

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜNEL YANGINLARINDA SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN BİR MODEL ÜZERİNDE
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

ALİ SERDAR GÜLTEK

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISI PROSES PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. ZEYNEP DÜRİYE BİLGE**

İSTANBUL, 2017

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TÜNEL YANGINLARINDA SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN BİR MODEL ÜZERİNDE
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Ali Serdar GÜLTEK tarafından hazırlanan tez çalışması 13.06.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Zeynep Düriye BİLGE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Zeynep Düriye BİLGE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Galip TEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Abdurrahman KILIÇ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hasan Rıza GÜVEN
İstanbul Üniversitesi

Doç. Dr. Derya Burcu ÖZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince beni bilimsel temeller ışığında yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Zeynep Düriye BİLGE 'ye, doktora sürecinin başından itibaren beni destekleyen Prof. Dr. Galip TEMİR 'e, teknik değerlendirmeleri ve yönlendirmeleri ile birlikte manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Prof. Dr. Abdurrahman KILIÇ 'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının oluşması için beni her zaman destekleyen babam Memet GÜLTEK, sabırla çalışmalarımın bitmesini bekleyen eşim İncinur Demir GÜLTEK ve oğlum Arda GÜLTEK 'e şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2017

Ali Serdar GÜLTEK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	v
ABSTRACT.....	vii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti.....	1
1.2. Tezin Amacı.....	2
1.3. Hipotez.....	3
BÖLÜM 2	
TÜNEL YANGINLARI ARAŞTIRMALARI	4
2.1 Tüneller ve Yangınlar	4
2.3 Ulaşım Ağlarında Tünel Yangını Araştırmaları	12
BÖLÜM 3	
TÜNEL YANGINLARI	14
3.1. Tünel Havalandırması Ve Tünel Havalandırma Sistemleri:.....	14
3.1.1. Tünel Havalandırma Sistemleri Çeşitleri	16
3.1.1.1. Doğal Havalandırma	18
3.1.1.2. Mekanik Havalandırma	19
3.2. Tünel Yangınları	23
3.2.1. Yangınlar	24
3.2.2. Patlamalar.....	31
3.2.3. Zehirli Gaz Yayılımı.....	31

3.3. Tünel Yangınlarının İnsan Sağlığına Etkileri ve Yaşanabilir Ortam	32
3.3.1. Alev	32
3.3.2. Isı.....	33
3.3.3. Duman ve Tehlikeli Gazlar	37
3.3.3.1 . Dumanın Niteliği ve Miktarı.....	37
3.3.3.2. Duman ve Zehirlilik ilişkisi	38
3.3.3.3. Yangın Ortamındaki Tehlikeli Gazlar	39
3.3.3.3.1. Tahriş Edici Gazlar	39
3.3.3.3.2. Boğucu Gazlar.....	40
3.3.3.3.3. Öldürücü Gazlar.....	41
3.3.3.3.4. Yanıcı Malzemelerin Çıkardığı Gazlar	43
BÖLÜM 4	
TÜNEL MODELLEMESİ DENEYSEL ÇALIŞMALAR	45
4.1. Deney Düzeneği.....	45
4.1.1. Sistem Bileşenleri.....	47
4.2. Ölçüm ve Veri Toplama Düzeneği	50
4.2.1. Veri Toplama Sistemi.....	50
BÖLÜM 5	
HAD ve NÜMERİK ÇALIŞMALAR	76
5.1. Tünellerde Deneysel Model Çalışmaları.....	76
5.2. Yürütülen HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) Analizi Çalışması	82
5.3. Froude Sayısı.....	84
5.4. Korunum Denklemleri	85
BÖLÜM 6	
SONUÇ.....	87
6.1. Deneysel Çalışma Sonuçlarının HAD Analizi Sonuçları İle Çapraz Karşılaştırması.....	87
6.2. Sonuç	97
KAYNAKLAR.....	102
EK- A	
ISI AKISI ÖRNEK HESAPLAMA.....	106
ÖZGEÇMİŞ	110

SİMGE LİSTESİ

dA_1	ışınım gerçekleşen birim yüzeyin alanı (m^2)
D^*	karakteristik yangın çapı
f_b	yerçekimi ve su damlasının havada sürüklenme kuvvetlerinin toplamını gösteren kuvvet değeri
FED	transfer edilen ısıнын dozunu belirten eşdeğer maruziyet değeri
Fr	Froude Sayısı
h_s	sıcaklığın fonksiyonu olarak hissedilir entalpi (kJ/mol)
I_n	ışınım yoğunluğunun normali
m_b	yanma ürünü kütlesi (kg)
P	basınç (Pa)
Q	ısı yayma gücü (W)
q'''	hacimsel ısı yayma gücü (W/m^3)
q_b'''	buharlaşan su damlalarına iletilen ısı (W/m^2)
R	üniversal gaz sabiti
T_0	ortam sıcaklığı
t_{exp}	FED değerinin 0,3'e ulaştığı maruziyet süresi (saniye)
t_{lconv}	taşınım kaynaklı ısı iletimi sonucu deride yanık oluşma süresi (saniye)
t_{lrad}	ışınım kaynaklı ısı iletimi sonucu deride yanık oluşma süresi (saniye)
U	akışkan olarak hareket eden gazın hızı (m/s)
u	Hız vektörü
$\overline{W}$	molekülün kütlesi (kmol)
ϕ	görüş faktörü
θ	ışınım yoğunluğun normali ile yaptığı açı değeri
ε	yayılım oranı
σ	Stephan-Boltzman sabiti

∇	($\partial/\partial x$, $\partial/\partial y$, $\partial/\partial z$) üç ekseninde uygulanan vektör operatörü
τ_{ij}	Stress tensörü
Φ	akışkanın viskozitesi ile kinetik enerjinin ısı enerjisine dönüşüm oranını gösteren dağılıma fonksiyonu
$\nabla \cdot q$	taşıyım ve ısıyım ile oluşan ısı akıları (W/m ²)
M	Benzeşim modelinde ölçeklenen değer indisi
T	gerçek tünelde ölçülen değer indisi

KISALTMA LİSTESİ

ADR	International Carriage of Dangerous Goods by Road
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HRR	Heat Release Rate
LES	Large Eddy Simulation
LPG	Likit Petrol Gazı
ModBus	Elektronik Ekipman Haberleşme Protokolü
NFPA	National Fire Protection Association
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
PIARC	World Road Association
PT100	Sıcaklık Duyar Eleman
GRAM	Qualitative Risk Assessment – Road Model
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
TBM	Tunnel Boring Mechanism
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Kritik hızın ısı yayma gücü ile değişimi[6]	5
Şekil 2.2 Dumanın havalandırma debisine bağlı olarak tünelin boyuna kesitinde yayılımı.....	8
Şekil 2.3 Farklı tünel eğimlerinde kritik hızın değişimi	11
Şekil 2.4 Kritik hızın tünel eğimine bağlı değişiminin karşılaştırması.....	11
Şekil 3.1 Bir tünel içinde çıkan yangın dumanının zamana ve hava akışına bağlı olarak dağılımının gösterimi	15
Şekil 3.2 Tünel içinde yangın dumanının hava akışının tersi yönünde yayılma durumunun şematik gösterimi	16
Şekil 3.3 Mekanik havalandırma sistemlerinin tünel içinde farklı uygulamalarının gösterimi	17
Şekil 3.4 Doğal havalandırma prensiplerinin gösterimi	18
Şekil 3.5 Tünel tavanına monte edilmiş jet fan kullanılarak boyuna havalandırma	20
Şekil 3.6 Tünel boyunca hem emiş hem üfleme kanallarının birlikte kullanılması	21
Şekil 3.7 Fan yardımıyla tünel içine havanın verilmesi ve egzoz edilmesi	21
Şekil 3.8 Yarı enine sistemde tünel içine havanın verilmesi	22
Şekil 3.9 Havalandırma yöntemlerinin tünel kesiti görünüşleri	23
Şekil 3.10 Bir tünel yangınında yaşanabilir bölgenin gösterimi	32
Şekil 4.1 Tünel modeli montaj resminin üstten görünümü ve ölçüm noktaları	45
Şekil 4.2 Deney seti parçalarının şematik gösterimi	46
Şekil 4.3 Hava klapesinin ayarlanması çalışması	46
Şekil 4.4 Veri toplama ünitesi çalışmasının gözlenmesi	47
Şekil 4.5 Veri toplama ünitesinde yapılan çalışma	47
Şekil 4.6 Sıcaklık ölçerlerin yerleşiminin gösterimi	51
Şekil 4.7 Tahliye tüneline sıcaklık ölçerler ile insan vücudunun temsili gösterimi	53
Şekil 4.8 Yangın kaynağında tavan sıcaklığının farklı ısı yayılım gücü ve zamana bağlı değişimi...	57
Şekil 4.9 Tünelde tahliye yolu girişinde tavan sıcaklığının farklı ısı yayılım gücüne ve zamana bağlı değişimi	58

Şekil 4.10 Tünelin çıkış portalında tavan sıcaklığında farklı ısı yayılım gücü ve zamana bağlı değişimi	59
Şekil 4.11 Tünelin farklı noktalarında tavandaki duman tabakası sıcaklığın zamana bağlı değişimi	60
Şekil 4.12 Tünelin tahliye noktasında sıcaklığın zamana bağlı değişimi	61
Şekil 4.13 Tünelin tahliye noktasında sıcaklığın tavandan zemine doğru yükseklik farkına ve zamana bağlı değişimi.....	62
Şekil 4.14 Q=15 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında tavandaki duman tabakası sıcaklığının mesafeye bağlı değişimi	63
Şekil 4.15 Q=20 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında tavandaki duman tabakası sıcaklığın zamana bağlı değişimi	63
Şekil 4.16 Tünelin tahliye noktasında sıcaklığın zamana bağlı değişimi	64
Şekil 4.17 Tünelin tahliye noktasında sıcaklığın tavandan zemine doğru yükseklik farkına ve zamana bağlı değişimi.....	65
Şekil 4.18 Q=20 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında tavandaki duman tabakası sıcaklığının mesafeye bağlı değişimi	66
Şekil 4.19 25 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında tavandaki duman tabakası sıcaklığının zamana bağlı değişimi	67
Şekil 4.20 30 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında tavandaki duman tabakası sıcaklığının zamana bağlı değişimi	67
Şekil 4.21 50 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında tavandaki duman tabakası sıcaklığının zamana bağlı değişimi	68
Şekil 4.22 CO gazı konsantrasyonu değişimi	69
Şekil 4.23 15 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında zemine etkiyen ısı akısının zamana bağlı değişimi.....	71
Şekil 4.24 15 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında duman tabakasından zemine etkiyen ısı akısının mesafeye bağlı değişimi	72
Şekil 4.25 Q=20 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında zemine etkiyen ısı akısının zamana bağlı değişimi.....	73
Şekil 4.26 Q=20 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında duman tabakasından zemine etkiyen ısı akısının mesafeye bağlı değişimi	74
Şekil 4.27 Q=50 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında zemine etkiyen ısı akısının zamana bağlı değişimi.....	74
Şekil 4.28 Q=50 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında duman tabakasından zemine etkiyen ısı akısının mesafeye bağlı değişimi	75
Şekil 5.1 Tünel modelinin CAD çizimi	82
Şekil 5.2 Tünel modelinin HAD analizinde kullanılan mesh gösterimi	83

Şekil 6.1 Q=30 kW ısı yayma gücünde, yangın kaynağında ve kaynaktan 1,5 m uzaklıkta tavan duman tabakası sıcaklığının deneysel ve HAD Analizi verisi ile karşılaştırması	88
Şekil 6.2 30 kW ısı yayma gücünde yangın kaynağında tavan duman tabakası sıcaklığının deneysel ve HAD Analizi verisi ile karşılaştırması	88
Şekil 6.3 30 kW ısı yayma gücünde yangın kaynağında tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile $\pm\%30$ değişim aralığı içinde karşılaştırması	89
Şekil 6.4 30 kW ısı yayma gücünde tünel çıkışında tavan duman tabakası sıcaklığının deneysel ve HAD Analizi verisi ile karşılaştırması	90
Şekil 6.5 30 kW ısı yayma gücünde tünel çıkışında tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile $\pm\%30$ değişim aralığı içinde karşılaştırması	90
Şekil 6.6 30 kW ısı yayma gücünde tünel girişinde tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile karşılaştırması	91
Şekil 6.7 30 kW ısı yayma gücünde tünel girişinde tavan duman tabakası sıcaklığının deneysel ve HAD Analizi verisi ile $\pm\%30$ değişim aralığı içinde karşılaştırması	92
Şekil 6.8 50 kW ısı yayma gücünde yangın kaynağında tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile karşılaştırması	93
Şekil 6.9 50 kW yayma gücünde yangın kaynağında tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile $\pm\%30$ değişim aralığı içinde karşılaştırması	93
Şekil 6.10 50 kW ısı yayma gücünde tünel çıkışında tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile karşılaştırması	94
Şekil 6.11 50 kW yayma gücünde tünel çıkışında tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile $\pm\%30$ değişim aralığı içinde karşılaştırması	95
Şekil 6.12 50 kW ısı yayma gücünde tünel girişinde tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile karşılaştırması	96
Şekil 6.13 50 kW yayma gücünde tünel girişinde tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile $\pm\%30$ değişim aralığı içinde karşılaştırması	96
Şekil 6.14 Tünelin yangın noktasında (x= 0,5 m) deney verisi ve HAD analizi verisi ile karşılaştırması a) ısı yayma değeri HRR=30 kW, b) ısı yayma değeri HRR=50 kW	99
Şekil 6.15 Tünelin tahliye noktasında (x=1,5 m) deney verisi ve HAD analizi verisi ile karşılaştırması a) ısı yayma değeri HRR=30 kW, b) ısı yayma değeri HRR=50 kW	99
Şekil A.1 Isı akısı örnek hesap gösterimi	106

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Ingason 'un yürüttüğü deneyler ve elde edilen değerler [10].....	6
Çizelge 3.1 Geçmiş büyük tünel yangınları	25
Çizelge 3.2 Gaz tabakası sıcaklığına bağlı olarak hareketsiz kalmadan geçirilebilecek süre	37
Çizelge 4.1 Ölçüm cihazları doğruluk aralığı	51
Çizelge 4.2 Deneylerin Birleşik Gösterimi	55
Çizelge 4.3 Karbondioksit gazı (ϵ) Işınım değerleri	70
Çizelge 4.4 Su buharı (ϵ) Işınım değerleri.....	70
Çizelge 5.1 Deneysel model çalışmalarında kullanılan parameterlerin gösterimi.....	77
Çizelge 6.1 Isı yayma gücü ile ısı akısı ilişkisinin gösterimi.....	97
Çizelge A.1 Belirlenmiş noktalardaki tavan gaz sıcaklığı değerleri	107

TÜNEL YANGINLARINDA SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN BİR MODEL ÜZERİNDE DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Ali Serdar GÜLTEK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zeynep Düriye BİLGE

Dünyanın çeşitli ülkelerindeki tünellerde yangın olayları yaşanmaktadır. Tünel geometrisine, trafik durumuna, yangın savunma donanımına bağlı olarak büyük bir yangın birkaç kişiden onlarca kişiye bağlı olarak insanları öldürebilir ve tünel yapısına zarar verebilir. İnsanların yangın anında pratik uygulamaya bağlı olarak maruz kalacağı ısı ve zehirli gaz eşik değerleri standartlarda kabul edilmiştir. Standartlarda tanımlanan ısı akısı değerlerinin yangının ısı yayma değeri ile değişimini ve bir tünel yangınında tahliye boyunca yaşanabilir ortamın sağlanabilirliğini incelemek üzere bir tünelin ölçüleri 1:12 ölçeğinde küçültülerek bir model oluşturulmuştur. 6 metre uzunluğunda ve 0.4 metre çapında modelin üzerine monte edilen yakıcı üniteye LPG gazı kullanılmıştır. Farklı değerlerdeki gaz debileri ile tutuşturulan yakıcı üniteden çıkan yanma ürünü gazların oluşturduğu gaz tabakasının durumu takip edilmiştir. Deney düzeneği üzerinde farklı noktalara monte edilen 24 adet sıcaklık ölçerle birlikte, CO ve O₂ gazlarının konsantrasyonu, gaz hızı ve basınç değişimi değerleri deneyler sırasında ölçümlenmiş ve kayıt edilmiştir. Deneysel çalışmaların yanı sıra bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan Fire Dynamics Simulator ile nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Modelle birlikte yürütülen çalışmalarda bir tünel içinde meydana gelecek yangın olayının, yangın başlangıcından itibaren geçen süreye bağlı olarak tahliyenin gerçekleştirilemez olduğu an ve müdahalede bulunacak insanların can güvenliğini tehlikeye atacak koşulların belirlenmesi amacıyla yürütülen deneysel çalışmaların ve nümerik çalışmaların birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Tünel yangını, tahliye, yaşanabilir ortam, FDS

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF TEMPERATURE
CHANGE DURING TUNNEL FIRES ON A MODEL**

Ali Serdar GÜLTEK

Department of Mechanical Engineering

Ph.D. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Zeynep Düriye BİLGE

Fire incidents occur in the tunnels of various countries of the world. Depending on the tunnel geometry, traffic structure, and fire defense equipment, a large fire may cause people to die and cause damage to the tunnel structure. Threshold values for heat and toxic gas emissions that people would be exposed to a fire are defined in standards. To examine the change of the heat flux values that are defined in the standards with the heat release rate of the fire and the viability of the tenable environment during an evacuation in a tunnel fire, a model was created by reducing the dimensions of a tunnel by 1/12. Liquid petroleum gas was used in the burner unit which was mounted on the model with a length of 6 meters and a diameter of 0.4 meters. The status of the gas layer formed by the combustion product gases emitted from the burner unit ignited by different values of gas flow rates was followed. The concentrations of CO and O₂ gases, gas velocity and pressure change values were measured and recorded during the experiments, together with 24 temperature gauges mounted on the test setup. In addition to experimental work, numerical analyzes were performed with Fire Dynamics Simulator, a computational fluid dynamics software. Experimental studies and numerical studies carried out with the model in order to determine the instant that evacuation operation will start to impede and hazardous conditions dominate the fire scene and it is observed that results of both studies are in harmony.

Keywords: Tunnel fire, evacuation, tenable environment, FDS

1.1. Literatür Özeti

İnsan ve yük taşıyan araçların katettiği yolun dağ, vadi, göl, nehir gibi coğrafi engellerle karşılaştığı kesintisiz ve ekonomik olarak devam edebilmesi için tünel inşa edilmesi sanayi devriminin başından beri uygulanan etkili bir yöntemdir. Ancak tünel içinde hareket eden aracın yanması durumunda yapının kapalı olması, havalandırma ve söndürme imkânlarının kısıtlı olması nedeniyle can kaybı olasılığı yüksektir. Geçmişte yaşanan olaylardan oluşturulan istatistiki veriler bu olasılığın yüksekliğini doğrulamaktadır [1]. Tünel açma tekniklerinin gelişmesi ile birlikte TBM (Tunnel Boring Mechanism – Tünel Delme Mekanizması) cihazları geliştirilmiş ve ekonomik olarak yapılabilir değerler sağlanıyorsa gidiş geliş kolayca trafiği birbirine paralel ilerleyen iki ayrı tünel tüpü içinden sağlanmaya başlanmıştır. Birbirine paralel iki ayrı tüp inşa edilmesi yöntemi ile bu tüneller belirli mesafelerde tünel eksenine dik olarak inşa edilen ve daha kısa olan kaçış tünelleri ile birbirine bağlanmıştır. Bu yapı, insanların tünellerden tahliyesine ve itfaiye gibi müdahale personelinin yangın mahalline erişimini kolaylaştırmaktadır.

Yaşanan gelişmelere rağmen bir tünel içindeki yangının sıcak ve zehirli dumanı hala hızlı ve güvenli şekilde tahliye edilememektedir. Yangında oluşan ısıнын özellikle tünel tavan kaplamasına olan yapısal hasarı azaltılamamaktadır. Sabit ve otomatik söndürme sistemleri ekonomik olarak işletilememektedir. Bu zorluklar ve engelleri aşmak yönünde araştırma çalışmaları dünya çapında çeşitli kurumlar ve gruplar tarafından yürütülmektedir.

Türkiye Cumhuriyeti 59, 60 ve 61. Hükümetleri tarafından yürütülen 2023 Türkiye hedefleri çerçevesinde ülkemiz Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı tarafından çok sayıda karayolu ve demiryolu projesi hayata geçirilmiş veya planlanmaktadır. Gerek yüksek hızlı tren projeleri, gerek otoyol projeleri gerekse bölünmüş yol projelerinde hızlı ve kısa güzergah oluşturmak amacıyla tünel inşaatlarına önemli bütçe ayrılmaktadır.

Bahsi geçen tünel projelerinin inşasında Türk inşaat sektörü müteahhitlik anlamında önemli deneyimler kazanmıştır ancak yangın ve acil durumlar sırasında tünelin güvenli işletilmesi için sistem geliştirilmesi konusunda müşavirlik hizmetleri hala yurtdışından sağlanmaktadır. Ülkemiz ekonomisi ve bu ekonomi içinde inşaat sektörünün yakaladığı hızlı büyüme oranları müşavirlik hizmetinin hızlı temin edilmesi için yurtdışı firmaları tercih edilmekte, araştırma faaliyetlerinin geride kalması tercih edilmektedir. Bu konuda üniversite-sanayi işbirliğinin sağlanabilmesi önemlidir. Araştırma faaliyetinin üniversite üzerinden yürütülebilmesi sektör firmaları için kolaylık sağlayacaktır.

Tünel yangınlarının deneysel olarak araştırılması çok maliyetli ve tehlikelidir. Bu iki sebepten dolayı tüm dünyada öncelikli olarak belirli ölçekte küçültülmüş tünel modelleri üzerinden araştırma faaliyetleri yürütülmekte ve veri toplanmaya çalışılmaktadır. Bu durum hem etkin sonuç veren bir tünel modeli geliştirilme konusunda hem de mevcut tünel modellerinden elde edilen verilerin doğrulanması konusunda araştırma faaliyetlerinin yürütülmesini sağlamıştır.

Bir tünelde yangın çıkması halinde çıkan gazların ve dumanın yapacağı hareketin ve izleyeceği yolun belirlenerek yangın tedbirlerinin alınması can ve mal güvenliğinin korunması amaçlı yangın tedbir ve müdahale sistemleri ve stratejisinin belirlenmesi için etkili öngörüler sağlanabilecektir.

1.2. Tezin Amacı

Yürütülen bilimsel araştırmalar ölçekli modeller kullanılarak veya tam ölçekli gerçek ortamlarda yangınlar oluşturularak gerçekleştirilmiştir[2],[3]. Bu araştırmalarda dinamik olarak değişen yangın koşullarının değişik etkileri anlaşılmaya çalışılmaktadır. Tünel yangınları esnasında insanların güvenli tahliyesini sağlamaya yönelik çalışmalar mevcuttur[4]. Pratik uygulamaya bağlı olarak bir insanın maruz kalacağı sıcaklık ve zehirli gaz eşik değerleri standartlarda kabul edilmiştir ancak yürütülen bilimsel

araştırmalarda bu konuya değinilmemektedir. Bu konuyu araştırmak üzere bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

1.3. Hipotez

Bu alışma sırasında gerçekleştirilen nümerik analizde ve Froude sayısı ölçeklendirmesi ile oluşturulan modelde yürütölen deneysel çalışmalarda tünelin tavanı boyunca ve düşey ekseninde çeşitli noktalardan alınan değlerle sıcaklık dağılımı, yanma sonrası gazların ölçümü, basınç değışimi verileri oluşturulmuştur. Bu veri kapsamında tünel tahliye rotası içinde yaşanabilir ortamın sağlanabilirliği araştırılmıştır.

TÜNEL YANGINLARI ARAŞTIRMALARI

2.1 Tüneller ve Yangınlar

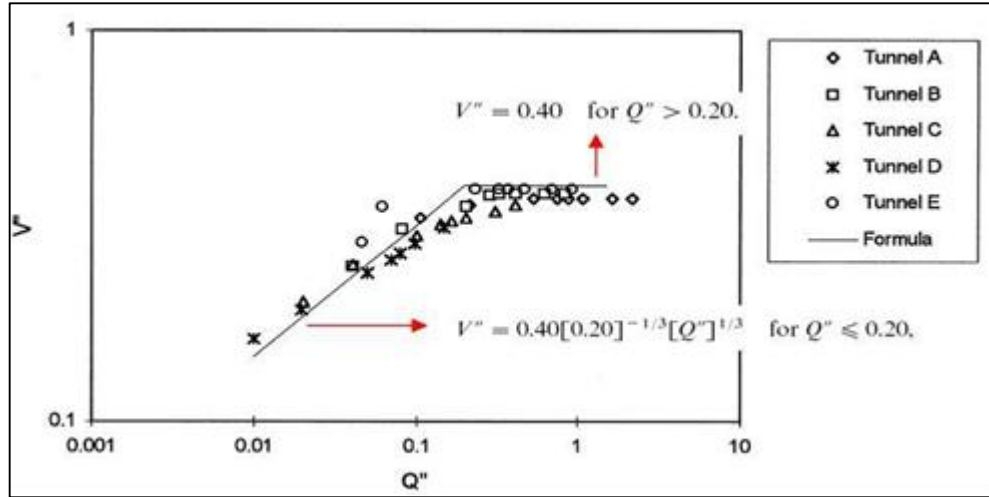
Hwang ve Edwards [5], çalışmasında deneylerle ölçülen ısı yayma gücü ve kritik hava hızı değerleri hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. Tünel geometrisinin, ısı yayma gücünün, tünel yüksekliğinin, kritik hava hızının birbiri ile olan ilişkisi açıklanmaya çalışılmıştır. Bu amaçla tünel yüksekliği tünel kesiti ile ilişkilendirilmiş ve hidrolik yükseklik değeri türetilmiştir. Aynı şekilde tünelin kesitinin, yüksekliğinin hız ve ısı yayma gücü ile ilişkisi hava hızı ve ısı yayma gücü boyutsuzlaştırılarak türetilmiştir. Farklı boyutlardaki iki tünelden alınan veriler simüle edilmiştir. Memorial tüneli test verisi, Baxton tüneli test verisi, Wu ve Bakar[6] 'ın ölçekli tünel testi verisi karşılaştırmalarda kullanılmıştır.

Kasheef ve diğ. [7], Kanada'da bulunan Ville-Marie ve LaFontaine tünellerinde mevcut havalandırma sistemlerinin yangın durumunda çalışma şekilleri ve performansı incelerken SOLVENT ve FDS isimli CFD modelleri ile yangın sonucu ortaya çıkan duman hareketinin simülasyonunda modellerin kalibrasyonu ve güvenilirliği havalandırma testlerinden elde edilen veri ile karşılaştırmıştır.

2.2 Tünel Yangınlarının Modellenmesi

Wu ve Bakar boyuna havalandırma yapılan tünellerde çıkan yangının oluşturduğu dumanın kontrol edilmesinde kritik akış hızının belirlenmesi konulu çalışmada Froude sayısı kullanılarak türetilen deneye dayalı formüllerin yer aldığı tekniklerle belirlenen kritik hız hesaplamalarında yangının gücünün kritik hıza olan etkisi, tünel geometrisinin

kritik hıza olan etkisi ve bu etkilere bağı olarak tünel yangınlarının ölçeklendirme tekniklerinde yaşanan sorunları incelemiştir. Şekil 2.1’de gösterildiği üzere bu çalışmada aynı tavan yüksekliğine ancak farklı kesit geometrisine sahip beş model tünelde yürütülen deneysel testlerde belirtilen belirsizlikler incelenmiştir.



Şekil 2.1 Kritik hızın ısı yayma gücü ile değişimi[6]

Jojo ve diğ. [8] Dünya Yol Birliği (PIARC), Amerikan Ulusal Yangın Güvenliği Birliği (NFPA) ve Hong Kong Yangın Yönetmeliğinde tanımlanan tünel geometrileri ve bu tünellerde kullanılacak mekanik havalandırma yöntemlerinin performansının değerlendirmesi nümerik yöntemlerle yapılırken karşılaşılan duman tabakasının akış yönünün tersine yönde ilerlemesi ve ısı yayma gücüne bağı değişimine ilişkin durumlar incelenmiştir. Yangın senaryosu olarak tünel içinde bir binek araç yangını CFD yazılımı olan PHOENICS kullanılarak modellenmiş ve simülasyonu yapılmıştır. Boyuna havalandırma, kesitli havalandırma, yarı kesitli havalandırma ve kombine sistemlerin yaratacağı hava akımı dikdörtgen prizma tünel geometrisinde hesaplanmıştır.

B. H. Chiam [9] yeraltı ulaşımında kullanılan bir trende gerçekleşecek yangının gelişmesini ve alev yayılmasını Fire Dynamics Simulator yazılımı ile HAD modelinde simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Tüneldeki havalandırmaya bağı olarak ısı yayma gücünün değişimi incelenmiştir. Yanan malzemenin özelliğı, aracın kendisinden kaynaklanan durumlar, tünel geometrisi ve havalandırmanın birbiri ile olan ilişkisini

incelemek üzere araç içinde oturma grubu üzerinden yangın, aracın içinde köşe yangını ve araç altı yangını durumlarının simülasyonunu yapmıştır. Yüksek hızlı ve debili havalandırmanın araç içi yangınlarının gelişiminde bir etkisi olmadığı, araç altı yangının havalandırma ile birlikte aracın diğer vagonuna yayıldığını, istasyonda meydana gelecek yangının 5 MW, tünel içinde meydana gelecek yangının 10 MW ısı yayma gücüne erişeceği değerlendirmesinde bulunmuştur.

H. Ingason [10] bir tren kompartımanındaki ısı yayma gücünü hesaplayacak veriyi elde etmek üzere 1/10 ölçeğinde model kullanarak deneyler gerçekleştirmiştir. Isı yayma gücü ve kütle Froude sayısı benzeşimi kullanılarak ölçeklendirilmiştir. Malzemenin ısı ataleti ve radyasyon etkileri göz ardı edilerek yapılan incelemede yanmaz alçı panel, sunta panel ve oluklu mukavva paneller kullanılarak farklı malzemelerin yüzeylerdeki yangında davranışı araştırılmıştır. Çizelge 2.1’de gösterildiği üzere havalandırma, yakıt yükü ve malzeme cinsi değişken olarak kullanılmış ve kompartımanın bir kapısı açık tutulurken pencerelerin açık ve kapalı konumları kullanılarak farklı deneyler yapılmıştır. Yangının ısı yayma gücünün pencerelerin açık olması halinde önemli derecede arttığı, kaplama malzemelerinin cinsine göre yangının gelişimi hızlandırıp yangın süresini arttırdığı bulguları elde edilmiştir.

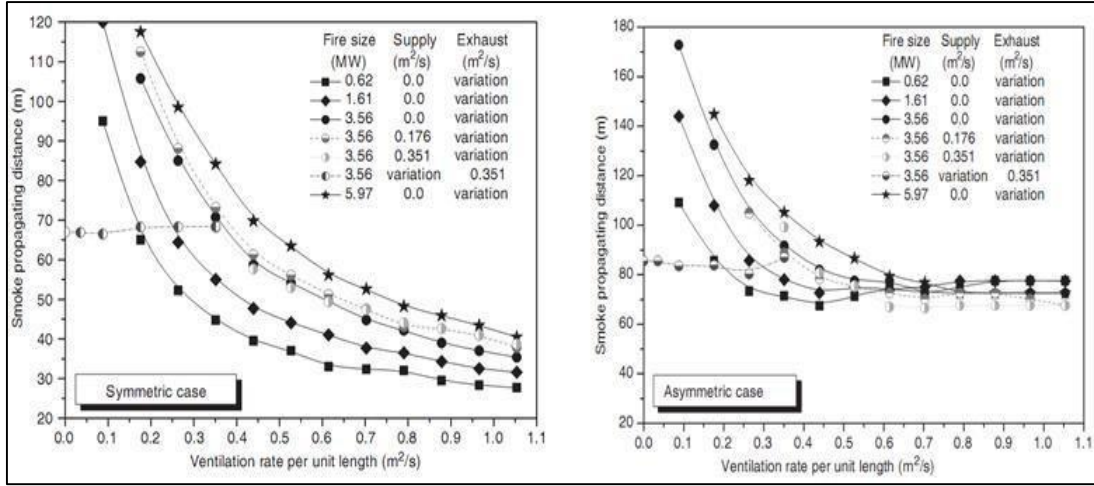
Çizelge 2.1 Ingason ’un yürüttüğü deneyler ve elde edilen değerler [10]

Deney Koşulları	Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4	Deney 5
Kaplama Malzemesi	3.5 mm sunta	3.5 mm sunta	2 X 6.5 mm oluklu mukavva	2 X 6.5 mm oluklu mukavva	2 X 6.5 mm oluklu mukavva
Kaplama malzemesi ağırlığı (kg)	-	5.3	-	3.44	3.08
Ortam sıcaklığı (°C)	18	17	19	20	20
Pencerelerin konumu	Hepsi Açık	Hepsi Kapalı	Hepsi Açık	Hepsi Açık	Hepsi Açık

Çizelge 2.1 Ingason 'un yürüttüğü deneyler ve elde edilen değerler [10] (devam)

Pencere açılma zamanı (d:s)	1:25 Pencere açıldı	5:17 Pencere açıldı			2:06 Pencere açıldı
Pik Isı Yayma Gücü (HRR) (kW)	148	136.5	142.8	147.6	113.2
Pik HRR Zamanı (dak)	6.5	11.1	3.8	3.9	6.5
Toplam yayılan enerji (kJ)	97828	96735	62359	62081	57451
Yanan kütle (kg)	9.58	-	4.8	4.2	4.5
Pik tavan sıcaklığı (°C)	914	921	871	942	962

J.S. Choi ve diğ. [11] tünelde duman yayılımını yangının ısı yayma gücü, yangının tünel içindeki pozisyonuna bağlı değişimini deneysel olarak incelemiştir. Deneyler 1/20 ölçekli bir tünelde gerçekleştirilmiştir ve Froude benzeşimi uygulanmıştır. Tünelin merkezinde ve tünelin bir kenarında yangın oluşması hallerinde duman yayılımındaki değişimler heptan yakılarak incelenmiştir. Ölçülen değerler tekrar Froude benzeşimi kullanılarak gerçek bir tünelde hangi mesafelere dumanın yayılabileceği öngörülmüştür. Şekil 2.2’de gösterildiği üzere deneylerde yangının ısı yayma gücü arttıkça dumanın tünel boyunca yayılımının arttığı, duman egzoz debisi azaltılırsa duman yayılımının azaldığı, yangına giren hava debisinin duman egzoz debisinden düşük olması durumunda duman yayılımına etkisi olmadığı ancak duman egzoz debisinden fazla olması halinde tersine etki yarattığı sonuçlarına varılmıştır.



Şekil 2.2 Dumanın havalandırma debisine bağlı olarak tünelin boyuna kesitinde yayılımı [11]

Kunsch[12], boyuna havalandırılan tünellerde yangın dumanının hava akış yönünün tersine yayılması olayını önlemek için uygulanması gereken kritik hızın değerini belirlemek üzere geliştirilen göreceli olarak basit bir modelin geçerliliği incelenmiştir. Yapılan ölçümlerde yangından yayılan ısı miktarı arttıkça gereken kritik hız artmakta ancak belli bir ısı yayma gücünde hız değeri sabitlenmektedir. Yazar bu durumu CFD modelleme yazılımlarının hesaplayıp hesaplayamayacağını incelemiştir. Ayrıca gerçek ölçekli deneyle küçük ölçekli deneyler arasındaki Froude sayısı ilişkisi incelenmiştir.

Lin ve Chuah [13], çok uzun tünellerde meydana gelecek bir araç yangınında ortaya çıkacak dumanı tünelde uzaklaştırmak için uygulanacak stratejilerden bir tanesinin birden fazla sayıda baca kullanılması teorisi ile CFD yazılımı kullanılarak bu yaklaşımın sadece bir noktadan duman çıkartma stratejisi ile karşılaştırılmıştır. Tek noktadan dumanın tahliyesinin çok noktadan duman tahliye sistemine göre daha etkili çalışacağı görülmüştür.

Carvel ve diğ. [14], tünellerde çıkan yangının dumanını kontrol etmek üzere kullanılan boyuna havalandırma sistemlerinin yangının gelişimine ve yangının yayılmasına olan etkisini araştırmışlardır. Hammerfest, Des Monts, VTT ve HSE tünellerinde uygulanan testlerden elde edilen veriler seçilerek çalışmada kullanılmıştır. Test verilerinin çokluğundan ve hepsini kullanmanın zorluğundan dolayı Bayes istatistik ve olasılık

teoremi kullanılarak bir örneklem altında zorlamalı boyuna havalandırmanın yangının yaydığı ısı miktarına olan etkisini incelemek üzere bir metot geliştirilmiştir.

Lee ve Ryou [15], aynı hidrolik çapa sahip olsalar da farklı yükseklik-genişlik gücüne sahip geometrideki tünellerde farklı yükseklik-genişlik oranlarının yangın dumanı hareketine olan etkisini incelemişlerdir. 1/20 ölçeğindeki dikdörtgen geometrili deney cihazında yapılan ölçümler ve FDS yazılımı ile yapılan hesaplamaların uyumu karşılaştırılmıştır.

Hu ve diğ. [16], tünel yangınlarında kendiliğinden yükselen dumanın havalandırma akış yönünün tersine olan hareketi, bu hareketi engellemek için gerekli kritik hava hızının mertebesini belirlerken geliştirilen formülasyonun kullanıldığı CFD modelleri ve gerçek deneylerden elde edilen ölçümler karşılaştırmış, FDS yazılımı kullanılarak ısı yayma gücü ile kritik hız arasındaki ilişki irdelenmiştir.

Wang [17], boyuna havalandırılan bir tünelde yakılan dairesel yangının ortaya çıkardığı toksik yanma ürünleri, sıcaklık dağılımı ve ısı akısını tanımlamak için Büyük Girdap Simülasyonu – Large Eddy Simulation (LES) modeli kullanarak nümerik bir çalışma yapmıştır.

Gao ve diğ. [18], (LES) metodunun yangın modelleme aracı olarak kullanılabileceği, LES modelinin $k-\epsilon$ olarak da bilinen Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes Denklemleri – Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations (RANS) yaklaşımı ile karşılaştırması ve boyuna havalandırmanın performansını incelemiş, yangını hacimsel ısı kaynağı olarak kabul ederek farklı havalandırma oranları değerlendirmiştir. LES yöntemi ile alınan sonuçlar RANS yaklaşımı ile alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bütün sonuçlar eski bir madende yürütülen deneylerde ölçülen veriler ile karşılaştırılmıştır.

Kurioka ve diğ. [19], duman yayılımının ve ısı yoğunluğunun oluşumunda belirleyici olan yangın kaynağına yakın bölgedeki yanma özellikleri deneysel olarak anlamaya çalışmıştır. Alevin hava hızına bağlı olarak akış yönünde eğilme açısı, maksimum sıcaklık değeri, duman tabakasının oluşum yerinin öngörülmesi ve tanımlanmasına çalışılmıştır. Bu hesapların uygulanabilirliği ölçekli modeller ile tam ölçekli bir model karşılaştırılarak incelenmiştir.

Blanchard ve diğ. [20] bir tünel yangını aynı anda 1/3 oranında ölçeklendirilen bir deney düzeneginde ve nümerik analizler gerçekleştirerek incelemişlerdir. Heptan ile gerçekleştirilen deneylerde 4 MW ısı yayma gücüne erişen yangınlar gerçekleştirip tünel kesiti içinde sıcaklık, gaz hızı ve ısı akısı değişimlerini ölçüp değerlendirmişlerdir. Havalandırma rejimine bağlı olarak ortama yayılan ısı enerjisinin %50 ila %67'sinin tünel duvarlarına iletilen ısı ile ortamdan uzaklaştığı sonucuna varılmıştır.

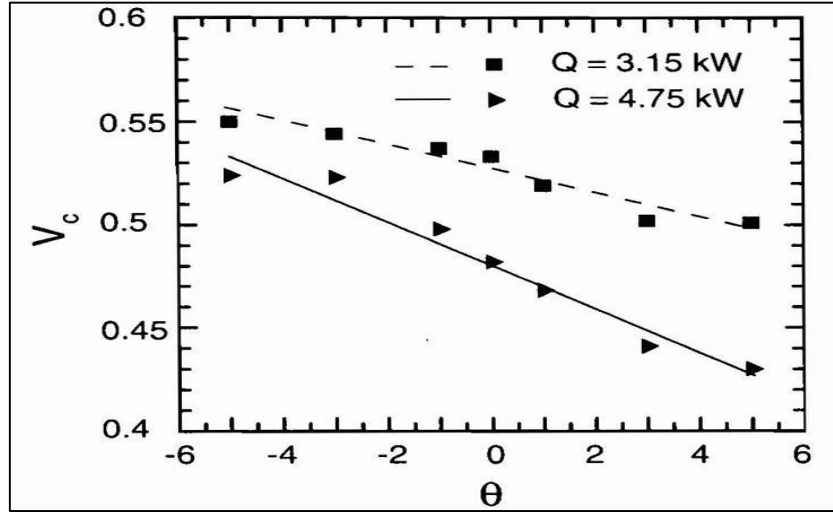
Karki ve diğ. [21], jet fan kullanılarak gerçekleştirilen boyuna havalandırma sistemi için bir Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) modelinin geliştirilmesi ve güvenilirliğini incelemiştir. Oluşturulan modelde türbülans, yanma, ısıma, duman ve jet fanlar için alt modeller yer almaktadır. Deney verileri kararlı-hal ve geçiş hali durumları için hazırlanan modellerle COMPACT-3D yazılımı kullanılarak HAD simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları Memorial Test Programı test verileri ile karşılaştırılarak simülasyonun ve modelin durumu değerlendirilmiştir.

Roh ve diğ. [22], bir tünel ortamında boyuna havalandırmanın yanma gücüne ve ısı yayma gücüne etkisini incelemiştir. Froude sayısı ile 1/20 oranında ölçeklendirilen tünel şekli bir deney düzeneginde n-heptan yakıtı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Yakıtın yanma ile azalması ve kütledeki değişim, ayrıca duman hareketinin değişimini sıcaklık değişimi ile tespiti yapılmıştır. Farklı hava hızlarında yanmadaki değişim izlenmiştir

Kim ve diğ. [23], tünel yangını simülasyonunda kullanılan HAD yazılımlarından biri olan Fire Dynamics Simulator (FDS) yazılımının 4.0 sürümünün değerlendirmesini yapmak üzere gerçekleştirilen hassasiyet analizi çalışmasında simülasyonda kullanılan kontrol hacmine uygulanan ızgara (grid) boyutu karakteristik yangın çapı değeri yüzde 5, yüzde 8 ve yüzde 10 değerlerinde incelenmiştir.

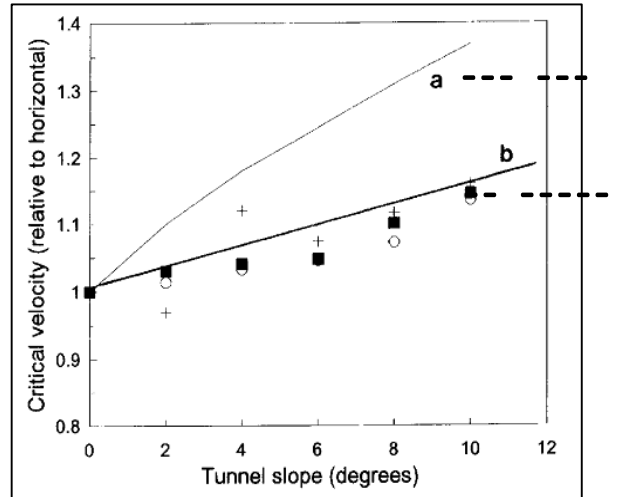
H. Xue ve diğ. [24] laboratuvar ortamında 1:20 ölçekte 0,3 metre yükseklik ve 0,9 metre genişliğe sahip model tünelde gerçekleştirdikleri deneylerde 3,15 kW ve 4,75 kW ısı yayılım gücü ile oluşan gazların 0,13 m/s ila 0,61 m/s aralığında farklı hava hızlarında yayılımını tünel eğimini de değiştirerek incelemişlerdir. Froude sayısına bağlı benzeşimler kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde kritik hızın altında kalan hava hızlarında yanma gazı akışının dikeyde ve yatayda yayılım gösterdiğini, şekil 2.3'de gösterildiği üzere ısı yayma gücü ve duman hareketinin tünel eğimi ile doğrudan ilişkisi

olduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 2.3 Farklı tünel eğimlerinde kritik hızın değişimi [24]

G. T. Atkinson ve diğ. [25] zemin eğimi 0 ila 10 derece arası değişen tünel modellerinde tünel eğiminin kritik hız etkisini test etmişlerdir. Şekil 2.3’de gösterildiği üzere gerçekleştirdikleri çalışmada kendilerinden önceki çalışmalarda belirtilenin aksine tünel eğiminin kritik hız olan etkisinin daha az olabileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.4 Kritik hızın tünel eğimine bağlı değişiminin karşılaştırması [25]

Y. Oka ve diğ. [26] Froude sayısı ölçeklendirmesi ile kritik hızın yangının ısı yayılım miktarı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Kritik hızın ısı yayma gücünün küp kökü ile hesaplanan değere bağlı olarak değiştiği ancak belli bir değerden sonra kritik hız değerinin ısı yayma

gücünden bağımsızlaşarak sabit değer alacağını öngörmüşlerdir. Ayrıca aynı deneylerde yangının tünelin enini kapladıkça kritik hızın yavaşladığı, eğer yangın tünel tavanına yaklaştıkça kritik hızın arttığını değerlendirmişlerdir. Bu farklılığın kamyon gibi büyük hacimli araçların tünelde yanması hali için önemli bir gösterge ve araştırma konusu olacağı belirtilmiştir.

2.3 Ulaşım Ağlarında Tünel Yangını Araştırmaları

1965 yılında İsviçre’de Ofenegg tüneline doğal, boyuna ve enine havalandırma sistemlerini araştırmak üzere farklı büyüklüklerde petrol kaynaklı yangınlar denenmiştir. Doğal havalandırma durumunda yanma bölgesinde azalan oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak bir yangının açık ortam koşullarına göre daha yavaş ilerlediği gözlenmiştir.

1980 yılında Japonya’da uzun bir otoyol tüneline binek araç ve otobüs gibi toplu ulaşım araçlarının yangınları incelenmiştir. Boyuna havalandırmanın yangına etkisi, karbon monoksit konsantrasyonu değerlerinin değişimi ölçülmüştür. Ayrıca yağmurlama sisteminin etkinliği denenmiştir. Yapılan deneylerde yağmurlama sisteminin tünelde oluşan yangınları söndüremediği ama ısı yayma gücünü yavaşlattığı belirlenmiştir. [1]

1985 yılında Finlandiya’da demiryolu vagonları ile yanma denemeleri yapılmıştır. 183 m uzunluğunda bir tünelde testler gerçekleştirilmiştir. [2]

1993-1995 yılları arasında Amerika Birleşik Devletleri Batı Virginia’da 4.000.000 dolar bütçeli Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program projesinde gerçek bir tünel içerisinde 98 adet test gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin sonucunda boyuna havalandırma prensibine hizmet eden aksiyel rotorlu fan (jet Fan) kullanımının tünelde yangın güvenliğini sağlamak için etkili bir yöntem olabileceği ortaya konmuştur. [3]

Avrupa Birliği’nin 6.600.000 Euro bütçeli FIRETUN 499 Fire Protection in Traffic Tunnels araştırmasında 10 Avrupa ülkesinden araştırmacılar 1990-1996 yılları arasında gerçek tüneller içinde tam ölçekli testler gerçekleştirmişlerdir. Bu testlerde yangın yayılma hızı, sıcaklık yayılım gradyenleri, dumanın oluşumu ve yayılımı, açığa çıkan enerji miktarı, havalandırma sistemlerinin etkisi, tünel kaplama malzemelerinin ısınması, tünel kaplama malzemelerinden tüneli saran toprağa ısı transferi, yangın olaylarında farklı tünel kaplama malzemelerinin statik yük altında davranışı, ısı ve duman artarken kaçış

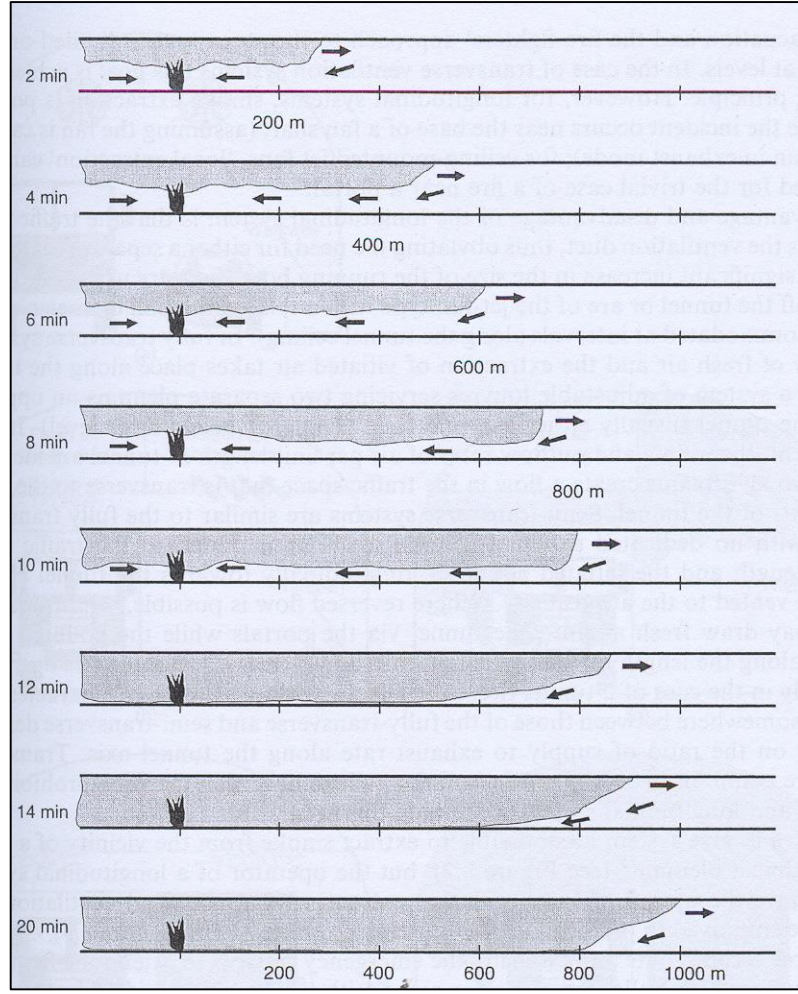
ve tahliye olanakları, dumanın içeriğinde yer alan toksik gazların emisyon ve konsantrasyonu tünel geometrisi, havalandırma koşullarına baēlı olarak incelenmiştir. Avrupa Birliēi'nin 11.000.000 Euro bütçeli "UPTUN: cost-effective, sustainable and innovative upgrading methods for fire safety in existing tunnels" araştırmasında Avrupa'nın her ülkesinden araştırmacılar 2000-2006 yılları arasında sürdürülebilir ulaşımı saēlamak amacıyla tünel tasarımında yangın gvenliēini artırmak için yapılabilecekleri tespit etmek için yangından korunma, algılama, zarar azaltma ölçüleri, insan davranışı, yangının tünele etkileri, mevcut tünellerin iyileştirilmesi, sosyoekonomik zararların azaltılması amacıyla 45 adet çalışma konusu belirleyerek raporlar yayınlamışlardır [2].

2003 yılında Norveç'te Runehamar tünelinde yüklü kamyonların yanması halinde gerekleēebilecek durumlar incelenmiştir. Deneylerde 70 MW ila 200 MW arasında deēiřen ısı yayma oranlarına erişilmiştir. Yanma sonrası oluşan gazların ve dumanın hem insan saēlıēına olan etkilerini azaltmak hem de tünel içinde görüş mesafesini korumak amacıyla gaz konsantrasyonunun kontrol edilerek hava kalitesinin belirli sınırlarda tutulması gerekir. CO ve NO_x ve duman parametreleri kontrol edilebildiēi takdirde diēer emisyonların da kabul edilebilir sınırlar içinde tutulmasının mümkün olabileceēi araştırmalarda ortaya çıkmıştır.

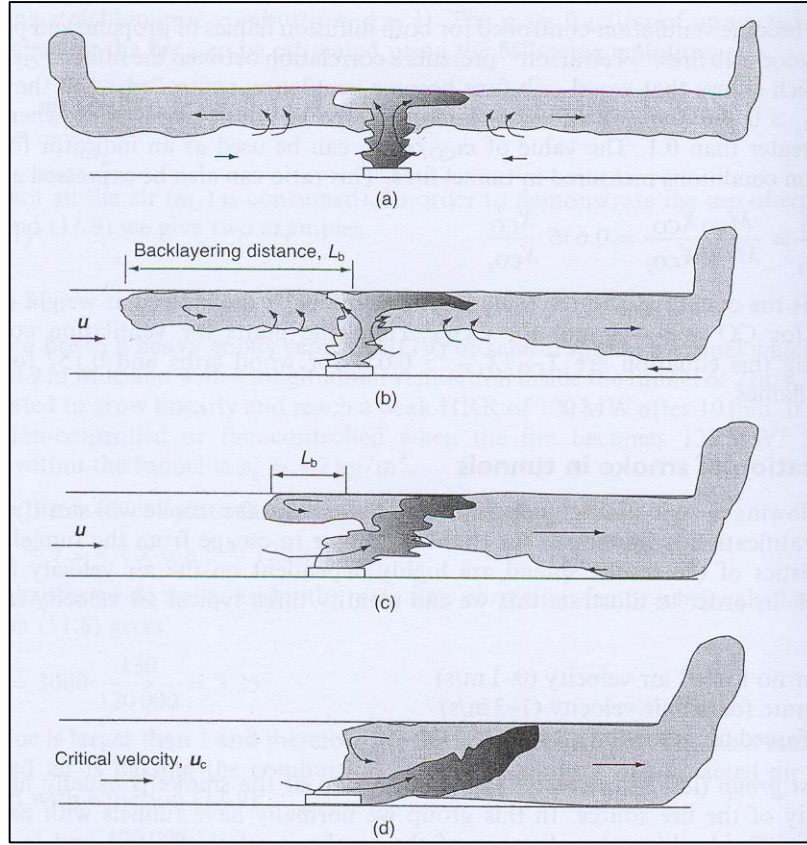
3.1. Tünel Havalandırması Ve Tünel Havalandırma Sistemleri:

Tünel havalandırma sistemlerinin amacı; hava kirleticileri seyreltmek, çevresel faktörleri gözetmek, bir yangın olayında ortaya çıkan dumanı kontrol etmektir. Sadece çevresel kriterler ve emisyon konsantrasyonunu azaltmaya göre tasarlanmış bir havalandırma sistemi yangın dumanının kontrol etmekte yetersiz kalacaktır. Bu anlamda ilave düzenleme gerekir. [4]

Duman yayılmasını kontrol altında tutmanın amacı insanları trafik mahallinin dumansız bir bölümünde mümkün olduğu kadar uzun süre tutabilmektir. Bu sebeple, şekil 3.1’de gösterildiği üzere mevcut duman tabakasının altında teneffüs edilebilir hava kalmasını sağlayacak şekilde duman tabakasının dağılmamasını (stratify) sağlamak veya dumanı akışın altından insan olmayan tarafa doğru sürmek/süpürmek gerekir. Herhangi bir durumda insanlar oldukça kısa bir sürede ve mesafede güvenli noktalara (acil çıkışlar veya yanmaz malzemeden kapalı alanlar) ulaşabilmelidir. Havalandırma sistemi kaçış yollarındaki ve diğer tüpte duman yayılımını engellemelidir. Şekil 3.2(a)’da havalandırma sisteminin çalışmadığı ve yangın dumanının tünel içinde her iki yönde yayıldığı durum, Şekil 3.2(b)’de tünel havalandırmasının çalıştığı ancak hava hızının yavaş kalması sonucu insanların tahliye edileceği yöne doğru duman tabakasının yayılmaya devam ettiği durum, Şekil 3.2(c)’de tünel havalandırmasının çalıştığı ancak hava hızının hala yavaş olduğunun gösterimi ve Şekil 3.2(d)’de tünel havalandırmasının yangın dumanının insanların tahliye olacağı yönde geri ilerlemesini engelleyecek kritik hıza ulaştığı güvenli durum gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Bir tünel içinde çıkan yangın dumanının zamana ve hava akışına bağlı olarak dağılımının gösterimi [27]



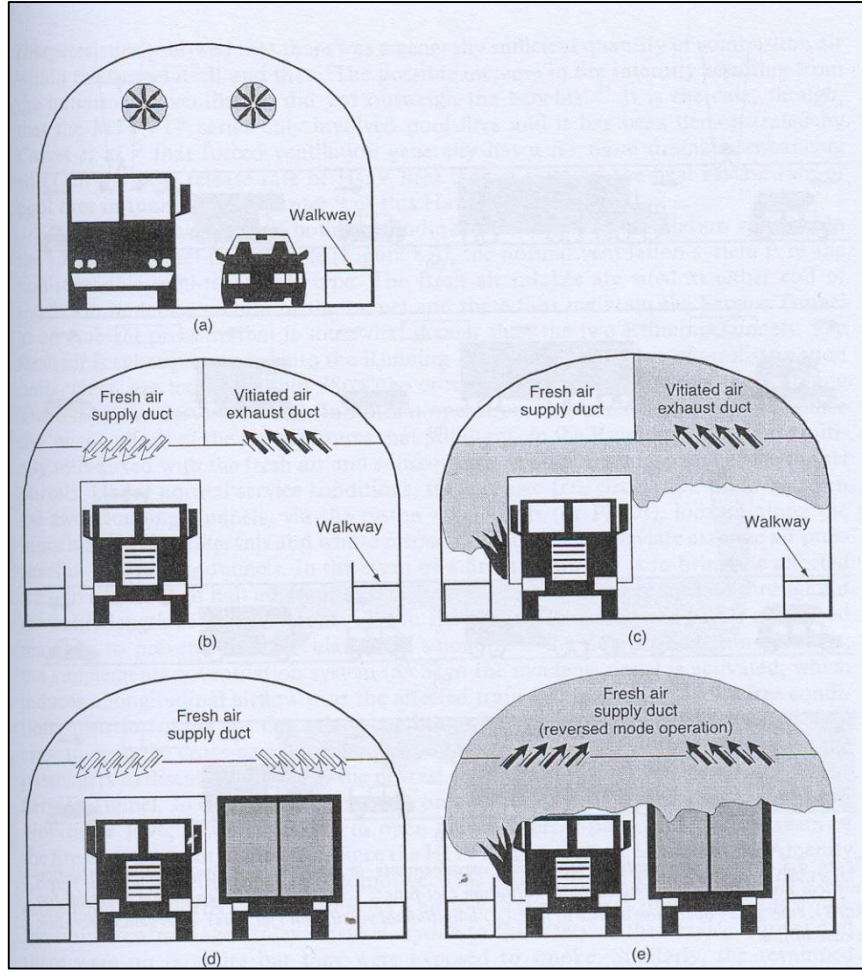
Şekil 3.2 Tünel içinde yangın dumanının hava akışının tersi yönünde yayılma durumunun şematik gösterimi [28]

Kapalı hacimlerde gerçekleşen petrol ürünleri yangınlarında oksijen yetersizliğinden dolayı yanmamış yakıtlarla ikincil patlamalar meydana gelebilmektedir. Havalandırma sistemi tam yanmayı sağlayacak şekilde veya yanmamış gazları seyreltmek için yeterli havayı yangın bölgesine aktarabilmelidir.

3.1.1. Tünel Havalandırma Sistemleri Çeşitleri

Tünellerde temel olarak iki tür havalandırma sistemi bulunmaktadır.

- Doğal Havalandırma
- Mekanik Havalandırma



Şekil 3.3 Mekanik havalandırma sistemlerinin tünel içinde farklı uygulamalarının gösterimi

Doğal havalandırma sistemi tünel dışında mevcut hava sıcaklığı ve basıncı değişimleri veya aracın önündeki havayı hareket yönünde kütleli olarak hareket ettirmesi ile havanın tünelin bir ucundan diğer ucuna (veya şafta) hareket ettirilmesidir. Hava koşullarının değişkenliği ve trafiğe bağlı olduğundan düzenli bir hava akımı yaratmak mümkün değildir.

Şekil 3.3’de gösterildiği üzere mekanik Havalandırma ise (tünel kesitine bağlı olarak) kendi içinde ikiye ayrılır:

- Şekil 3.3(a)’da gösterilen boyuna havalandırma ve
- Enine havalandırma

Enine havalandırma sistemleri ise havanın çevrilme prensibine göre ikiye ayrılır

- Tam enine havalandırma (transverse) sistemi
- Yarı enine havalandırma (semi-transverse) sistemi

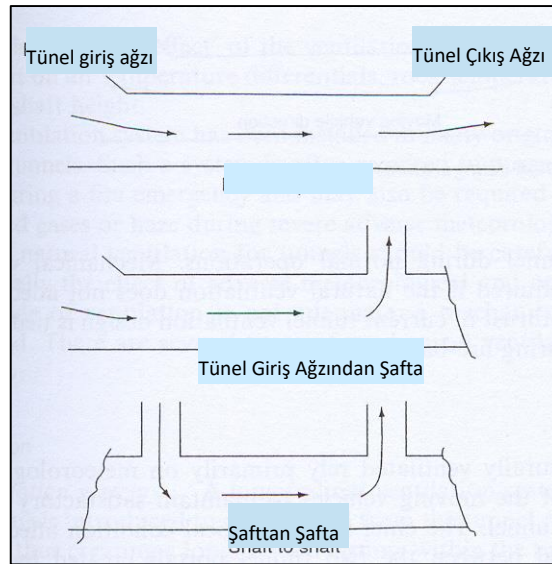
Şekil 3.3(b)'de tam enine havalandırma sisteminin normal trafik koşullarında kullanımı, Şekil 3.3(c)'de tam enine havalandırma sisteminin yangın olayı sırasında üfleme keserek çalışma durumu, Şekil 3.3(d)'de yarı enine havalandırma sisteminin normal trafik koşullarında kullanımı ve Şekil 3.3(e)'de yarı enine havalandırma sisteminin yangın olayı sırasında üfleme keserek ve sadece çekiş yaparak çalışma durumu gösterilmektedir. Her sistemin maliyet ve performans olarak üstünlükleri ve problemleri mevcuttur. Bu anlamda tünel tasarım hedeflerine bağlı olarak bir ve birden fazla sistemin birlikte düşünülmesi gerekir.

3.1.1.1. Doğal Havalandırma

Tünel hacmi içerisinde hava akışının mekanik sistemlerle kontrol edilmediği, desteklenmediği ortamlar doğal havalandırma olarak tanımlanır. Hava sıcaklığı ve hava basıncı değişiklikleri, tünelin girişleri arasındaki yükseklik farkı ve tünel trafiğindeki araçların yarattığı hava hareketleri tarafından oluşur.

Ancak girişler arasındaki yükseklik farkı hariç olmak üzere bu faktörler değişkenlik gösterir ve birbirini etkiler.

Şekil 3.4'de gösterildiği üzere doğal havalandırma temel olarak üç şekilde yapılır:



Şekil 3.4 Doğal havalandırma prensiplerinin gösterimi

Tünel giriş ağzından – tünel çıkış ağzına doğru

Tünel giriş ağzından – şafta doğru

Şafttan – şafta doğru

Tünel ağzından tünel ağzına havalandırma, düzenli hava akışı yarattığı için, tek yönlü trafiğin bulunduğu tünellerde uygulanabilir. Hava kirliliği tünel çıkış ağzına doğru artar ve trafik yönünün tersine esen rüzgar gibi meteorolojik koşullar oluştuğunda hava hızını düşürebilir, tünel içindeki havada kirlilik yoğunluğu artabilir. Trafiğin çift yönden ilerlediği tünellerde, tünel içindeki hava akışı tek yönlü tünele göre daha fazla azalmaktadır. Araçların oluşturduğu trafik yoğunluğu artması durumunda tünel merkezi ve ona yakın bölgelerde hava kirliliği sağlığa zararlı seviyeye ulaşmaktadır. Karayolu tünellerinde araçlar tarafından yaratılan hava hızı az olmasına rağmen piston etkisi ile tek tüplü karayolu tünelleri havalandırılabilir. Bununla birlikte tünel çapı büyüdükçe araçlar tarafından oluşturulan hava hızı düşer ve hava hacmindeki artış daha fazladır, dolayısıyla tünel kesitinin artmasıyla tünel içi havadaki kirlleticilerin seyreltilmesi yavaşlar.

Dünyada birkaç yüz metreden daha uzun olmayan tünellerde doğal havalandırma kullanılır. Dağlık alanlarda bu uzunluk 500 metreye kadar çıkabilmektedir. Ancak meteorolojik unsurların ve basınç farkının kullanımı yangın dumanının kontrolü amacıyla özellikle uzun ve trafiği yoğun (araç sayısı 2000 adet/saatten fazla ise) tüneller için uygun bir yöntem değildir.

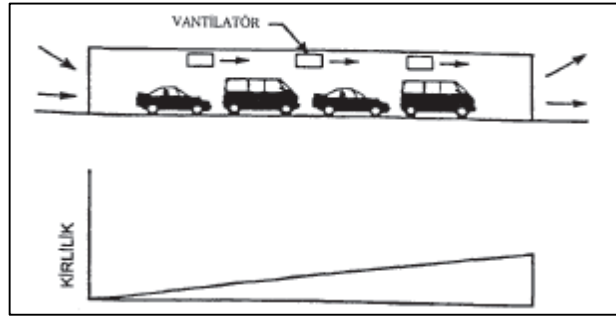
3.1.1.2. Mekanik Havalandırma

Boyuna Sistem (Longitudinal Ventilation)

Havalandırma sisteminin bütün tünel boyunca düzgün bir boyuna akış yaratmasıdır. Böyle bir sistemde tünel giriş ağzındaki hava temiz kabul edilir. Araçların yaydığı maddelerle hava kirlendiğinden tünel çıkışında kirli hava vardır.

Boyuna havalandırma genellikle tünel boyunca tünel kesitine dağıtılmış eksenel akış vantilatörleri tarafından sağlanır. Jet vantilatörlerin tünel boyunca dağılımları ve büyüklükleri tünelin boyunca oluşan hava hızının tamamı üzerine etkili değildir. Aerodinamik açıdan bakıldığında, vantilatörler çıkışlara çok yakınsa, etkileri azalır. Vantilatörlerin ilk ve son tesis yerleri tünel içinde çıkışlara en az 80 ila 100 metre mesafede olmalıdır. Bu yöntem, tek yönlü trafiğe sahip tünellerde etkilidir. Hava hızı tünel boyunca sabit kalmakta, giriş ağzında temiz olan hava giderek kirlenmekte ve çıkış ağzında en fazla kirlilik seviyesine ulaşmaktadır. Şekil 3.5’de gösterildiği üzere tünel

uzunluğunun artması ve enjekte edilen hava miktarının azalması da çıkış ağzındaki hava kirliliğini arttıran bir faktördür.



Şekil 3.5 Tünel tavanına monte edilmiş jet fan kullanılarak boyuna havalandırma [29]

Boyuna havalandırma sistemleri dışındaki diğer mekanik havalandırma sistemlerinde, havalandırma havası bu amaçla inşa edilmiş kanallardan temin edilir veya tahliye edilir. Bazı tünellerde bu kanallardan hem tahliye hem taze hava temini sağlanır. Bu sistemler tam enine sistem, yarı enine sistem şeklinde ayrılır.

Tam Enine Sistem

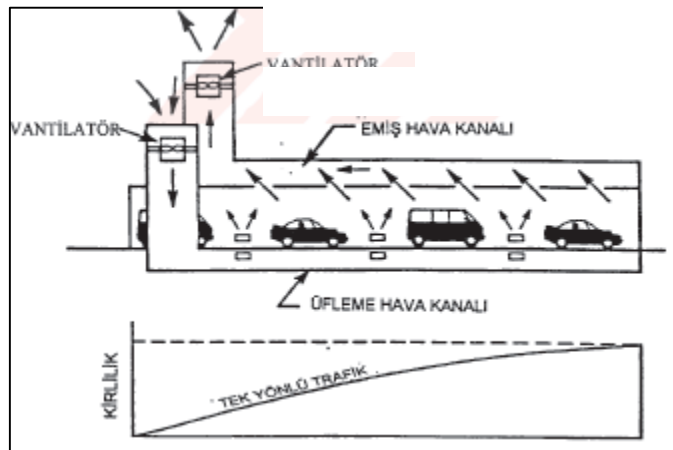
Bu havalandırma sistemlerinde, trafik boyunca uzanan taze hava besleme kanalı ve kirli hava emiş kanalı vardır. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de gösterildiği üzere taze hava tünel boyunca oluşturulmuş açıklıklardan tünel kesitine verilirken, egzoz havası tünelin diğer yan tarafındaki egzoz kanalından tahliye edilir. Bu sistemde, tünel uzunluğunun her metresinde, tahliye edilen egzoz havası miktarıyla beslenen hava miktarı eşittir.

Enine havalandırma sistemi büyük kapasiteye sahip olsa da işletme zorluğu vardır. Hava akımında kullanılan en yaygın kontrol taze havanın enjekte edilmesinin veya egzoz havası tahliyesinin birbirinden ayrı çalıştırıldığı ardışık bağımsız havalandırma bölümleri oluşturmaktır.

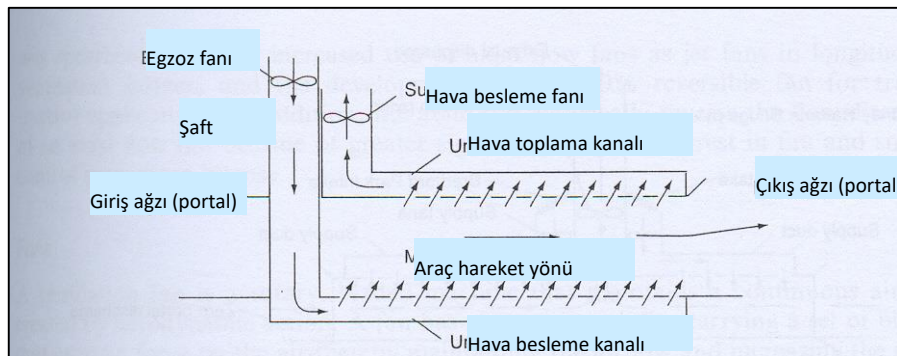
Hava içindeki kirletici konsantrasyonu, bütün tünel boyunca sabittir, bunda dolayı uzun tünellerde uygulama için uygundur. Prensip olarak tahliye edilen kirli hava miktarı veya tünel uzunluğunda bir kısıtlama yoktur. Ancak ekonomik kısıtlamalar göz önünde bulundurulmalıdır. Taze havanın gerekli toplam hacmi tünel uzadıkça doğal olarak artmaktadır. Havalandırma kanalları geniştir ve pahalıdır. Kanallardaki hava hızı, gerekli vantilatör kapasitesini de belirler. Bundan dolayı uzun tünellerde kanal sistemi kısımlar halinde boyuna bölünür ve bu farklı kısımlar içinde hava hızını sınırlamak için hava farklı

yerlerden beslenir. Sistem tam kapasite çalıştırıldığında hava bacalarında 15 m/s ila 25 m/s hızlar gözlemek mümkündür. Oluşturulan birkaç bağımsız havalandırma bölümü ile boyuna hava debisinin de belli ölçüde kontrolü sağlanır. Ventilatorler genelde tünel tüplerine yakın veya yeraltı platformlarına yerleştirilir.

Ancak büyük bir yangın olayında yangın bölgesinde dumanın seyreltilmesinden başarılı olunmadığı Memorial Tüneli Test Programı'nda görülmüştür. Mevcutta bu sisteme sahip tünellerde yaygın uygulama şu şekildedir. Yangın anında taze hava kanalı tam egzoz boşaltma konumuna çevrilir ve komşu havalandırma bölümlerinde egzoz kanalları taze hava besleme konumuna çevrilerek boyuna akış sağlanmaya çalışılır ve hava hızıyla hareket edebilen duman bu yolla kontrol edilir. Bununla birlikte kısa tünellerde rüzgar etkisi altında ve sıcak dumanın baca etkisiyle yangın bölgesi içinde hava yönünün ve hızının kolay kontrol edilemediği testler vasıtasıyla anlaşılmıştır.



Şekil 3.6 Tünel boyunca hem emiş hem üfleme kanallarının birlikte kullanılması [29]



Şekil 3.7 Fan yardımıyla tünel içine havanın verilmesi ve egzoz edilmesi

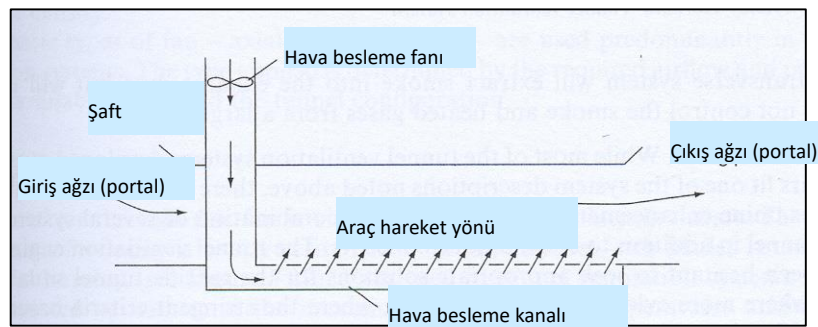
Yarı Enine Sistem (Tersine Çevrilebilir Sistem – Semi Transverse Sistem)

Bu sistemde Şekil 3.8’de gösterildiği üzere dış hava genellikle tünel boyuna eşit dış taraftaki bir hava besleme kanalından sağlanır, fakat hava tahliyesi yoktur. Taze hava tünelin boyuna eksenine dik yönde bir fan yardımıyla dış ortamdan sağlanır.

Tersine çevrilebilir sistemde kanallardaki hava akış yönünü tersine çevirmek mümkündür. Bu durumda, temiz hava tünel giriş ağzlarından tünele doğru akarken egzoz havası açıklıklardan ve tersine çevrilebilir hava kanallarından tahliye edilir. Bu yüzden tünel boyunca iki ağzdan veya komşu havalandırma bölümlerinden gelen havayı devamlı olarak hava beslemesi için emen boyuna bir hava akımı yaratır. Tersine çevrilmiş çalışma konumu genellikle tünel içinde yangın durumu için oluşturulur.

Tam enine havalandırma sisteminde olduğu gibi yarı enine havalandırma sisteminde de dış faktörler tünel boyunca bir hava akımı yaratabilir. Hava tünel uzunluğu boyunca düzgün dağılımlı olarak üflenmekte veya emilmektedir. 2000 metre den uzun tünellerde tünel ağzlarındaki hava hızı çok yüksek değerlere çıkmaktadır.

Yangın çıktığı zaman üfleme fanları ters yönde çalıştırılarak dumanın kanalların içine çekilmesi ve tünel dışına tahliyesi sağlanır. Yangın sırasında ihtiyaç olunan temiz hava tünel ağzlarından sağlanır. Bu sistemde uygulanan bir diğer yöntem emiş hava kanalı kullanılmasıdır. Tünel giriş ve çıkış ağzlarından alınan hava tünel tavanına inşa edilen hava kanalı ve egzoz fanı ile tünel dışına tahliye edilmektedir.



Şekil 3.8 Yarı enine sistemde tünel içine havanın verilmesi

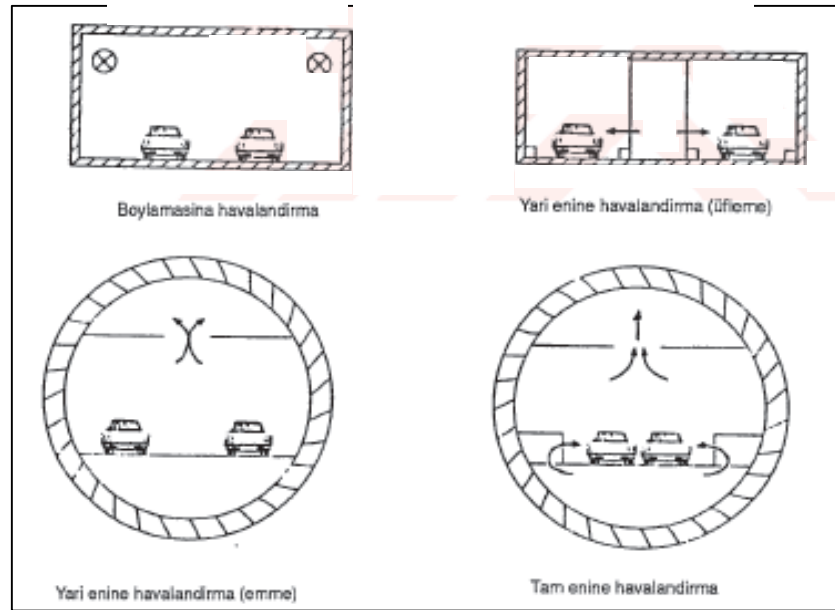
3.1.1.2.1. Mekanik Havalandırmanın Gerektiği Durumlar

Doğal havalandırma kirleticilerin seyreltilmesi için etkili olabilir fakat yangın durumunda güvenli ortamın sağlanması için sadece doğal havalandırmaya güvenilmemelidir. Tünel

içindeki bir yangın olayında trafik muhtemelen duracaktır ve havalandırma sadece kısmen bir baca etkisi ile sağlanacak ancak yetersiz olacaktır. Bu sebeple bazı ülkeler doğal havalandırma uygulamasını sınırlamaktadırlar ve mekanik havalandırma ölçütlerini ortaya koymaktadırlar.

Almanya	350 metreden uzun,
Fransa	şehir içinde 300 metreden uzun,
İngiltere	400 metreden uzun,
Hollanda	risk analizi ile uzunluk belirlenir,
ABD	240 metreden uzun,

tünellerde doğal havalandırma yetersiz bulunmaktadır ve Şekil 3.9'da kesit görünüşleri belirtilen farklı tipteki mekanik sistemlerden ihtiyaca ve koşullara uygun olanın inşası zorunlu olmaktadır. [29]



Şekil 3.9 Havalandırma yöntemlerinin tünel kesiti görünüşleri

3.2. Tünel Yangınları

Tünel içinde bir kaza meydana geldiği takdirde çok sayıda insana zarar verecek ve büyük olasılıkla tünelin yapısına zarar verecek 3 büyük risk vardır:

- yangınlar

- patlamalar
- zehirli gazların yayılması veya zehirli sıvıların buharlaşması

3.2.1. Yangınlar

Geçmiş yıllarda dünyanın çeşitli ülkelerindeki tünellerde yangın olayları yaşanmıştır. Bu yangınların bir kısmının listesi Çizelge 3.1’de yer almaktadır. Bu yangın olayları incelendiğinde yaşanan insani kayıplar ve hasar değişik mertebelerde yer almaktadır. Ancak 2001 yılı St. Gotthard tüneli gibi yangınlar önemli ulaşım kanallarının uzun süre boyunca kapalı kalmasına yol açarak yangın sonrasındaki ekonomik kayıplar da önemli etkiye sahiptir.

Çizelge 3.1 Geçmiş büyük tünel yangınları

Yılı	Tünel	Ülke	Tünel Uzunluğu	Olayın Sonucu
2015	Sangju Tüneli	Kore	0.4 km	Tanker kazası sonucu patlama, 21 kişi yaralandı, 12 araç yandı, yangın 6 saat
2014	Yanhou Tüneli	Çin	0.8 km	Tanker kazası sonucu patlama, 40 kişi öldü, 4 araç yandı, yangın 73 saat
2013	Baltimore Tüneli	A.B.D	2.33 km	Tünelde giden araç yangını
2013	Guddvanga Tüneli	Norveç	11.43 km	Kamyon kazası sonucu çıkan yangında 26 kişi yaralandı, tünel ağır hasara
2011	Oslofjord Tüneli	Norveç	7.31 km	Kamyon kazası sonucu çıkan yangında 31 kişi yaralandı, tünel ağır hasara
2009	Eiksund Tüneli	Norveç	7.77 km	Kamyon kazası sonucu patlama yaşandı, tünel ağır hasara uğradı
2009	Follo Tüneli	Norveç	0.91 km	Kamyon kazası sonucu çıkan yangında tünel ağır hasara uğradı.
2007	San Martin Tüneli	İtalya	4.82 km	Kamyon kazası sonucu çıkan yangında 2 kişi öldü, tünel ağır hasara uğradı.
2007	Burnley Tüneli	Avustralya	3.40 km	Kamyon kazası sonucu yangın, 3 kişi öldü, 3 kişi yaralandı.
2006	Viamala Tüneli	İsviçre	0,74 km	Otobüs kazası sonucu yangın, 9 kişi öldü, 9 kişi yaralandı, 6 araç yandı.
2006	Oslofjord Tüneli	Norveç	7.31 km	Kamyon yangını
2005	Adana TAG tüneli	Türkiye	0.3 km	Takla atan petrol tankeri yandı. Tünel günlerce kapalı kaldı.
2004	Frejus tüneli	Fransa	1.29 km	Kamyon yangını, tünel 2.5 saat kapatıldı.
2004	Trojan tüneli	Slovenya	2.9 km	İnşaat sırasında çıkan yangın, maden işçileri tarafından söndürdü.

Çizelge 3.1 Geçmiş büyük tünel yangınları (devam)

Yılı	Tünel	Ülke	Tünel Uzunluğu	Olayın Sonucu
2004	Cointe tüneli	Belçika	1.3 km	Kamyon yangını, tünel 3 gün kapalı kaldı.
2004	Dullin tüneli	Fransa	1.5 km	Otobüs yangını, şoför tünel içinde durmayarak 37 kişiyi kurtardı.
2003	Golovec tüneli	Slovenya	0.7 km	Otobüs yangını, otobüsteki 50 gönüllü itfaiyeci yangını söndürdü.
2003	Floyfjell tüneli	Norveç	3.1 km	Araç yangını, araç sürücüsü öldü.
2003	Guadarrama tüneli (demiryolu)	İspanya	30 km	Tren yangını. 34 işçi tünelin içindeki bir noktadan 5 saat sonra kurtarıldı.
2003	Locica tüneli	Slovenya	0.8 km	Kamyon yangını. Kamyondan sonra tünele giren 28 araç yandı.
2003	Mornay tüneli (demiryolu)	Fransa	2.6 km	Yangın 5 saatte söndürüldü.
2003	Cret d'eau tüneli (demiryolu)	Fransa	4.0 km	53 yolcu 4 saat sonra kurtarıldı.
2003	Jungangno tüneli (demiryolu)	Güney Kore		Kundaklama sonucu 6 vagon yandı. 189 kişi öldü.
2002	Homer tüneli	Yeni Zelanda		Otobüs yangını. Şoför çıkışa yakın noktada durarak 32 kişiyi kurtardı.

Çizelge 3.1 Geçmiş büyük tünel yangınları (devam)

Yılı	Tünel	Ülke	Tünel Uzunluğu	Olayın Sonucu
2002	Ted Williams tüneli	A.B.D.	2.6 km	Otobüs yangını, şoför 5 yolcu duman zehirlenmesinden hastaneye kaldırıldı.
2002	A86 tüneli	Fransa		Yangın 6 saat sürdü. 19 işçi tünelin içinde mahsur kaldı. 150 itfaiyeci ile söndürülebildi.
2002	Tauern tüneli	Avusturya	6.4 km	Kamyon yangını
2001	St. Gotthard tüneli	İsviçre	16.9 km	İki kamyonun çarpışması sonucu çıkan yangın 2 gün sürdü,11 kişi öldü,23 araç yandı.
2001	Gleinalm tüneli	Avusturya	8.0 km	İki araç çarpıştı. Çıkan yangında 5 kişi öldü, 4 kişi yaralandı.
2001	Howard tüneli	A.B.D.		6 vagonunda hidroklorik asit taşıyan tren yandı. Tünel yakınından geçen
2001	Schipol havaalanı	Hollanda		Bağlantı tüneli yandı.
2001	Tauern tüneli	Avusturya	6.4 km	2 kamyon çarpışarak yandı.
2001	Berlin Platz istasyonu	Almanya		
2000	Kitzsteinhorn tüneli	Avusturya	3.3 km	Kayakçıları taşıyan funiküler araç yandı. 150 kişi öldü.
2000	New York metro tüneli	A.B.D.		20 metro istasyonu 4 saat kapalı kaldı.
2000	Rotsethorn tüneli	Norveç	1.2 km	2 kişi öldü.
1999	Candid Tüneli	Almanya	0.25 km	

Çizelge 3.1 Geçmiş büyük tünel yangınları (devam)

Yılı	Tünel	Ülke	Tünel Uzunluğu	Olayın Sonucu
1999	Amsterdam metrosu	Hollanda		Tüm metro sistemi durduruldu.
1999	New York metrosu	A.B.D.		52 kişi dumandan zehirlendi
1999	Tauern tüneli	Avusturya	6.4 km	
1999	Mont-Blanc tüneli	Fransa	11.6 km	Kamyon yandı. 39 kişi öldü, 34 araç yandı, 53 saatte söndürüldü.
1999	Leinebusch tüneli	Almanya		Tren raydan çıktı. Yangın 12 saatte söndürüldü. 1 itfaiyeci öldü.
1998	Gueizhou tüneli	Çin	0.8 km	80 kişi öldü
1997	Exilles tüneli	2.1 km	İtalya	1 lokomotif, 13 vagon ve 156 araç yandı.
1996	Channel tüneli	İngiltere - Fransa	51 km	10 kamyon ve onların taşıyan vagonlar yandı. 350 MW ısı enerjisi yayıldığı ölçüldü.
1996	Isola tüneli	İtalya	0.15 km	LPG taşıyan tankere arkadan otobüs çarptı. Patlamalarda 5 kişi öldü, 40 kişi yanarak ağır yaralandı.
1995	Baku metrosu	Azerbaycan		220 kişi öldü, 256 kişi yaralandı.
1994	Huguenot tüneli	Güney Afrika	4.0 km	
1993	Hovden tüneli	Norveç	1.3 km	
1993	Vardo tüneli	Norveç		

Çizelge 3.1 Geçmiş büyük tünel yangınları (devam)

Yılı	Tünel	Ülke	Tünel Uzunluğu	Olayın Sonucu
1993	Serra Ripoli tüneli	İtalya	0.44 km	4 kişi öldü, 4 kişi yaralandı.
1992	New York metrosu	A.B.D		400 kişi tahliye edildi, 51 kişi dumandan zehirlendi.
1991		Çin		Yanan trenden inen 15 kişi karşı yönden gelen trenin altında kalarak öldü.
1991	Moskova metrosu	Rusya		7 kişi öldü, 10 kişi yaralandı.
1991	Hirshengraben tüneli	İsviçre	1.3 km	
1990	Roldal tüneli	Norveç	4.7 km	
1990	Los Angeles metrosu	A.B.D.		Tünelin 45 metrelik kısmı çöktü
1990	Mont-Blanc tüneli	Fransa - İtalya	11.6 km	Kamyon yandı. 2 kişi dumandan zehirlendi.
1989	Brenner tüneli	Avusturya		155 itfaiyeci müdahale etti. 2 kişi öldü.
1988	Mont-Blanc tüneli	Fransa - İtalya	11.6 km	Kamyon yandı. Fransız itfaiyeciler 500 metre duman içinde mahsur kaldılar.
1987	Kings Cross istasyonu	Londra, İngiltere		31 kişi öldü. Yangın 6 saat sürdü.
1987	Brüksel metrosu	Belçika		1000 kişi tahliye edildi. Ölü veya yaralı yok.
1986	L'arme tüneli	Fransa	1.1 km	3 kişi öldü, 5 kişi yaralandı.

Çizelge 3.1 Geçmiş büyük tünel yangınları (devam)

Yılı	Tünel	Ülke	Tünel Uzunluğu	Olayın Sonucu
1985	Meksiko metrosu	Meksika		1700 kişi yaralandı
1985	Grand Central istasyonu	New York, ABD		15 kişi yaralandı. 3 milyon dolar maddi hasar
1984	San Benedetto tüneli	İtalya	18.5 km	Bombalama sonucu 17 kişi öldü, 120 kişi yaralandı.
1984	Hamburg metrosu	Almanya		Kundaklama sonucu 1 kişi öldü, 3 milyon dolar hasar meydana geldi.
1983	Pecorile tüneli	İtalya	0.66 km	9 kişi öldü, 20 kişi yaralandı.
1983	Frejus tüneli	Fransa	12.9 km	
1982	Salang tüneli	Afganistan		Askeri konvoy içindeki tanker patladı. Resmi olmayan rakamlara birkaç bin asker öldü.
1982	Caldecott tüneli	A.B.D.	1.0 km	Araç tankere çarptı. Yangında 7 kişi öldü.
1981	Mont-Blanc Tüneli	Fransa - İtalya	11.6 km	
1981	Moskova metrosu	Rusya		
1979	Nihonzaka Tüneli	Japonya	2.05 km	Araç kazası sonucu çıkan yangında 173 araç yandı. Yangın 6 gün sürdü

Tünel geometrisine, trafik durumuna, yangın savunma donanımına bağlı olarak büyük bir yangın birkaç kişiden onlarca kişiye bağlı olarak insanları öldürebilir ve tünel yapısına zarar verebilir.

OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development) örgütü ile Dünya Yol Birliği (PIARC) ortaklaşa çalışarak, 7 Nisan 2003 tarihli 2003/28/EC direktifinde ADR (Tehlikeli Maddelerin Yollar Vasıtası ile Uluslararası Taşınması) içinde tanımlanan güvenlik prensiplerini anlayacak ve yol gösterecek bir risk değerlendirme metodu geliştirmişlerdir. [30] QRAM (Qualitative Risk Assessment - Road Model) olarak bilinen bu metot sayesinde tehlikeli maddelerin tünel geçişleri esnasında ortaya çıkacak riskler sayısal olarak hesaplanabilmekte ve zarar azaltma çalışmaları planlanabilmektedir[31].

3.2.2. Patlamalar

Tünel içindeki büyük patlamaları ikiye ayırmak gerekir.

- BLEVE patlamaları

Aracın taşıdığı çok miktarda tehlikeli sıvının yangınla ısınması sonucu patlamasıdır. Tank içindeki sıvı kaynamakta, tank içinde buharlaşmakta, basınç artmakta ve patlama gerçekleşmektedir.

- Soğuk BLEVE patlamaları

Sıkıştırılmış halde tutulan ama yanıcı olmayan bir gazın yangın sonucu ısınması, basıncın artması ve patlamanın gerçekleşmesidir.

3.2.3. Zehirli Gaz Yayılımı

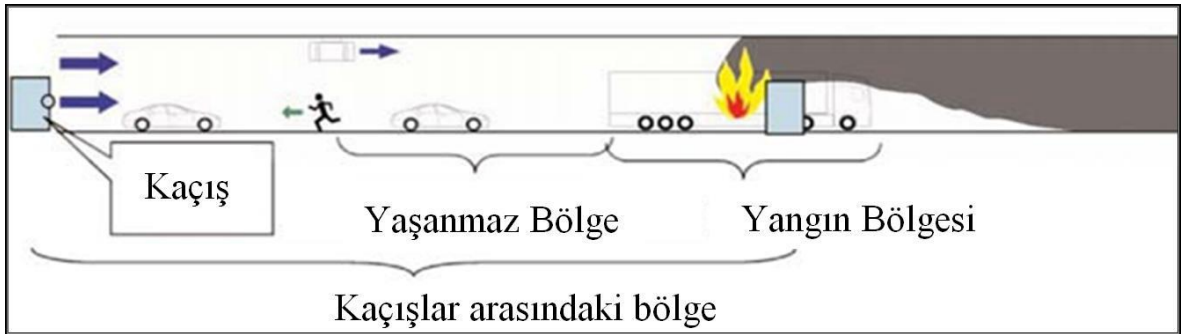
Zehirli gazlar taşımak için tanklara çeşitli yöntemlerle yüklenirler. Bu yöntemler esas olarak; basınçlandırarak sıkıştırma, sıvılaştırma ve başka bir maddenin içinde çözündürmedir.

Tank içindeki bu gaz veya sıvının bir kaçak neticesinde ortam havasına karışması sonucu kaçağın gerçekleştiği bölgedeki insanları öldürmesi ve havalandırmanın gazı yönlendirdiği bölgedeki insanları da ciddi şekilde etkilemesi büyük olasılığa sahiptir. Böyle bir kazada özellikle ilk dakikalarda tünelin tamamını bu ölümcül etkiden koruma imkânı bulunmamaktadır.

3.3. Tünel Yangınlarının İnsan Sağlığına Etkileri ve Yaşanabilir Ortam

Bir yangın; yüksek sıcaklıkların, ısı radyasyonunun, solunabilir havadaki oksijen oranının azalması, görüş mesafesinde azalma, ölümcül zehirleyici ve korozyif gazların ortama yayılmasına neden olur. Bütün bu fiziksel durumlar insanlara, yapıya, donanıma ve araçlara tehdit oluşturur.

Yaşanabilir ortam insan yaşamını belirli bir süre destekleyen ortam olarak adlandırılır, Şekil 3.10'da "kaçışlar arasındaki bölge" olarak belirtilmiştir. Yangına karşı can güvenliği sistemlerinin hedefi tahliye için gerekli yaşanabilir ortamın sağlanmasıdır.



Şekil 3.10 Bir tünel yangınında yaşanabilir bölgenin gösterimi [4]

Oluşan bir yanma sonucunda aşağıdaki ürünler meydana gelir

1. Alev
2. Isı
3. Duman ve tehlikeli gazlar

Bu üç yanma ürününün de insan sağlığını tehdit eden özellikleri vardır.

3.3.1. Alev

Yanma sonucu oluşan alevler cilt ile temas ettiğinde yanıklara sebep olur. Yanıklar şiddetine göre üçe ayrılır.

- 1. Derece Yanıklar
- 2. Derece Yanıklar
- 3. Derece yanıklar

1. Derece yanıklar, güneş yanığı türü hafif şiddette yanıklardır. Tedavi için su kullanılması yeterli olmaktadır.

2. Derece yanıkların şiddeti biraz daha fazladır. Ciltte kısmi su toplamaları (bül) oluşur. Tedavi için oda sıcaklığında akan su ve yanık kremleri kullanılmalıdır. Büllerin kesinlikle patlatılmaması gerekmektedir.

3. Derece yanıklar, deri, kas ve sinir bütünlüğünün zarar gördüğü şiddetli yanıklardır. Yanan alan yüzeyinin büyüklüğüne göre ölüme sebep verebilir. Tedavi için bir yanık merkezine başvurulması gerekmektedir.

Yangınla mücadelede alevin olumsuz etkisinden korunmak ve alevli ortamlara girebilmek için kullanılan en yaygın koruyucu, alüminize elbiselerdir. Alüminize elbiselerde dikkat edilecek nokta, elbisenin bütün olarak değerlendirilmesidir. Elbise altına giyilecek ayakkabının ve eldivenlerin de koruyucu olması gerekmektedir.

3.3.2. Isı

Yanma sonucu oluşan ısı, ısıma özelliğinden dolayı cilt yanıklarına sebep olacağı gibi başka zararlı etkileri de vardır. Ortam sıcaklığının aşırı artması sonucu kalp krizi, iç organ kanaması, protein pıhtılaşması sonucu ölümcül etkiler meydana gelebilmektedir. Bu durumda, sıcaklık bariyerli, geç yanar koruyucu kıyafet kullanılması gerekmektedir. Bu kıyafetlerin kumaşları özel olarak emprenye edilmiş, geç tutuşmaları sağlanmış ve tutuştuklarında eriyerek yanmaları önlenmiştir.

Ortamdaki ısıyı, iç taraflarına çok düşük derecelere düşürerek aktaran bu kıyafetler yangına yaklaşma elbisesi olarak bilinirler. Dikkat edilmesi gereken nokta, bu kıyafetlerin ısı ve nem bariyerli astarlarıyla birlikte kullanılması gerekliliğidir. Ayrıca kıyafetlerin dikişlerinde kullanılan ipliklerinde geç yanar özellikte olması gerekmektedir. Bir diğer önemli nokta da, kıyafetin tamamlayıcı unsuru olan ve ense ile başı korumaya yarayan ısı yalıtkanlığı sağlanmış başlıkların kullanılmasıdır.

Yangına müdahale personelinin bahsi geçen bu etkilere maruz kalması halinde nasıl müdahale edileceği yasal düzenlemelerde ve bu düzenlemelere bağlı geliştirilen prosedürlerde mevcuttur. Ancak sivil kullanıma açık bir ulaşım tüneline çıkan yangında bu etkilere maruz kalacak ilk kişiler bu tür ortamları bilmesi beklenmeyen insanlar olacaktır. Dolayısıyla tünelde oluşan yangın sırasında yaşanabilir ortamın hangi ölçütler ile oluşturulacağı uluslararası kabul görmüş yasal düzenlemelerde mevcuttur.

Tünel yangınında yasal düzenlemenin temel amaçları tünel yapısı ve tünelde mevcut donanımın yangın hasarının önlenmesi, tünelde mevcut kullanıcıların tahliye için yeterli süreye sahip olması ve yangına müdahale eden kişilerin korunması, can güvenliğinin sağlanmasıdır. Yaşanabilir koşulların belirlenmesi bu amaçlar doğrultusunda son derece önemlidir.

NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, 2014 standardı 7.16.2 maddesinde bir tünel yangınında tahliye boyunca yaşanabilir ortamın sağlanması gerektiği hükmü vardır[4]. Bu hükümle ilgili olarak aynı standardın B Ekinde yaşanabilir ortam ısı yanında hava kalitesi ile birlikte tanımlanmıştır. Söz konusu standartta belirtildiği üzere ısıya maruz kalmak üç temel etki ile bir insanın yaşamını tehdit eder.

- Hipertermi,
- Vücut yüzeyinde, deride oluşan yanıklar
- Solunum yollarında oluşan yanıklar.

Yangında ısıya maruziyetin yaşama olan etkisinin modellenmesinde kullanılabilecek bazı değerler vardır:

- Deride yanık oluşması için sınır değeri ve
- Hipertermi etkisi sonucu ruhsal yıkım, hareket edememe ve tahliyenin gerçekleşmemesi ile sonuçlanan sıcaklık

Solunum yolu yanığı için solunan hava içindeki nem değerinin %10 altında olması durumu gerekir. Ancak, 60 °C üzerinde sıcaklığa sahip ve su buharına doymuş havanın solunması halinde solunum yolunda yanık oluşabilir.

İnsan vücudu derisinin dayanabileceği ısıma ısı eşik değeri 2.5 kW/m² mertebesinde. Işınım kaynaklı ısı akısının bu değerin altında kalması durumunda 30 dakika üzerinde süre ile deri bu etkiye dayanabilir. Bu durumda tahliye için gerekli süre üzerindeki etkisi sınırlıdır. Isı akısı değeri belirtilen değerin üzerinde çıkması halinde deri üzerinde yanıkların oluşması için gerekli minimum süre aşağıdaki eşitliğe bağlı olarak hızlı azalır.

$$t_{Irad} = 4q^{-1,36} \quad (3.1)$$

t_{Irad} : ısıma kaynaklı ısı sonucu deride yanık oluşma süresi (dakika);

q : radyant ısı akısı (kW/m^2).

İşimaya maruz kalan kişinin zamana bağlı etki altında kalınan dozaj olarak tanımlanabilir. Eşdeğer doz değeri (FED)(fractional equivalent dose); t_{Irad} : ısıma kaynaklı ısı sonucu deride yanık oluşma süresinin karşılığı olarak kişinin dakikada maruz kaldığı ısıma kabul edilir. ısıma sıcaklık ile ortaya çıkar. İşmanın seviyesi dumanın sıcaklığı ve yayılımına bağlıdır. ısıma hem dumandan hem de alevin kendisinden kaynaklanır. ısıma ısı belli bir doğrultuda ilerleme eğilimindedir, böylelikle vücudun sıcak hava ile temas eden başka kısımları göreceli olarak düşük ısıda olsa bile ısıma altındaki deri üzerinde belirli kısımlarda ısınma meydana gelir. Deri tabakasının sıcaklığı deri yüzeyine uygulanan ısı ile deri altından geçen kan akışının çektiği ısıнын farkı olarak hesaplanır. Nitekim vücut derisinin önemli derecede ısınmasına engel olan bir ısıma eşik değeri mevcutken, eşik değerin üzeri hızlı ısınma meydana getirir.

Bu bilgilere dayanarak yukarıda tanımlanan denklemin belirsizlik oranı $\pm\%25$ 'dir. Ayrıca 2.5 kW/m^2 ısıma değeri yaklaşık olarak 200°C derece ısıma kaynağı yüzey sıcaklığına karşılık gelir. Yangına yakın bölgede ısıma alevin kendisi ile oluşur, çevreleyen hacimdeki sıcak duman bu işimaya katkıda bulunur. Yangın kaynağından uzaklaştıkça sadece duman tabakasının sıcaklığı tehlikeli koşulu meydana getirir. Tahliyenin güvenle gerçekleşebilmesi için ısıma seviyesinin çıplak deri yüzeyinde bir kaç dakika içinde ciddi ağrılara yol açan eşik değerin altında olmalıdır. Bu değer yaklaşık 2 ile 2.5 kW/m^2 değerleri arasındadır. Yangın olaylarına müdahale eden itfaiye personeli koruyucu kıyafetleri sayesinde normalde 5 kW/m^2 ısıma seviyesine 7 dakika süresince dayanabilirler. Kapalı alana girerek müdahale eden bir itfaiye erinin operasyon yürütebileceği süre hava solunum cihazına bağlı hava silindirin kapasitesine bağlı olduğu için 30 dakikadan fazla değildir. Bu süre limiti içinde 20 dakika müdahale yürütecek itfaiye erinin maruz kalacağı ısıma seviyesi 2 kW/m^2 değerini aşmamalıdır.

Nem oranı $\%10$ 'un altında havanın oluşturduğu taşınım ısı transferinin etkisinde kalındığında hareket edemez hale gelinecek süreyi hesaplamak mümkündür. Taşınım ısı transferi ile kaç dakikada hareketsiz hale gelineceğini belirten eşdeğer doz değeri t_{Iconv}

karşılığı olan FED 'dir. Tamamen giyinik bir kişinin üzerinde biriken taşınım ısı miktarı şu şekilde hesaplanır.

$$t_{I_{conv}} = (4,1 \times 10^8) T^{-3,61} \quad (3.2)$$

bu denklemde;

$t_{I_{conv}}$: zaman (dakika)

T : sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)

Hafif giyinmiş bir kişinin üzerinde biriken taşınım ısı miktarı şu şekilde hesaplanır.

$$t_{I_{conv}} = (5,0 \times 10^7) T^{-3,4} \quad (3.3)$$

Belirtilen her iki eşitlik deneye dayalı olup insanlar için kullanılabilir. Bu denklemlerin kullanımında gözetilecek belirsizlik oranı $\pm\%25$ 'dir.

Deneylerden elde edilen ısı hata sınırı verisine göre taşınım ile transfer edilen ısı için limit değer 120°C 'dir. Bir kişi birkaç dakika bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklık değerlerinin etkisinde kaldığında deride ağrılar, yanıklar oluşmaya başlar. Etki altında kalma süresine bağlı olmakla birlikte, limit sıcaklık değerinin altında etkilenme olursa vücutta hipertermi hasarının yaşanması mümkündür.

Hem ısıma, hem taşınım yolu ile transfer edilen ısı dozunun belirten eşdeğer etkilenme değeri şu şekilde hesaplanır.

$$FED = \sum \left(\frac{1}{t_{I_{rad}}} + \frac{1}{t_{I_{conv}}} \right) \Delta t_{t_1}^{t_2} \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte deriye etkiyen ısıma akısı $2,5 \text{ kW/m}^2$ altındaki alanlarda eşitliğin ilk değeri sıfır olarak kabul edilir.

FED değerinin hareketsiz kalma eşik değeri olarak $0,3$ değerini aştığı süre belirlenen ısıma ve taşınım ısılarının etkisi altında mümkün olan tahliye süresini belirtir.

Bu tanıma göre, örneğin; hafif kıyafet giymiş kişilerin tahliye olduğu, ısıma akısının sıfır olduğu, denklemlerdeki belirsizliğe bağlı olarak FED değerinin $\%25$ azaldığı, etkilenme sıcaklığının sabit olduğu ve FED değerinin $0,3$ değerini aşmadığı koşullarda önceden tanımlanan eşitlikler yeniden düzenlendiğinde;

$$t_{exp} = (1,125 \times 10^7) T^{-3,4} \quad (3.5)$$

t_{exp} : FED değerinin $0,3$ 'e ulaştığı etkilenme süresi (dakika)

Bu eşitlik, Çizelge 3.2'de gösterilen ve hangi sıcaklık değerinin etkisinde kalınırsa hareketsiz düşmeden geçirilebilecek süre değerlerini sağlar.

Çizelge 3.2 Gaz tabakası sıcaklığına bağlı olarak hareketsiz kalmadan geçirilebilecek süre

Etki Altında Kalınan Sıcaklık (°C)	Hareketsiz Kalmadan Geçirilebilecek 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

3.3.3. Duman ve Tehlikeli Gazlar

Yangının, insan sağlığı açısından birincil derecede olumsuz etkisinin, yangın sırasında oluşan dumandan kaynaklandığı uzun zamandan beri tespit edilmiş bir durumdur. Dumanın bu olumsuz etkisi iki şekilde ortaya çıkmaktadır:

Dumanın zehirlilik gücü (toxic potency) / dumanın öldürücü etkisi (lethal effect);

Dumanın öldürücü olabilecek diğer etkileri (sublethal effect);

Başka bir deyişle; dumanın yarattığı tehlikeler, dumanın zehirlenme gücünün ve yangın ortamında bulunan insanların, değişen duman konsantrasyonu ve ısıl gerilime maruz kalmalarının bir fonksiyonudur. Dumanın bazı etkileri, devam eden maruz kalma ile artarken, diğerleri anlık olarak ortaya çıkar.

3.3.3.1 . Dumanın Niteliği ve Miktarı

Duman, zehirli gazlar ve buharlar yangın esnasında birlikte ortaya çıkarlar ve hangi ürünün zararlı etki oluşturduğunu tespit etmek oldukça zordur. Bunları tartışmadan önce, duman, gaz ve buhar terimleri tanımlanmalıdır.

Duman, çok küçük parçalar ve yoğunlaşmış buhar içeren parçalı bir yapıdır. Duman önemli ölçüde, yangın sırasında gözlenebilen ve gözle görülebilir yanma ürünlerinden oluşur. Gaz ise bina normal sıcaklığına soğuduğu zaman bile gaz olarak var olan bir yanma ürünüdür. Buhar, yangın esnasında gaz olan ancak normal sıcaklıkta sıvı veya katı

fazına dönen bir yanma ürünüdür. Buharlar yangından uzaklaşıp serin yüzeylerle temas ettiklerinde kademeli olarak yoğunlaşırlar. Bu üç unsurdan oluşan yangın etkisi duman bulutu olarak adlandırılmalıysa da genellikle sadece duman terimi kullanılır.

Dumanın en büyük tehlikesi görüşü azaltması ve buna bağlı olarak da zehirli gaz ve buharların yaşam fonksiyonları üzerindeki olumsuz etkilerini arttırmasıdır. Duman yangın sırasında binadan kaçmayı zorlaştırır ve zehirli ürünlere maruz kalma süresini arttırır. Bu ürünlerin belli bir miktarına yeterince maruz kalınırsa ölüm olayı meydana gelebilir. Belli başlı olanları ise aynı zamanda tahriş edici özellikleri nedeniyle bazı kötü etkiler yaratabilirler. Örneğin küçük derişimlerde hidrojen klorür ve amonyak, solunum bölgeleri ve gözlerde doğrudan tahrişe neden olurlar. Tahriş edici bu maddeler, uyarıcı ve alarma geçirici etkiler taşımakla birlikte kurbanları, görüşü azaltmaları nedeniyle kaçırmaktan alıkoyabilirler.

Dumanın yoğunluğu ve toksik etkisi, yanan malzeme cinsine bağlı iken, açığa çıkan toplam duman miktarı yangının ve yangının çıktığı binanın büyüklüğüne bağlıdır. Yangının büyüklüğü, yanan malzeme cinsine ve yanma hızına bağlı olduğundan yanıcı malzemenin yapısı, açığa çıkan duman miktarını da etkiler. Bu yüzden duman çok ya da az yoğun olabilir. Ancak her hâlükârda, sıcak ve yoğunluğu ne olursa olsun hayati tehlike yaratacak kadar yeterli toksik ürünlere sahiptir.

Dolayısıyla, dumanın niteliği incelenirken göz önünde bulundurulması gereken üç önemli faktör vardır. Bunlar;

duman karartması ve görüş mesafesindeki düşüşün yol açtığı tehlikeler;

gaz ve buharların toksik etkileri;

dumanın da etkili olduğu aşırı sıcak ortamın insan hayatı üzerindeki olumsuz etkileridir.

3.3.3.2. Duman ve Zehirlilik İlişkisi

Yangınlarda insan sağlığını olumsuz yönde etkileyecek, maruz kalma süresine bağlı olarak ölüme ve kalıcı rahatsızlıklara yol açacak birçok gaz çıkmaktadır. Yangın kurbanlarının detaylı patolojik incelemesi pek sık yapılamadığından, ölüme neden olan zehirli gaz tam olarak tespit edilemez.

Öte yandan yangının gelişimi ve maruz kalma şekilleri her yangında farklılıklar gösterdiğinden, aslında tek bir gazın ölüme yol açmasından bahsedilemez. Yangın ortamı sinerjik bir etki yaratarak, birden fazla etkisiyle ölüme yol açar. Bununla birlikte yangında

oluşan zehirli, gazlarla buharlar ve insanın bunlara nasıl bir fizyolojik tepki verdiği bilinmektedir. Genellikle:

- oksijeni tüketerek boğulmaya yol açabilirler;
- nefes yollarını tahriş ve tahrip edebilir, akciğerleri zedeleyebilirler;
- kanda, sinir sisteminde ve hücrelerde tahribata yol açabilirler;

Öte yandan zehirli gazlar en iyi vücut üzerindeki etkileri temel alınarak tanımlanır. Buna göre:

- Tahriş edici gazlar (NH_3 , Cl_2 , HCl , HF , COCl_2 , SO_2 , PCl_3 , NO_2 - N_2O_4 ve C_6H_6)
- Boğucu gazlar (Cl_2 , COCl_2 , CO , CO_2 , NH_3 , C_6H_6 , He , HCN)
- Yakıcı gazlar (En iyi örnek; iperit, levizik, dik vb. kimyasal savaş silahları)
- Öldürücü gazlar (HCN , CO , C_2H_2 , CS_2 ve C_2H_4)

Yapılan bu sınıflandırmaya rağmen, gazların birbirlerinden kesin sınırlarla ayrılması mümkün değildir. Bir gaz hem tahriş edici, hem de yakıcı ve boğucu özellik gösterebilir.

3.3.3.3. Yangın Ortamındaki Tehlikeli Gazlar

3.3.3.3.1. Tahriş Edici Gazlar

Tahriş edici gazların başlıca etkileri solunum yolları, gözler ve deri üzerinde görülür. Bu gazların etkileri, çoğu zaman geç fark edilir. Ortaya çıkan ilk belirtiler; öksürme, göz yaşarması, burun akıntısı ve bunalma hissidir.

Bu gazlardan birine maruz kalan kişi, ortamdaki derhal uzaklaştırılıp, yatırılmalı ve rahat nefes alması sağlanıp, saf oksijen verilmelidir. Aşağıda bu gazlara bazı örnekler yer almaktadır.

Amonyak (NH_3)

Tehlike sınırı 25 ppm ya da 18 mg/m^3 olan amonyağın hafif zehirlenmeleri geçicidir. 1700 ppm yoğunlukta yarım saat teneffüs edildiğinde ölüm tehlikesi vardır.

Kükürt dioksit (SO_2)

Bütün kükürt içeren malzemelerin, özellikle kauçuk vulkanizasyonunda kullanıldığı için kauçuk kökenli malzemelerin yanması sonucu SO_2 açığa çıkar. Tehlike sınırı 5 ppm ya da 13 mg/m^3 'tür.

Ortam havasındaki konsantrasyonu, 500 ppm olduğu zaman, yarım saat ile bir saat arasındaki zamanda ölüm tehlikesi baş gösterir.

Hidrojen Klorür (HCl)

Yangında polivinil klorür ayrıştığı zaman HCl oluşur. Eğer solunursa, üst solunum yollarını hasara uğratarak afeksiye neden olur veya ölüme yol açar.

3.3.3.3.2. Boğucu Gazlar

Solunum yoluyla akciğerleri tahrip eden, hava keseciklerini yırtan ve solumayı önleyerek boğan gazlardır. Solunum yoluyla, akciğere giren hava içindeki oksijen, akciğer keseciklerindeki kirli kanın temizlenmesini sağlar. Oksijen, keseciklerin içini kaplayan ince bir zardan kana geçer; kandaki karbonik asit de aynı yoldan geçerek, keseciklere ve oradan da nefes verme yoluyla dışarı atılır. Boğucu gazlar solunduğunda, kesecikler bu gazlarla dolar ve kesecik zarları tahriş olarak inceler. İncelmiş zardan, kanın su kısmı içeri dolmaya başlar ve havanın oksijen bırakma alanı gittikçe daralır. Kesecikler doldukça, vücut oksijen alamaz ve karbonik asit yüklü kan tekrar vücuda döner. Bu duruma akciğer ödemi adı verilir. Akciğer ödemi fazlaştıkça, insan nefes alamamaya ve sanki boğazı sıkılıyormuş gibi davranarak, havasızlıktan boğulmaya başlar. Boğucu gazlarla zehirlenenlerin yüzü ya kül rengi gibidir ki böyleleri süratle ölürlere ya da mosmordur ki bu oksijen alamayan kirli ve siyah kanın temiz ve kırmızı kan haline geçemediğini gösterir. Boğucu gazlardan etkilenmiş insanlar, derhal ortamdan uzaklaştırılmalı, temiz havaya çıkarılmalıdır. Nefes alış veriş sağlamadığı takdirde suni solunum yapılmalıdır. Şoka girmesini engellemek amacıyla, üstü örtülü tutulmalıdır.

Boğucu gazlar arasında; Cl₂, COCl₂, (Fosgen) CO, CO₂, NH₃, C₆H₆, He, HCN sayılabilir.

Klor (Cl₂)

Klor havadan ağır, sarı – yeşil renkte ve kendine has kokusu olan bir gazdır. Genel olarak, üst solunum yollarını tahriş eden bir gaz olmasına rağmen, gözleri de tahriş eder. 100 ppm mertebesinde, tahriş belirtileri görülmeye başlar, daha sonra boğulma hissi duyulur. Daha yüksek konsantrasyonlarda sinir sistemini felce uğratarak, şiddetli öksürük, nefes darlığı eşliğinde ölüme neden olur. Cl₂, etkisini hemen gösteren bekleme süresi olmayan bir gazdır, püskürtme suyla indirgenebilir.

Fosgen (COCl₂)

PVC'nin yanmasından açığa çıkan bu gaz taze mısır püskülü, çürük saman ya da ham elma gibi kokar. Eşik tehlike sınırı 0.1 ppm olan fosgen, eşik tehlike sınırı 50 ppm olan CO'dan 500 kat daha tehlikelidir. Düşük konsantrasyonlarda varlığını belli etmez ve kişi bu gazı farkına varmadan uzun müddet soluyabilir. Yüksek konsantrasyonlarındaysa önce, gözlerin ve boğazların yanması, gözlerin yaşarması ve hafif öksürmeden ibarettir. Fakat kısa süre sonra, asıl toksik etkisi olan boğma özelliği görülür.

Karbondioksit (CO₂)

CO₂ en çok bina yangınlarında oluşur. CO₂ solunumu, kanın pH'sını, metabolik asidoz (kanın asitli hale gelmesi)'u ve nefes alma ihtiyacını arttırır. Bu da, hem oksijen hem de yangın sırasında ortaya çıkan zehirli gazlarla, buharların solunumunu arttırır. İlk uyarım %5 (50.000 ppm) seviyesinde telaffuz edilir. 30 dakikalık maruz kalma, alkol zehirlenmesi işaretlerini verir.

70.000 ppm'in üzerinde bir kaç dakika içerisinde bilinçsizlik hali oluşur. CO₂ için eşik limit değeri 5.000 ppm'dir.

Azot Oksitler

Azotun üç genel oksiti vardır: Diazot oksit (N₂O), Nitrik oksit(NO) ve dioksitin iki formu: (NO₂ ve N₂O₄). Çok zehirli olan azot dioksit, selüloz nitratin yanması ile üretilebilir. Nitrik oksit, oksijen varlığında dioksite dönüştüğü için atmosferde bulunmaz. Bu bileşikler, güçlü tahriş edicilerdir.

Azot oksitler genellikle selülozun, patlayıcı maddelerin ve azot gübrelerinin alevsiz bozunmasından ortaya çıkar. Özellikle sümüksü ince zarlara ve bu yüzden de solunduklarında, nem ile reaksiyona girip azotlu asit ve nitrik asit üreterek, solunum bölgelerindeki ince zarlara zarar verirler.

NO₂ ve N₂O₄'e ilaveten selüloitte rastlanan NO ise, oyuncak fabrikası ve film gösterim kabinlerinde çıkan yangınlarda çok tehlikelidir.

3.3.3.3. Öldürücü Gazlar

Solunduğu zaman, hiçbir organı tahriş etmeden vücuda giren, en yüksek konsantrasyonlarda bile kendini belli etmeyen ve aniden ölüme yol açan bu gazların etkileri iki türlüdür: ya sinirleri- tahrip ederler ya da kanı zehirlerler. Sinirleri tahrip etme

kabiliyetleri, özellikle beyindeki solunum merkezi üzerinde kendisini gösterir. Solunum merkezini uyuştururlar, bu uyuşukluk Dolayısıyla akciğerler işlev dışı kalır ve bu duruma maruz kalan canlılar hareket kabiliyetlerini yitirip aniden ölürlər. Kanı zehirleyen gazlar ise, kanın ter kibini bozduklarından, bunları soluyanlarda baş ağrısı, bulantı, kuvvetsizlik ve halsizlik görülür, derin bir uyuşukluğa düşerler ve bir daha uyanamazlar. Sinir sistemini etkileyen gazların başında hidrojen siyanür (HCN), kanı zehirleyen gazların başında da CO gelir. Ayrıca, asetilen (C₂H₂, karbon sülfür (CS₂)ve etilen (C₂H₄)’ de merkezi sinir sistemini baskı altına alan ve bilinçsizliğe yol açan tehlikeli gazlardır.

Karbon monoksit (CO)

CO, renksiz kokusuz, tadı olmayan ve irrite etmeyen bir gazdır. 25 °C’de ve 760 mmHg basıncında havaya göre bağıl yoğunluğu 0.96’dır. Özgöl ağırlığı ise 1.15 g/lt ’dir. Parlak mavi bir alevle yanar. CO, yangın esnasında tam yanmanın gerçekleşmemesi sonucu en yoğun olarak çıkan üründür. CO ’in solunması afeksiye (oksijensizlikten boğulma) yol açar. CO, gaz halinde olduğu için organizmaya başlıca solunum yolu ile girer ve eritrositler tarafından soğurularak, kanda karboksi-hemoglobin oluşturur. Başlıca toksisitesi de hemoglobine olan kimyasal ilgisinden ileri gelmektedir.

Oksi hemoglobin harcanmasına dayalı bu oluşum, bedenin hücre sel sistemlerinin ihtiyaç duyduğu oksijen miktarının azalmasına neden olur. CO ile indüklenmiş anoksemiya, basit afekside olduğu gibi taze hava solunur solunmaz, durmaz. Daha basit gazla zehirlenme derecelerinde bile, normal şartlar altında ilk bir saat içinde yaklaşık %50 oranında CO elimine edilir. Taze havanın etkisi altındaki tam kurtulma saatlerce sürer. İnsanın, olumsuz bir etki olmaksızın sürekli maruz kalabileceği maksimum CO konsantrasyonu 50 ppm dir. Bu seviyenin üstünde; baş ağrısı, bitkinlik ve baş dönmesi gibi belirtiler ortaya çıkabilir. CO ’e maruz kalan insanların rahatsızlanma dereceleri, kişiden kişiye, yaşa, genel sağlık durumuna, maruz kalma konsantrasyonu ve uzunluğuna bağılı olarak değişir [32].

Yaşanabilir ortamdaki havanın içeriğinde bulunabilecek karbon monoksit (CO) değeri zamana bağılı olarak şöyle ifade edilebilir:

- bir kaç saniye için 2,000 ppm
- maruziyetin ilk 6 dakikası için ortalama 1,150 ppm
- maruziyetin ilk 15 dakikası için ortalama 450 ppm

- maruziyetin ilk 30 dakikası için ortalama 225 ppm
- maruziyetin geri kalan süresi için ortalama 50 ppm ve daha az miktar olmalıdır.

Bu değerler 1,000 metre irtifaya kadar geçerli kabul edilir [4].

Hidrojen Siyanür (HCN)

Hidrojen siyanür (HCN), yapısında azot bulunduran, orlon, naylon, yün, poliüretan, üreformaldehit ve ABS gibi malzemeler yandığı zaman ortaya çıkar. Hidrojen siyanür ve diğer siyanojen bileşikler canlı maddelerin bütün formlarının aktivitesini durdurur. Bu maddeler canlı hücrelerin oksijen kullanımını engeller. 1 m³ havada 300 mg HCN bulunduğu takdirde, ortamdaki canlılar hızla ölürlür. Bu özelliğiyle CO 'ten 5 kat daha zehirlidir. HCN, acıbadem kokulu ve renksizdir.

3.3.3.3.4. Yanıcı Malzemelerin Çıkardığı Gazlar

Yanma ortamında birçok yanıcı malzeme bulunmaktadır. Ahşap, plastik, kauçuk kökenli malzemeler, mobilyalar, tekstil ürünleri, kağıt, karton vb. gibi malzemeler; yanmaya ya da bozulmaya başladıklarında, kimyasal yapıları uyarınca, CO, CO₂ ve H₂O'dan başka maddeler çıkarmaktadırlar. Bu konuda yapılan yangın odası deneylerinde pek çok malzeme bozunma ve yanma sonucu çıkardıkları ürünlerin tespiti için kullanılmıştır.

Polietilen Yanması Sonucu Çıkan Gazlar

Polietilen karbon ve hidrojen atomları içeren bir polimerdir. Bu malzeme ideal şartlar altında sıcak alev ve bol oksijen desteği altında yandığında ana ürünler CO₂ ve H₂O'dur. Olumsuz koşullar altında, örneğin oksijen desteği sınırlı olduğunda, karbon parçacıkları ve zehirli CO de oluşacaktır. CO, polietilen ve diğer karbon ve hidrojen atomlarından oluşan malzemelerin yanması sonucu ortaya çıkan en önemli zehirli gazdır.

Polistiren Yanması Sonucu Çıkan Gazlar

Polistiren de karbon ve hidrojen atomlarından oluşmaktadır. Bu polimer ısı ile bozulduğunda ana ürün, kendisini oluşturan maddelerden biri olan stirendir. Yangın sırasında stiren, sıradan yanma ürünlerini oluşturmak üzere oksijen ile reaksiyona giren daha küçük moleküllere parçalanır. Polistirenin yanmasıyla oluşan en temel zehirli gazlardan biri yine CO'dur. Ürün olarak polistiren de en az CO kadar zehirlidir ancak çok küçük miktarlarda üretilir.

Polivinil Klorür (PVC) Yanması Sonucu Çıkan Gazlar

PVC, karbon, hidrojen ve klor atomlarından oluşmaktadır. Bu polimer bozunduğunda Cl atomları serbest kalır ve her biri, bir H atomu ile birleşerek HCl oluşturur. Bu madde çok zehirli olmasının yanı sıra çok da koroziftir. PVC'nin bozunmasından ihmal edilemeyecek miktarda, çok zehirli olan fosgen(COCl_2) de çıkar. HCl, CO 'den daha zehirlidir ve yangın ortamında PVC varsa, miktarca CO 'den daha fazla oluşur.

Polimetilmetakrilat (Pleksiglas) Yanması Sonucu Çıkan Gazlar

Pleksiglas ısıtıldığında temel bozunma ürünü metil metakrilattır. Yangın sırasında bu madde, oksijenle bilinen yanma ürünlerini oluşturmak üzere daha küçük moleküllere parçalanır.

Pleksiglas'ın esas zehirli yanma ürünü CO'dir. Metil metakrilat'ın zehirliliği CO ile aynıdır ama daha küçük miktarlarda üretilir.

Ahşap ve Selüloz Yanması Sonucu Çıkan Gazlar

Ahşabın temel bileşeni olan selüloz, karbon, hidrojen ve oksijen atomlarından oluşmaktadır.

Selülozun yanmasıyla, bilinen yanma ürünlerine ek olarak hidrokarbonlar ve bu üç maddenin birleşiminden doğan maddeler meydana gelir. Bazı oksijen içeren buharlar özellikle de aldehytler çok zehirlidir. Yine de ortamda selüloz bulunan yangınlarda, ölüme neden olan başlıca maddenin CO olduğu kabul edilmektedir. Çünkü diğer gazlara göre miktarca çok daha fazla üretilmektedir.

Akrilik Fiberler Yanması Sonucu Çıkan Gazlar

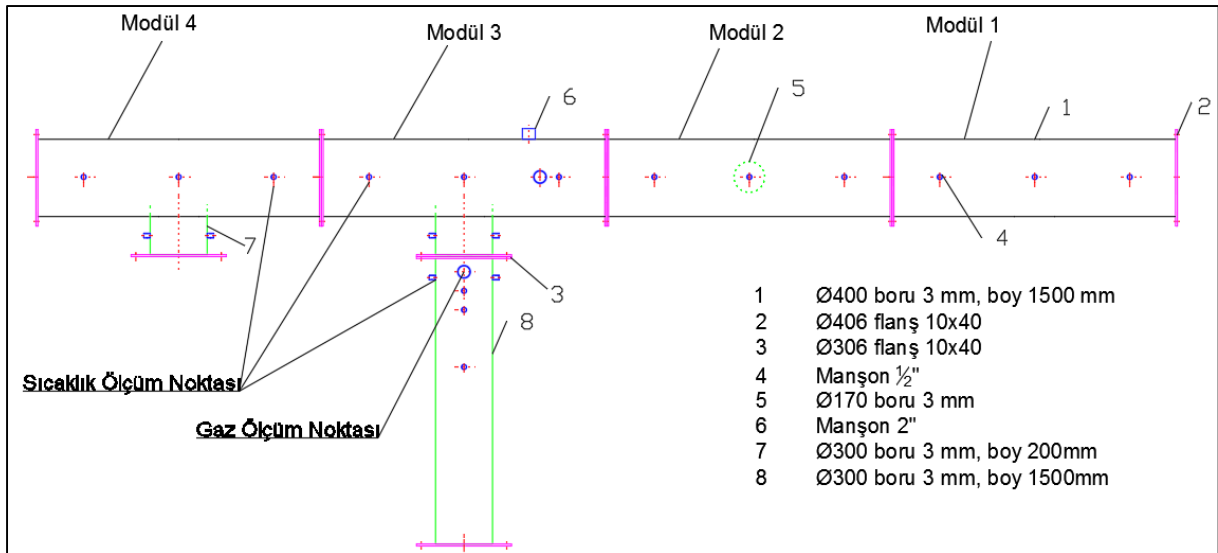
Birkaç önemli sentetik fiber, %80-85 gibi yüksek bir oranda akrilonitril içerir. Bu sentetik malzemeler karbon, hidrojen ve azot atomlarından oluşmaktadır. Yangında bozunduklarında çok zehirli bir gaz olan HCN 'ye ek olarak, CO ve diğer yanma ürünleri de oluşur. HCN aynı zamanda ABS (akrilo nitril bütadien stiren) boruların ve akrilonitril ile sentezlenmiş akrilik bazlı halıların yanması sonucu oluşur. Bu madde ayrıca üreformaldehit, naylon, yün ve poliüretan gibi yapılarında azot bulunduran maddelerin yanmasıyla da oluşur. [32]

TÜNEL MODELLEMESİ DENEYSEL ÇALIŞMALAR

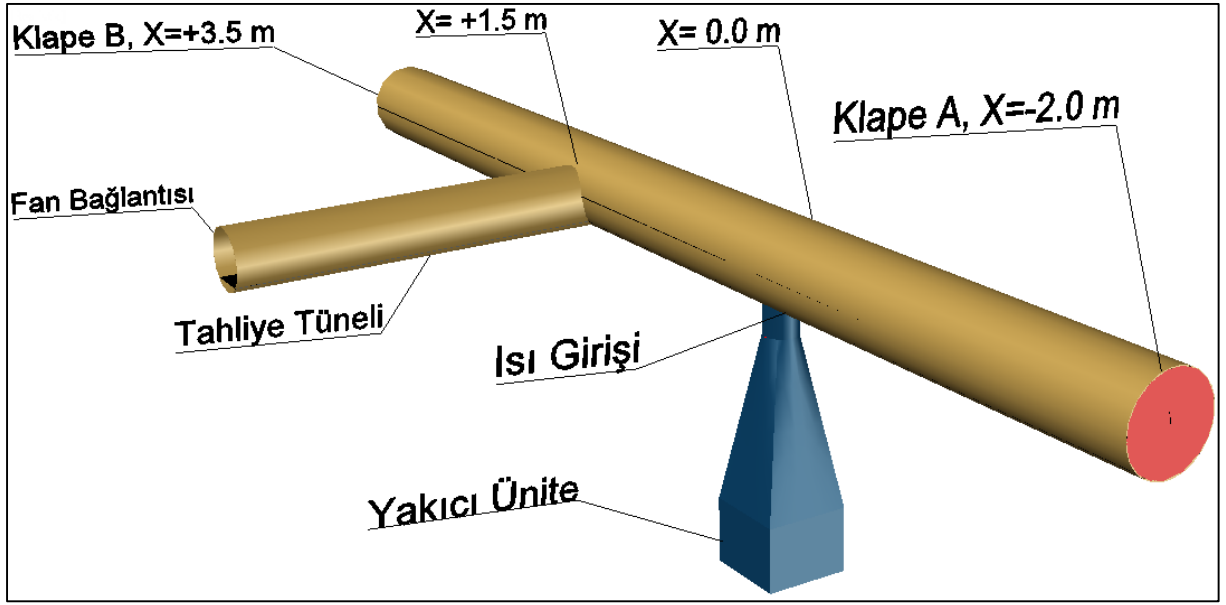
4.1. Deney Düzeneği

Baş hizasında sıcaklığın ve karbon monoksit gazı konsantrasyonunu kontrol etmek ve ölçmek amacıyla bir deney düzeneği ve deney süreci tasarlanmıştır.

Şekil 4.1’de üstten montaj resmi görülen deney düzeneği 1 adet 1/12 ölçekli tünel, 1 adet yakıcı ünite, 24 adet termorezistor sıcaklık okuyucu, 1 adet gaz ölçer, 1 adet basınç ölçer, 1 adet ağırlık ölçer, 1 adet fan motoru, 1 adet hava hızı ölçerden oluşmaktadır. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 4.2’de yer almaktadır.



Şekil 4.1 Tünel modeli montaj resminin üstten görünümü ve ölçüm noktaları



Şekil 4.2 Deney seti parçalarının şematik gösterimi

Deney setinin kurulumu ve yürütülen test çalışmaları ile ilgili görseller Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te yer almaktadır.



Şekil 4.3 Hava klapesinin ayarlanması çalışması



Şekil 4.4 Veri toplama ünitesi çalışmasının gözlenmesi



Şekil 4.5 Veri toplama ünitesinde yapılan çalışma

4.1.1. Sistem Bileşenleri

Sistem LPG gazlı ısı kaynağı, yangın simülasyon tüneli, veri toplama sistemi, sıcaklık ölçme cihazları, basınç ölçme cihazı ve gaz ölçme cihazından oluşmaktadır.

4.1.1.1. LPG Gazlı Isı Kaynağı:

LPG gazlı ısı kaynağı, yanmanın gerçekleştiği döküm ocak, yakıt kontrol mekanizması, hava kontrol mekanizması ile ocağın ve yakıt hava kontrol mekanizmasının monte edileceği yapı, ısıyı soğuracak taşların oturtulacağı metal ızgara ve sac davlumbazdan oluşmaktadır.

4.1.1.2. Döküm Ocak:

Konik yapıda ve alevi merkezde toplayan, ayrıca yanmayı eksenel olarak burgaç halinde oluşturan 3 adet uzun, 20 adet kısa alev çıkış ağzına sahip, 60 kW enerji sağlayabilen döküm imalatıdır.

4.1.1.3. Yakıt Kontrol Mekanizması:

2 mm çapında sanayi tipi manyeto ile ateşlenen, alevin sönmesi halinde gazın kesilmesini sağlayan termal elemana sahip, gazın fazla gelmesi halinde akışı kesen termal elemana ve mekanizmaya sahip olan 3 kademeli gaz ayar valfidir.

4.1.1.4. Yangın Simülasyon Tüneli

Yangın simülasyon tüneli gövde, gövde içi imalat, gövde dışı imalat, flanşlar, ½" ve 2" manşonlar, klapeler, klape ayar düzeneği, kapaklar, taşıma ayakları, ayak bağlantı kelepçeleri, dengeleme takozları, cıvata ve somunlar, hava akışı sağlayacak fan, hava hızı ölçümü için boru ve izolasyondan oluşmaktadır.

4.1.1.5. Sac Gövde

Tünel gövdesi 2 ana kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım silindirik geometride iç çapı 400 mm, boyu 1500 mm olan kalınlığı 3 mm çelik sac malzeme 4 parçadan oluşmaktadır. Tünel gövdesi ikinci kısım silindirik geometride iç çapı 300 mm, boyu 1500 mm olan kalınlığı 3 mm çelik sac malzeme 1 parçadan oluşmaktadır. 2. Kısım, 1. Kısıma flanş ile 90 derece açı ile monte edilmiştir.

4.1.1.6. Gövde içi imalat

Birinci kısımdaki her bir gövde ana parçasının içine zemine paralel olarak konumlanacak şekilde eksenden 1400 mm aşağıya 1500 mm uzunluğunda, 270 mm genişliğinde 3 mm kalınlığında sac malzeme kaynatılmıştır. 2. ana parça içine monte edilen sac levhanın orta noktasından 160 mm çapında dairesel kesit kesilerek çıkarılmıştır, 205 mm uzunluğunda 152 mm iç çapa sahip 3 mm kalınlığında silindir iç kısımda düz levhaya sıfırlanacak şekilde gövdeye kaynatılmıştır. 3. ana parçaya monte edilen 2. kısımdaki gövde parçası içine zemine paralel olarak konumlanacak şekilde eksenden 1050 mm aşağıya 1500 mm uzunluğunda, 210 mm genişliğinde 3 mm kalınlığında sac malzeme kaynatılmıştır.

4.1.1.7. Gövde dışı imalat

2. kısmın monte edileceği 3. ana parça ile 2. kısım arasında 200 mm uzunluğunda 150 mm iç çapa sahip 3 mm kalınlığında elik sac malzemeden flanşlı ara bağlantı parçası iki adet imal edilmiştir. 1. Ana kısım ile 2. Kısım arasındaki çap farkından dolayı oluşan eksen kaçıklığı gözetilerek teknik resim üzerinden izdüşümü çıkarılıp lazer kesimle şekillendirilmiş sac malzemeden gaz altı kaynağı ile kaynatılarak imalat yapılmıştır. 3. Ve 4. Ana kısımlara dışarıdan kaynatılan ara bağlantı parçaları için bu kısımlar üzerinde kesite uygun kesim yapılmıştır. Gövdenin dış kısmına 4 adedi 2", 24 adedi ½" llerinde manşon kaynatılmıştır.

4.1.1.8. Flanşlar

50 mm genişliğinde 10 mm kalınlığında elik lama kesilerek imalat yapılmıştır. Flanş üzerinde 8 adet eksene 45° aı hizalanmış 11*15 mm ölçülerinde elips şeklinde civata-somun bağlantı delikleri açılarak 4 adet i çapı 400 mm flanş ile 2 adet i çapı 300 mm olan flanş ilave olarak imal edilmiştir.

4.1.1.9. 1/2" ve 2" manşonlar

Manşonlar yatayda 500 mm ara ile monte edilmiştir. Manşonlar 2. kısma yatay-ekseninde 100 mm mesafede dikey ekseninde gövdenin st i hizasında sırasıyla 25 mm sol, 75 mm sağ, 125 mm sol, 175 mm sağ konumlanacak şekilde kaynatılmıştır.

4.1.1.10. Hava Akışı Sağlayacak Fan

150 m³/saat debide hava üfleyecek 50 mm*100 mm bağlantı ağzına sahip fan monte edilmiştir. Fanın devir hızı ilave donanım ile ayarlanabilmektedir.

4.1.1.11. Hava hızı ölçümü için boru

Sisteme giren anlık hava hızı ve gerçekleşen debiyi ölçmek üzere bağlanacak cihaz için fanın hava emiş ağzında 150 mm çapında 1500mm boyunda bir boru monte edilmiştir.

İzolasyon

Gövdenin bütün dış yüzeyi 50 mm kalınlığında taş yn malzeme ile sarılmıştır.

4.2. Ölçüm ve Veri Toplama Düzenegi

4.2.1. Veri Toplama Sistemi

Veri Toplama Sistemi, her biri 8 kanal PT100 (Sıcaklık Duyar Eleman) okumayı sağlayacak tipte üç adet analog giriş modülü vardır. Modüllerin tümü UART üzerinden bir biri ile haberleşmekte ve bir tanesinde ModBus protokolünü destekleyen RS485 çıkış vardır. Bir adet endüstriyel tip çevirici ile RS485 bağlantı USB bağlantıya dönüştürülmektedir. Pano içerisinde bu sistemin elektrik beslemesi için 24V DC switch mode güç kaynağı vardır. Toplanan veriyi bilgisayara aktaran yazılım scada mantığı ile çalışmakta ve USB bağlantı üzerinden panoya bağlı bulunan modüller ile haberleşerek, duyar elemanların ölçüm bilgilerini kaydetmekte ve bu bilgileri 1 sn. aralıklarla bilgisayar ortamında saklamaktadır.

4.2.2. Sıcaklık Ölçme Cihazı

Sıcaklı ölçen duyar elemanlar toplamda 26 adet 3/8" PT100 tipinde termorezistördür. Tüm duyar elemanların panoya bağlantıları, 0,50 mm kesitli, çok telli blendajlı (ekranlı) kablo ile yapılarak kablolanmanın sinyal gürültüsünden en az etkilenecek şekilde olması sağlanmıştır.

4.2.3. Basınç Ölçme Cihazı

Elektronik, fark basınç manometresi özelliğindedir. Ölçüm skalası ± 200 mbar 'dır, ortam sıcaklığına göre düzeltme yapabilmektedir.

4.2.4. Gaz Ölçme Cihazı

Gaz ölçme cihazı sıcak yanma ortamına dayanabilmesi için standart prob ile 0-600°C aralığında yanma gazı sıcaklığı ölçümü yapabilmektedir. Kızılötesi ölçüm teknolojisi ile çalışan gaz sensörü doğalgaz, propan, bütan, LPG, hafif yağlar ve ağaç esaslı pellet yakıtlar ile kullanıma uygun olup fark basınç manometresi ile $\pm 0-80$ mBar basınç okuması yapabilmekte, kızılötesi veri aktarım çıkışı sağlayabilmektedir. Cihaz sıcaklık ölçümü için K-tipi ısı çift kullanmaktadır.

4.2.5. Hassasiyet, Kalibrasyon ve Ölçüm Belirsizlikleri

Deney setinde yer alan cihazların ölçüm hassasiyetini belirtir değerler Çizelge 4.1'de belirtilmiştir. Kalibrasyon sertifikalı dijital kalibratör tarafından ölçülen değer, ölçülmesi

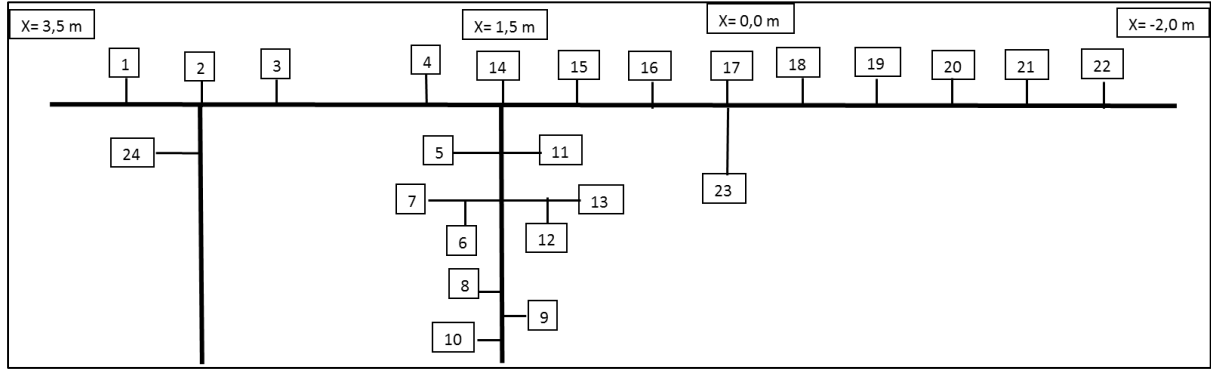
gereken değere göre kontrol edilmiş ve kalibrasyon değerleri scada yazılımına tanımlanarak ölçülen ve kaydedilen değerlerin kalibrasyonlu olması sağlanmıştır.

Çizelge 4.1 Ölçüm cihazları doğruluk aralığı

Cihaz	Doğruluk Aralığı
Termorezistor	$\pm 1,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Gaz analiz cihazı	$\pm 0,3 \text{ } \%$
Pitot-basınç ölçer	$\pm 0,5 \text{ } \%$ Fs
Tartı	$\pm 0,1\% \text{ kg}$
Hava hızı ölçer	$\pm 0,2 \text{ m/s}$

4.3. Deneysel Çalışma ve Ölçümler

24 farklı noktadan alınan sıcaklık ölçümleri ile farklı likit petrol gazı debisi, farklı hava açıklığı kombinasyonları oluşturularak 30 adet deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sırasında gerçekleşen değişikliklerin birleşik gösterimi Çizelge 4.1' de yer almaktadır. Deney tesisatı üzerindeki sıcaklık ölçerlerin yerleşiminin gösterimi Şekil 4.6 'de yer almaktadır.

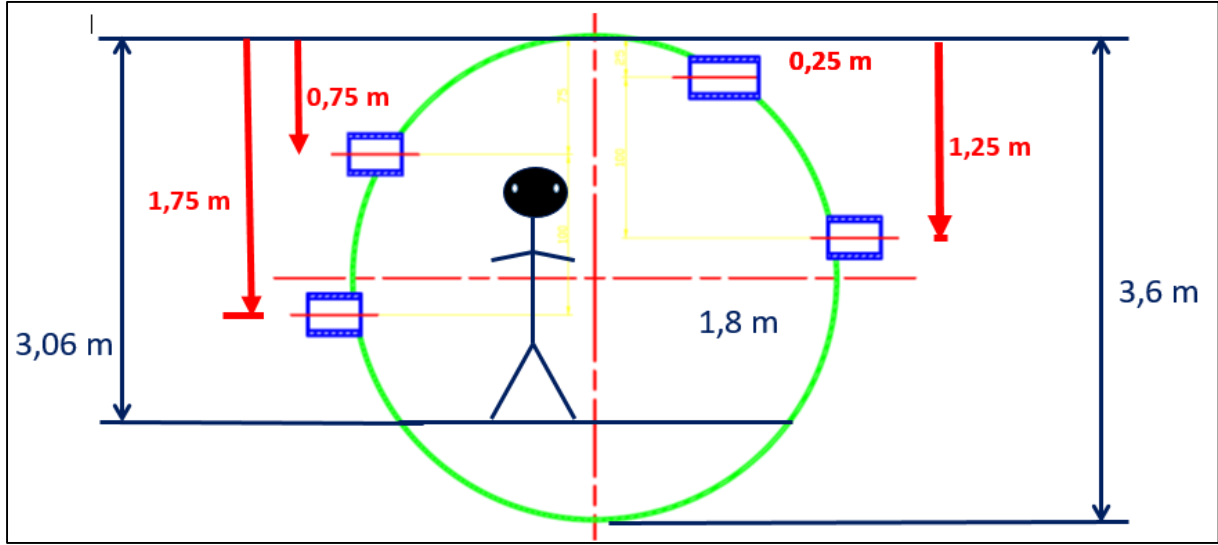


Şekil 4.6 Sıcaklık ölçerlerin yerleşiminin gösterimi

%70 bütan ve %30 propan karışımından oluşan likit petrol gazı (LPG) yakılarak ısı ve yanma ürünleri elde edilmiştir. Yakıcı üniteye 1 bar ile 2 bar arasında değişen basınç aralığında iletilen gazın debisi 0.001 kg hassasiyetli tartım aleti ile 60 saniyede bir ölçülmüş, 600 saniye boyunca yapılan ölçümde okunan değerler 60'ar saniyelik farkların ortalaması alınarak deney sırasında yakıcı tarafından çekilen gazın debisi olarak kaydedilmiştir. 1,16 kg/saat ile 4,11 kg/saat aralığında değişen LPG debileri kullanılmıştır. Bu sayede sırasıyla 15 kW, 20 kW, 30 kW ve 50

kW ısı yayma gücünde yangınlar temsil edilmiştir. Çizelge 5.3’de hangi mertebede ısı yayma gücünün hangi tip araç yangınına temsil edebileceği listelenmiştir.

Yakıcı ünite özel imalattır ve 60 kW enerji üretebilmektedir. Yakıcı ünitenin hemen üzerinde yer alan pürüzlü yüzeye sahip bazalt taşları ısıtılarak yüksek enerjiye sahip alevin deney düzeneği ve sıcaklık okuyucu cihazlara teması engellenmiştir. Alevin önce bazalt taşlarının sıcaklığını artırması sonrasında ısınan taşların arasından çıkan yanma ürünü gazların tünelin içine yönlendirilmesiyle alev dalgalanmalarından kaynaklanacak sıcaklık farkları minimize edilmiştir. Yanma ürünü gazların tünel yapısı içine girmesi sağlanarak ölçüm yapılacak noktalara yönlendirilmiştir. Birinci deney ile onuncu deney arasındaki deneyler yalıtım kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. Çelik malzemeden olan tünel yüzeyinden yaşanan ısı kayıplarını azaltmak için 10 cm kalınlığında taş yünü ile hem yakıcı ünite hem tünel yalıtılmıştır. Yakıcı ünite çıkışında, tünel tahliye girişi, tünel tahliye kesiti orta nokta gibi 24 farklı noktada zamana ve yanma merkezinden uzaklığa bağlı sıcaklık değişimini gözlemek amacıyla sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Tünelin tavanında tünelin uzunluğu boyunca 50 cm aralıklarla sıcaklık ölçerler yerleştirilmiştir. Şekil 4.2’de şematik olarak görülen tahliye tüneli girişinde tavandan aşağı 25 cm aralıklarla sıcaklık ölçerler yerleştirilmiştir. Bu sayede tahliye tüneli tavanındaki sıcaklık değerine ilave olarak zamanla tavandan zemine doğru kalınlaşan ve ısınan gaz katmanı sıcaklık değerleri okunmuştur. İnsan vücudunun baş hizası, göğüs hizası, bel hizası seviyelerini temsil eden yüksekliklerdeki gaz katmanı sıcaklıkları ölçülmüştür. Temsili gösterim Şekil 4.7’de yer almaktadır.



Şekil 4.7 Tahliye tünelineki sıcaklık ölçerler ile insan vücudunun temsili gösterimi

Deney sırasında tünel kesitinin 10 katı mesafeye yerleştirilen bir pitot düzeneği ile tünel içindeki basınç değişimi zamana bağlı olarak kaydedilmiş ve deney sırasında oluşan gaz hareketinin hızı tayin edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca tünelin her iki ucuna yerleştirilen ve tüm kesiti kaplayan klapeler ve bu klapeler tam açık, tam kapalı veya %25 açık gibi konumlamalar yapılmak suretiyle farklı tünel açıklık oranlarında hava hızının değişimi ölçülmeye çalışılmıştır. 2,26 m/s ile 5,23 m/s arasında değişen hava hızlarında testler gerçekleştirilmiştir.

Deney sırasında tahliye tüneli girişi üst noktasına yerleştirilen gaz ölçer cihazı ile karbon monoksit gazının zamana bağlı değişimi milyonda parçacık adedi (ppm) olarak, solunabilir havanın tayini için oksijen gazının zamana bağlı değişimi yüzde hacimsel konsantrasyon olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

1/12 ölçekli tünelde ortalama insan boyunun bel hizasına denk gelen noktada yer alan sıcaklık ölçerin değeri deneyin başlangıcında ortam sıcaklığı olarak ölçülürken, sıcaklık değeri 60 °C 'yi geçtiği süreye kadar deney sürdürülmüştür ve bu andan itibaren yakıcı üniteye gaz akışı kesilerek deneyin sonlandırılması süreci başlatılmıştır. Sıcaklık ölçerlerden okunan değerler ortam sıcaklığı değerlerine ulaşana kadar yeni deneye başlanmamıştır.

Yürütülen deneylerin bazılarında tahliye kesitinde bir fan yardımı ile ters yönden 90 m³ ile 130 m³ taze hava üflenerek tahliye tünelineki yaşanabilir koşulların sona erdiği sürenin nasıl değiştiği incelenmiştir.

Çizelge 4.1’de 26 numaralı deney ile 30 numaralı deney arasındaki P2 ile gösterilen deneyler için tahliye tüneli isimli parça mevcut yerinden sökülmüştür ve ısı kaynağından 1,5 metre daha uzaklaştırılarak önceden imal edilmiş yerine monte edilmiştir. Bu değişiklik ile ısı kaynağına yakın olan tahliye tüneli içindeki sıcaklık değişimi ile ısı kaynağından daha uzaktaki tahliye tüneli içindeki sıcaklık değişimi arasındaki farkın belirlenmesi amacıyla sıcaklık değerleri ölçülmüştür.

Çizelge 4.2 Deneylerin Birleşik Gösterimi

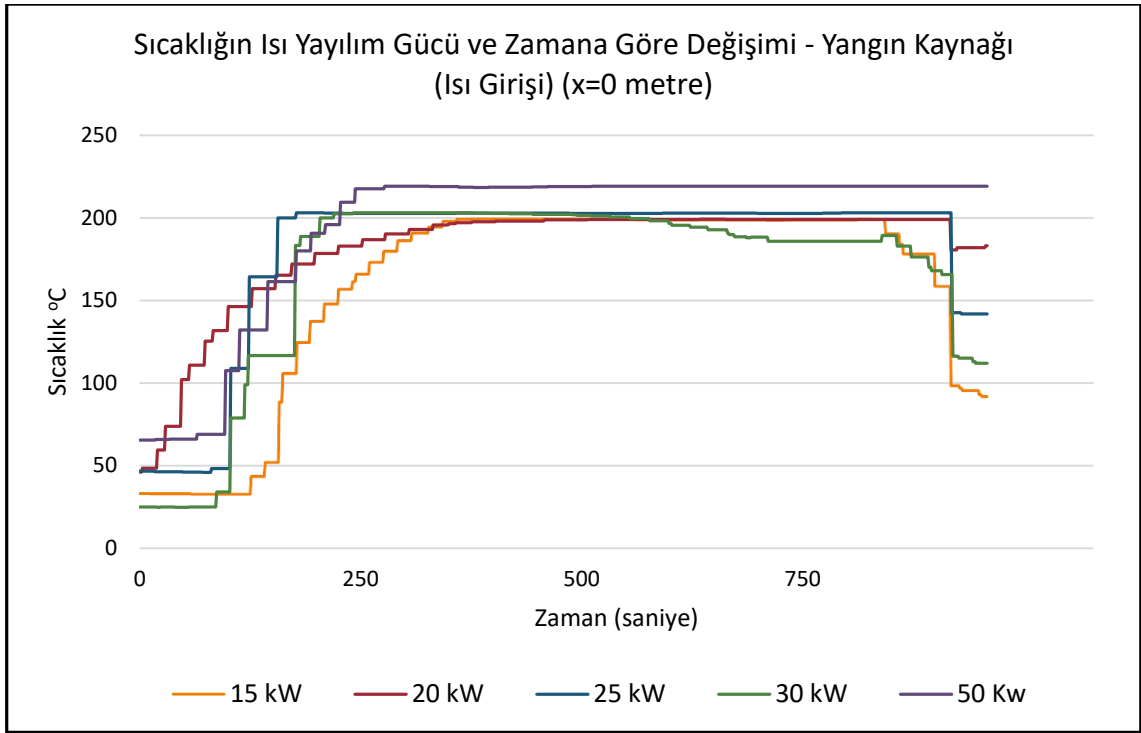
Deney No	Klape A	Klape B	Debi (kg/s)	Fan Durumu	Yalıtım Durumu	Dış Ortam Sıcaklığı (°C)
1	Açık	Kapalı		Kapalı	Yok	26
2	Açık	Kapalı		Kapalı	Yok	26
3	Açık	Açık		Kapalı	Yok	25
4	Açık	Kapalı		Kapalı	Yok	24
5	Açık	Kapalı	0,000417	Kapalı	Yok	23
6	Açık	Kapalı	0,0009	Kapalı	Yok	23
7	Açık	Kapalı	0,000324	Kapalı	Yok	23
8	Açık	Kapalı	0,000539	Kapalı	Yok	23
9	Açık	Kapalı	0,000240741	Kapalı	Yok	23
10	Açık	Kapalı		Kapalı	Yok	23
11	Açık	Kapalı	0,000885185	Açık	Var	21
12	Açık	Açık	0,000937037	Kapalı sonra açık	Var	23
13	Açık	Açık	0,000855556	Kapalı sonra açık	Var	22
14	Açık	Kapalı	0,00057963	Kapalı sonra açık	Var	23
15	Açık	Kapalı	0,000955556	Kapalı sonra açık	Var	23
16	Açık	Kapalı	0,000431481	Kapalı sonra açık	Var	22
17	Açık	Kapalı	0,00042963	Kapalı sonra açık	Var	22
18	Açık	Kapalı	0,000535185	Kapalı sonra açık	Var	22
19	Açık	Kapalı	0,000766667	Kapalı sonra açık	Var	20
20	Açık	Kapalı	0,000564815	Kapalı sonra açık	Var	20
21	Açık %10	Açık %10	0,000553704	Kapalı sonra açık	Var	20
22	Açık %25	Açık %25	0,000714815	Kapalı sonra açık	Var	19
23	Açık %25	Açık %25	0,00067963	Kapalı sonra açık	Var	13
24	Açık %25	Açık %25	0,000718519	Kapalı sonra açık	Var	13
25	Kapalı	Açık %25	0,000703704	Kapalı sonra açık	Var	13
26P2	Açık	Açık	0,000688889	Kapalı	Var	19
27P2	Açık %10	Açık %10	0,001142593	Kapalı	Var	19
28P2	Açık %10	Açık %10	0,000774074	Kapalı	Var	19

Çizelge 4.2 Deneylerin Birleşik Gösterimi (devam)

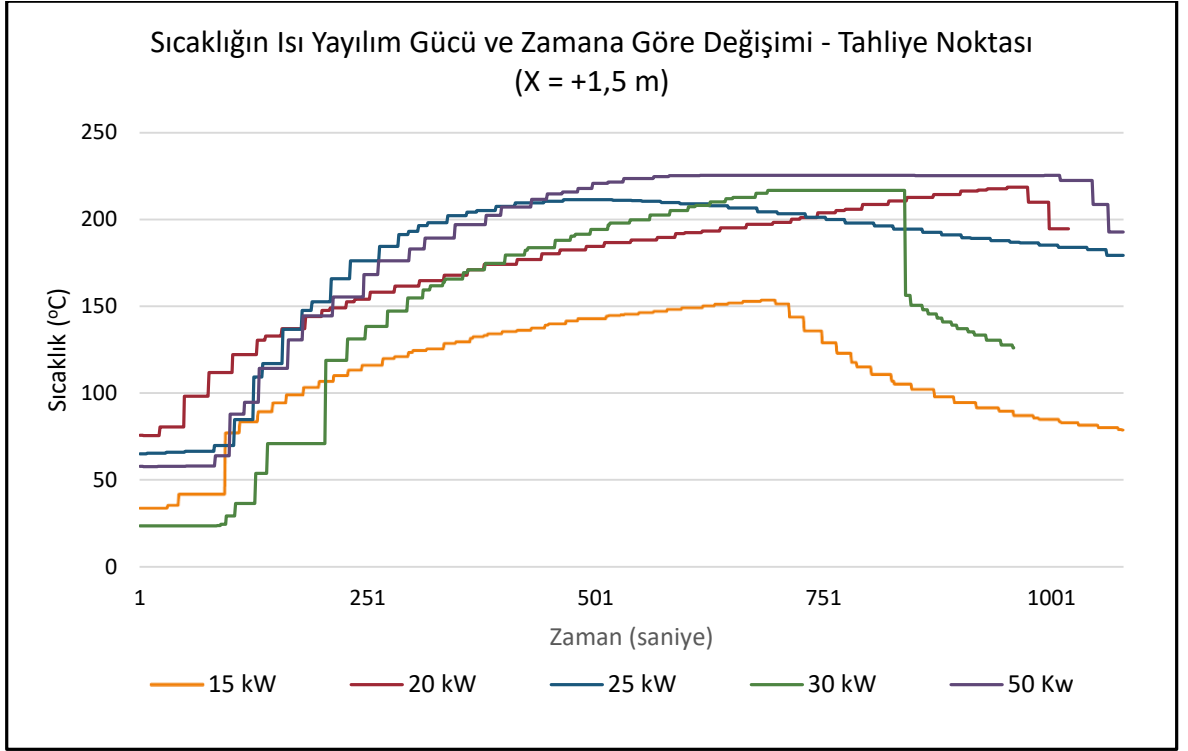
Deney No	Klape A	Klape B	Debi (kg/s)	Fan Durumu	Yalıtım	Dış Ortam
29P2	Açık %10	Açık %10	0,000622222	Kapalı	Var	19
30P2	Açık	Açık	0,000538889	Kapalı	Var	19

4.4. Deney Sonuçları

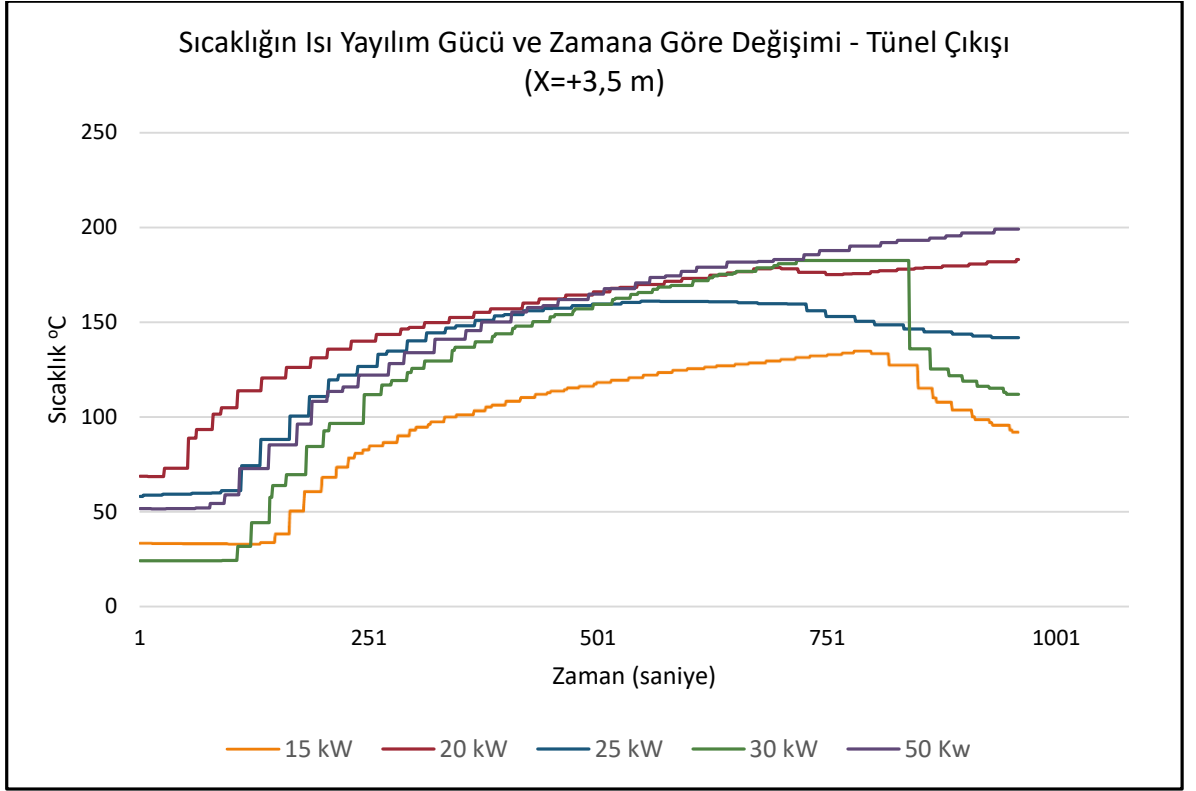
Deneylerde likit petrol gazı debisi değiştirilerek farklı ısı yayma gücüne sahip deney ortamları oluşturulmuştur. Bu sayede farklı yakıt yüküne sahip araçları tünel içinde yanması halinde temsilen oluşacak durum arasındaki farklar gözlemlenmiştir. Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10'da sırasıyla yangın kaynağında (ısı girişi), tünel tahliye yolu girişinde ve tünel çıkış ağzında tavan sıcaklığının 15 kW, 20 kW, 25 kW, 30 kW, 50 kW ısı yayma gücünde zamana bağlı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Yangın kaynağında tavan sıcaklığının farklı ısı yayılım gücü ve zamana bağlı değişimi

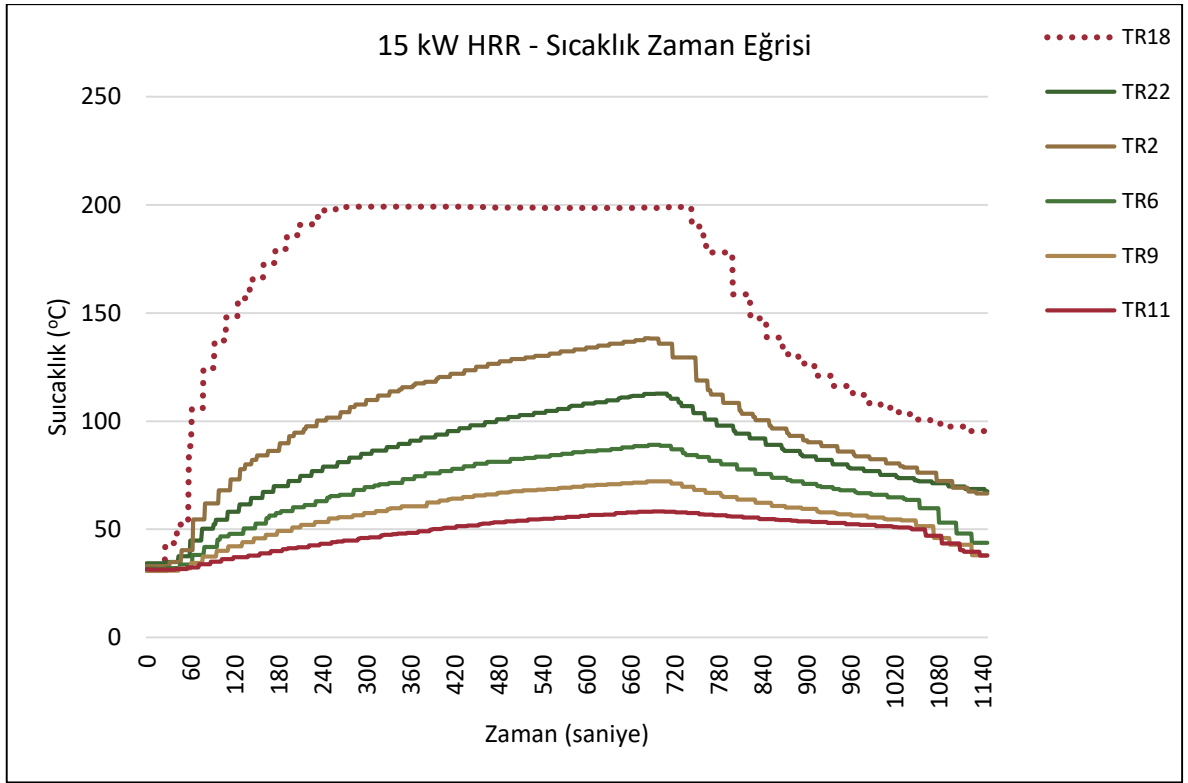


Şekil 4.9 Tünelde tahliye yolu girişinde tavan sıcaklığının farklı ısı yayılım gücüne ve zamana bağlı değişimi



Şekil 4.10 Tünelin çıkış portalında tavan sıcaklığında farklı ısı yayılım gücü ve zamana bağlı değişimi

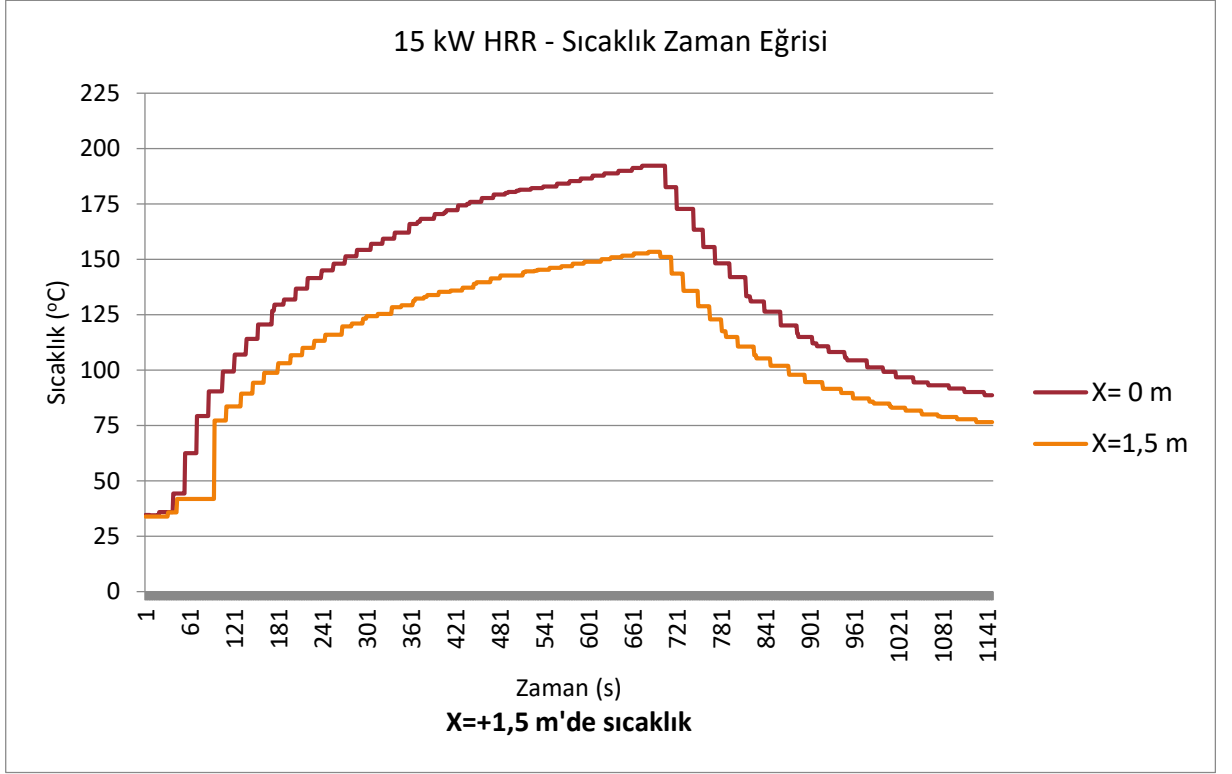
Şekil 4.9’da 15 kW ısı yayma gücü ile gerçekleştirilen deneyde 600 saniye geçtikten sonra, Şekil 4.10’da 15 kW ve 30 kW ısı yayma gücü ile gerçekleştirilen deneylerde 800 saniye geçtikten sonra yakıcı ünite kapatıldığı için sıcaklık değerlerinde hızlı düşüş yaşanmıştır.



Şekil 4.11 Tünelin farklı noktalarında tavandaki duman tabakası sıcaklığın zamana bağlı değişimi

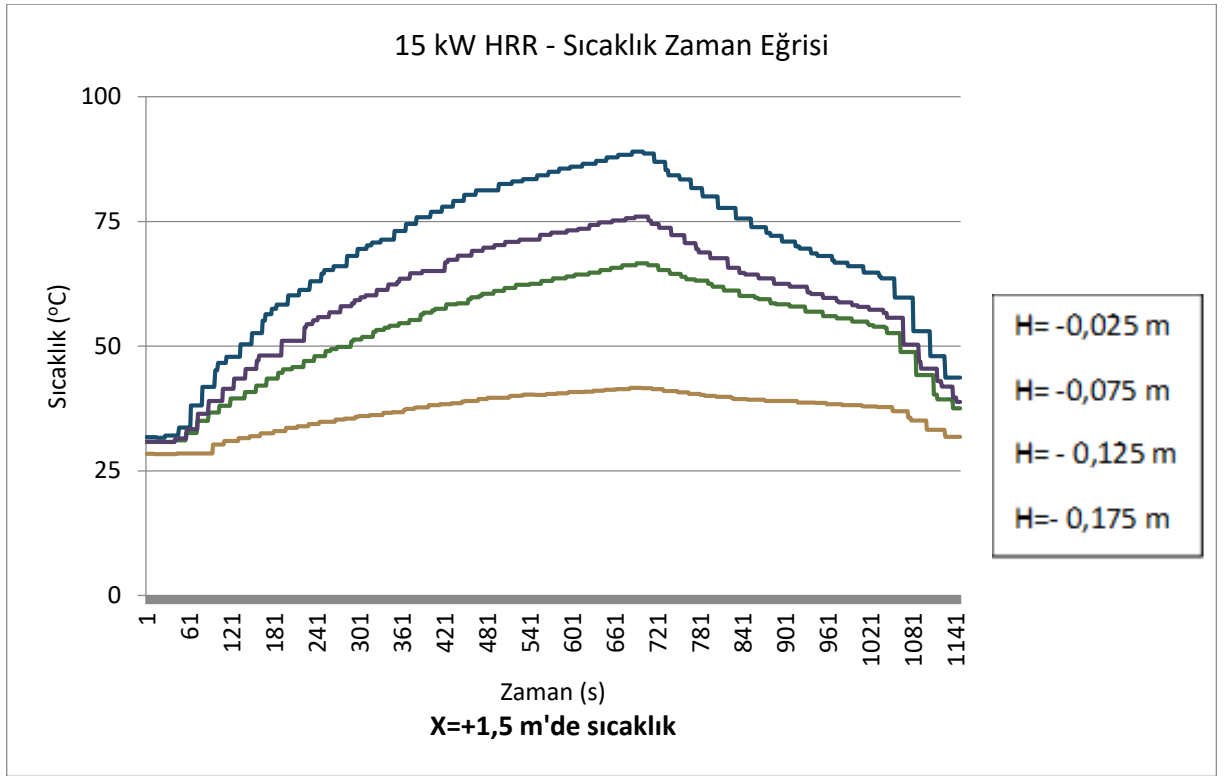
24 ayrı sıcaklık ölçer (termorezistör) cihazlardan tünelin çıkış noktasına yakın TR2 numaralı cihazdan, tünel tahliye tüneli içinde girişe yakın noktadaki tavan seviyesinde yer alan TR6 numaralı cihaz, tahliye tüneli içinde girişten uzak noktadaki TR9 numaralı cihaz, tahliye tüneli içinde giriş noktasında ve baş hizasında yer alan TR11 numaralı cihaz ve tünelin ısı girişine yakın noktadaki TR18 numaralı cihazdan toplanan veri Şekil 4.11’de ki sıcaklık zaman eğrisinde elde edilmiştir. Bu eğrideki yangında ortama yayılan ısı miktarı (HRR – Heat Release Rate) 15 kW dır. Grafikten görüldüğü üzere eğriler 2 ayrı bölgede gruplanmıştır. Yanma ısısının deney ortamına giriş yaptığı noktada diğer noktalara göre daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşılmakta, ısı yayılımı olan noktadan uzaklaştıkça yaklaşık 50°C lik bir sıcaklık düşüşü okunmaktadır. Ortama yayılan ısı miktarının nispeten düşük olması ve deney tertibatı yüzeyindeki ısı kayıpları bu sıcaklık farkını oluşturduğu düşünülmektedir. Tahliye tüneli olarak modellenen kesitte gruplanan eğriler grafiğin alt kısmında görülmektedir. 50 °C ila 100 °C aralığında gruplanan bu eğrilerden görüleceği üzere iki kesit arasında tavan kotlarındaki mevcut farkın oluşturduğu bariyer ve iki kesitin birbirine dik konumda olması daha düşük değerlerin elde edilmesini sağlamıştır. t=680

saniyeden itibaren yanmanın durdurulması ile birlikte sıcaklık değerleri azalmaya başlamaktadır.



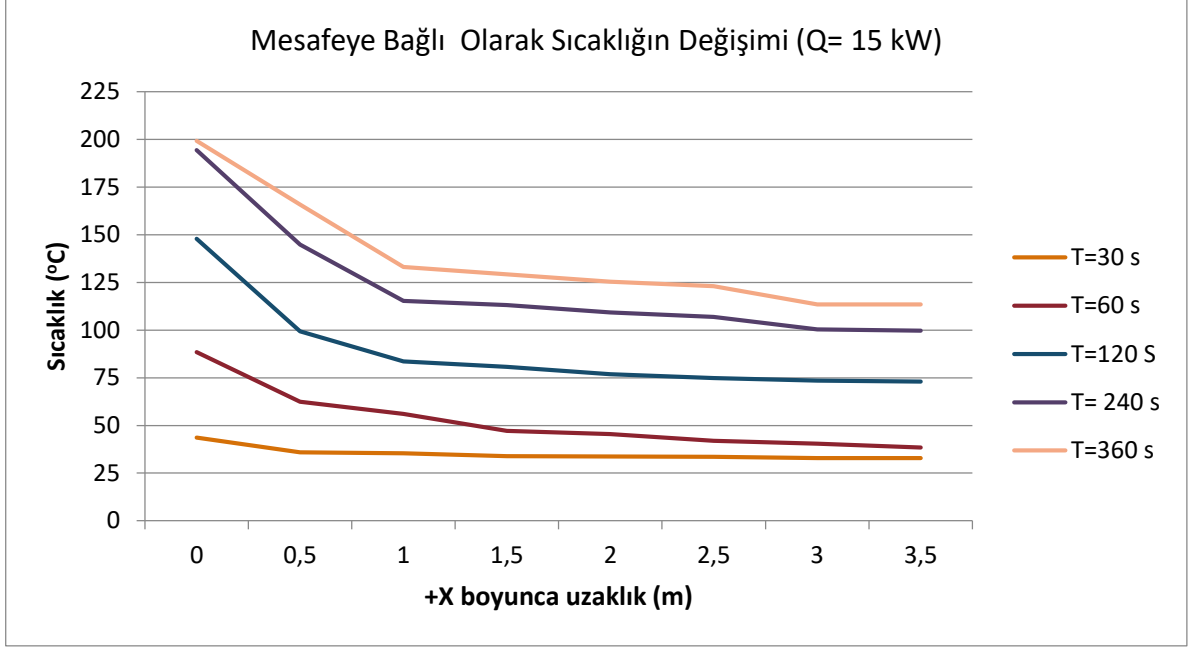
Şekil 4.12 Tünelin tahliye noktasında sıcaklığın zamana bağlı değişimi

Deney tertibatında yer alan ana tünel ile dik konumda bulunan tahliye tüneli kesişim noktasındaki ($X = +1,5$ m) tavanda biriken gazın sıcaklık değerinin, yanma ısısının deney ortamına tatbik edildiği noktadan ($X = 0$ m) 1,5 metre mesafede oluşan gaz sıcaklığı arasındaki farkı gösteren ve Şekil 4.12’de ki eğrilerde 50 °C lik bir sıcaklık düşüşü okunmaktadır. Yanma noktasından uzaklaştıkça gerçekleşen bu sıcaklık farkı beklenen bir sonuçtur.



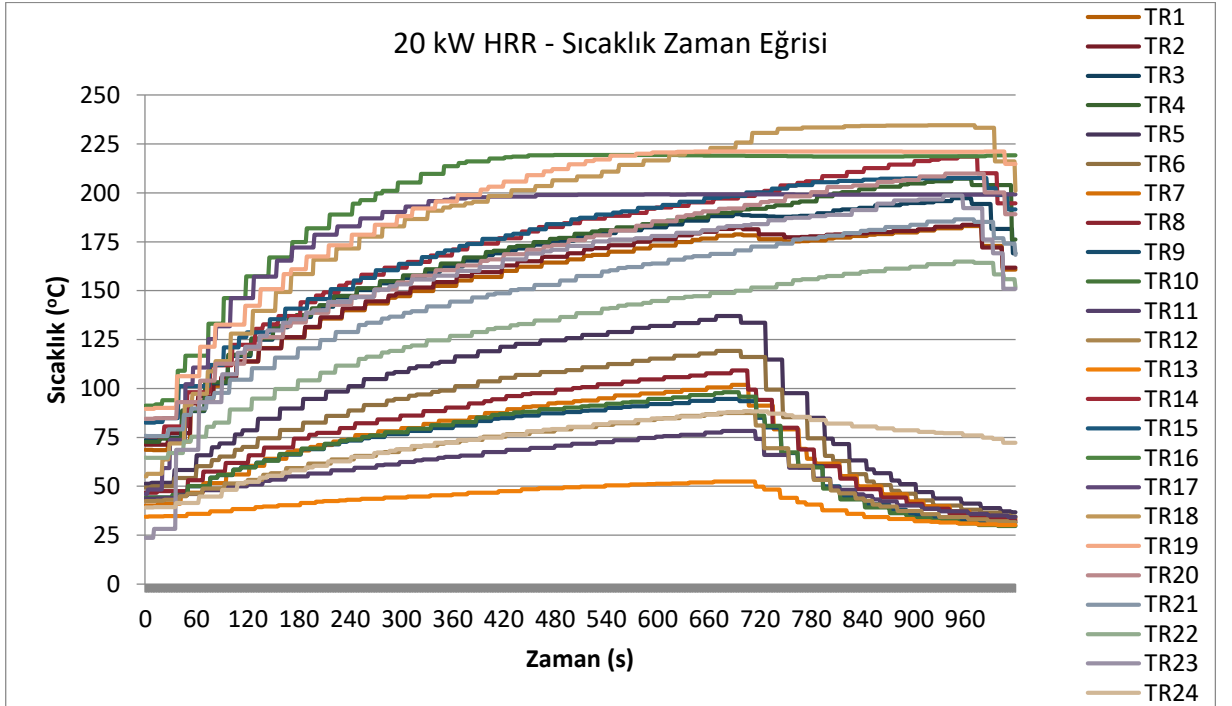
Şekil 4.13 Tünelin tahliye noktasında sıcaklığın tavandan zemine doğru yükseklik farkına ve zamana bağlı değişimi

Deney tertibatında tahliye tüneli olarak modellenen kesitte yer alan sıcaklık ölçerlerden okunan değerler Şekil 4.13'de görülmektedir. Ana tünelden $Y=0,4$ m uzaklıkta yer alan sıcaklık ölçerler tavan kotu $H=0$ m olarak kabul edildiğinde $H=(-0,025)$ m, $H=-0,075$ m, $H=-0,125$ m ve $H=-0,175$ m olarak yerleştirilmiştir. Deney tertibatı ile modellenen ortamda $H=-0,175$ m'de bulunan sıcaklık ölçer tahliye olan bir kişinin ayakta dururken bel hizasına tekabül eden noktadan ölçülebilecek sıcaklık değerini okumaktadır. Benzer şekilde, $H=-0,125$ m'de yer alan sıcaklık ölçer kişinin ayakta dururken boyun/göğüs hizasına tekabül eden nokta, $H=-0,075$ m'de yer alan sıcaklık ölçer kişinin ayakta dururken baş üstü hizasına karşılık gelen noktadan ölçülebilecek sıcaklık değerini okumaktadır. Grafikten görüleceği üzere $t=180$ saniyeden itibaren tavanda biriken gaz sıcaklığı baş üstü mertebesinde 50°C 'nin üzerine çıkmaktadır, $t=300$ saniyeden itibaren tavanda biriken gaz sıcaklığı boyun/göğüs hizası mertebesinde 50°C 'nin üzerine çıkmaktadır.



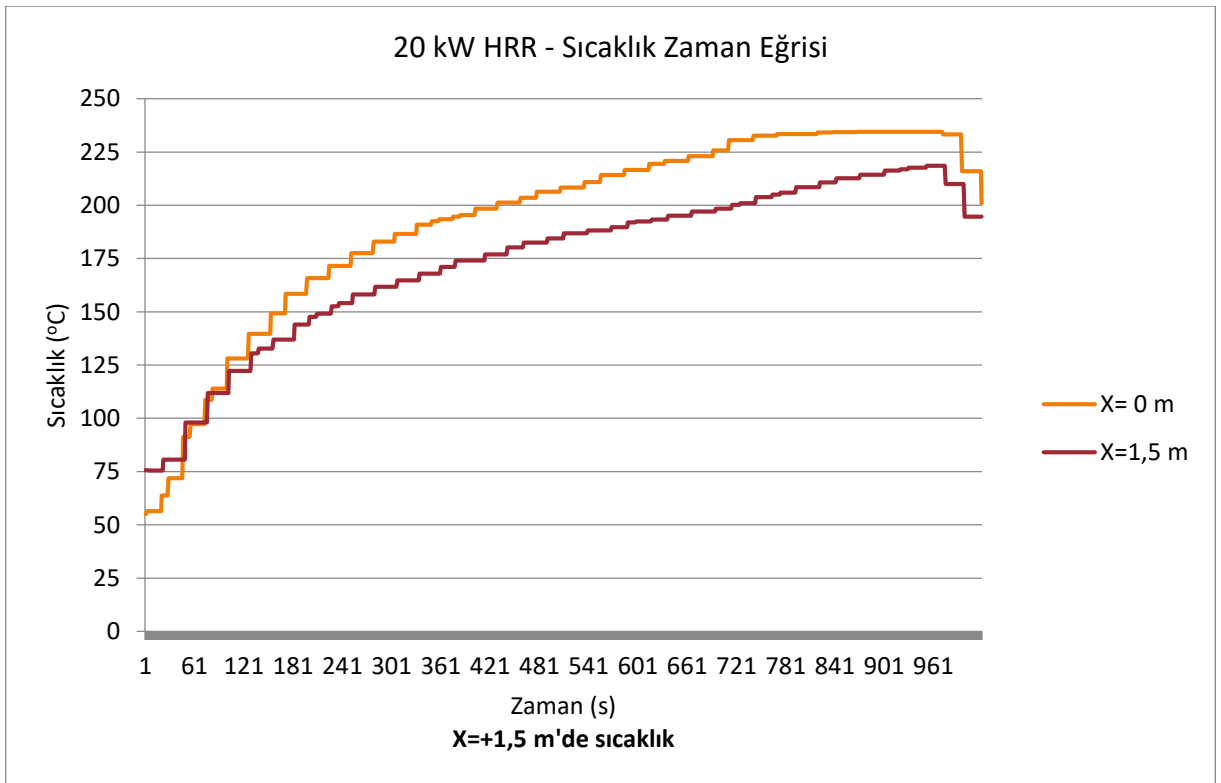
Şekil 4.14 Q=15 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında tavandaki duman tabakası sıcaklığının mesafeye bağlı değişimi

Deney tertibatında ölçülen sıcaklığın, deneyin farklı zamanlarında ısıнын ortama yayıldığı noktadan uzaklaştıkça değişimini belirlemek için Şekil 4.14’de grafiğe aktarılmıştır.



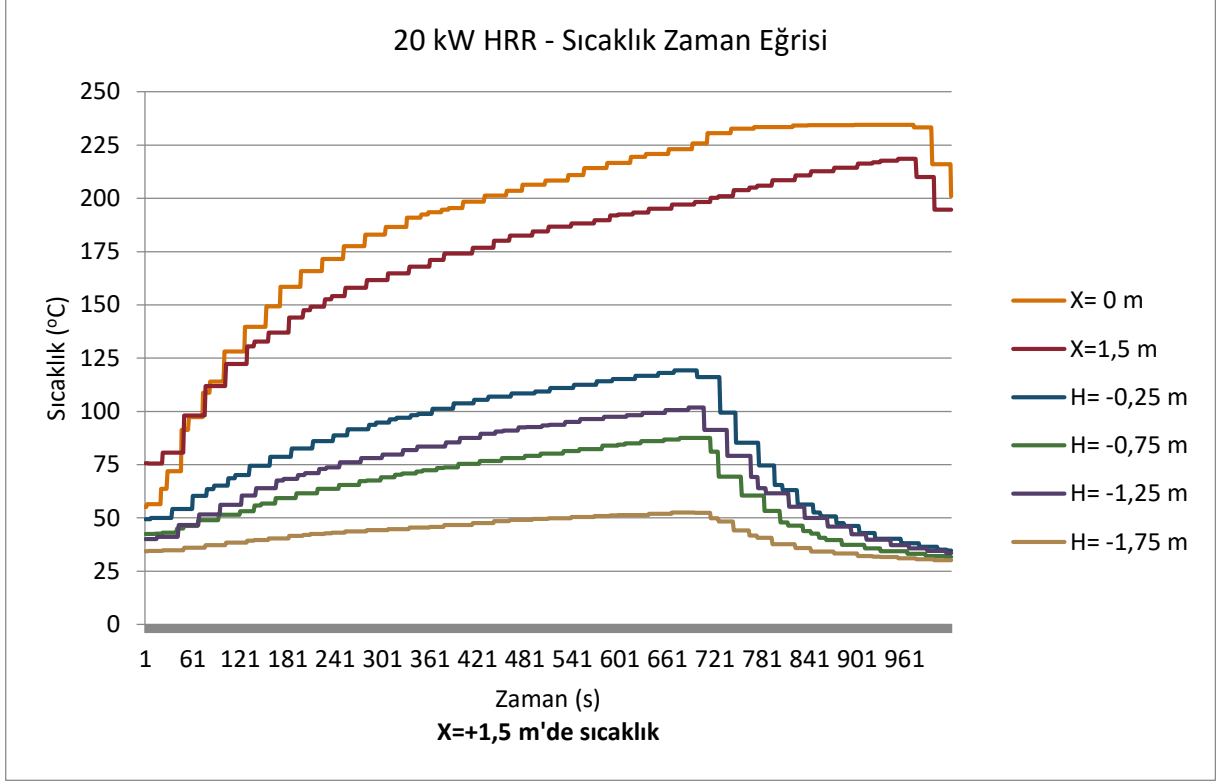
Şekil 4.15 Q=20 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında tavandaki duman tabakası sıcaklığının zamana bağlı değişimi

Isı yayma gücü 5 kW arttırılarak yapılan deneylerde tavan sıcaklığında oluşan artışın 25°C mertebesinde olduğu Şekil 4.15'deki eğrilerden görülmektedir. Bu deneyde önceki deneyden farklı olarak tahliye tüneli olarak modellenen kesit boyunca uzunlamasına doğrultuda (-Y ekseninde) karşı hava akımı oluşturacak 150 m³/h sabit debide fan kullanılmıştır. Tahliye modelinde baş üstü mertebesine denk gelen sıcaklık ölçerde 75°C sıcaklık derecesine erişildiğinde fan çalıştırılmıştır. t= 720 saniyede başlayan ters hava akımı ile birlikte ana tünele dik konumda bulunan tünel içinde önemli sıcaklık düşüşü hızla gerçekleşmiştir.



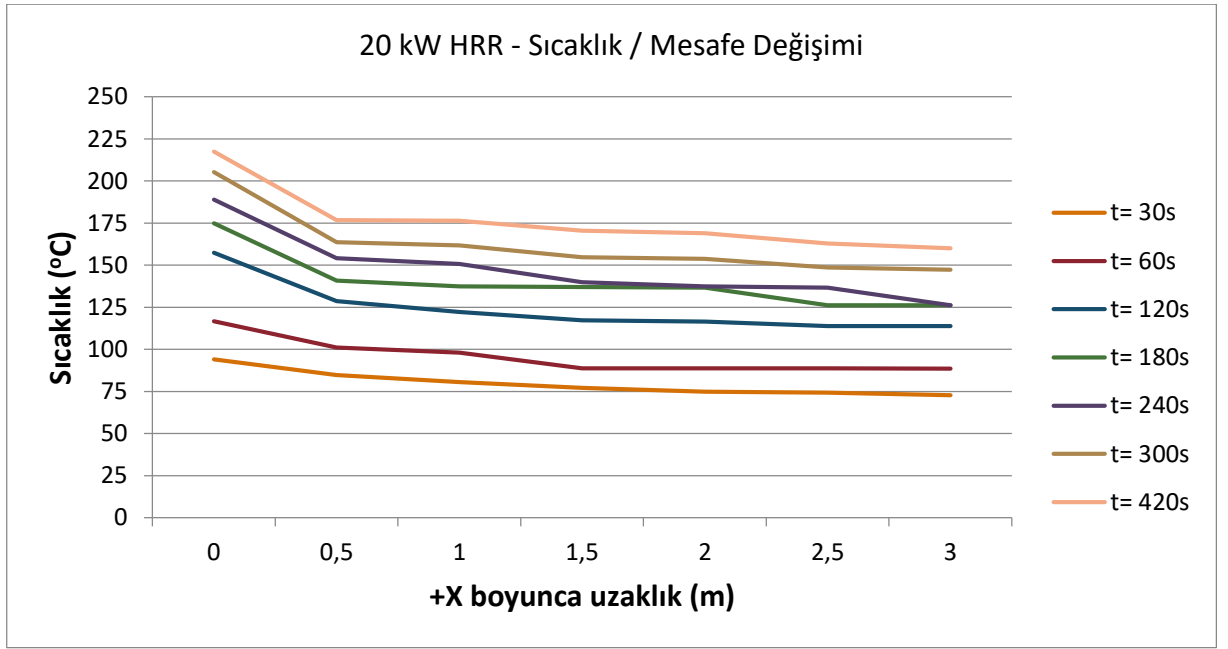
Şekil 4.16 Tünelin tahliye noktasında sıcaklığın zamana bağlı değişimi

Tahliye tüneli kesişim noktasındaki tavanda biriken gazın sıcaklık değerinin, yanma ısısının deney ortamına tatbik edildiği merkez noktası arasındaki mesafede oluşan gaz sıcaklığı arasındaki farkı gösteren Şekil4.16'teki eğrilerden sıcaklık farkının zaman ilerledikçe değişmediği hatta t=900 saniyede tavan sıcaklığının X= 1,5 metre uzaklıkta merkez değerine oldukça yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 4.17 Tünelin tahliye noktasında sıcaklığın tavandan zemine doğru yükseklik farkına ve zamana bağlı değişimi

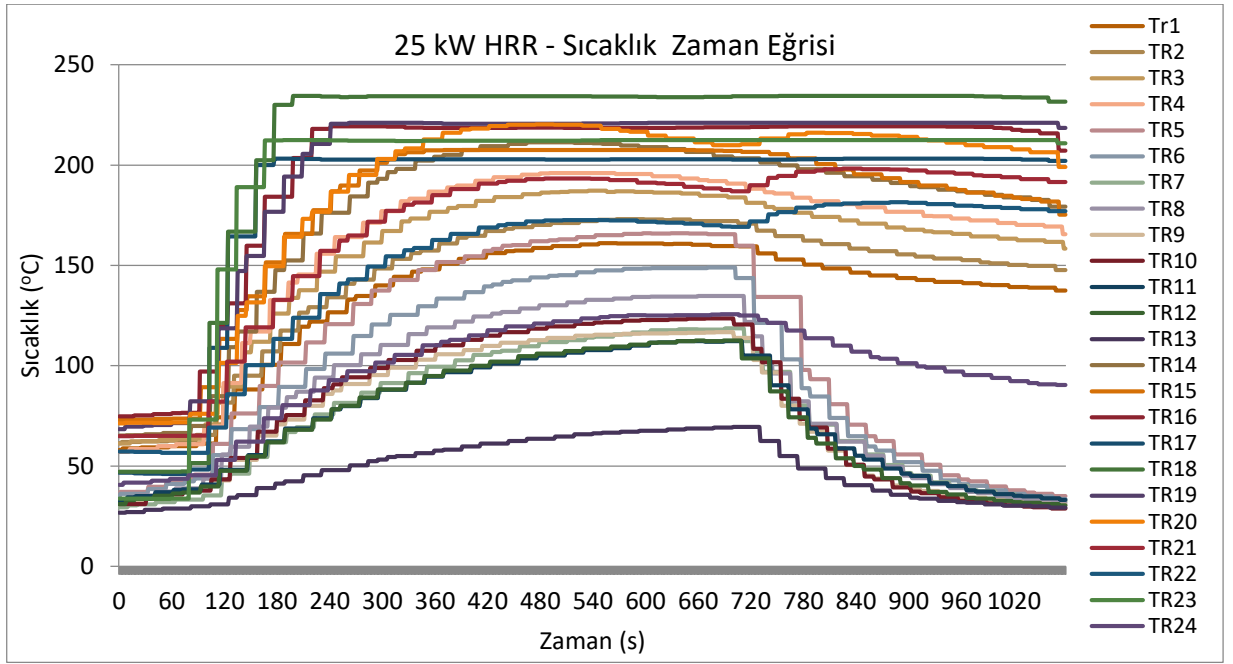
Tahliye tüneli olarak modellenen kesitte yer alan sıcaklık ölçerlerden okunan değerler Şekil 4.17’de görülmektedir. Grafikten görüleceği üzere $t=60$ saniyeden itibaren tavanda biriken gaz sıcaklığı baş üstü mertebesinde 50°C ’nin üzerine çıkmaktadır, $t=120$ saniyeden itibaren tavanda biriken gaz sıcaklığı boyun/göğüs hizası mertebesinde 50°C ’nin üzerine çıkmaktadır. $t=720$ saniyede çalıştırılan fan ile oluşturulan soğuk hava akımı 120 saniye içerisinde $t=840$ saniyede baş üstü mertebesindeki sıcaklığın 50°C ’nin altına inmesini sağlamaktadır.



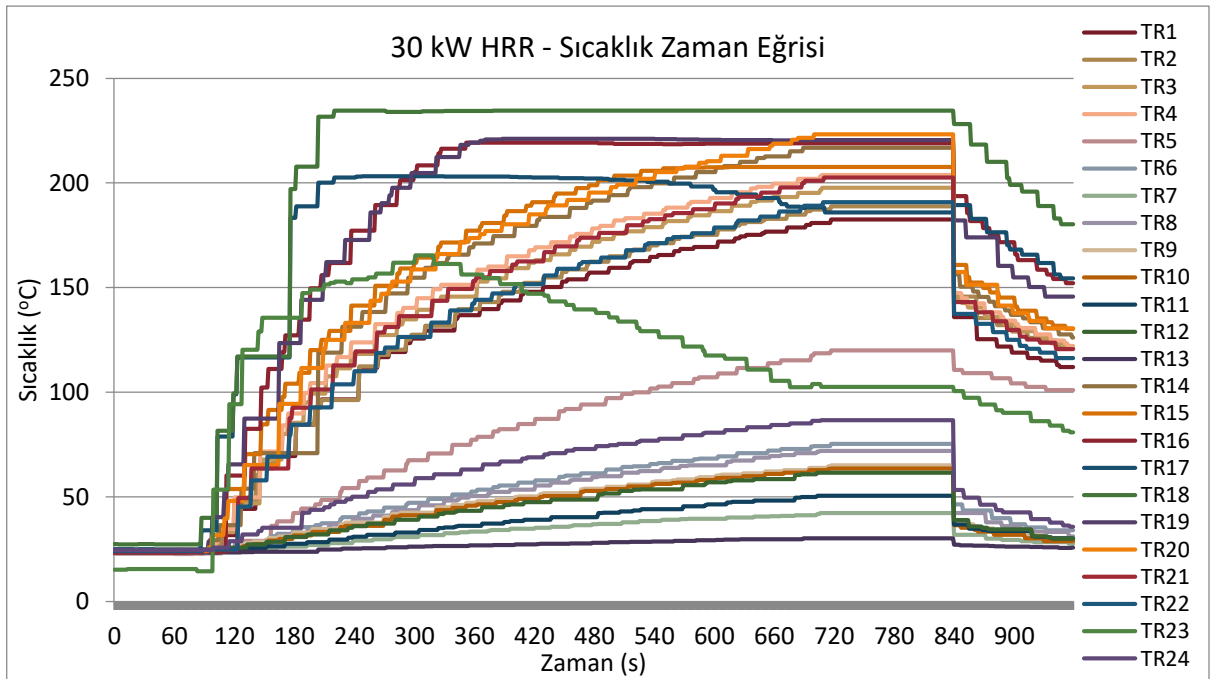
Şekil 4.18 Q=20 kW ısı yayam gücünde tünelin farklı noktalarında tavandaki duman tabakası sıcaklığının mesafeye bağlı değişimi

Ölçülen sıcaklık değerleri, deneyin farklı zamanlarında ısının ortama yayıldığı noktadan uzaklaştıkça sıcaklık değerinin değişimi belirlemek için Şekil 4.18'deki grafiğe aktarılmıştır.

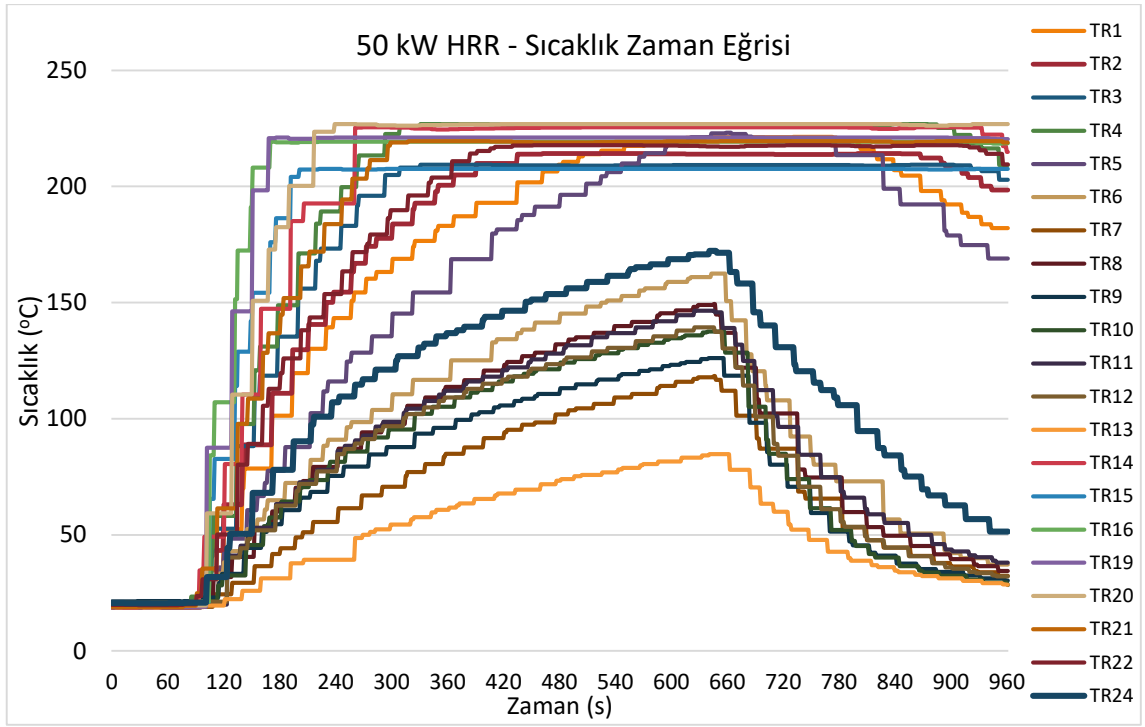
TR1 numaralı cihaz ile başlayıp sırasıyla TR2, TR3, ..., TR 24 numaralı cihazlar deneylerde kullanılan sıcaklık ölçerlerin adı olup tünel boyunca tavan hizasındaki sıcaklık değerlerini ölçülmesinde kullanılmıştır. TR5, TR6, TR 7, TR8, TR9, TR10, TR11, TR 12, TR 13 numaralı cihazlar tahliye tüneli kısmına yerleştirilerek tavanda ve düşey ekseninde farklı seviyelerde sıcaklık değerlerinin ölçülmesinde kullanılmıştır. Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de sırasıyla 25 kW, 30 kW, 50 kW ısı yayma gücünde tünelin içine yerleştirilmiş tüm sıcaklık ölçerlerden elde edilen değerler gösterilmektedir.



Şekil 4.19 25 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında tavandaki duman tabakası sıcaklığının zamana bağlı değişimi

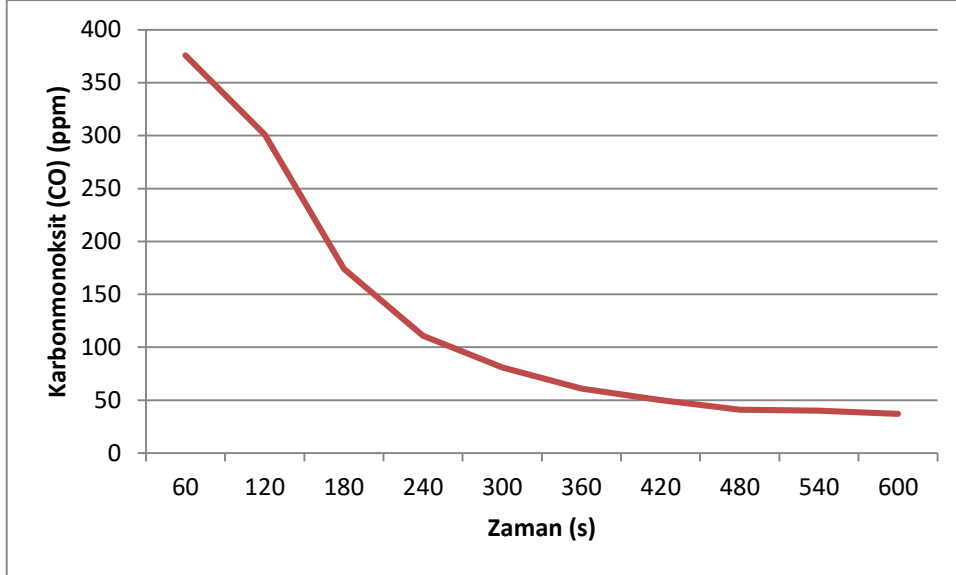


Şekil 4.20 30 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında tavandaki duman tabakası sıcaklığının zamana bağlı değişimi



Şekil 4.21 50 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında tavandaki duman tabakası sıcaklığının zamana bağlı değişimi

Deneyler sırasında sıcaklık ölçümlerinin yanında gaz ölçme cihazı ile karbon monoksit (CO) gazının konsantrasyon değişimi de ölçülmüştür. Gerçekleştirilen deneylerin hepsinde deney başlangıcında ısı yayma gücüne bağlı olarak 150 ila 350 ppm aralığında ölçülen CO konsantrasyonu deney süresi ilerledikçe giderek azalmıştır. CO gazı konsantrasyonunun zaman bağlı değişimi Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22 CO gazı konsantrasyonu değişimi

4.5. Deney Verisi ile Gerçekleştirilen Hesaplamalar

Tünel tavanında biriken gaz tabakasından tünel zeminine doğru gerçekleşen ısıma (radyasyon) sırasında gerçekleşen ısı akısı değerinin hesabında ısıma ile gerçekleşen ısı transferi değeri:

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (4.1)$$

ve ışıyım yoğunluğu:

$$I = I_n \cdot \cos \theta \quad (4.2)$$

olduğuna göre:

Işınımdan kaynaklanan enerjinin bir yüzey üzerine olan ısı akısının değeri:

$$q'' = \phi E \quad (4.3)$$

$$\phi = \int_0^{A_1} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 \quad (4.4)$$

eşitlikleri ile hesaplanmaktadır [33].

Gaz tabakası içinde yanma ürünü olarak ortaya çıkan karbondioksit gazı ve su buharı ağırlıklı olarak yer almaktadır. Dolayısıyla ısı akısı hesaplanırken her iki gaz için ışıınım değerleri Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de belirtilmiştir.

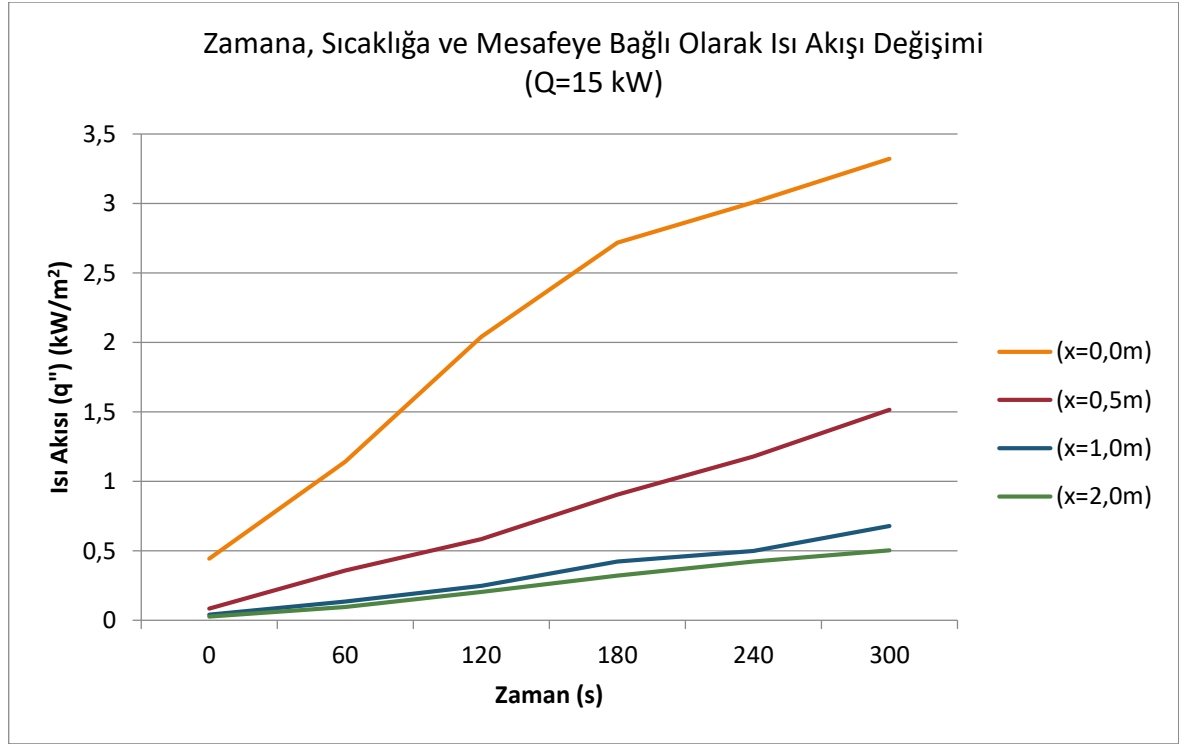
Çizelge 4.3 Karbondioksit gazı (ϵ) Işıınım değerleri

Karbondioksit gazının (ϵ) Işıınım değeri							
	Kısmi Basınç.Işın uzunluğu (atm.m)						
Gaz Sıcaklığı (K)	0.001	0.004	0.02	0.1	0.4	1.0	2.0
200	0.0015	0.003	0.005	0.009	0.1	0.15	0.2
300	0.0017	0.004	0.006	0.009	0.12	0.16	0.25
500	0.0015	0.002	0.004	0.007	0.85	0.1	0.15
1000	0.002	0.0035	0.006	0.01	0.15	0.2	0.3

Çizelge 4.4 Su buharı (ϵ) Işıınım değerleri

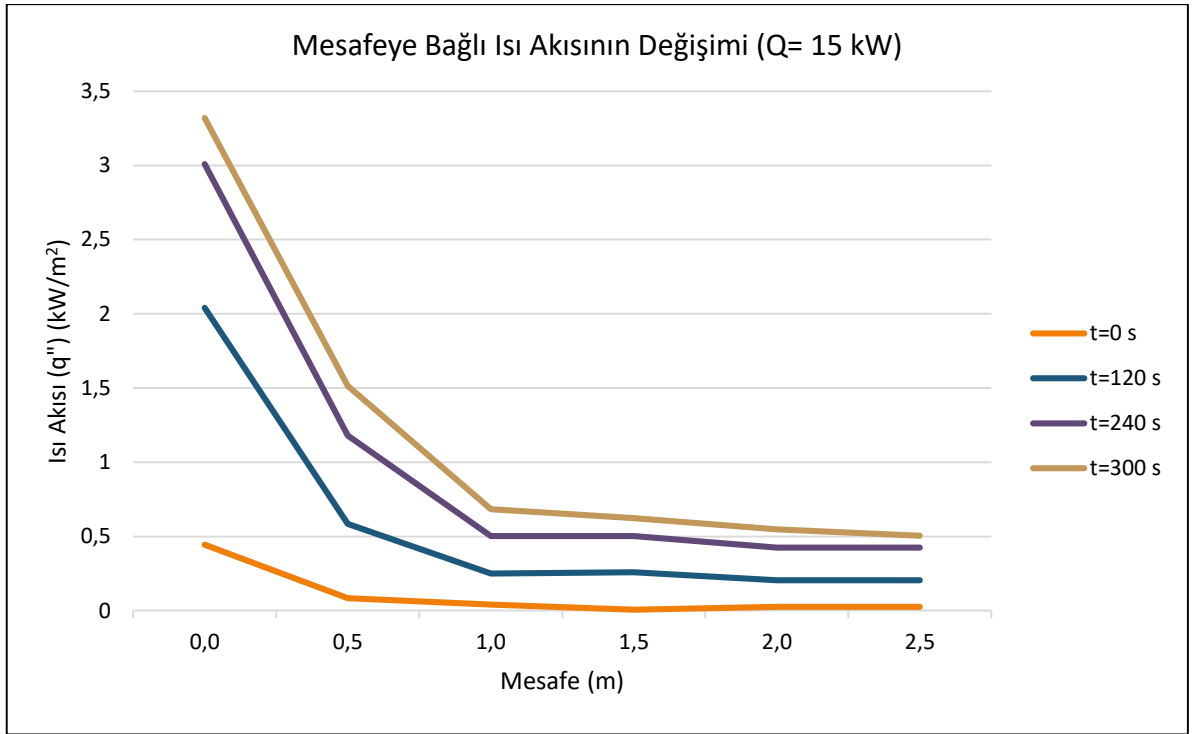
Su buharının (ϵ) Işıınım değeri							
	Kısmi Basınç.Işın uzunluğu (atm.m)						
Gaz Sıcaklığı (K)	0.001	0.004	0.02	0.1	0.4	1.0	2.0
200	0.08	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8
300	0.07	0.095	0.17	0.25	0.4	0.6	0.7
500	0.01	0.02	0.03	0.1	0.4	0.6	0.8
1000	0.002	0.007	0.01	0.02	0.03	0.1	0.5

Ek-1’de açıklanan örnek hesabagöre deneylerden elde edilen sıcaklık değerleri kullanılarak tünel içinde zamana ve mesafeye bağlı ısı akısının değişimi hesaplanmıştır. Bu hesaplamağa bağlı olarak sırasıyla 15 kW, 20 kW ve 50 kW ısı yayma gücünde gerçekleştirilen deneylerin verileri kullanılarak Şekil 4.23 ile Şekil 4.28 arasında gösterilen ısı akısı değişimi eğrileri elde edilmiştir.

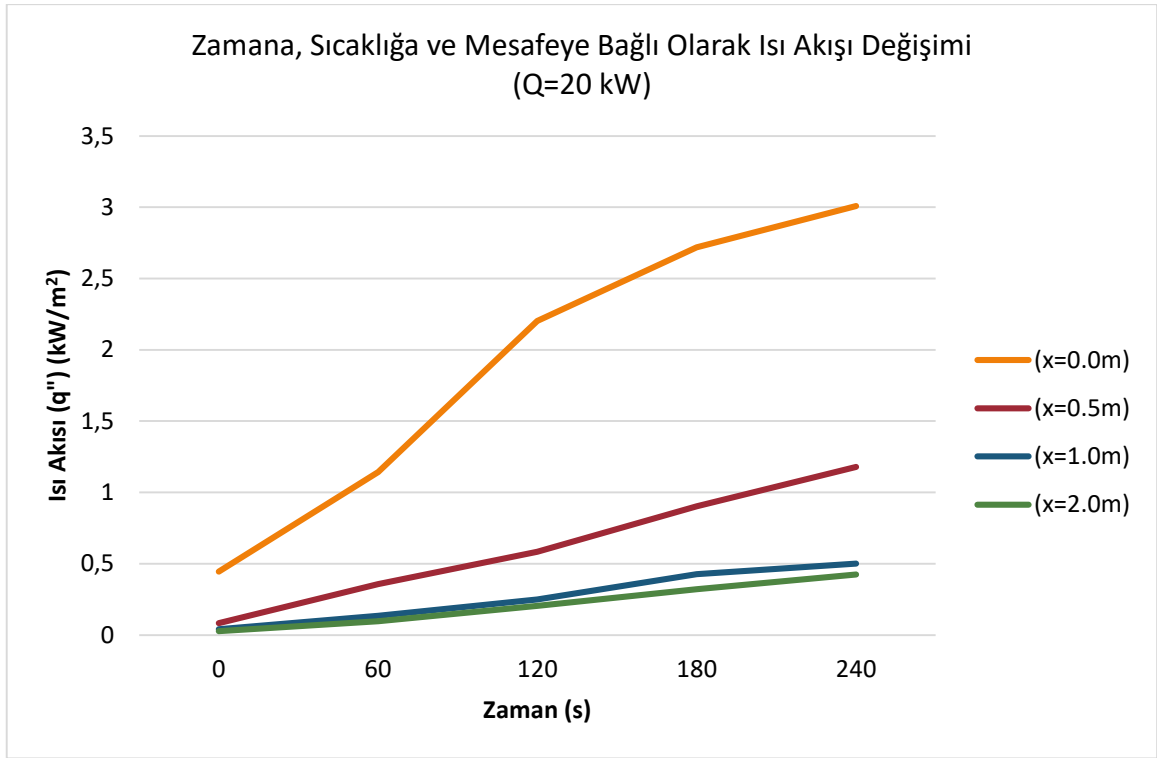


Şekil 4.23 15 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında zemine etkiyen ısı akısının zamana bağlı değişimi

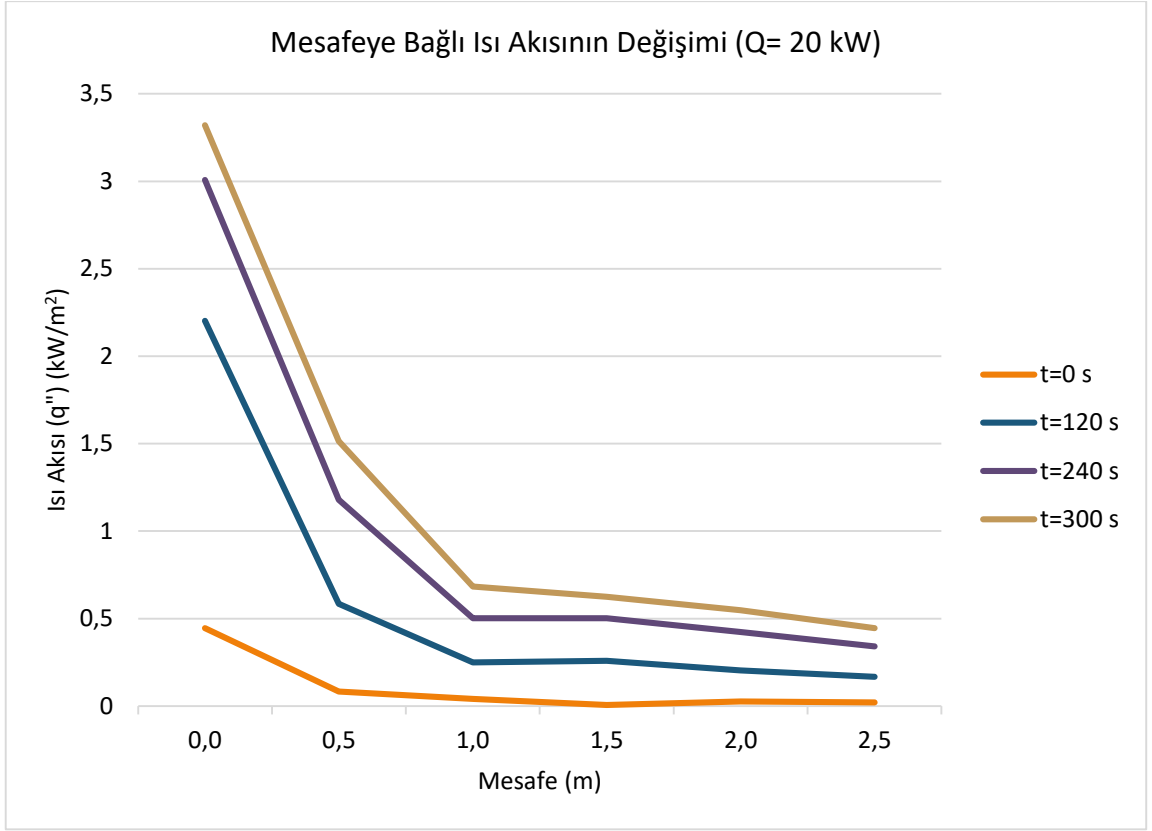
Sıcaklık ölçerlerden elde edilen değerler zemin ile duman tabakası arasında yarım küre üzerinde integre edilerek yangın kaynağından farklı uzaklıklarda bir insanın üzerine etkiyebilecek ısı akısı değerinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.23’de gösterilmektedir.



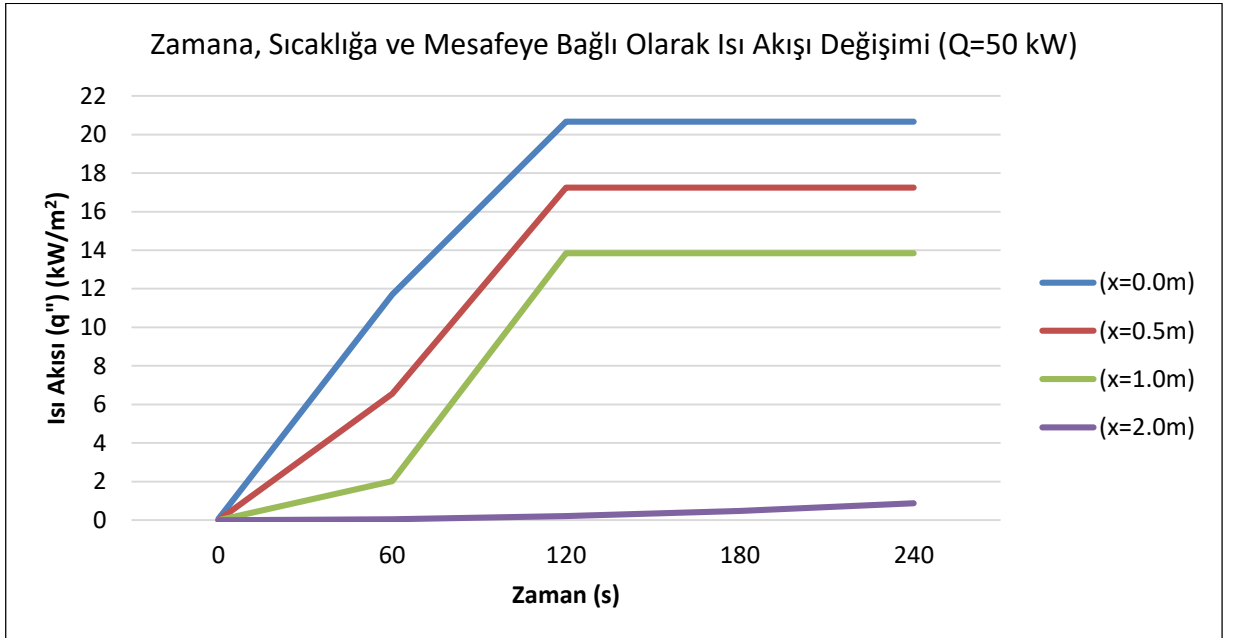
Şekil 4.24 15 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında duman tabakasından zemine etkiyen ısı akısının mesafeye bağlı değişimi



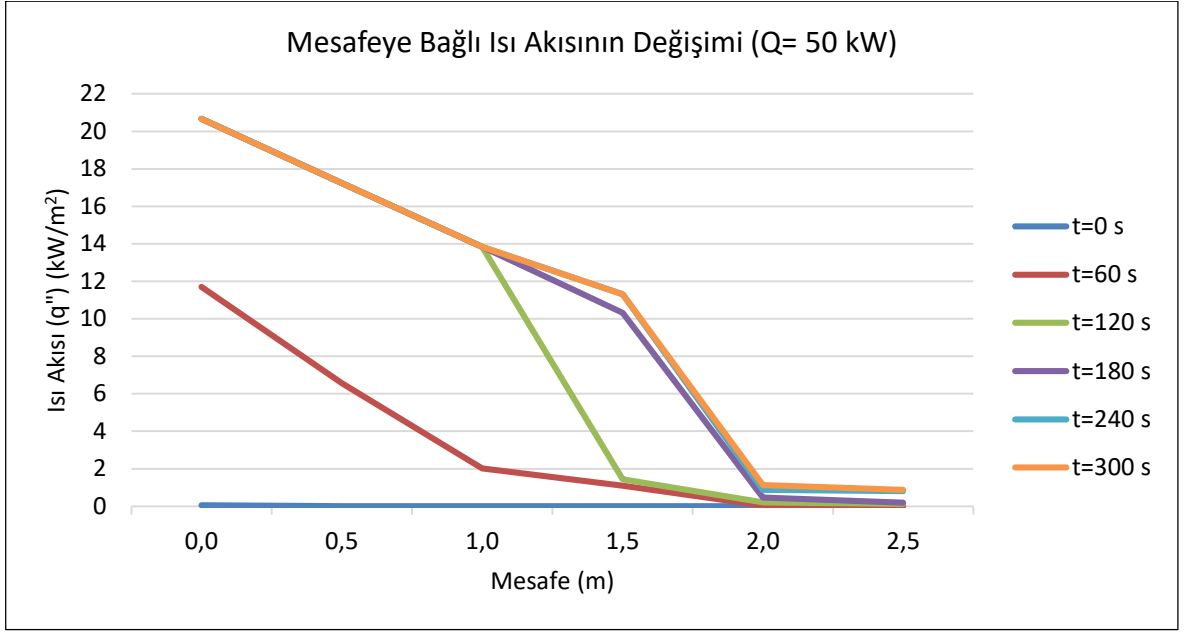
Şekil 4.25 $Q=20$ kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında zemine etkiyen ısı akısının zamana bağlı değişimi



Şekil 4.26 Q=20 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında duman tabakasından zemine etkiyen ısı akısının mesafeye bağlı değişimi



Şekil 4.27 Q=50 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında zemine etkiyen ısı akısının zamana bağlı değişimi



Şekil 4.28 Q=50 kW ısı yayma gücünde tünelin farklı noktalarında duman tabakasından zemine etkiyen ısı akısının mesafeye bağlı değişimi

HAD ve NÜMERİK ÇALIŞMALAR

5.1. Tünellerde Deneysel Model Çalışmaları

Bir deneysel model kurularak tünel yangını olayı üzerine yapılan çalışmalar literatürde mevcuttur. Çeşitli araştırmacıların tünel yangınlarının çeşitli değişkenlerini incelemek üzere gerçekleştirdiği deneysel çalışmaların özeti çizelge 5.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 5.1 Deneysel model çalışmalarında kullanılan parameterlerin gösterimi

No	İsim	Tünel Boyu (m)	Tünel Çapı (m)	Ölçek	Yakıt	Ölçülen Değerler	Yayın	Kaynak
1	Li, Lei, Ingason	12	0,45	1:20	Propan	Sıcaklık, CO	Scale Modelling and Numerical Simulation of Smoke Control for Rescue Stations in Long Railway Tunnels [34]	Journal of Fire Protection Engineering, 2012, 22:101
2	Wu, Bakar	15	0,17; 0,25; 0,33; 0,4	1:10	Propan	Sıcaklık, Hava Hızı	Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Velocity Systems A study of the Critical Velocity [6]	Fire Safety Journal, 2000, 35:363
3	Roh, Yang, Ryou, Yoon, Yeong	10	0,4	1:20	n-heptan	Sıcaklık, kütle kaybı, havalandırma hızı	An experimental study on the effect of ventilation velocity on burning rate in tunnel fires-heptane pool fire case [22]	Building and Environment, 2008, 43:1125

Çizelge 5.1 Deneysel model çalışmalarında kullanılan parameterlerin gösterimi (devam)

4	Kuiroka , Oka, Satoh, Sugawa	4,8; 5; 10,2	0,3; 0,6	1:10, 1:2, 1:1	Propan, metanol, kerosen	Sıcaklık	Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels [19]	Fire Safety Journal, 2003, 38:319
5	Choi	12	0,44	1:20	Heptan	Duman Yayılım ı, Havala ndırma hızı	A new design criterion of fire ventilation for transversely ventilated tunnels [35]	Tunneling and Undergro und Space Technolog y, 2006, 21:277
6	Vauque lin, Telle	10	0,33	1:20	Helyum	Havala ndırma hızı, duman egzoz hızı	Definition and experimental evaluation of the smoke “confinement velocity” in tunnel fires[36]	Fire Safety Journal, 2005, 40:320
7	Li, Ying	12,5	0,75	1:10	Propan	Sıcaklık , Havala ndırma hızı,	Fire Induced Ceiling Jet Characteristics in Tunnels under different ventilation conditions [37]	SP Technical Research Institute of Sweden Report, 2015:23

Çizelge 5.1 Deneyisel model çalışmalarında kullanılan parameterlerin gösterimi (devam)

8	Appel G.	3	2,4	1:1	Dizel , Heptan	Sıcaklık , ısı yayma gücü, kütle	Development of a test method for fire detection in road tunnels [38]	SP Technical Research Institute of Sweden Report, 2015:13
9	Lotta V.,	15	1,85	1:4	Ahşap, Poliüret an	Sıcaklık , ısı yayma gücü, CO	Influence of fire suppression on combustion products in tunnel fires [39]	SP Technical Research Institute of Sweden Report, 2015:09
10	Lönner mark A.	10	0,48	1:10	Heptan, Ahşap	Sıcaklık , ısı yayma gücü, CO	The Effect of Cross-sectional Area and Air Velocity on the Conditions in a Tunnel during a Fire [40]	SP Technical Research Institute of Sweden Report, 2007:05
11	Hugoss on J.	3	0,15	1:40	Propan	Sıcaklık , CO	Fire incidents during construction work of tunnels – Model scale experiments [41]	SP Technical Research Institute of Sweden Report, 2010:86

Çizelge 5.1 Deneysel model çalışmalarında kullanılan parameterlerin gösterimi (devam)

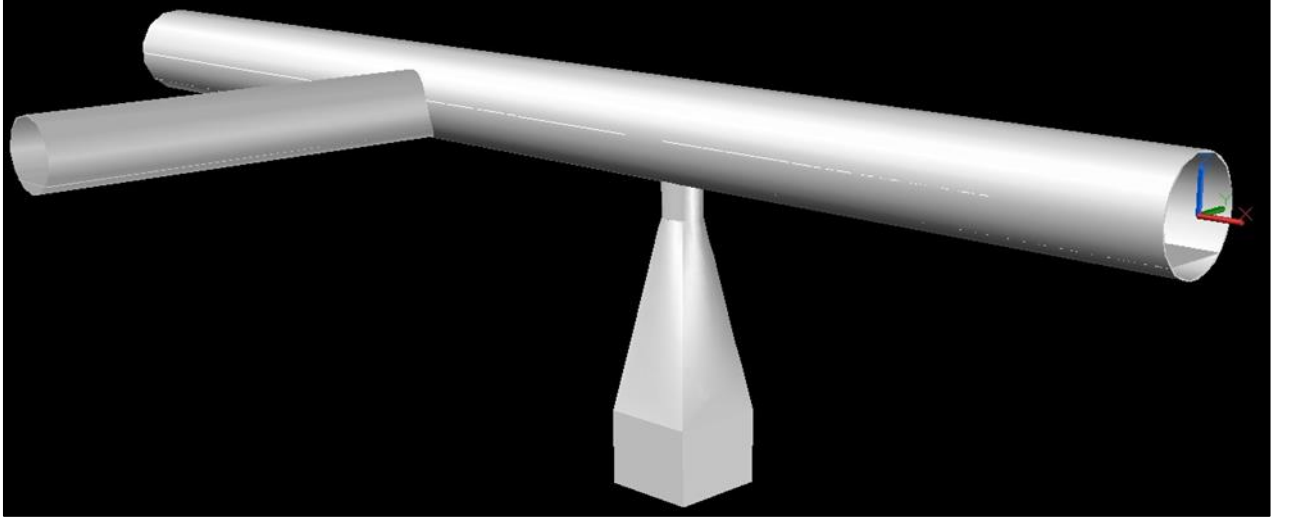
12	Chen, Zu, Cai, Pan, Liao	7,5	1,2	1:10	Motorin, ahşap	Sıcaklık, CO	Experimental study of water mist fire suppression in tunnels under longitudinal ventilation [42]	Building and Environm ent, 2008
13	Yoon, Rie, Kim	20	0,2	1:50		Sıcaklık, CO	Smoke control of a fire in a tunnel with vertical shaft [43]	Journal of Loss Preventio n in the Process Industries , 2009, 22-954
14	Ingason, H.			1:10	Ahşap, oluklu mukavva		Model Scale Railcar Fire Tests [10]	Fire Safety Journal, Volume 42 ,2007 , Pages 271-282
15	Choi, Kim, D.H. Choi			1:20	Heptan	Sıcaklık	Experimental Investigation on Smoke Propagation in a Transversely Ventilated Tunnel [15]	Journal of Fire Sciences, vol. 23, 469- 483, Kasım 2005

Çizelge 5.1 Deneysel model çalışmalarında kullanılan parameterlerin gösterimi (devam)

16	Xue, Chew, Kay ve Cheng		0,9	1:20		Sıcaklık	Control of Ventilation Airflow for Tunnel Fire Safety [24]	Combusti on Science Technolog y 2000; 152: 179- 96
----	----------------------------------	--	-----	------	--	----------	---	--

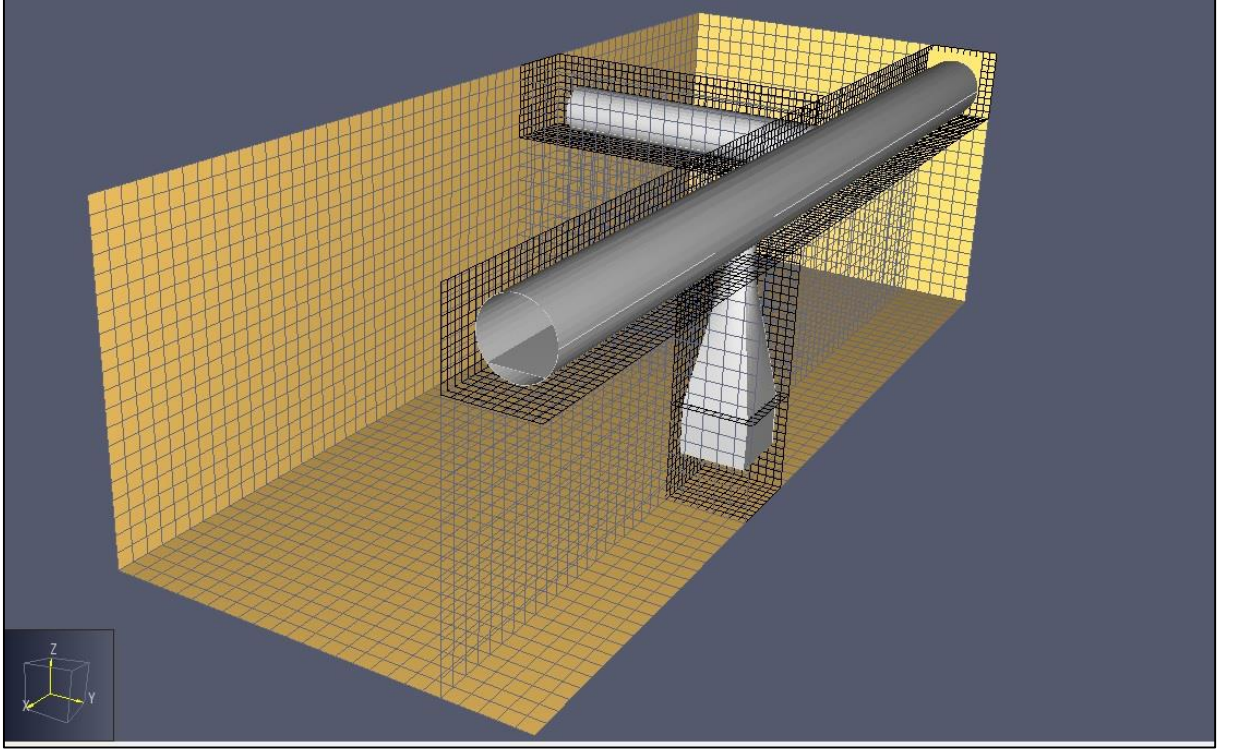
5.2. Yürütülen HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) Analizi Çalışması

Çizelge 5.1’de belirtilen çalışmalarda görüleceği üzere modelleme için seçilen ölçeğin 1:10 ile 1:20 arasında yoğunlaştığı görülmektedir. 1:20’den küçük ölçeklerde yapılan çalışmaların tutarsızlığa yönelik eğilimi daha yüksektir [44,45] Gerçekleştirilen analiz çalışmasında gerçek bir tünelin ölçüleri 1:12 ölçeğinde küçültülerek bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan model CAD programı ile dijital hale getirilmiştir.



Şekil 5.1 Tünel modelinin CAD çizimi

Şekil 5.1’de gösterilen CAD çizimi katı model haline getirildikten sonra HAD analizi için kullanılacak Fire Dynamics Simulator yazılımına aktarılmıştır. Tünel modelinin HAD analizinde kullanılan örgü Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Tünel modelinin HAD analizinde kullanılan mesh gösterimi

HAD analizi için bilgisayar zamanından tasarruf etmek amacıyla tek bir mesh yerine tünel modeli ile modelin sınır koşullarına oluşturacak atmosferik ortam 2 ayrı bölge olarak tasarlanmıştır. Bu amaçla model 9 ayrı mesh olarak bölünmüştür. Mesh içinde yer alacak hücrelerin boyutunu belirlemek için ön analiz yapılmıştır. Bu analiz için yangın karakteristik çapı olarak isimlendirilen bir ölçü kullanılmıştır[46].

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (5.1)$$

Bu denklemde $\rho_0 C_p T_0$ ortam havasının özelliklerini, Q yangının ısı yayma gücünü (kW) ve g yerçekimi ivmesini göstermektedir. Yapılan çalışmalarda $0,1D^*$ ila $0,12D^*$ ölçülerinde seçilen mesh birim hücre ölçüsü kullanılmıştır. Ayrıca $0,075D^*$ den daha küçük seçilen mesh birim hücre ölçüsünün sonuçları değiştirmedeği de görülmüştür. Yapılan ön denemeler sonrasında modeli çevreleyen mesh aralığı için birim hücre ölçüsü 0,05 metre, modelin dışındaki ortamı çevreleyen mesh aralığı için birim hücre ölçüsü 0,1 metre olarak belirlenmesi halinde farklı sayıda pik noktaların daha az olduğu tutarlı sonuçların elde edileceği görülmüştür. Toplam 49325 hücre ile analizler gerçekleştirilmiştir.

5.3. Froude Sayısı

Froude sayısı atalet kuvvetlerinin yerçekimi kuvvetlerine oranı olarak tanımlanırken Yanıcı sıvı yüzeyinde ve katıların yüzeyinde oluşan yangınların mekanizması tanımlanırken türbülanslı akım oluşturan jet akışlı alevler yerine yakıt buharının düşük momentuma sahip olduğu durumlar incelenmiştir. Yangın dinamiğinde sıcaklığa bağlı yoğunluk farkının oluşturduğu kaldırma kuvvetinin karşıtı olan yerçekimi ve atalet arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılmaktadır. [33],[46]

$$Fr = U^2 / g.L \quad (5.2)$$

Bu denklemde U akışkan olarak hareket eden gaz hızını (m/s), L tünelin karakteristik ölçüsü olarak tanımlanan tünel yüksekliğini ve g yerçekimi ivmesini göstermektedir. Eşitlikte yer alan L ifadesi yerine yangın tabanının çapı olarak D alınırsa, böyle bir yangında ortaya çıkacak ısı hesabı üzerinden yakıtın yoğunluğu, yanma ısısı bilindiği takdirde yakıt buharının başlangıç hızını tayin etmek mümkün olabilir.

$$U = \frac{Q}{\Delta H_c \rho \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)} \quad (5.3)$$

İki eşitlikteki hız bileşenleri karşılaştırıldığında Froude sayısının Q^2/D^5 ile orantılı olduğu görülmektedir.

Bu orantı ve Froude eşitliğine bağlı olarak yangının ısı yayma gücü, akışkan olarak tanımlanan duman tabakasının tünel kesiti boyunca hareket hızı, zaman, yanma sırasında tüketilen yanıcı maddenin kütlesi tünel yüksekliği ile Çizelge 5.2’de verilen oranlarda benzeştirilerek modelin ölçeğinde kullanılabilmektedir.

Çizelge 5.2 Froude Sayısından türetilmiş model benzeşim oranları [47]

Model Benzeşim Oranları	
Isı Yayma Değeri (Q)	$:Q_M/Q_T = (L_M/L_T)^{5/2}$
Hız (V)	$V_M/V_T = (L_M/L_T)^{1/2}$
Zaman	$t_M/t_T = (L_M/L_T)^{1/2}$
Kütle (m)	$m_M/m_T = (L_M/L_T)^3$
Sıcaklık (T)	$T_T/T_M = 1$

Gerçek bir araç yangınında yanmakta olan yakıtlar çok çeşitli olup araç tipi ve kullanım amacına bağlı olarak kompleks yapılar oluşturmaktadır. Bir araçta tipik olarak plastik iç kaplama ve konsol yüzeyleri, sentetik kumaş ile kaplanmış ve sentetik köpük ile dolgulu koltuklar, polimer esaslı izolasyon köpüğü, kauçuk veya plastik hortumlar, lastikler, yakıt, yağlar ve aracın içeriğinde bulunabilecek yükler yakıt olarak yer almaktadır. Bu kadar karmaşık bir yapıda araçlar yanmakta iken ortama yayılan ısı değerleri yapılan tam ölçekli testler sonucunda belli aralıklarda gruplandırılmıştır. Benzeşim oranların tablosunda belirtilen değerler ile gerçek bir aracın yanmakta olan ortama yaydığı ısının model çalışmasında beklenen ve karşılık değerleri Çizelge 5.3’de listelenmiştir.

Çizelge 5.3 Yanan araçların tiplerine bağlı olarak ortama yaydıkları ısı gücünün gösterimi

Araç Tipi	Yangın Sırasında Ortama	Modelde Karşılık Gelen Isı
Otomobil	1-3	15-27
Minibüs	3-5	27-55
Otobüs	10-15	--
Tren Vagonu	20-30	--
Yük Kamyonu	10-100	--
Yakıt Tankeri - Kamyon	100 ve üzeri	--

5.4. Korunum Denklemleri

Yangının gelişimini önceden tasarlayabilmek veya sonradan değerlendirmek amacıyla yangında ortaya çıkan ısı ve dumana odaklanmış düşük Mach hızında gerçekleşen termal akışların hesaplanmasında Navier-Stokes denklemlerinin Large Eddy Simulation (LES) formunu kullanarak çözümleme yapan ve açık kaynak kodlu Fire Dynamics Simulator (FDS) yazılımı kullanılmıştır. Yazılım, aşağıda belirtilen korunum denklemleri ile hesaplamaları gerçekleştirmektedir. Kısmi diferansiyel eşitliklerden oluşan bu denklem seti bilinmeyenler olarak tanımlanan yoğunluk (ρ), hız (u), sıcaklık (T) ve basınç (p) değerlerinin hesaplanmasını sağlamaktadır[48].

Kütlenin korunumu

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = \dot{m}_b \quad (5.4)$$

Momentumun Korunumu

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (5.5)$$

Enerjinin Korunumu - entalpi transport denklemi

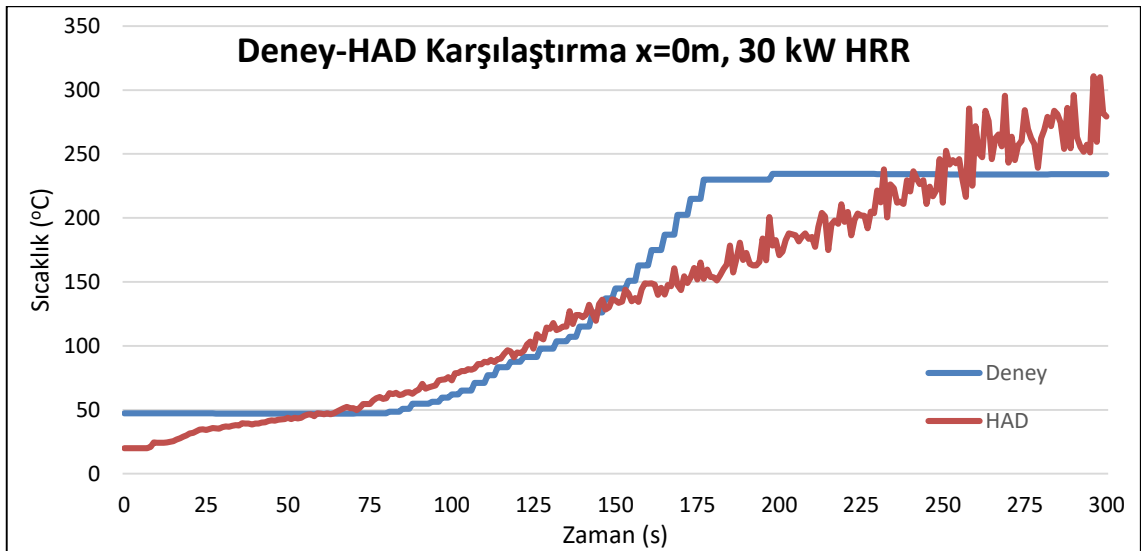
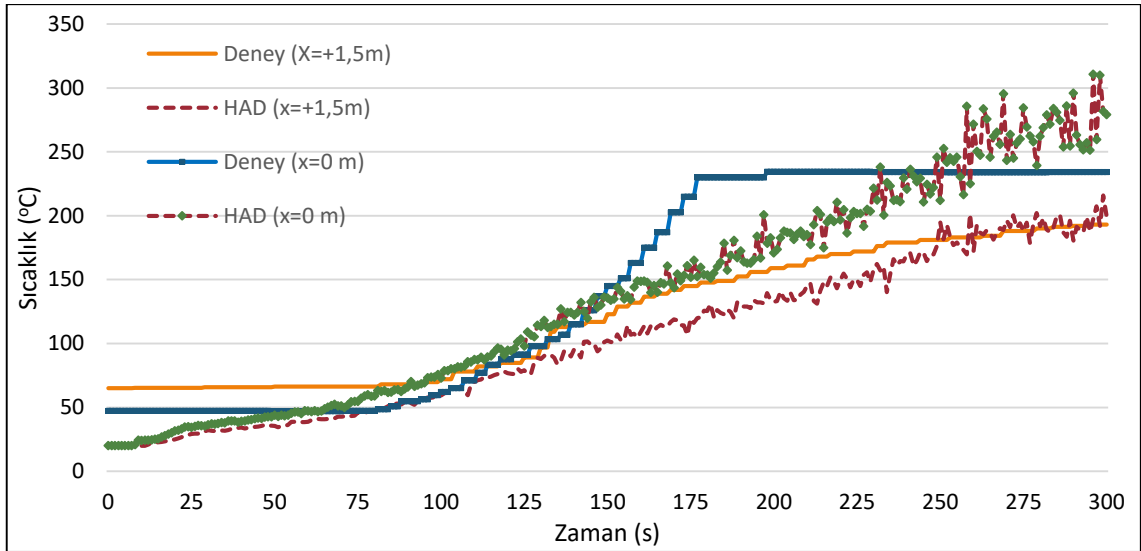
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q} - \dot{q}_b - \nabla \cdot \dot{q} + \Phi \quad (5.6)$$

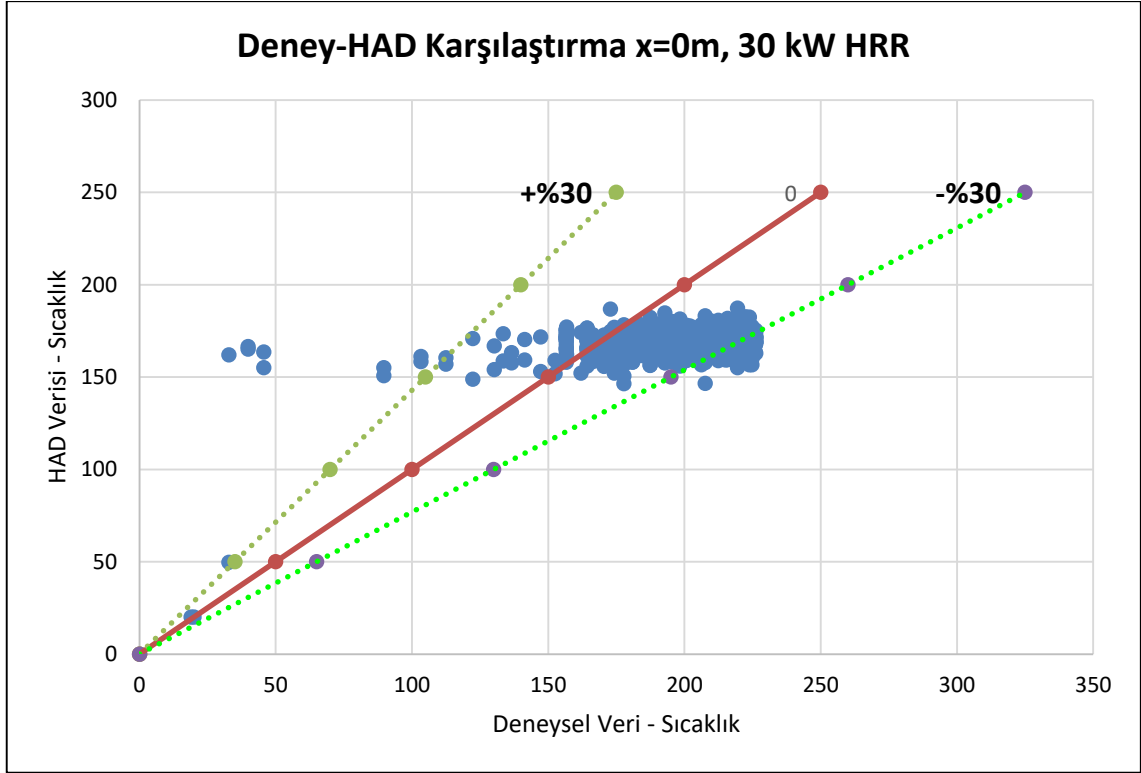
İdeal Gaz Hal Denklemi

$$p = \frac{\rho RT}{W} \quad (5.7)$$

6.1. Deneysel Çalışma Sonuçlarının HAD Analizi Sonuçları İle Çapraz Karşılaştırması

Duman tabakası sıcaklığı ile ilgili veri deneysel çalışmada yer alan termorezistör cihazlar aracılığıyla elde edilirken, HAD analizi çalışmaları ile benzer bir ortamdaki sıcaklık değişimine dair veri elde edilmiştir. Yangın kaynağında ve kaynaktan 1,5 metre uzaklıkta yer alan -modelde tahliye noktası olarak belirlenen - kesimdeki duman tabakası sıcaklığının zamana bağlı değişimi şekil 6.1’de gösterilmektedir. Bu şekilde hem deneysel veri hem de kesikli çizgiye sahip eğriler ile HAD analizi verisi yer almaktadır. 30 kW ısı yayma gücüne sahip yangının başlangıcından itibaren ortam koşullarındaki değişimin ilk beş dakikalık kısmının değerlendirildiği HAD analizine göre tavan sıcaklığı 240 saniyelik kısa sürede kaynak noktasında 250 °C - 300 °C aralığına ulaşmaktadır. Deneylerde ortamdaki taşınım ve yüzeye iletimle ısı kayıplarından dolayı tavan sıcaklığının en üst değerine 180 saniyeden sonra eriştiği görülmüştür. Bu etkiden dolayı deneyin ilk iki dakikasında tavan sıcaklığı değerleri birbirine yakın olarak yükselmektedir.

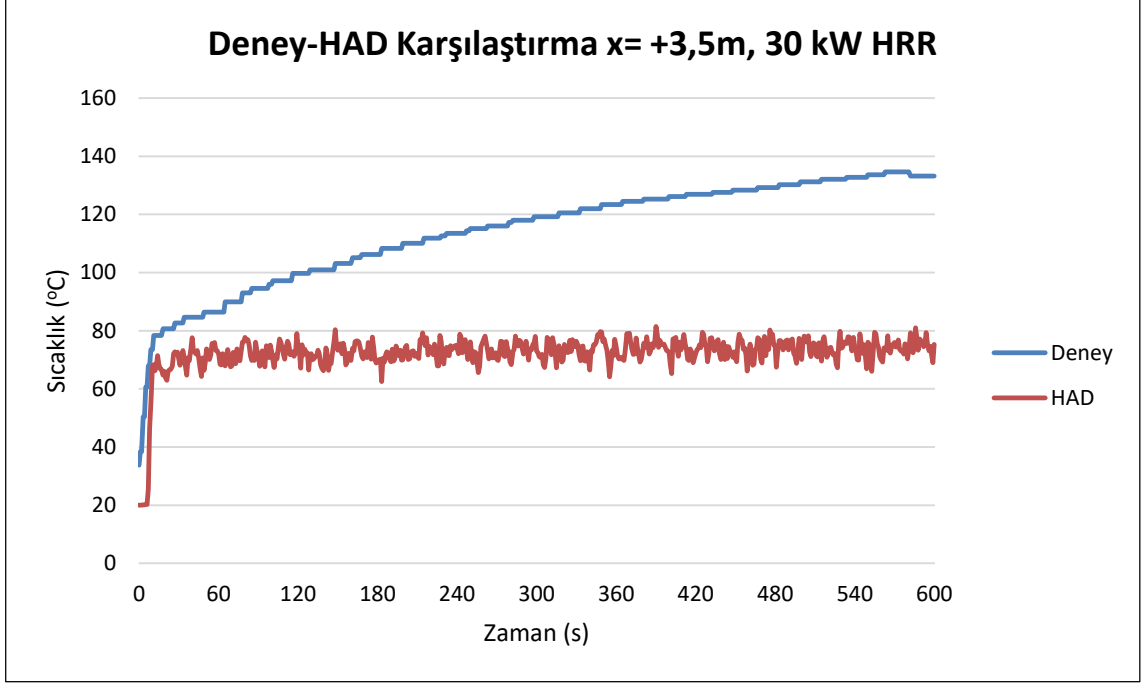




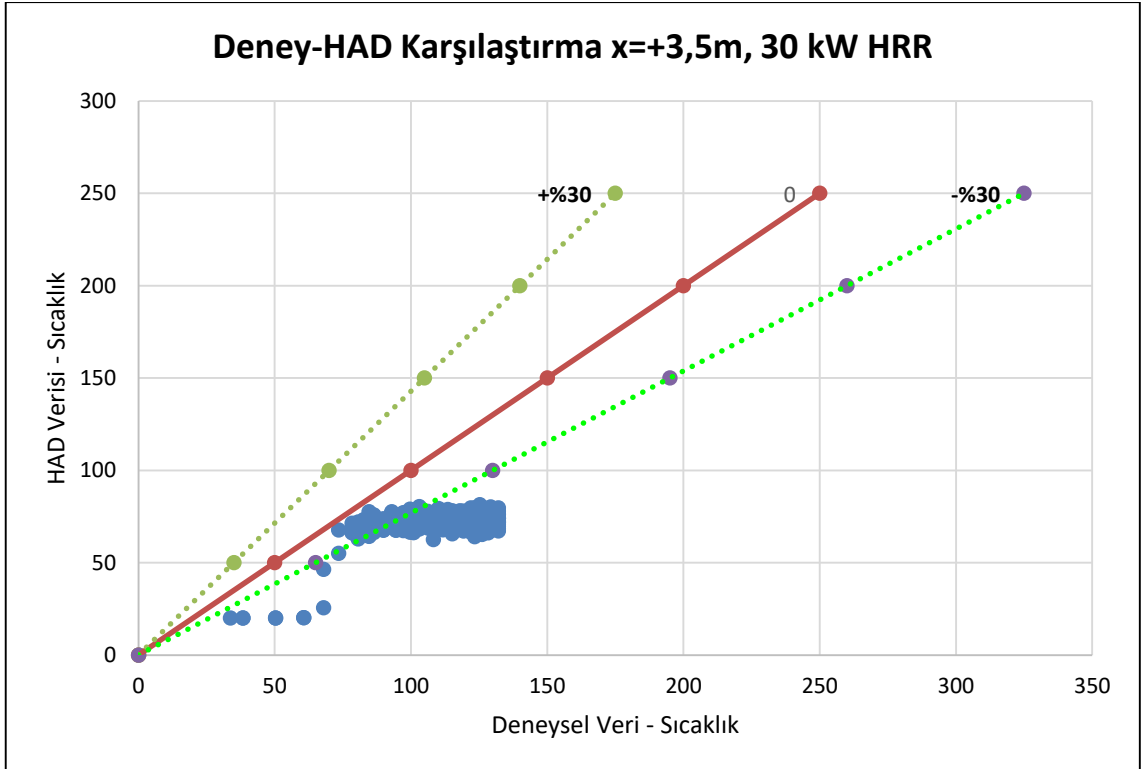
Şekil 6.3 30 kW ısı yayma gücünde yangın kaynağında tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile ± 30 değişim aralığı içinde karşılaştırması

Şekil 6.2’de Şekil 6.3’de 30 kW ısı yayma gücünde yangın kaynağında (ısı girişinde) elde edilen deney verisi ile HAD analizi verisinde tavan sıcaklığı değerleri birlikte gösterilmiştir. Şekil 6.3’de aynı veriye bağlı olarak ± 30 aralığında birbiri ile uyumu gösterilmiştir. Yanma başladıktan sonra elde edilen değerler birbiri ile uyumlu görülmektedir.

Şekil 6.4’de 30 kW ısı yayma gücünde tünel çıkışında ($X=+3,5$ m) elde edilen deney verisi ile HAD analizi verisinde tavan sıcaklığı değerleri birlikte gösterilmiştir. Şekil 6.5’de aynı veriye bağlı olarak ± 30 aralığında birbiri ile uyumu gösterilmiştir. Yanma başladıktan sonra sıcaklık değerlerinin artış hızı azaldığında deney verisindeki sıcaklık değerleri HAD analizi verisine göre daha yüksek olmuştur.

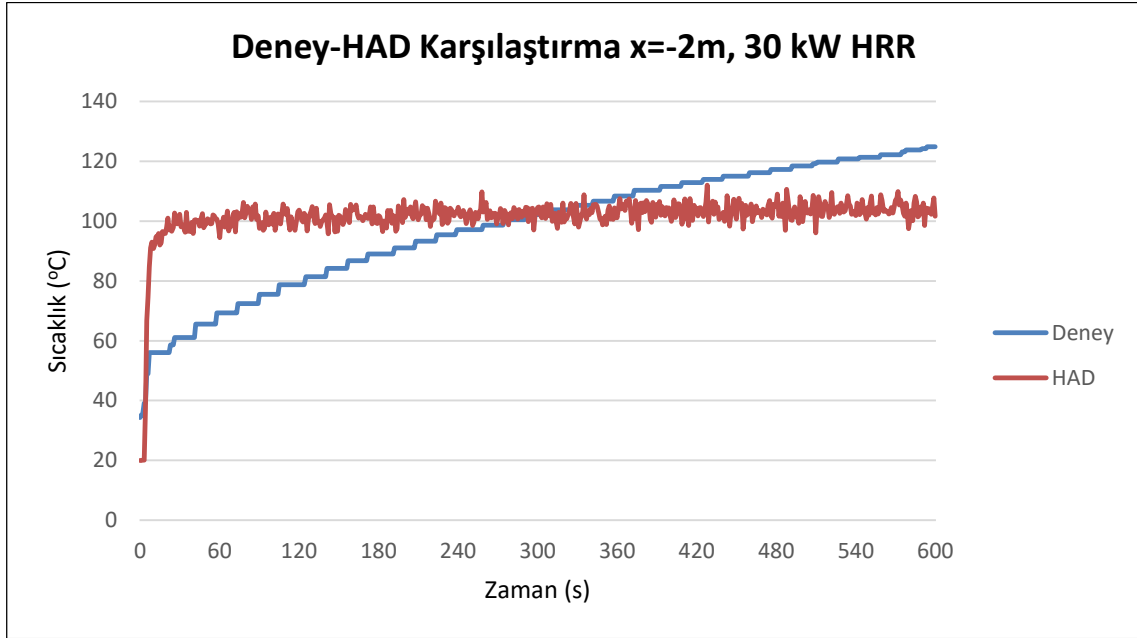


Şekil 6.4 30 kW ısı yayma gücünde tünel çıkışında tavan duman tabakası sıcaklığının deneysel ve HAD Analizi verisi ile karşılaştırması

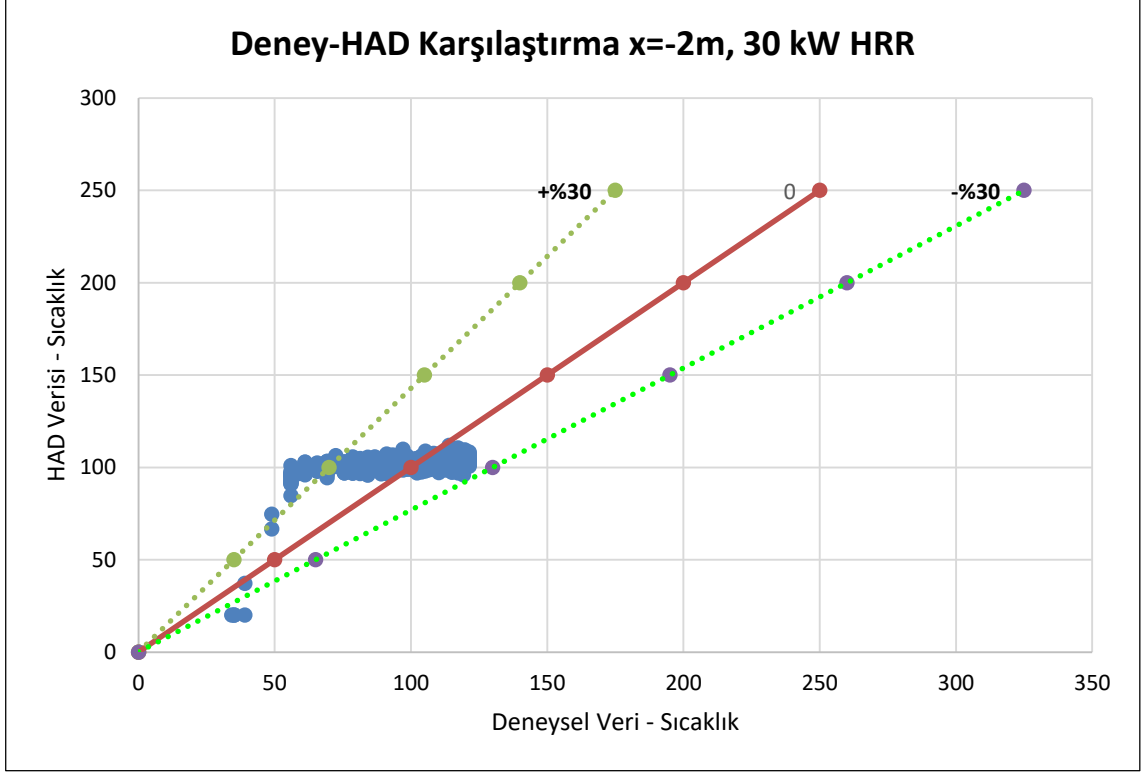


Şekil 6.5 30 kW ısı yayma gücünde tünel çıkışında tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile ± 30 değişim aralığı içinde karşılaştırması

Şekil 6.6’de 30 kW ısı yayma gücünde tünelin diğer çıkışında (X=-2,0 m) elde edilen deney verisi ile HAD analizi verisinde tavan sıcaklığı değerleri birlikte gösterilmiştir. Şekil 6.7’de aynı veriye bağlı olarak $\pm\%30$ aralığında birbiri ile karşılaştırması gösterilmiştir. Yanma başladıktan sonra elde edilen değerler birbiri ile uyumlu görülmektedir.

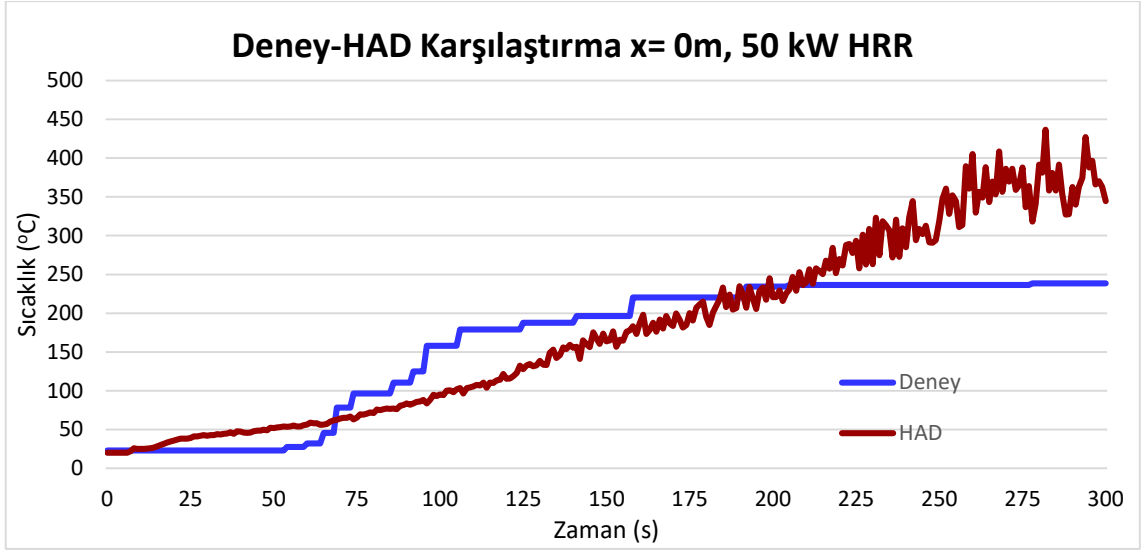


Şekil 6.6 30 kW ısı yayma gücünde tünel girişinde tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile karşılaştırması

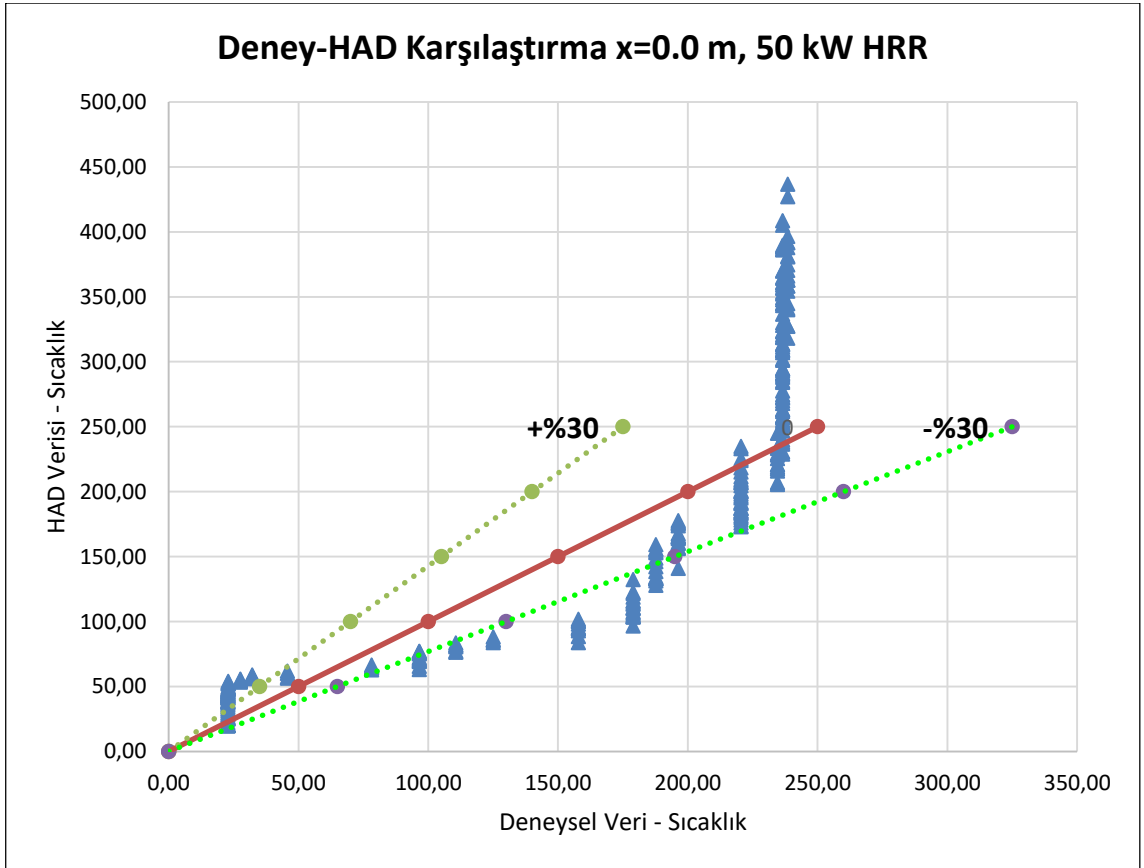


Şekil 6.7 30 kW ısı yayma gücünde tünel girişinde tavan duman tabakası sıcaklığının deneysel ve HAD Analizi verisi ile $\pm 30\%$ değişim aralığı içinde karşılaştırması

Şekil 6.8’de 50 kW ısı yayma gücünde yangın kaynağında (ısı girişinde) elde edilen deney verisi ile HAD analizi verisinde tavan sıcaklığı değerleri birlikte gösterilmiştir. Şekil 6.9’de aynı veriye bağlı olarak $\pm 30\%$ aralığında birbiri ile karşılaştırması gösterilmiştir. Yanma başladıktan sonra elde edilen değerlerde deneyde elde edilen sıcaklık değerlerinin HAD analizinde elde edilen değerlere göre daha düşük olduğu görülmüştür.

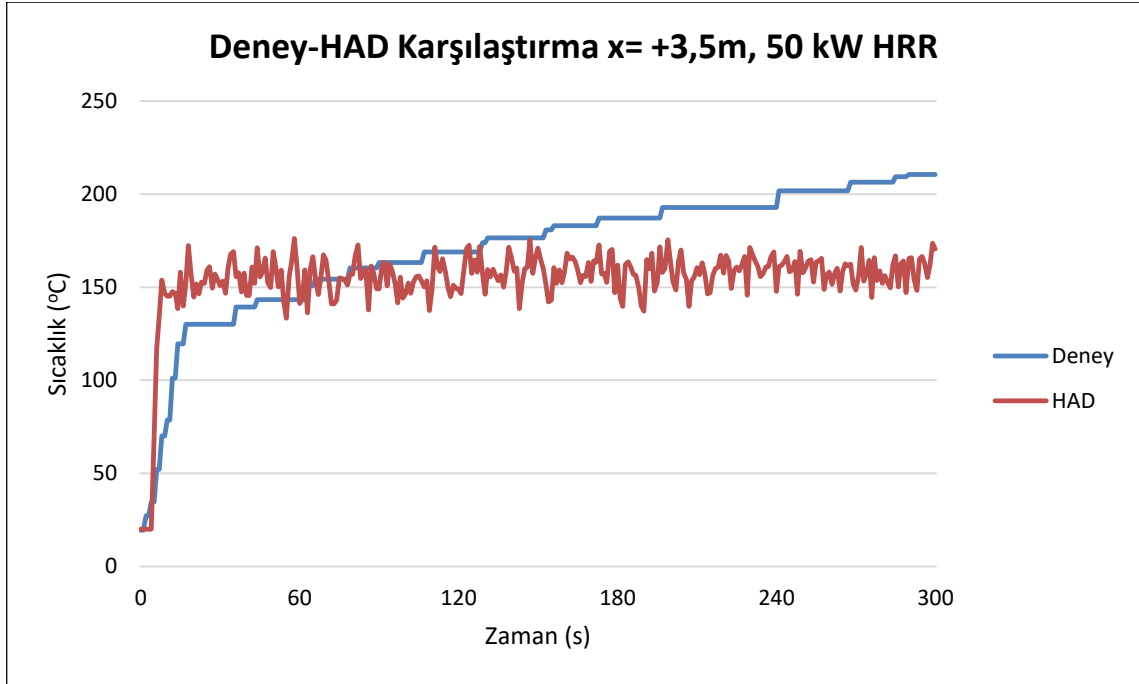


Şekil 6.8 50 kW ısı yayma gücünde yangın kaynağında tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile karşılaştırması

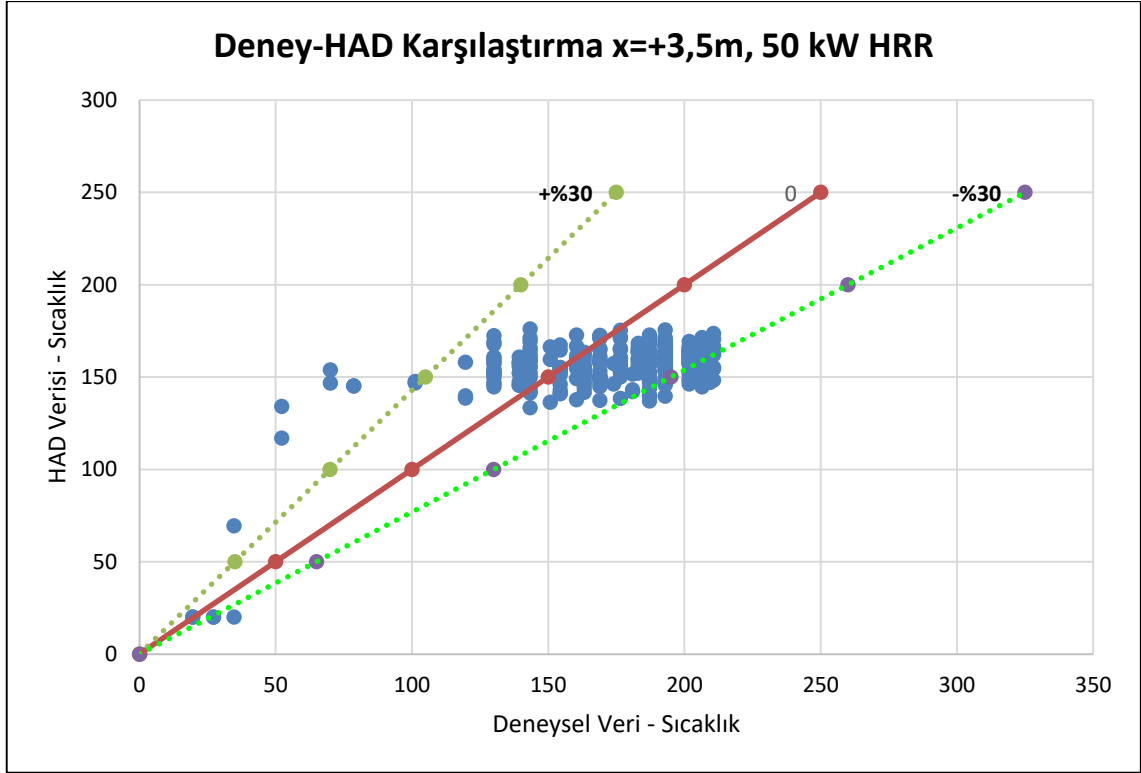


Şekil 6.9 50 kW yayma gücünde yangın kaynağında tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile ± 30 değişim aralığı içinde karşılaştırması

Şekil 6.10'da 50 kW ısı yayma gücünde tünel çıkışında (X=+3,5 m) elde edilen deney verisi ile HAD analizi verisinde tavan sıcaklığı değerleri birlikte gösterilmiştir. Şekil 6.11'de aynı veriye bağlı olarak ± 30 aralığında birbiri ile karşılaştırması gösterilmiştir. Yanma başladıktan sonra sıcaklık değerlerinin artış hızı azaldığında deney verisindeki sıcaklık değerleri HAD analizi verisine göre daha yüksek olmuştur.

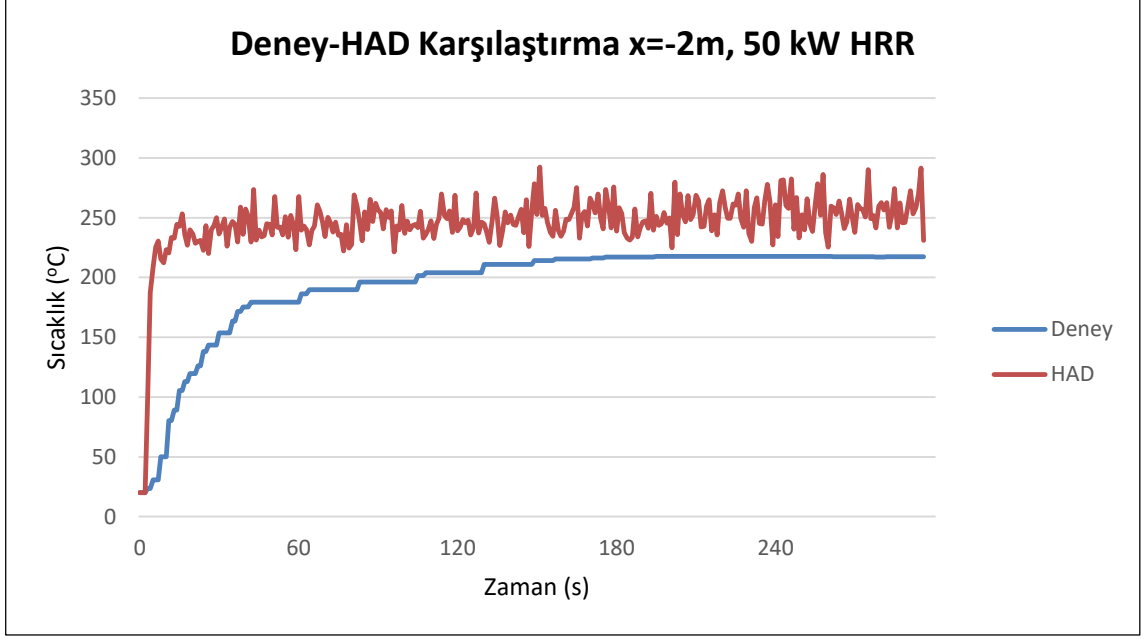


Şekil 6.10 50 kW ısı yayma gücünde tünel çıkışında tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile karşılaştırması

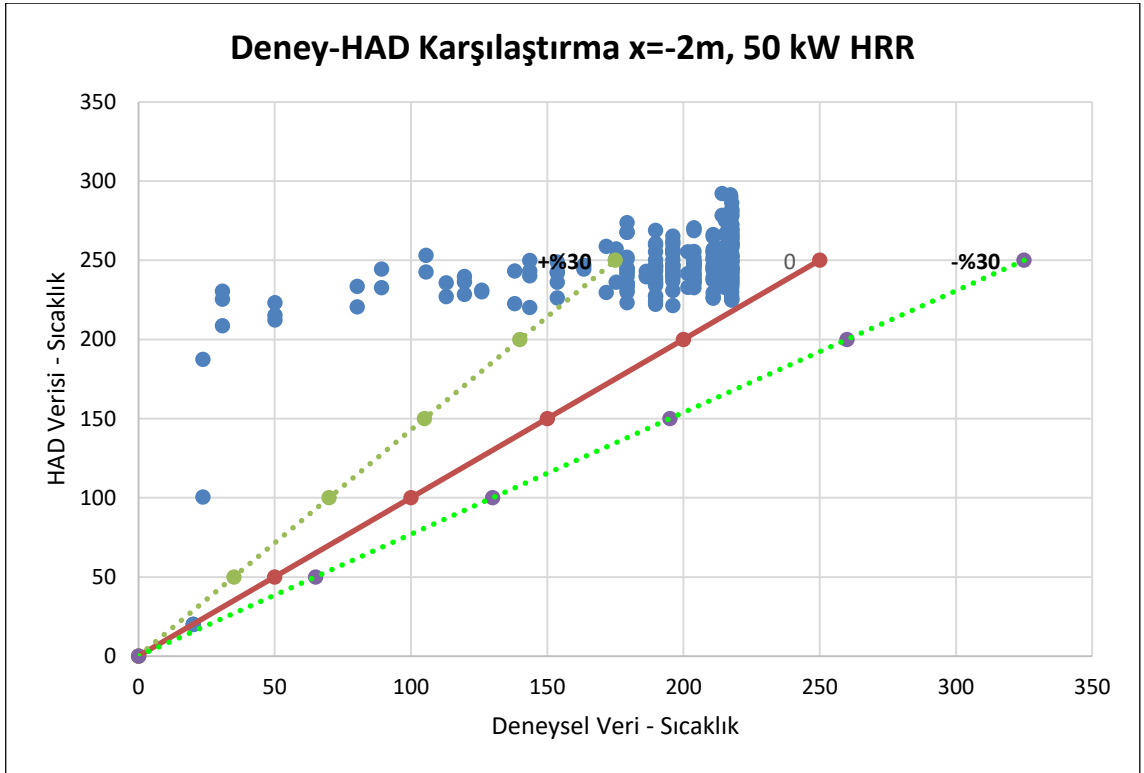


Şekil 6.11 50 kW yayma gücünde tünel çıkışında tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile ± 30 değişim aralığı içinde karşılaştırması

Şekil 6.12’de 50 kW ısı yayma gücünde tünelin diğer çıkışında ($X=-2,0$ m) elde edilen deney verisi ile HAD analizi verisinde tavan sıcaklığı değerleri birlikte gösterilmiştir. Şekil 6.13’de deney verisi ile HAD analizi verisinde tavan sıcaklığının ± 30 aralığında birbiri ile uyumu gösterilmiştir. Yanma başladıktan sonra sıcaklık değerlerinin artış hızı azaldığında deney verisindeki sıcaklık değerleri HAD analizi verisine göre daha düşük olmuştur.



Şekil 6.12 50 kW ısı yayma gücünde tünel girişinde tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile karşılaştırması



Şekil 6.13 50 kW yayma gücünde tünel girişinde tavan duman tabakası sıcaklığının deney verisi ve HAD Analizi verisi ile ± 30 değişim aralığı içinde karşılaştırması

6.2. Sonuç

Gerçek koşullarda 900 kW ısı yayma gücüne sahip bir yangın 1:12 ölçek ile modellenerek 15 kW ısı yayma gücünde deney ve analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.13’de yer alan eğrilerden görüleceği üzere modellenen yangın süresi uzadıkça $t=60$ saniyeden itibaren $X=1,25$ metre mesafede tavan sıcaklığı $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’nin üzerine çıkmaktadır. Tavan sıcaklığı $t=120$ saniyeden itibaren $X=2,25$ metre mesafede $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’nin üzerine çıkmaktadır.

Şekil 4.17’de yer alan eğrilerden görüleceği üzere ısı yayma gücü 20 kW olarak modellenen yangının süresi uzadıkça $t=30$ saniyeden itibaren $X=1,75$ metre mesafede tavan sıcaklığı 75°C ’nin üzerine çıkmaktadır. Isı yayma gücündeki 5 kW ’lık artış tavanda biriken gaz sıcaklığının daha hızlı artmasına neden olmuştur. Duman tabakasından tabana doğru olan ısı akısı NFPA 502’de tanımlanan eşik seviye olan $2,5\text{ kW/m}^2$ değerini yangın başladıktan 2 dakika ila 3 dakika sonra aşacak mertebeye gelmektedir. Bu seviyenin altındaki ısı akısı değerlerinde insanlar bir müddet zorlayıcı ortam koşullarına dayanabilirler ancak eşik seviye aşıldığında insanların yangın kaynağından daha uzak noktalara ilerlemeleri gerekmektedir. Sırasıyla 15 kW, 20 kW ve 50 kW ısı yayma güçlerinde mesafeye bağlı olarak ısı akısının değişimini gösteren Şekil 4.22, Şekil 4.24 ve Şekil 4.26 birlikte incelendiğinde bu ilerlemeyi sağlamak için gerekli sürenin oldukça kısıtlı olduğu şekillerden görülmektedir. Gerçek koşullarda kişisel koruyucu donanım olmadan insanların yaklaşamayacağı durum olarak kabul edilebilir.

Çizelge 6.1’de tahliye olan insanların üzerine gaz tabakasından tabana doğru gerçekleşen etkiyen ısı akısı değeri $1,5\text{ kW/m}^2$ ’ye eriştiğinde acı vermeye başladığı süre ile deri üzerinde yanık hasarının başlaması beklenen ısı akısı $2,5\text{ kW/m}^2$ ’ye eriştiğinde geçecek süreler ısı yayma gücüne bağlı olarak gösterilmektedir.

Çizelge 6.1 Isı yayma gücü ile ısı akısı ilişkisinin gösterimi

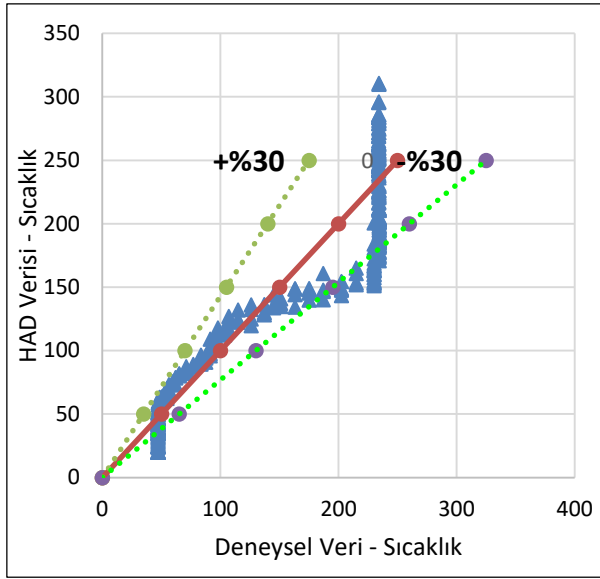
Isı Akısı Miktarı	Isı Yayma Gücü - Q (kW)			
	15	20	30	50
	Süre (saniye)			
$q''=1,5\text{ kW/m}^2$	120	120	100	60
$q''=2,5\text{ kW/m}^2$	300	240	180	120

Binek otomobil, minibüs gibi araçların yanması ile yayılacak ısı güç bu çalışmada yer alan benzeşim modeline göre 15-20 kW aralığında olup tünelden tahliye olacak insanlar için 300

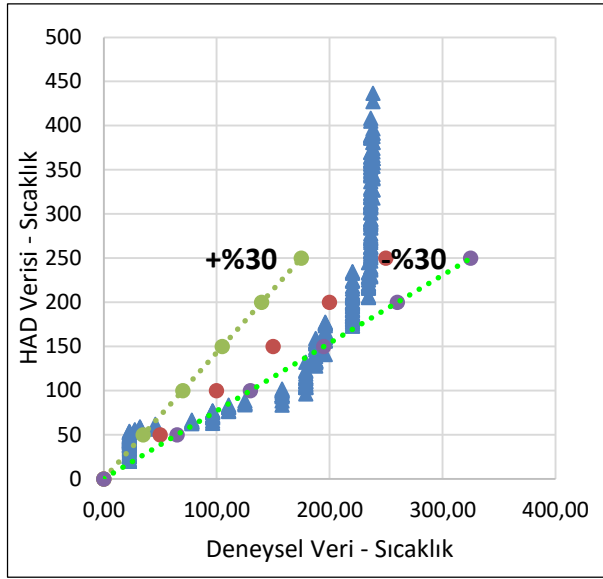
saniye süre ile güvenli zaman aralığı vardır. Otobüs, kamyon gibi araçların yanması ile yayılacak ısı güç bu çalışmada yer alan benzeşim modeline göre 30-50 kW aralığındadır. Binek otomobil yangınına göre daha fazla enerjinin açığa çıktığı bu yangınlarda tahliye için sağlanabilecek güvenli süre 120 ila 180 saniye aralığında olacaktır. Deney verisi ile hesaplanan bu değerler NFPA 502 standardında tanımlanan ve Çizelge 3.2’de yer alan tahliye sırasında gerçekleşen ısı etki sonucu hareketsiz kalmadan geçirilebilecek süre değerleri ile uyumludur.

Bir yangın olayında ortama yayılan duman miktarı arttıkça duman tabakası içindeki karbon monoksit (CO) gazı miktarının artması beklenir. Deney düzeneğinde kullanılan yakıcı üniteye yer alan ve alevin doğrudan tünel içine girmesini engellemek için kullanılan bazalt taşları deney süresi ilerledikçe ısınmaktadır. Deney düzeneğinde kullanılan bazalt taşları çok pürüzlü bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla yanma ürünü olarak çıkan gazların tünel içine doğru ilerlerken bir kısmının bu pürüzlü yapı içine hapsolması ve bazalt taşlarının yüzey sıcaklığı 450-500 °C mertebesine ulaştığında yanma ürünü gazlardan biri olan karbon monoksit gazının kendiliğinden tutuşması muhtemeldir. Şekil 4.21’de gösterildiği üzere deney sırasında açığa çıkan CO gazı konsantrasyonunun zamana bağlı olarak azalması pürüzlü taşların yüzeyinde hapsolan CO gazının bir kısmının kendiliğinden tutuşarak ilave bir yanmanın oluşması ve CO gazının konsantrasyon miktarının azalması, tükenmesi olarak değerlendirilmiştir.

Bir tünel içinde meydana gelecek yangın olayının, yangın başlangıcından itibaren geçen süreye bağlı olarak tahliyenin yapılamaz olduğu, müdahalede bulunacak insanların can güvenliğini tehlikeye atacak koşulların belirlenmesi amacıyla oluşturan modele bağlı olarak yürütülen deneysel çalışmaların ve nümerik çalışmaların birbiri ile uyumlu olduğu şekil 6.14 ve şekil 6.15’de yer alan eğrilerde görülmektedir. Şekil 6.14(b) ve şekil 6.15(b)’de yakıtın yanmasıyla ortaya çıkan enerjinin artmasına rağmen yüzeyde gerçekleşen iletimle ısı kaybının aynı mertebede artmaması ve iki koşul arasında oluşan fark değeri azalmakta olduğundan ortama yayılan ısı değerinin yüksek olduğu koşulda nümerik çalışmada hesaplanan en yüksek tavan sıcaklığı deneysel çalışmalarda ölçülen sıcaklık değerlerine göre daha yüksektir.

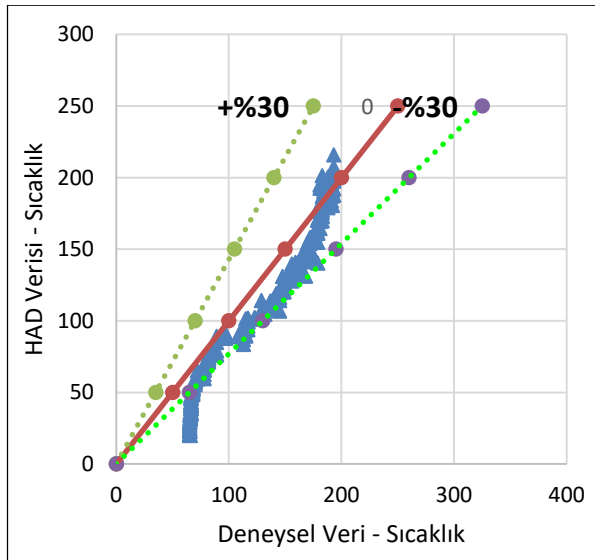


(a)

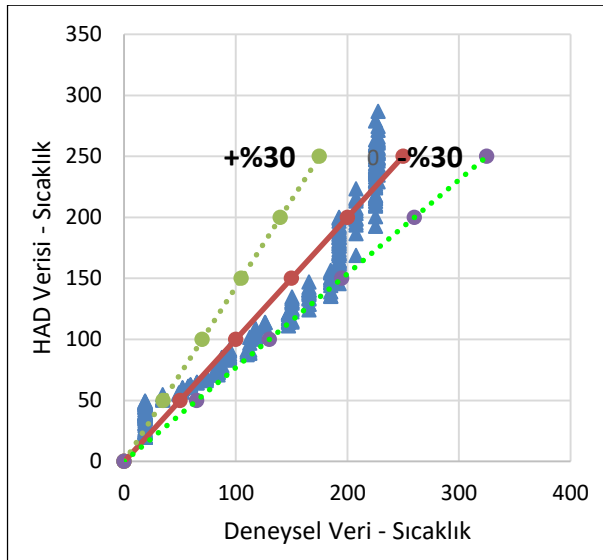


(b)

Şekil 6.14 Tünelin yangın noktasında ($x=0,5$ m) deney verisi ve HAD analizi verisi ile karşılaştırması a) ısı yayma değeri $HRR=30$ kW, b) ısı yayma değeri $HRR=50$ kW



(a)

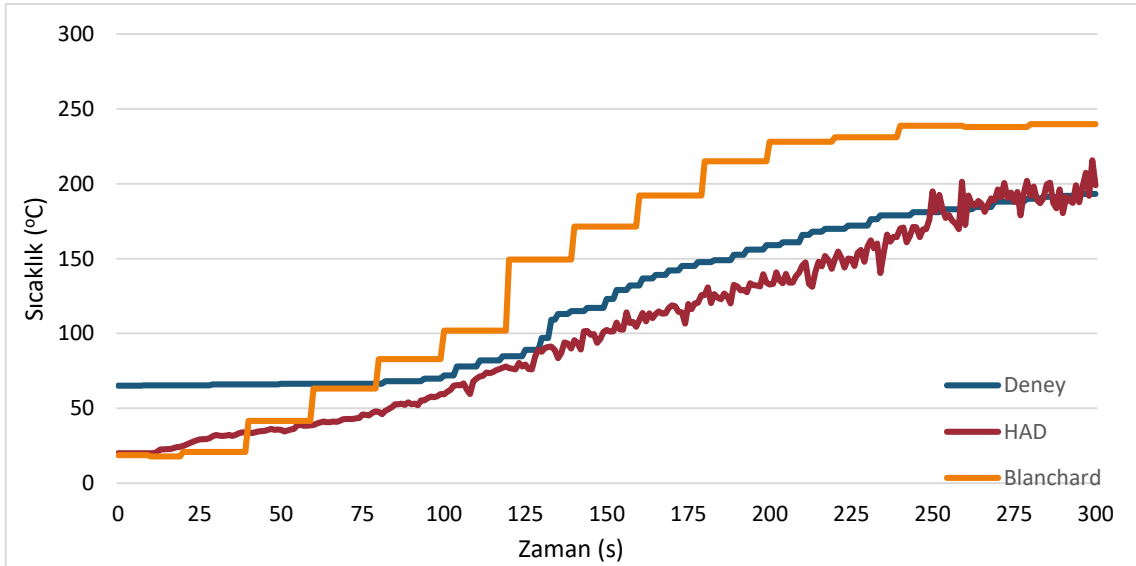


(b)

Şekil 6.15 Tünelin tahliye noktasında ($x=1,5$ m) deney verisi ve HAD analizi verisi ile karşılaştırması a) ısı yayma değeri $HRR=30$ kW, b) ısı yayma değeri $HRR=50$ kW

Yürütülen çalışmalarda olası bir yanma olayında yangın mahallinin 120 saniye ile 180 saniye arasında tahliye edilmesi gerektiği, bu noktadan sonra standartlarda tanımlanan yaşanabilir ortamın sağlanamayacağı değerlendirilmektedir. Gerçekte yaşanan tünel yangını olayları sonrası düzenlenen raporlama çalışmalarında tespit edilen tahliye süresi ile uyumlu değerler elde edilmiştir.

Hazırlanan deneysel model ve nümerik modelin hem birbiri ile hem de literatürde yer alan çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmektedir. Blanchard ve diğ. [20] 1/3 oranına sahip orta ölçekli bir tünelde 2,2 MW ısı yayma gücü ile gerçekleştirdikleri deneyden elde edilen sıcaklık değerleri ile Froude sayısı ile ölçeklendirildiğinde 30 kW ısı yayma gücü ile gerçekleştirilen deney verisi ve HAD analizi verisinin birlikte gösterimi Şekil 6.16'da yer almaktadır.



Şekil 6.16 Deney verisi, HAD analizi verisi, Blanchard ve diğ. çalışması sıcaklık verisinin birlikte gösterimi

Başta ısı kayıplarının daha tutarlı hesaplanması amacıyla sınır koşulları oluşturan malzemenin gerçek koşullara uygun olarak belirlenmesi, sıcaklık ölçüm noktalarının geliştirilmesi ve tünel içindeki hava hareketlerinin tünel boyunca hava besleyecek bir fan ile daha dinamik kontrol edileceği çalışmalara zemin oluşturacağı değerlendirilmektedir. Deneylerden elde edilen uygulama verileri temel alınarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği prensibi ile çalışan bir yazılımın kaynak veri dosyası oluşturulabilir. Bu şekilde daha gerçekçi ve doğal şartlara uygun verinin elde edilmesine hizmet eden nümerik

analizler yapılabilir. Bu yapılacak nümerik analizlerin doğal şartları içeren ve gerçeğe daha uygun modellerin tasarlanmasını sağlayacağı düşünülmektedir. Dolayısıyla modelden tam ölçekli uygulamaya geçilirken imalat süresince ve sonrasında oluşabilecek hatalar minimize edilecektir. Bunun sonucunda kamu için daha güvenli alanlar hizmete sunulacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Beard, A., (2005). The Handbook of Tunnel Fire Safety, Thomas Telford Publishing, 218, Londra.
- [2] Lönnermark, A., (2005). On the Characteristics of Fires in Tunnels, Doktora Tezi, Lund University, Lund.
- [3] U.S. Federal Highway Administration, (1995). Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, Test Report, Washington.
- [4] NFPA 502, (2014). Standard for Road Tunnels, Bridges and Other Limited Access Highways, NFPA, Boston.
- [5] Hwang, C.C. ve Edwards, J.C., (2005). "The Critical Ventilation Velocity in Tunnel Fires – A Computer Simulation", Fire Safety Journal, 40: 213-244.
- [6] Wu, Y. ve Bakar, M.Z.A., (2000). "Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems – a study of the critical velocity", Fire Safety Journal, Elsevier, 35: 363-390.
- [7] Kashef, A., Benichou, N. ve Loughheed, G., (2003). "Numerical Modelling of Movement and Behaviour of Smoke Produced from Fires in the Ville-Marie and L.H. –La Fontaine Tunnels: Literature Review", IRC-RR-141, Report for National Research Council, Kanada.
- [8] Jojo S., Li, M. ve Chow, W.K., (2003). "Numerical Studies on Performance Evaluation of Tunnel Ventilation Safety Systems", Tunnelling and Underground Space Technology, Pergamon, 18: 435-452.
- [9] Chiam, B. H., (2005). Numerical Simulation of a Metro Train Fire, Master of Engineering in Fire Engineering Tezi, University of Canterbury, Canterbury.
- [10] Ingason, H., (2007). "Model Scale Railcar Fire Tests", Fire Safety Journal, 42: 271-282.
- [11] Choi, J.S., Kim, M.B. ve Choi, D.H., (2005). "Experimental Investigation on Smoke Propagation in a Transversely Ventilated Tunnel", Journal Of Fire Sciences, 23: 469- 483.
- [12] Kunsch, J.P., (2002). "Simple Model for Control of Fire Gases in a Ventilated Tunnel", Fire Safety Journal, 37: 67-81.

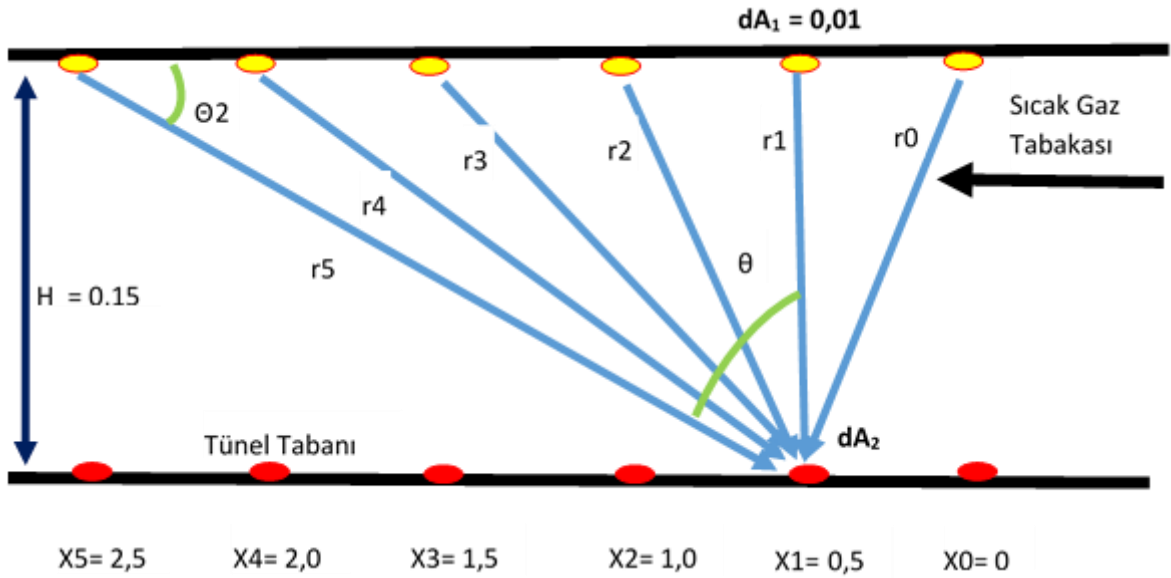
- [13] Lin, C.J. ve Chuah, Y.K., (2007). "A Study on Long Tunnel Smoke Extraction Strategies By Numerical Simulation", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23: 522-530.
- [14] Carvel, R., Beard, A., Jowitta, P.W. ve Drysdale, D., (2001). "Variation of Heat Release Rate with Forced Longitudinal Ventilation for Vehicle Fires in Tunnels", *Fire Safety Journal*, 36: 569-596.
- [15] Lee, S.R. ve Ryou, H.S., (2006). "A Numerical Study On Smoke Movement in Longitudinal Ventilation Tunnel Fires for Different Aspect Ratio", *Building and Environment*, 41: 719-725.
- [16] Hu, L.H., Huo, R. ve Chow, W.K., (2008). "Studies On Buoyancy-Driven Back Layering Flow in Tunnel Fires, 2008, *Experimental Thermal and Fluid Science*", 32: 1468- 1483.
- [17] Wang, H.Y., (2008). "Prediction of Soot and Carbon Monoxide Production in a Ventilated Tunnel Fire by Using a Computer Simulation", *Fire Safety Journal*, 44: 394-406
- [18] Gao, P.Z., Liu, L.S., Chow, W.K. ve Fong, N. K., (2004). "Large Eddy Simulations For Studying Tunnel Smoke Ventilation", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19: 577-586.
- [19] Kurioka, H., Oka, Y., Satoh, H., ve Sugawa, O., (2002). "Fire Properties in Near Field of Square Fire Source With Longitudinal Ventilation in Tunnels", *Fire Safety Journal*, 38: 319-340.
- [20] Blanchard, D., Boulet, H., Desanghere, C., Cesmat, A., Meyrand, G., Garo, B. ve Vantelo, A., (2012). "Experimental And Numerical Study Of Fire In A Midscale Test Tunnel", *Fire Safety Journal*, 47: 18-31
- [21] Karki, K., Patankar, S., Rosenbluth, E. ve Levy S., (2000). "CFD Model For Jet Fan Ventilation Systems", *10th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels Principles*, 1 - 3 Kasım 2000, Boston.
- [22] Roh, J.S., Yang, S., Ryou, H.S., Yoon, M. ve Jeong, Y., (2007). "An Experimental Study on The Effect of Ventilation Velocity on Burning Rate in Tunnel Fires – Heptane Pool Fire Case, *Building and Environment*", 43: 1225-1231.
- [23] Kim, E., Woycheese, J. P. ve Dembsey, N., (2008). "Fire Dynamics Simulator (4.0) Simulation for Tunnel Fire Scenarios with Forced, Transient, Longitudinal Ventilation Flows", *Fire Technology*, 44: 137-166.
- [24] Xue, H., Chew, T. C, Kay K. L. Ve Cheng Y. M, (2000). Control of Ventilation Airflow for Tunnel Fire Safety, *Combustion Science Technology*, 152: 179-96.
- [25] Atkinson, G. T. ve Wu, Y.; (1996). Smoke Control in Sloping Tunnels, *Fire Safety Journal*, 27: 335-341.
- [26] Oka, Y. Ve Atkinson, G. T., (1995). Control of Smoke Flow in Tunnel Fires, *Fire Safety Journal*, 25: 305-322.

- [27] Jagger, S., (2004). Use of Tunnel Ventilation of Fire Safety, Handbook of Tunnel Fire Safety, 167, Thomas Telford Publishing, Londra.
- [28] Ingason, H., (2004). Fire Dynamics In Tunnels, Handbook of Tunnel Fire Safety, 231, Thomas Telford Publishing, Londra.
- [29] Akkaplan, S., (2001). Karayolu tünellerinde yangın güvenliği ve yapımı devam eden Hapan tüneli (Karadeniz otoyolu) üzerinde bir uygulama, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, 2001, Ankara.
- [30] World Road Association (PIARC), (2001). Quantitative Risk Assessment Model for Dangerous Goods Transport Through Road Tunnels, Washington.
- [31] United Nations, (2010). European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road, ECE/TRANS/215, Brüksel.
- [32] Clarke A. ve Frederick B., (2000). Fire Hazards Of Materials, Fire Protection Handbook, 18th.ed, NFPA, Boston.
- [33] Drysdale, D., (2011). An Introduction to Fire Dynamics, 3rd edition, Wiley, Londra.
- [34] Li, H., Lei, W. ve Ingason, H., (2012). "Scale modelling and numerical simulation of smoke control for rescue stations in long railway tunnels", Journal of Fire Protection Engineering, 22:101.
- [35] Choi, J.S., (2006) "A new design criterion of fire ventilation for transversely ventilated tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology", 21:277.
- [36] Vauquelin, C. ve Telle, D., (2005). "Definition and experimental evaluation of the smoke confinement velocity" in tunnel fires", Fire Safety Journal, 40:320.
- [37] Li, B. ve Ying, J., (2015). "Fire induced ceiling jet characteristics in tunnels under different ventilation conditions", SP Technical Research Institute of Sweden Report, 2015:23.
- [38] Appel G., (2015). "Fire induced ceiling smoke characteristics in tunnels under different ventilation conditions", SP Technical Research Institute of Sweden Report, 2015:13.
- [39] Lotta V., (2015). "Influence of fire suppression on combustion products in tunnel fires", SP Technical Research Institute of Sweden Report, 2015:09
- [40] Lönnemark A., (2007). "The effect of cross-sectional area and air velocity on the conditions in a tunnel during a fire", SP Technical Research Institute of Sweden Report, 2007:05.
- [41] Hugosson J., (2010). "Fire incidents during construction work of tunnels – Modelscale experiments", SP Technical Research Institute of Sweden Report, 2010:86.
- [42] Chen, H. Zu, B., Cai, D., Pan, T. ve Liao, G., (2008). "Experimental study of water mist fire suppression in tunnels under longitudinal Ventilation", Building and Environment, 44: 446-455.

- [43] Yoon, M., Rie, J. ve Kim, S., (2009). "Smoke control of a fire in a tunnel with vertical shaft", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22: 954-1003.
- [44] Quintiere, J., (1989). "Scaling Applications in Fire Research", *Fire Safety Journal*, 15:3-29.
- [45] Heskestad, G., (1975). "Physical Modeling of Fire", *Journal of Fire and Flammability*, 6:253-273.
- [46] Hwang, C. Ve Edwards, J., (2008). "The critical ventilation velocity in a tunnel cross - passage", *Journal of China Railway Society*, 30:87-90.
- [47] Ingason, H., (2011). "Model scale fire tunnel tests with point extraction Ventilation", *Journal of Fire Protection Engineering*, 21:5-36.
- [48] McGrattan,K., (2015). *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide*, Sixth Edition, NIST.SP.1018-1, 2015, National Institute of Standards and Technology, Gaithesburg.
- [49] Muthukumar, P., Anand, P. ve Sadcheva, P., (2011). "Performance analysis of porous radiant burners used in LPG cooking stove", *International Journal of Energy and Environment*, 15: 367-374.

ISI AKISI ÖRNEK HESAPLAMA

Isı yayma gücü 30 kW olan bir kaynaktan oluşan sıcak gaz tabakası tünel tavanında yayılırken tünel tabanına doğru ışıınım gerçekleşir. Yanma zamanı ilerledikçe gaz tabakasının sıcaklığı artmaktadır. Dolayısıyla $0,01 \text{ m}^2$ yüzeye sahip dA_1 gaz tabakasından tünel tabanında $x=0,5 \text{ m}$ aralıklarla belirlenmiş mesafelerde olduğu kabul edilen dA_2 yüzeyine doğru oluşan ısı akısı değerleri hesaplanırken kullanılacak değişkenler olan θ_1 , θ_2 , r değerleri Şekil A.1 'de gösterilmektedir.



Şekil A.1 Isı akısı örnek hesap gösterimi

Örneğin tünel tabanında ısı kaynağına $x_1 = 0,5$ m uzaklıkta olan bir yüzeye tavandaki sıcak gaz tabakasından olan ısı akısının değeri hesaplanırken sıcak gaz tabakasından farklı θ_1 açılarında ışıınım gerçekleşmektedir. Bu örnekte x_1 noktası için hesaplama yapılırken $+X$ doğrultuda 5 ayrı noktadan $-$ ışıınım gerçekleştiği kabulü hesaplama yapılmıştır. Bu duruma bağlı olarak Çizelge A.1’de yanma başlangıcından $t=300$ saniyeye kadar olan zaman diliminde her bir belirlenmiş noktadaki tavan gaz sıcaklığı değerleri gösterilmektedir.

Çizelge A.0.1 Belirlenmiş noktalardaki tavan gaz sıcaklığı değerleri

Noktalar	x0	x1	x2	x3	x4	x5
(kaynaktan uzaklık) (m)	0	0,5	1	1,5	2	2,5
Sıcaklık (t=0s) °C	46	21	21	18	19	20
Sıcaklık (t=60s) °C	192	172	128	110	48	49
Sıcaklık (t=120s) °C	226	200	196	192	72	65
Sıcaklık (t=180s) °C	229	219	207	206	89	72
Sıcaklık (t=240s) °C	231	224	211	211	104	104
Sıcaklık (t=300s) °C	231	224	216	217	111	106

Isı akısı hesaplanırken $q'' = \phi E$

$$\phi = \int_0^{A_1} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1$$

Bu örnekte her bir noktadaki ϕ değeri

	x0	x1	x2	x3	x4	x5
ϕ (x1)	0,096498	1	0,096498	0,006854	0,001388	0,000443

Bu örnekte her bir noktadaki ışıınım enerjisi $E = \varepsilon \sigma T^4$, sıcak gaz tabakasındaki karbondioksit gazı yayılım değeri $\varepsilon = 0,03$ ve su buharı yayılım değeri $\varepsilon = 0,08$ değerleri alınarak toplam ışıınım enerjisi;

	E (x1)
Sıcaklık (t=0s) °C	0,001213
Sıcaklık (t=60s) °C	5,458704
Sıcaklık (t=120s) °C	9,9792
Sıcaklık (t=180s) °C	14,34671
Sıcaklık (t=240s) °C	15,70246
Sıcaklık (t=300s) °C	15,70246

Bu değerlere bağlı olarak tavandaki $x_0, x_1, \dots, x_5$ mesafelerinden tünel tabanına etkiyen ısı akısı değeri

	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Toplam
$q(x_1)$	0,000117	0,001213	0,000117	8,31E-06	1,68E-06	5,37E-07	0,001458

$q''(x_1) = 0,01458 \text{ kW/m}^2$ olarak hesaplanmıştır.

Diğer noktalar için de hesaplama yapılarak zamana ve mesafeye bağlı ısı akışı değişimi eğrileri elde edilmiştir.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Ali Serdar GÜLTEK
Doğum Tarihi ve Yeri :19 / 04 / 1976, İstanbul
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :sgultek@istanbul.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Fire Protection Engineering	Worcester Polytechnic Institute	2003
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2000
Lise	Matematik	Kadıköy Anadolu Lisesi	1994

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2004	İstanbul Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2003	Kimberly - Clark	Safety Engineer