→	—	→	←

Yapılan analizler sonucunda, Tünel Portalı – Adliye İstasyonu – Topraklık İstasyonu – Tünel Portalı bölgesinde yer altı tünellerindeki toplam 12 yangın senaryosu için yapılan analizde (bkz. Tablo 6), gerekli kritik hızın sağlanması için toplam 18 adet jet fan ihtiyacı olduğu görülmüştür. Tablo 8’de belirtilen değerler, yapısal formun zarar görmemesi durumu kabul edilerek ekipmanların çalışma yeterliliğidir. Ancak, ilgili senaryolarda tünel iç çeperinin maruz kaldığı sıcaklıklarında ortaya konularak gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Tüneldeki güvenli tahliye için gereken kritik hızı sağlayan jet fanlara ait konum ve kapasite bilgileri Tablo 9’da verilmektedir.

**Tablo 8.** Yangın senaryoları ve sağlanan hızlar

Senaryo No	Kritik hız (m/s)	Sağlanan hız (m/s)	Açıklama
SN-01	2.37	2.61	√ Yeterli
SN-01	2.32	2.38	√ Yeterli
SN-02	2.65	3.41	√ Yeterli
SN-03	2.34	3.34	√ Yeterli
SN-04	2.30	3.54	√ Yeterli
SN-05	2.47	2.47	√ Yeterli
SN-06	2.37	2.62	√ Yeterli
SN-07	2.32	2.52	√ Yeterli
SN-08	2.65	3.15	√ Yeterli
SN-09	2.34	3.20	√ Yeterli
SN-10	2.30	3.12	√ Yeterli
SN-11	2.47	2.68	√ Yeterli
SN-12	2.37	2.61	√ Yeterli

**Tablo 9.** Jet Fan konum ve kapasiteleri

Konum	Fan adedi	Çıkış hava hızı (m/s)	Çıkış hava debisi (m <sup>3</sup> /s)	İtki kuvveti (N)
13.670	3	35.7	40.4	1730
13.960	1	35.7	40.4	1730
13.960	2	35.7	40.4	1730
14.100	3	35.7	40.4	1730
15.480	3	35.7	40.4	1730
15.685	1	35.7	40.4	1730
15.685	2	35.7	40.4	1730
15.955	3	35.7	40.4	1730
13.670	3	35.7	40.4	1730
13.960	1	35.7	40.4	1730
13.960	2	35.7	40.4	1730
14.100	3	35.7	40.4	1730
15.480	3	35.7	40.4	1730

Yangın senaryolarına bağlı olarak, yangın çıkan bölümde maksimum duvar sıcaklıkları Tablo 10’da verilmektedir. Bu sıcaklık değerleri, yük trenin yangın başlamasından 1 saat sonraki durumunu göstermektedir. Ayrıca, yük trenine ait yüksek yangın yükünden (~100 Mw) dolayı çıkan yangına ait duman ve sıcak havanın; istasyon merdiven yapılarından veya tünel portallarından atıldığı görülmektedir. Yangın senaryo analiz sonuçlarından, merdiven ve peron bölgesine ait sıcaklık verilerinden de anlaşılan bu durum, istasyon peronlarında bekleyen/tahliye olan yolcular açısından can güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Sonuçta, Marmaray hattında da olduğu üzere, yüksek yangın yüküne sahip yük tren işletmeciliği, yolcu tren işletim saatlerinde yapılmaması büyük önem taşımaktadır [46].

**Tablo 10.** Yangın bölgesinde oluşan maksimum duvar sıcaklıkları

Senaryo No	Maksimum duvar sıcaklıkları (°C)
SN-01	774
SN-01	802
SN-02	894
SN-03	846
SN-04	776
SN-05	923
SN-06	774

## V. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Raylı sistemler, hızlı, güvenli ve çevre dostu bir toplu taşıma seçeneği olarak dünya genelinde kullanılmaktadır. Gaziray Raylı Sistem Hattı, Türkiye'nin Gaziantep şehrinde toplu taşıma ihtiyacını karşılamak amacıyla planlanan bir proje olarak büyük önem taşımaktadır. Tren yangınları, raylı sistem hatlarında nadir olsa da meydana gelebilecek potansiyel tehlikelerden biri olsa da, tehlike riski dikkate alınması ve tünel yapısının yangından etkilenme seviyesinin değerlendirilmesi çok önemlidir. Yangınlar, trenlerin elektrikli ve mekanik bileşenlerinde çeşitli nedenlerle ortaya çıkabilmekte, örneğin elektrik kablolarının aşırı ısınması, fren sistemlerinde arızalar, yakıt sızıntıları gibi sebeplerle yangınlar meydana gelebilmektedir. Tünel yapısının yangından etkilenme seviyesi, yangının tünel yapısına verdiği zararın değerlendirilmesini ifade etmektedir. Tünelde meydana gelen yangınlar, tünel duvarlarına, tavanına, tabanına ve diğer yapısal elemanlara zarar verebilmekte ve bu zararlar, tünelin kullanılabilirliğini, güvenliğini ve yapısal bütünlüğünü etkileyebilmektedir. Yangın sonrası yapısal hasar, tünelin

onarım maliyetlerini ve işletme süreçlerini de etkiler. Tünel yangınlarının etkilerini değerlendirmek için yangın testleri, modelleme ve simülasyonlar gibi yöntemler kullanılmaktadır. Yangın testleri, gerçek yangın senaryolarını taklit ederek tünel yapısının yangına karşı tepkisini belirlemektedir. Modelleme ve simülasyonlar ise tünel yapısının yangından etkilenme seviyesini belirlemek için kullanılmaktadır.

Bu makalede sunulan analiz çalışması, Gaziray Raylı Sistem Hattı'nın güvenliğini ve yangın durumlarında tahliye süreçlerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel hedefi, tünel yapısının yangından etkilenme seviyesini belirlemek ve gerekli önlemleri alarak güvenli bir işletme ortamı sağlamaktır. Analizde, tünelde oluşabilecek yangın senaryoları ele alınmış ve bu senaryolara yönelik havalandırma stratejileri geliştirilmiştir. Tahliye yönlerine göre hava akışı, sıcaklık ve hız bilgileri incelenmiştir. Yapılan analizler ve simülasyonlar sonucunda, yer altı tünellerinde gerçekleştirilen yangın senaryoları için havalandırma tasarımının başarılı ve geçerli olduğu sonucuna varılmıştır. Acil kaçış yönünün tersi yönünde kritik havalandırma hızının sağlanması için jet fan kapasiteleri yeterli tespit edilmiştir. Bu sayede tahliye yönüne doğru duman ve sıcak gazların ilerlemesi engellenerek güvenli bir tahliye sağlanabilecektir. Tahliye yönünde bulunan acil kaçış merdivenleri için duman yönelimi olmaması nedeniyle ilave bir basınçlandırma gereksinimi bulunmamaktadır. Ayrıca, tünelde normal işletme ve yoğun trafik durumlarında oluşabilecek sıcaklık artışları ve kirli hava problemlerini çözmek için TVF kullanılmıştır. Bu 36 m<sup>3</sup>/s kapasiteli aksiyel fanlar, tüneldeki havanın kontrolünü sağlamak ve kirli havayı dışarıya atmak için kullanılmaktadır. Fanların konumu ve kapasiteleri yangın senaryolarına bağlı olarak belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, Tünel Portalı - Adliye İstasyonu - Topraklık İstasyonu - Tünel Portalı bölgesinde yer alan yer altı tünellerindeki toplamda 12 yangın senaryosu için 18 adet jet fan gerektiği tespit edilmiştir. Jet fanların çıkış hızı 35.7 m/s ve çıkış debisi 40.4 m<sup>3</sup>/s olarak belirlenmiştir. Yangın senaryolarına bağlı olarak, yangın bölgesindeki duvar sıcaklıkları maksimum olarak ölçülmüştür. Bu sıcaklıklar, yük treninin yangın başlamasından 1 saat sonra ulaşılan değerlerdir. Yangın çıkan bölümdaki duvarlarda maksimum 774 °C ile 923 °C arasında sıcaklıklar kaydedilmiştir. Bu bilgiler, yangının şiddetini ve yayılma potansiyelini belirlemek için önemli veriler sağlamaktadır. Örneğin, yüksek yangın yüküne sahip yük trenlerinin işletimi, yolcu trenlerinin işletim saatleriyle çakışmaması önerilmektedir. Yük trenleri, yolcu trenlerinden farklı bir risk potansiyeli taşımaktadır ve yangın durumunda yolcuların güvenliğini tehlikeye atabilmektedirler. Bu nedenle, işletim saatlerinin düzenlenmesi ve gerektiğinde ayrı bir tren hattının kullanılması önerilmektedir.

Bu çalışma, Gaziray Raylı Sistem Hattı'ndaki tünellerin yangın güvenliği açısından kapsamlı bir değerlendirme sunmakta ve proje için özelleştirilmiş çözümler önermektedir. Çalışmanın sonuçlarının, tünelin yangın güvenliği ve acil durum yönetimi konularında tasarımcılara, işletmecilere ve karar vericilere rehberlik etmek amacıyla kullanılabilirliği düşünülmektedir. Gaziray Raylı Sistem Hattı'ndaki tünellerde meydana gelebilecek olası tren yangını durumunda tünel yapısının yangından etkilenme seviyesini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen bu makale çalışması, diğer benzer çalışmalardan farklılık gösteren başlıca hususları aşağıda sıralanmıştır:

- İncelenen çalışma konusu, Gaziantep şehrinde gerçekleştirilen Gaziray Raylı Sistem Hattı projesine odaklanmaktadır. Bu nedenle, tünel yapılarının yangın güvenliği için özel olarak bu projeye yönelik analizler yapılmış ve öneriler sunulmuştur.
- Tünel yangınlarından etkilenen bölgelerde etkili havalandırma stratejilerinin belirlenmesi konusu çalışmanın odaklandığı bir diğer husustur. Yangın sırasında oluşan dumanın ve sıcak gazın hızlı bir şekilde tahliyesi, insanların güvenli bir şekilde tahliye edilmesi için hayati öneme sahiptir. Bu yönüyle çalışma,

jet fanların doğru konumlandırılması ve kapasitelerinin belirlenmesi gibi havalandırma stratejilerine yönelik detaylı analizler içermektedir.

- Çalışmada, kritik hava hızının sağlanması ve dumanın tahliye yönüne doğru yönlendirilmesi için gerekli havalandırma stratejileri belirlenmektedir. Yangın senaryolarına bağlı olarak, jet fanların çıkış hızı ve debisi gibi parametreleri ile birlikte tünelin güvenli bir şekilde tahliye edilmesi için gerekli olan jet fan sayısı ve performansı da belirlenmektedir.
- Yangın sonrası yapısal hasarın minimize edilmesi için yangın dayanıklı malzemelerin kullanımı, yangın sırasında yapısal deformasyonları önlemek için stratejik destek elemanlarının yerleştirilmesi gibi öneriler sunulan bu makale çalışmasında değerlendirilmektedir.

Yangınların yol açabileceği yapısal hasarlar da dikkate alınarak gerekli önlemlerin alınması önerilmiştir. Çalışma kapsamında, yangınların tünel yapısına ve yapısal elemanlara verdiği zararlar da değerlendirilmiştir. Gaziray Raylı Sistem Hattı gibi kritik ağlar için yangın güvenliği önlemlerini iyileştirmede aşağıdaki genel önlemler önerilmektedir:

- **Yangına dayanıklı malzemelerin kullanımı:** Tünel yapısının yangına dayanıklı malzemelerle güçlendirilmesi, yangının tünel içindeki yapısal elemanlara verdiği zararı en aza indirecektir. Bu sayede tünelin yangın sonrası onarım maliyetleri azalacak ve işletme süreçleri daha hızlı bir şekilde normale dönebilecektir.
- **Duman tahliyesi ve havalandırma sistemlerinin optimize edilmesi:** Yangın sırasında oluşan dumanın ve sıcak gazın tünel içinden hızlı bir şekilde tahliye edilmesi önemlidir. Jet fanların doğru konumlandırılması ve kapasitelerinin uygun şekilde belirlenmesi, etkin bir duman tahliye sistemi oluşturulmasını sağlayacaktır.
- **Acil tahliye önlemlerinin güçlendirilmesi:** Tüneldeki acil kaçış merdivenlerinin konumları ve erişilebilirlikleri, güvenli tahliye için büyük önem taşımaktadır. Bu önlemlerin güçlendirilmesi, yangın durumunda insanların hızlı ve güvenli bir şekilde tünelden çıkmasını sağlayacaktır.
- **Yangın alarm ve söndürme sistemlerinin iyileştirilmesi:** Yangınların erken tespiti ve hızlı müdahale için etkili bir yangın alarm ve söndürme sistemi kurulmalıdır. Bu sistemlerin sürekli olarak bakımı ve test edilmesi, güvenliğin sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır.
- **Eğitim ve farkındalık:** Tünel kullanıcıları, çalışanları ve güvenlik personeli arasında yangın güvenliği konusunda düzenli eğitimler düzenlenmelidir. Yangın durumunda yapılması gerekenlerin bilinmesi ve farkındalığın artırılması, güvenli tahliyenin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, bu analiz çalışması Gaziray Raylı Sistem Hattı'nın güvenliğini sağlamak amacıyla yapılmıştır. Yangın senaryoları ve tahliye yönleri göz önünde bulundurularak havalandırma stratejileri geliştirilmiş ve gerekli ekipmanların konumu ve kapasiteleri belirlenmiştir. Bu çalışma, tünel yapısının yangından etkilenme seviyesini değerlendirmek ve güvenli bir işletme ortamı sağlamak için önemli bir adımdır.

## TEŞEKKÜR

Yazar, bu makale çalışmasının hazırlanmasında teknik desteği için Makine Mühendisi Davut Belkızıoğlu'na teşekkür eder.

**KAYNAKLAR**

- [1] Tarada F, King M (2009) Structural fire protection of railway tunnels. Railway Engineering Conference, University of Westminster, UK, June 24-25.
- [2] Wang H, Binder E, Mang H, Yuan Y, Pichler B (2018) Multiscale structural analysis inspired by exceptional load cases concerning the immersed tunnel of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge. *Underground Space* 3(4):252–267. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.02.001>
- [3] Feist C, Aschaber M, Hofstetter G (2009) Numerical simulation of the load-carrying behavior of RC tunnel structures exposed to fire. *Finite Elements in Analysis and Design* 45(12):958–965. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2009.09.010>
- [4] Long X, Guo H (2016) Fire Resistance study of concrete in the application of tunnel-like structures. 2nd International Symposium on Submerged Floating Tunnels and Underwater Tunnel Structures, *Procedia Engineering* 166:13–18.
- [5] Avcı-Karataş Ç (2022) Yalova il afet risk azaltma planının (İRAP) hazırlanması konusunda ön çalışmaların incelenmesi. 8. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi, İstanbul, Türkiye, 8-9 Aralık.
- [6] Krausmann E, Mushtaq F (2008) A qualitative Natech damage scale for the impact of floods on selected industrial facilities. *Nat Hazards* 46:179–197. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9203-5>
- [7] Ingason H, Li YZ, Lönnemark A (2014) *Tunnel Fire Dynamics*. Springer, New York.
- [8] PIARC. (1999). *Fire and Smoke Control in Road Tunnels*. Technical Committee 5 Road Tunnels (C5). PIARC-World Road Association, France.
- [9] EI-Arabi IA, Duddeck H, Ahrens H (1992) Structural analysis for tunnels exposed to fire temperatures. *Tunnelling and Underground Space Technology* 7(1):19–24. [https://doi.org/10.1016/0886-7798\(92\)90109-U](https://doi.org/10.1016/0886-7798(92)90109-U)
- [10] Davidy A (2016) CFD studies of tunnel fire growth on composite lining materials. *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 5(4):1-6.
- [11] Avcı-Karatas C, Taşkın K (2023) Current modeling techniques for reviewing fire safety in road/highway tunnels. 5th International Congress on Engineering Sciences and Multidisciplinary approaches. Istanbul, Turkey, Feb. 25-26.
- [12] AASHTO-LRFD (2010). *Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials. 5th Edition. ISBN: 978-1-56051-451-0. 444 North Capitol Street, Washington DC, USA.
- [13] Directive (EU) (2004). 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network. Luxembourg, Belgium.
- [14] Directive (EU) (2019). 2019/1936 of the European Parliament and of the Council of 23 October 2019 amending Directive 2008/96/EC on road infrastructure safety management, OJ L 305, 26.11.2019, p.1. Luxembourg, Belgium.
- [15] ITA-Working Group No.6 (2004). *Maintenance and Repair. Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels*. International Tunneling Association (ITA). Châtelaine, Switzerland.
- [16] EN 1991-1-2 (2002). (English): Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. Plzen, Czech Republic.
- [17] EU (2021). Report - A9-0211/2021. REPORT on the EU Road Safety Policy Framework 2021-2030–Recommendations on next steps towards “Vision Zero”.
- [18] Channel Tunnel. [https://en.wikipedia.org/wiki/Channel\\_Tunnel](https://en.wikipedia.org/wiki/Channel_Tunnel). Erişim tarihi: 16 Mayıs 2023.
- [19] Stucchi R, Amberg F (2020) A practical approach for tunnel fire verification. *Structural Engineering International* 30(4):515–529. <https://doi.org/10.1080/10168664.2020.1772697>
- [20] Tarada F (2007) Improving road tunnel safety. *Eurotransport* 5:35–39.
- [21] Seike M, Ejiri Y, Kawabata N, Hasegawa M (2014) Suggestion of estimation method of smoke generation rate by CFD simulation and fire experiments in full-scale tunnels. *J Fluid Sci Technol* 9:1–11. <https://doi.org/10.1299/JFST.2014JFST0018>
- [22] Seike M, Kawabata N, Hasegawa M (2016) Experiments of evacuation speed in smoke-filled tunnel. *Tunn Undergr Space Technol* 53:61–67. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.01.003>
- [23] Thomas PH (1958) The movement of buoyant fluid against a stream and the venting of underground fires. *Fire Safety Science* 351:1–7.
- [24] Oka Y, Atkinson GT (1995) Control of smoke flow in tunnel fires. *Fire Safety Journal* 25(4):305–322. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(96\)00007-0](https://doi.org/10.1016/0379-7112(96)00007-0)
- [25] Hwang CC, Edwards JC (2005) The critical ventilation velocity in tunnel fires—A computer simulation. *Fire Safety Journal* 40(3):213–244. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2004.11.001>
- [26] Hu LH, Peng W, Huo R (2008) Critical wind velocity for arresting upwind gas and smoke dispersion induced by near-wall fire in a road tunnel. *Journal of Hazardous Materials* 150(1):68–75. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.094>

- [27] Ingason H, Lönnemark A (2004) Recent achievements regarding measuring of time-heat and time-temperature development in tunnels. In Proceedings of the 1st International Symposium on Safe & Reliable Tunnels, Innovative European Achievements, pp.87–96, Prague, Czech Republic, Feb 4–6.
- [28] Li YZ, Ingason H (2016) Influence of ventilation on road tunnel fires with and without water-based suppression systems. SP Technical Research Institute of Sweden: Boras, Sweden, 36:1–58.
- [29] Nakahori I, Sakaguchi T, Kohl B, Forster C, Vardy A (2015) Risk assessment of zero-flow ventilation strategy for fires in bidirectional tunnels with longitudinal ventilation. In Proceedings of the 16th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation and Fire in Tunnels, Seattle, WA, USA, Sept. 15–17.
- [30] Kodur, Naser MZ (2021) Fire hazard in transportation infrastructure: Review, assessment, and mitigation strategies. *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 15:46–60. <https://doi.org/10.1007/s11709-020-0676-6>
- [31] Isıkan MO, Kaya O (2019) Yüksek kamu binalarında duman tahliyesinin simülasyon metoduyla incelenmesi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 3:223–231. <https://doi.org/10.7240/jeps.512479>
- [32] Nishiki S (2013) Numerical study of the effect of water mist spray in tunnel fire using FDS. In Proceedings of the 5th Japan/Taiwan/Korea Joint Seminar for Tunnel Fire and Management, pp.42084–42087, Tokyo, Japan, Nov. 7.
- [33] Yamamoto K, Kokubo S, Nishinari K (2006) New approach for pedestrian dynamics by Real-Coded Cellular Automata (RCA). In *Cellular Automata*; Yacoubi, S.E., Chopard, B., Bandini, S., Eds.; Lecture Notes in Computer Science; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany Vol. 4173, pp.728–731.
- [34] Yamamoto K, Kokubo S, Nishinari K (2007) Simulation for pedestrian dynamics by real-coded cellular automata (RCA). *Physica A* 379(2):654–660. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2007.02.040>
- [35] Yamamoto K, Sawaguchi Y, Nishiki S (2018) Simulation of tunnel fire for evacuation safety assessment. *Safety* 4(2):12. <https://doi.org/10.3390/safety4020012>
- [36] McGRATTAN K (2010) Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide. NIST Special Publication 1018, NIST.
- [37] McGrattan K, Forney GP (2010) Fire Dynamics Simulator (Version 5) - User's Guide. NIST Special Publication 1019, NIST.
- [38] Wang HY, Sahraoui H (2014) Mathematical modelling of pool fire burning rates in a full-scale ventilated tunnel. *Fire Saf Sci* 11:361–375. <http://dx.doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.11-361>
- [39] CFAST (2023). National Institute of Standards and Technology (NIST), The United States Department of Commerce. 17/105, Middletown, CT.
- [40] Gaziray. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Gaziray>. Erişim tarihi: 16 Mayıs 2023.
- [41] National Fire Protection Association (NFPA) 130 (2023). Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems. Avon, Massachusetts.
- [42] Subway Environmental Design Handbook, Volume II, Subway Environment Simulation Computer Program, Version 4, Part 1, User's Manual.
- [43] UNE EN 13848-1:2020. Railway applications - Track - Track geometry quality - Part 1: Characterization of track geometry.
- [44] Subway Environmental Design Handbook. (1976). Volume I. Principles and Applications. Second Edition. Technical rept. NTIS Issue Number: 197619.
- [45] Bakke A, Safety in Mines Research Establishment (Great Britain), Leach SJ (1960) Methane Roof Layers, Ministry of Power, Safety in Mines Research Establishment.
- [46] Marmaray Project – Detailed Design Report for Tunnel Ventilation Analysis and Design.

