

METRO İSTASYONUNDA FARKLI YANMA MODELLERİ KULLANARAK YANGIN SİMÜLASYONU

Salih KARAASLAN, Nureddin DİNLER ve Nuri YÜCEL

Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06570 Maltepe / Ankara
karaaslansalih@gazi.edu.tr, ndinler@gazi.edu.tr, nuyucel@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 14.09.2010; Kabul/Accepted: 28.03.2011)

ÖZET

Bu çalışmada, gerçek boyutlarda bir yeraltı raylı taşıma sistemi istasyon modeli oluşturulmuştur. Fluent programında yanma simülasyonu ve türbülanslı akış çözümleri için farklı modeller incelenmiş, bu modellerin hangi durumlarda gerçeği daha iyi temsil ettiği araştırılmıştır. Yapılan değerlendirmenin sonunda ölçekli modeldeki akışı en iyi temsil eden sonuçların SST $k-\omega$ türbülans modelinde vermiş olması nedeniyle, gerçek boyutlardaki istasyon geometrisindeki simülasyonlarda da SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılmıştır. Bu model üzerindeki akış simülasyonları, tünel giriş hızları 1, 3, 5 ve 7 m/s olmak üzere SST $k-\omega$ modeli kullanılarak yapılmıştır. Yanma simülasyonları için ise; 'non-premixed combustion model', 'eddy dissipation' ve 'species transport' modelleri uygulanmıştır. Sonuçlar literatürdeki deneysel ve sayısal verilerle karşılaştırıldığında yangın simülasyonları için en uygun modelin Species transport modeli olduğu belirlenmiştir. 10 MW ve 50 MW ısı yayılım oranına sahip yakıt havuzunun istasyon merkezinde konumlandırıldığı yangın senaryoları için simülasyon sonuçlarından elde edilen sıcaklık, kritik hız ve yangın kaynaklı duman hareketinin, literatürdeki benzer çalışmaların sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Kritik hız değerinin altındaki havalandırma hızlarında istasyon tavanında geriye akış olduğu tespit edilmiştir. Species transport model dışındaki modellerde yangın kaynaklı sıcaklık dağılımının çok yüksek olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Tünel Yangını, HAD simülasyonu, piston etkisi.

NUMERICAL FIRE SIMULATION IN SUBWAY STATION TUNNEL BY USING DIFFERENT COMBUSTION MODELS

ABSTRACT

In this study, a full scaled model of underground subway system station model was generated. The turbulence and combustion models available in Fluent were searched for which models best suits with real experiments. It is found that SST $k-\omega$ turbulence model represents the flow more realistically. Flow simulations on this model were conducted by using SST $k-\omega$ turbulence model for tunnel entrance velocity of 1, 3, 5 and 7 m/s. 'Non-premixed', 'eddy dissipation' and 'species Transport' combustion models available in Fluent were tested for fire simulations. By comparing simulation results with the experimental and numerical data found in the literature, it is observed that the Species transport model is the more suitable than the others. The fire simulations were performed for heat release rate of 10 MW and 50 MW fire scenarios for fuel pool located at the centre of station. The results of critical velocity, temperature and fire-induced smoke spread were compared with the experimental and numerical found in the literature. It was investigated that the backflow occurred at the station ceiling under critical ventilation velocity. Temperature distributions were very high for non-premixed and eddy dissipation combustion models except species transport model.

Keywords: Tunnel fires, CFD simulations, piston effect.

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yeraltı raylı taşıma sistemi istasyonları ve karayolu tünelleri gibi yapılarda meydana gelen yangın ve

yangın kaynaklı zehirli sıcak gaz oluşumlarının ne derece tehlikeli olduğu dünyada yaşanan korkunç kazalar ile tartışılmaz bir boyut kazanmıştır. Dolayısı

ile meydana gelen yangın kaynaklı sıcaklık dağılımlarının tespiti ve oluşan zehirli sıcak gazların tahliyesi birçok araştırmacının ilgi odağı haline gelmiştir. Çalışmanın uygulamadaki zorluğu araştırmacıların ölçekli modellerde yapılan deneysel ve bilgisayar ortamında gerçekleştirilen sayısal çalışmalar çerçevesinde yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Hu ve ark.'nın yapmış oldukları araştırmalar, konu ile ilgili en güncel deneysel çalışmalara örnektir [1,2]. Yapılan bu çalışmalarda tünel yangınlarında görülen temel problemin, tünel ortamında yangın ve yangın sonrasında oluşan yüksek sıcaklık dağılımları ve tavan bölgesinde oluşan sıcak gaz kümelerinin olduğu ifade edilmiştir [1,2]. Bir başka deneysel araştırmada Roh ve ark. [3] ise havalandırma hızının yangını ve yangın kaynaklı zehirli sıcak gaz kümelerini nasıl etkilediği incelemişlerdir. Bu çalışmada meydana gelen yangın senaryolarında tavan bölgesinde oluşan sıcak gaz kümelerinin geriye doğru olan akış hareketi ve bu hareketi durdurmak için gerekli olan kritik havalandırma hızı incelenmiştir [3]. Deneysel model kurulmasının oldukça pahalı bir uygulama olması nedeni ile konu ile ilgili birçok sayısal araştırma yapılmıştır [4-5]. Simülasyonlarda farklı akış ve yanma modelleri kullanılmıştır. Bu kapsamda, Xue ve ark., kapalı hacimlerde kullanılması için en uygun yanma modelini karşılaştırmalı olarak araştıran bir çalışma yapmışlardır [6]. Kullanılan akış ve yanma modellerinin simülasyon sonuçlarını oldukça etkilediği görülmektedir. Bir başka önemli çalışma da birçok Avrupa ülkesinin katılımı ile gerçekleştirilen EUREKA projesi; EU 499 FIRETUN, projesi olup 1990-1995 yılları arasında West Virginia'da yer alan MEMORIAL tüneline petrol havuzu kullanılarak 100 MW gücüne kadar çeşitli yüklerden oluşan 20 yangın senaryosunun kullanıldığı deneysel çalışmadır. Bu testlerin tümü deneysel olup, birçok noktadan sıcaklık ve gaz emisyon ölçümleri yapıp büyük bir veri tabanı oluşturulmuştur. Birçok çalışmada bu deneysel çalışmadan alınan veriler nümerik modellerde kullanılarak sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir [7]. Olivier [8] tarafından 2007 yılında yapılan deneysel çalışmada ise uzun bir tünelde yangın çıktığında güvenlik için duman kontrolünün önemi ifade edilmiştir. Bu çalışmada, 1/20 ölçekli bir tünel modelinde yangın nedeni ile tünel boyunca meydana gelen duman hareketinin havalandırma sistemleri ile kontrol edilmesi deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel modelde, hava-helyum karışımı yakılarak yangın simüle edilmiş (oluşturularak), dumanın kontrolü için boyuna ve enine havalandırmanın etkisi gözlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda atalet kuvvetleri (ventilasyon kaynaklı akış hızı) ve kaldırma kuvvetleri arasındaki ilişki belirlenmiş ve tünel içinde duman kontrolünü sağlayabilecek boyuna ve enine yapay, havalandırma hızları belirlenmiştir [8]. Bir diğer deneysel çalışmada ise, tünellerdeki eksenal (uzunlamasına) zorlanmış havalandırmanın tünel içindeki otomobil, havuz ve

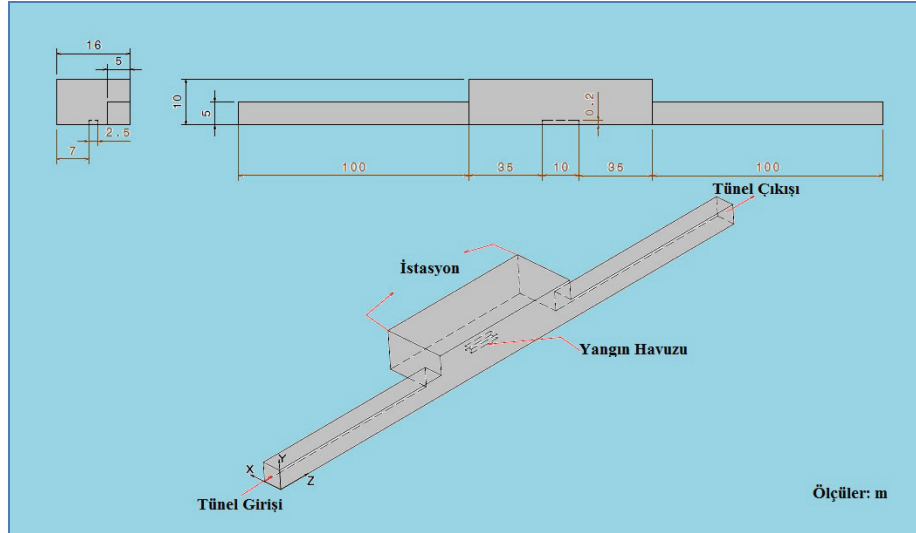
ağır yük taşıtı yangını üzerine olan etkisi incelenmiştir. Tünellerde uygulanan yangın deneylerinden elde edilen verileri Bayseian (Bayes) olasılık yaklaşımı ile iyileştirmişlerdir. Uzunlamasına havalandırmanın ağır yük taşıtı yangınında etkili olduğunu, zorlanmış havalandırma hızının artmasıyla yangının büyüdüğünü belirlemişlerdir. Büyük havuz yangınlarının olasılıkla havalandırma kontrollü, küçük havuz yangınlarının olasılıkla yakıt kontrollü olduğunu ve düşük havalandırma hızlarında otomobil yangınının büyüklüğünün önemli ölçüde etkilenmediğini belirtmişlerdir [9]. Bir başka önemli çalışmada, alev ısıl kapasitesi ve tünel geometrisinin, kritik hız etkisinin incelenmesi amacıyla aynı yüksekliğe sahip fakat farklı kesit geometrilili beş tünel modeli üzerinde deneyler yapılmıştır. Deneylerde, hız ve sıcaklık dağılımları detaylı bir şekilde ölçülmüştür ve kritik hızların tünel geometrisine göre değiştiği gözlenmiştir. Yüksek ısı yayılım oranlarında kritik hızlar ısı yayılım oranından etkilenmez iken, düşük ısı yayılım oranlarında kritik hızlar ısı yayılım oranının 1/3. kuvveti ile değişmektedir. Ayrıca ısı yayılım oranı ile alev bloğunun geometri değişimide incelenmiş ve yapılan 5 deney sonucu karşılaştırılmıştır. Ayrıca tünel modelleri için sayısal çözümler yapılmış ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) (CFD) hesaplamaları sonucunda genel olarak deneylerle örtüşen sonuçlar alınmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılırken, HAD simülasyonları ile hesaplanan akış alanlarındaki hız dağılımları daha düşük, sıcaklıklar daha yüksek olarak bulunmuştur [10].

Bu çalışmada gerçek boyutlardaki istasyon modelinin sayısal akış ve yangın simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Kullanılan akış ve yanma modellerinin seçimi için kapsamlı teorik ve uygulamalı araştırma yapılmıştır. Gerçek ölçülerdeki model üzerinde yapılan sayısal simülasyon çalışmaları ve sonuçları literatürde yer alan benzer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılarak irdelenmiştir. Yangın sonrası meydana gelen sıcak gaz yığınının, kritik havalandırma hızlarının altında tavan bölgesinde geriye doğru olan akış hareketleri simüle edilmiştir.

2. GEREÇ ve YÖNTEM (EQUIPMENT AND METHOD)

2.1. Kullanılan Model ve Soğuk Akış Simülasyonları (Model and Cold Flow Simulations)

Gerçek boyutlardaki bir yeraltı taşıma sistemi istasyonu modeli için akış ve yanma nümerik olarak incelenmiştir. Oluşturulan üç boyutlu (3D) model "Piston Etkisi"nin gelişeceği giriş tüneli, yolcu ve yangın merkezinin oluşturulacağı istasyon bölgesi, ve tahliye kanalı görevi görececek olan çıkış tüneline meydana gelmektedir. Çalışmanın parametrik algoritmasına karar verirken, daha önce ölçekli model üzerinde yapılan ve deneysel verilerle kıyaslanarak



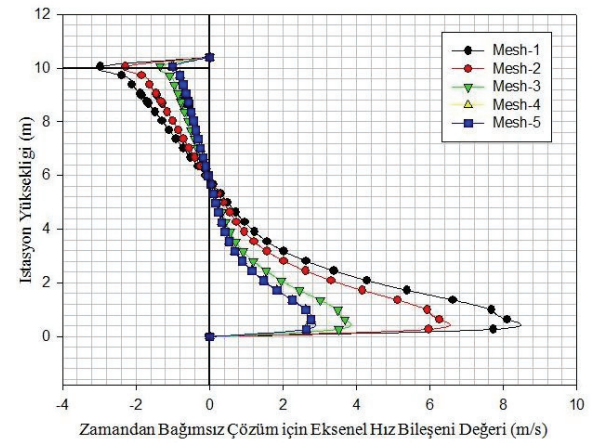
Şekil 1. Kullanılan tünel-istasyon geometrisinin şematik görünümü (Schematic layout of the tunnel-station geometry used in this study)

doğrulan sonuçlar birer kaynak teşkil etmiştir. Oluşturulan modelin giriş ve çıkış tünelleri 100 m uzunluğunda ve 5 m yüksekliğinde ve 5 m derinliğinde tasarlanırken, yangın kaynağının yerleştirileceği yarım istasyon modeli ise 80 m uzunluğunda 10 m yüksekliğinde ve 16 m derinlikte tasarlanmıştır. Çalışmada gerek akış gerekse yanma analizleri için Fluent HAD yazılımı kullanılmıştır. Tünel ve istasyon ve yangın havuzunun şematik görünümü kullanılan koordinat sistemi ile birlikte Şekil 1’de verilmiştir.

Gerçek boyutlardaki yeraltı raylı taşıma sistemi istasyon modeli üzerinde optimum hücre sayısı ve optimum iterasyon çalışmaları yapılmıştır. Yapılan optimum mesh araştırmasında 100 bin’den 2.5 milyon’a kadar mesh sayılarına sahip 6 farklı model üretilmiş, bu modeller içerisinde aynı parametreler kullanılarak kararlı akış çözümleri yapılmıştır. Tüm modellerde hexagonal (6 yüzlü) mesh hücreleri kullanılmıştır. Mesh optimizasyonu için zamandan bağımsız durum incelenmiştir. Farklı mesh sayılarına sahip her bir durum için çözümler gerçekleştirilmiştir. Tünel girişinden $z = 120$ m uzaklıktaki düşey bir çizgi üzerindeki aksel hız bileşenleri referans kabul edilerek, farklı mesh değerlerine sahip durumlar için bu çizgi üzerinde elde edilen hız değerleri incelenmiştir. Optimum mesh sayısının belirlenmesi için referans çizgi üzerinde istasyon yüksekliğinin $y = 10$ m yüksekliğinde yer alan noktada meydana gelen geriye akış değerleri kullanılmıştır. Hesaplanan hız değerleri Şekil 2’de verilmiştir.

Şekil 2’den görüldüğü gibi farklı mesh yapıları için yapılan çözümlerde $y = 10$ m istasyon yüksekliğindeki geriye akış davranışı ortak olmakla birlikte hesaplanan değerler farklıdır. Çözümün grid yapısından bağımsızlığını sağlayan mesh sayısını bulmak için en hassas mesh yapısına sahip

simülasyon sonucundan meydana gelen sapma miktarları Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 2. Zamandan bağımsız çözümde grid bağımsızlığının incelenmesi (Grid independency of steady-state simulation)

Tablo 1. Çözümün grid yapısından bağımsızlığı (Grid independency)

Mesh Hassasiyeti	Toplam Eleman Sayısı	Referans Çizgi Üzerinde Hesaplanan Hız değerleri (m/s)	En Hassas Mesh Çözümünden Sapma Miktarı (%)
Mesh.1-En Kaba	112268	-2,9454	% 63
Mesh.2-Kaba	408486	-2,3682	% 54
Mesh.3-Orta Hassas	1096662	-1,3266	% 18
Mesh.4-Hassas	2001428	-1,0971	% 0,9
Mesh.5-En Hassas	2586924	-1,0872	-

Optimum mesh yapısının elde edilmesi için gerçekleştirilen çalışmada 7 m/s lik en yüksek tünel giriş hızı, giriş sınır şartı olarak kullanılmıştır. Simülasyonlarda kullanılan daha düşük tünel giriş hızları için de elde edilen bu optimum mesh yapısı kullanılmıştır. Optimum mesh taraması yapılırken farklı türbülans modellerinin akış çözümleri kıyaslanmış ve sonuçların iterasyon sayısından bağımsız hale geldiği iterasyon sayıları herbir mesh yapısı için ayrı ayrı belirlenmiştir. Yakınsama için gerekli olan iterasyon miktarlarının belirlenmesi için 200, 400, 750, 1000, 1300, 1600, 2000 ve 2300 iterasyon sayıları kullanılmıştır. Herbir mesh yapısının, zamandan bağımsız olarak kullanıldığı simülasyonlarda birbirine yakın ancak farklı iterasyon sayılarında yakınsama sağlandığı görülmüştür. En genel haliyle, optimum eleman sayısının belirlenmesi için herbir mesh yapısının **zamandan bağımsız** çözücüde kullanılması halinde süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin hesaplamalarının yakınsaması için minimum 1200 iterasyon sayısının kullanılması gerektiği söylenebilir.

En hassas mesh yapısının verdiği değerden sapmanın % 0,9 olduğu 2 milyon mesh sayısına sahip durum olan Mesh-4 optimum mesh yapısı olarak tercih edilmiş ve tüm simülasyon çözümlerinde kullanılmıştır. Zamana bağlı çözücünün kullanıldığı simülasyonlarda herbir zaman adımı için 40 iterasyonun yakınsama kriterleri için yeterli olduğu belirlenmiştir. Optimum mesh ve optimum iterasyon çalışması sonucunda pürüzlü ve tam ısı yalıtımlı duvarlar kabulü ve standart duvar fonksiyonu kullanımı ile tünel giriş hızı uniform 1 m/s, 3 m/s, 5 m/s ve 7 m/s olan piston etkileri ile çıkış tüneli sonunda fark basınç '0' sınır koşulları için 2 milyon hexagonal mesh hücreesine sahip model optimum olarak belirlenmiştir. Simülasyonlar sırasında kullanılan sınır şartları Tablo 2'de verilmiştir. Gerçek boyutlardaki 3D dijital Yeraltı Raylı Taşıma Sistemi İstasyon modelinde, 1 m/s, 3 m/s, 5 m/s ve 7 m/s

piston etkisi ile oluşacak akışı en iyi temsil edebilmek için farklı türbülans modelleri 1/100 ölçekli deney modelinde (detached eddy formülasyonu hariç) denenmiştir.

Tüm çözümler kontur ve vektör formlarında incelendiğinde akış karakteristiğini temsil etmesi açısından SST k- ω , realizable k- ϵ ve RNG k- ϵ modellerinin ölçekli model üzerindeki deneylerde yapılan akış gözlemleriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Ancak, ölçekli modelde yapılan sayısal ve deneysel inceleme sonucunda **SST k- ω türbülans modelinin**, ölçekli modelin giriş tüneli, çıkış tüneli ve istasyon bölgesinin merkezinde konumlandırılan pitot tüpleri ile ölçülen hızlarla diğer modellere oranla daha iyi örtüşen sonuçlar vermesi nedeniyle en uygun türbülans modeli olarak belirlenmiştir.

Ayrıca ölçekli modelde duman makinası kullanılarak, akışın ani genişleme ve daralma noktalarındaki, istasyon içindeki hareketini gözlemlemek için yapılan akış deneylerine benzer akış alanları SST k- ω türbülans modelinin simülasyon sonuçlarında görülmüştür. Ölçekli modelin giriş tüneli, çıkış tüneli ve istasyon bölgesinin merkezinde konumlandırılan pitot tüpleri ile yapılan hız ölçümlerinin, SST k- ω türbülans modelinin kullanıldığı sayısal çözümlemelerde ölçüm yapılan noktalarda elde edilen hız simülasyon sonuçlarının aynı zaman adımıdaki değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3'de yapılan karşılaştırmada 1 m/s'lik tünel giriş hızı için farklı zaman adımlarındaki ölçülen ve hesaplanan hız değerleri kullanılmıştır. Sayısal simülasyonun 25. saniyesinden sonra elde edilen zaman adımlarında gerek sıcaklık gerek hız değerlerindeki değişim çok azalmıştır. Giriş tünelinin sonunda (x=2,5, y=2,5, z=90), istasyon merkezinde (x=8, y=5, z=140) ve çıkış tünelinin başında (x=2,5, y=2,5, z=190) yer alan pitot tüpü ölçümleri ile en uyumlu sonuçları SST k- ω türbülans modelinin

Tablo 2. Soğuk akış simülasyonlarında kullanılan sınır şartları (Initial and boundary conditions for cold flow simulations)

Değişkenler	İlk Şart	Tünel Giriş Sınır Şartı z=0	Tünel Çıkış Sınır Şartı z=L	Tünel Duvar Sınır Şartı
$u(x,y,z,t)$	$u(x,y,z,0)=0$	$u(x,y,0,t)=0$	-	$u(x,y,z,t)=0$
$v(x,y,z,t)$	$v(x,y,z,0)=0$	$v(x,y,0,t)=0$	-	$v(x,y,z,t)=0$
$w(x,y,z,t)$	$w(x,y,z,0)=0$	$w(x,y,0,t)=U_0$	-	$w(x,y,z,t)=0$
$k(x,y,z,t)$	$k(x,y,z,0)=0$	$k(x,y,0,t)=(3/2)(IU_0)^2$	-	$\omega(x,y,z,t)=0$
$\omega(x,y,z,t)$	$\omega(x,y,z,0)=0$	$\omega(x,y,0,t)=\frac{k^{1/2}}{C_\mu^{1/4}}$	-	$\epsilon(x,y,z,t)=0$
$\epsilon(x,y,z,t)$	$\epsilon(x,y,z,0)=0$	$\epsilon(x,y,0,t)=C_\mu^{3/4}\frac{k^{1/2}}{l}$ $C_\mu=0,09$	-	$k(x,y,z,t)=0$
$P(x,y,z,t)$	-	-	$P(x,y,L,t)=Patm$	$u(x,y,z,t)=0$

kullanıldığı soğuk akış simülasyonları vermektedir. Her üç noktadaki sayısal simülasyon sonuçlarının deneysel ölçümlerden olan sapmaları diğer modellerin verdiği sonuçlara göre daha olumludur. Özellikle istasyon bölgesindeki sonuçlar giriş ve çıkış tünelineki sonuçlara nazaran daha fazla bir salınım göstermektedir. Soğuk akış şartlarında ile 1 m/s lik tünel giriş hızı için ölçekli model üzerinde gerçekleştirilen SST k- ω türbülans modelinin kullanıldığı simülasyon sonuçlarında farklı düzlemler üzerindeki hız konturları Şekil 3’de sunulmuştur. Ani genişleme ve ani daralma bölgelerinde beklenen akış alanı davranışları grafik incelendiğinde görülebilmektedir. Uygun modelin bulunması için yapılan çalışmanın tüm sonuçları 106M370 kodlu Tübitak projesinin kesin raporunda detaylı olarak sunulmuştur [15]. Elde edilen bu veriler değerlendirildiğinde, gerçek boyutlardaki metro istasyonu için tüm simülasyonlarda SST k- ω türbülans modelinin kullanılmasına karar verilmiştir. Gerçek boyutlardaki model üzerinde akış kararsız

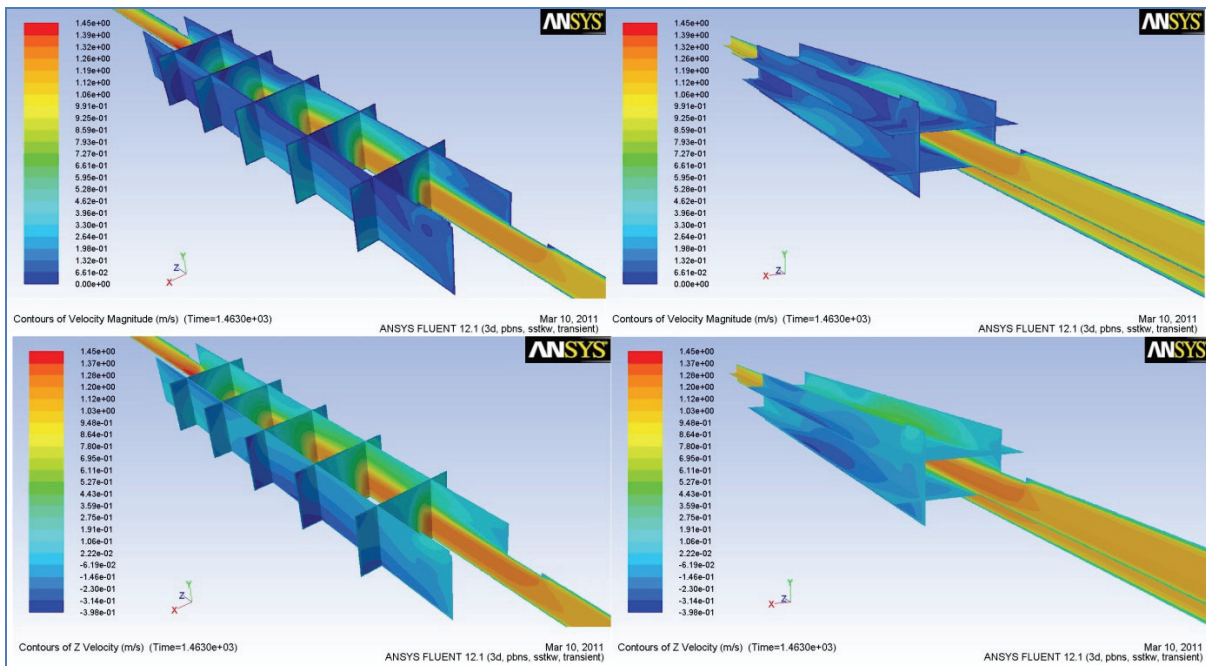
(unsteady) olarak çözümlenmiş, kullanılan SST k- ω türbülans modeli için ayırık implicit çözücü 0,05 saniye zaman adımı için işletilmiştir. 600 s’den sonra zaman adımı 0,1s ve 1000 s’den sonra da zaman adımı 0,2 s’ye çıkartılarak çözümler gerçekleştirilmiştir. Her 0.1 saniye için çözüm dosyası, kaydedilmiştir. 1600 saniyelik çözüm için toplamda 84.5 Gb yer tutan 3233 veri dosyası oluşturulmuştur. Zamana bağlı yapılan bu çözümlerde 1600 s için yapılan akış simülasyonları Core TM 2 Quad CPU @2.4 Ghz, 2 Gb RAM özelliklerine sahip bilgisayarda 360 saat işlemci zamanı kullanmaktadır. Ayrıca her 0.05 saniyede üretilen sonucun grafiği kaydedilmiştir.

2.2. YANGIN SİMÜLASYONLARI (FIRE SIMULATIONS)

Bu çalışmada yangın simülasyonları için Fluent ticari yazılım kodunda bulunan birçok yanma modeli kullanılmıştır. Modellerden elde edilen sonuçlar

Tablo 3. Ölçekli Model üzerinde SST k- ω türbülans modelinin kullanıldığı soğuk akış simülasyonları ile deneysel pitot tüpü ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (Comparative results of experimental measurement of axial velocity by using pitot tube and SST k- ω turbulence model cold simulation results)

Zaman Adımı	Giriş Tüneli Hızı m/s		İstasyon Hacmi Merkezi Hızı m/s		Çıkış Tüneli Hızı m/s	
	Deneysel	Sayısal	Deneysel	Sayısal	Deneysel	Sayısal
5. saniye	1,27	1,86	0,34	0,52	0,84	1,14
10. saniye	1,32	1,53	0,46	0,48	0,92	1,02
15. saniye	1,13	1,21	0,69	0,54	0,88	0,97
20. saniye	0,97	1,02	0,54	0,46	0,96	0,94
25. saniye	1,09	1,08	0,46	0,45	0,87	0,96
30. saniye	1,14	1,08	0,43	0,45	0,90	0,94
35. saniye	1,12	1,08	0,45	0,45	0,91	0,94



Şekil 3. SST k- ω türbülans modelinin kullanıldığı 1 m/s’lik tünel giriş şartındaki ölçekli model soğuk akış simülasyon sonuçlarının farklı kesitlerdeki hız konturları (Velocity contour of cold flow simulations at the different cross sections of the model tunnel by using SST k- ω turbulence model on 1 m/s tunnel entrance boundary conditions)

literatürdeki verilerle karşılaştırılarak [1,6,7,12] modellerle ilgili yorumlar ve seçimler yapılmıştır.

Tünel içerisinde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, havalandırma sistemlerinin tasarımı için ortaya çıkan en önemli kavramlardan biri **kritik hız** olmaktadır. Kritik hız yangın sonrası ortaya çıkan duman hacminin tavan bölgesinden geriye doğru hareket eden kısmının engellenerek duman tahliye işlemine başlanabilmesi için gerekli olan aksel minimum havalandırma hızı olarak tanımlanmaktadır [10]. Dolayısıyla yangın sonrası ısı yayılımı ve kritik hız arasında bir ilişki olduğu anlaşılmaktadır. Kritik hız değerlerinin değişimi tünel geometrisi ile değişmektedir. Wu ve Bakar, kaldırma kuvveti ifadesinde karakteristik uzunluk olarak tünel yüksekliği yerine hidrolik tünel yüksekliğinin kullanılmasını önermişlerdir [10]. Önemli bir başka değişken olan Froude sayısı ise basitçe, yangın kaynaklı kaldırma kuvvetleri ile havalandırma kaynaklı atalet kuvvetlerinin oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$Fr = \frac{V^2}{gD_h} = \frac{\text{atalet kuvvetleri}}{\text{kaldırma kuvvetleri}} \quad (1)$$

Thomas, 1968 yanma simülasyonlarında Froude sayısının korunduğunu ifade etmiştir. Kritik şartlarda Richardson sayısının birleştirici etkisinden bahsetmiştir. Richardson sayısı Denklem 2’de tanımlanmaktadır [11].

$$Ri = \frac{gD_h \Delta\rho}{V^2 \rho} = \frac{1}{Fr} \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (2)$$

Kritik havalandırma hızı ise Denklem 3’de verilmiştir.

$$V_c = \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} gD_h} \quad (3)$$

Aynı zamanda Thomas kritik ventilasyon hızını Isı yayılım oranı (HRR-Heat Release Rate) ‘nın fonksiyonu olarak tanımlamıştır [11].

$$V_c \approx \left(\frac{gD_h Q}{\rho_o T_o C_{ph} A_{istasyon}} \right)^{1/3} \quad (4)$$

Modelde giriş tüneli, istasyon bölgesi ve çıkış tüneli yer almaktadır. Yapılan hesaplamalar içerisinde yer alan istasyon ortalama hız değeri Denklem 5’de aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$V_{ortalama} = V_{tünel} * [A_{tünel} / A_{istasyon}] \quad (5)$$

Bu çalışmada kullanılan gerçek boyutlardaki modelde, piston etkisini temsil etmek için, giriş

tünelinde hava giriş hızı 1, 3, 5 ve 7 m/s olarak, ısı yayılım oranı (HRR) 10 ve 50 MW alınarak yangın simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Burada 3 m/s lik piston etkisine sahip 10 MW ısı yayılım oranındaki yangın simülasyon sonuçları verilmiştir. Modelde istasyon bölgesinde kullanılan parametreler; $A_{tünel}=5 \times 5=25 \text{ m}^2$, $A_{istasyon} = 16,2 \times 10,9=176,58 \text{ m}^2$, $D_h=4A_{istasyon}/\text{çevre}=13,03 \text{ m}$, $T_o= 26 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho_o= 1,225 \text{ kg/m}^3$, $C_{ph}=1006 \text{ J/kgK}$ alınmıştır. İstasyon içerisindeki ortalama hız değerleri hava giriş hızı 1, 3, 5 ve 7 m/s için sırasıyla; 0,141; 0,424; 0,707 ve 1 m/s olarak hesaplanmıştır. Isı yayılım oranı 10 ve 50 MW için kritik hızlar sırasıyla $V_c= 6,09 \text{ m/s}$ ve $V_c = 10,41 \text{ m/s}$ olarak hesaplanmıştır.

Yanma modeli çözümlerinde, havanın $26 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta uniform olarak tünele girdiği ve tüm tünel ve istasyon duvarlarının yalıtılmış olduğu, katı yüzeylerde kayma sınır şartının olmadığı ve çıkışın atmosfere açık olduğu kabulleri yapılmıştır. İstasyon içerisinde yangın ve yangın kaynaklı dumanı simüle etmek için; Non-premixed, species transport ve eddy dissipation yanma modelleri kullanılmıştır. Tüm modeller 3 m/s tünel giriş hızı için simüle edilmiştir.

Şekil 1’de şematik olarak verilen tünel istasyon geometrisine, istasyon merkezine giriş tünel ağzından 140 m uzaklıkta ve simetri düzleminde 8.1 m derinlikte merkezlenmek üzere 10m uzunluğuna, 2.5m derinliğinde ve 20 cm yüksekliğinde bir yakıt havuzu yerleştirilmiştir. Non-premixed ve Eddy Dissipation modelleri kullanılarak yapılan simülasyonlarda yakıt olarak sıvı fazda n-heptan (C_7H_{16}) kullanılmıştır. Yakıt havuzu da dört yüzü hücre yapısı kullanılarak meshlenmiştir. Ortalama kütle akısı değerleri $m_{yakıt} = Q/Q_c A_{havuz}$ formülü ile hesaplanmış olup, burada n-heptanın alt ısıl değeri $Q_c = 45 \times 10^6 \text{ J/kg}$ ve $A_{havuz} = 10 \times 2,5 = 25 \text{ m}^2$ alınmıştır. 10 MW ısı yayılımına sahip yanma simülasyonlarında n-heptan alan ortalama kütle akısı (average area mass flux) $0.0044 \text{ kg/m}^2\text{s}$ olarak hesaplanmıştır.

Non-premixed yanma modeli için non-adaibatic (two stream) PDF (probability density function) grafiği denge halinde 101325 Pa çalışma basıncında, 1 mol C_7H_{16} ve $0,79 \text{ mol } N_2 + 0,21 \text{ mol } O_2$ oksidasyonu ile oluşturulmuştur. Fluent yazılımında non-premixed yanma modülünde, ortalama karışım oranı 31 nokta, karışım oranı değişim nokta sayısı 21, ve sistemdeki kimyasal tür sayısı 20, alındığı takdirde ortalama entalpi nokta sayısı 41 değerlerini almaktadır. Bu girdiler ile meydana gelen PDF (Probability Density Function) grafiği Şekil 4’te verilmiştir. Şekil 4’ten de görüldüğü gibi non-premixed yanma modelinin oluşturulan PDF tablosu/grafiğinde maksimum sıcaklık 2300K olarak hesaplanmıştır. Bu model ön karışmasız yanma prensibine göre çalışmakta olup zengin alevlenebilme limiti (rich flammability limit) yakıt için 0.07 olarak girilmiştir. Yakıt ve oksitleyici sıcaklıkları başlangıç değeri olarak $26 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır. Kimyasal reaksiyon içindeki tüm

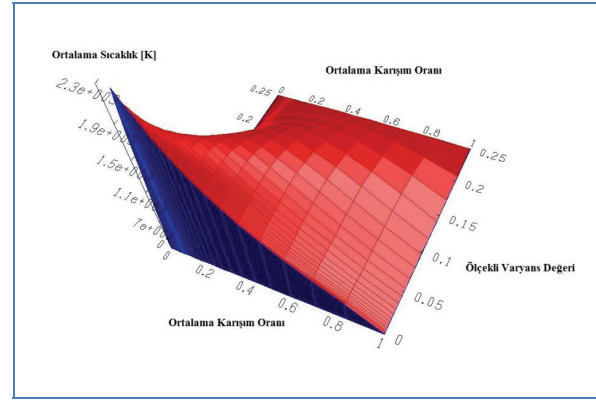
bileşenlerin hesaplamalarında mol oranları kullanılmıştır. Yapılan nümerik çözümlemede her zaman adımı için residuals (artıklar) 10^{-4} ile başlayıp zaman adımının sonundaki iterasyonda 10^{-6} değerine düşmüştür.

Non-premixed yanma modelinin, giriş hızı 3 m/s ve yakıt havuzu üzerinden istasyona verilen 0,0044 $\text{kg/m}^2\text{s}$ kütle akısı değerleri ile çözüm başlatılmış ve sırasıyla yanmanın 15, 40, 50 ve 65. saniyelerdeki eş sıcaklık eğrileri sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.

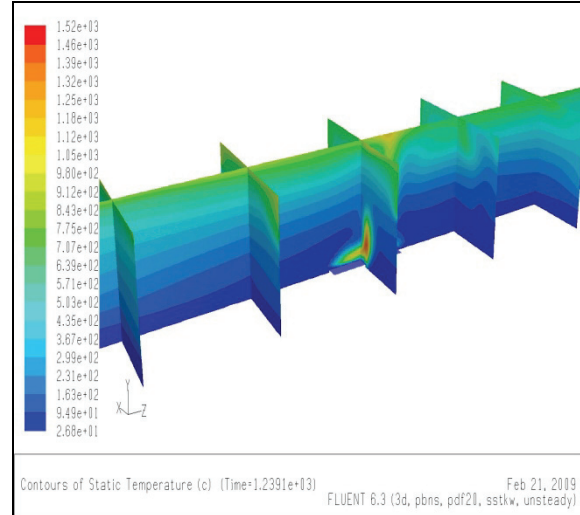
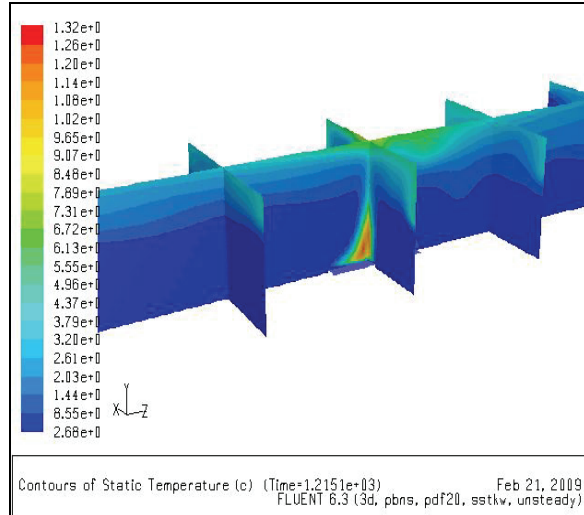
Grafiklerden görüldüğü gibi sıcaklık değerleri zaman arttıkça artmaktadır. Sıcaklık dağılımları uygun olmasına rağmen sıcaklık değerleri literatürde bulunan deneysel verilerin çok üzerindedir [1,3]. Yangının başlamasının 65. saniyesinde istasyon tavan bölgesinde 2000 K sıcaklık değerleri görülmektedir.

Bunun sebeplerinden biri yanmanın çok hızlı kimyasal bir reaksiyon (fast chemistry reaction)

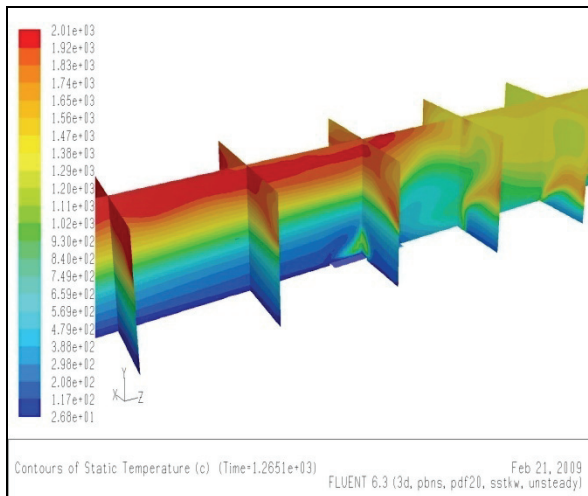
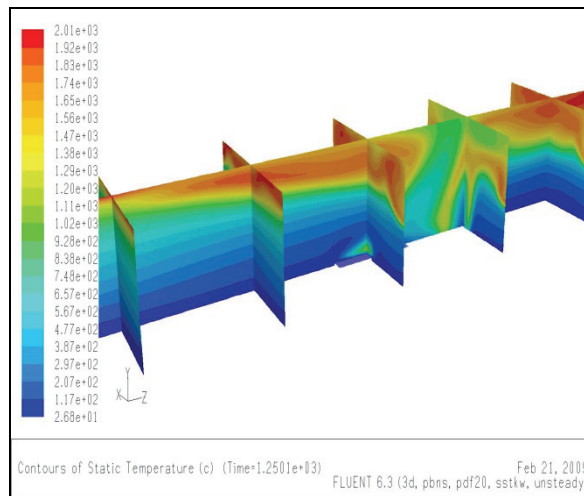
şeklinde olması, yalıtım sınır şartından dolayı non-premixed model alev hareketini çözerken ayna etkisi (mirror effect) meydana gelmesi nedeniyle duvar cidarlarında (özellikle havuz simetrisindeki tavan duvar cidarlarında) yüksek sıcaklık bölgelerinin



Şekil 4. Adyabatik olmayan olası yoğunluk fonksiyonu grafiği (Non-adiabatic two stream probability density function PDF)



Şekil 5. Yanmanın 15. ve 40. saniyelerindeki yanma ve istasyon derinlik düzlemlerindeki sıcaklık dağılımı (Temperature distribution of the fire at 15th and 40th seconds for cross sections of station)



Şekil 6. Yanmanın 50. ve 65. saniyelerindeki yanma ve istasyon derinlik düzlemlerindeki sıcaklık dağılımı (Temperature distribution of the fire at 50th and 65th seconds for cross sections of station)

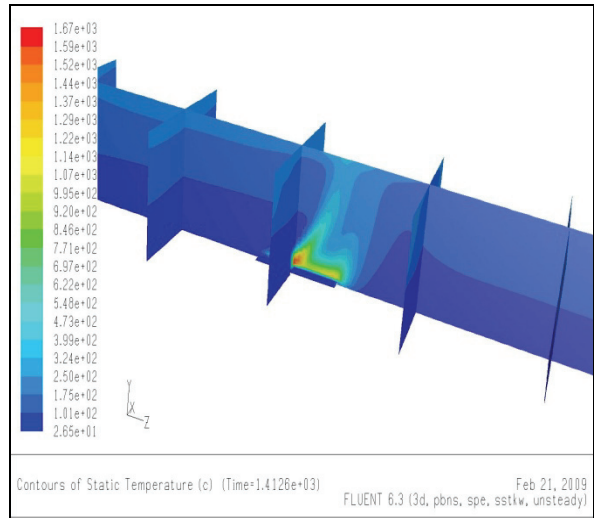
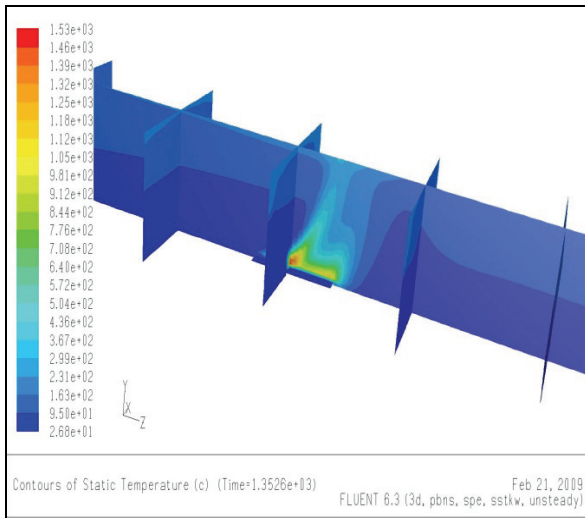
oluşmasıdır. Diğer bir neden de, oluşturulan PDF tablosu için önemli bir değer olan “Rich Flammability Limit” değerlerinin stokiometrik oran civarında değiştirilebilme olması, dolayısı ile alev ortalama sıcaklığına müdahale imkanının kısıtlanması ile izah edilebilir. Fluent yazılımında kullanılan non-premixed yanma modelinin daha çok kapalı hacimlerdeki (kazan brülörü, gaz türbini vb.) uygulamalar için geliştirilmiş olması bu sonuçları doğurmaktadır [13]. Farklı kütle akışı değerleri için de (0,013 kg/m²s ve 0,040 kg/m²s) simülasyonlar yapılmış ve benzer olarak çok yüksek sıcaklık dağılımları elde edilmiştir.

Eddy Dissipation yanma modeli kullanılarak, Q=10 MW ısı yayılım oranına sahip n-heptan için yakıt havuzundan 0,0044 kg/m²s kütle akışı verilerek simülasyonlar yapılmıştır. Bu modelde, kullanıcı için kimyasal yanma (oksidasyon) denkleminin molar dengesinin oluşturulması için imkan bulunmaktadır. Dolayısı ile reaksiyona giren yakıt (n-heptan) ve yakıcının molar değerleri istenilen fakir/zengin karışım tercihine göre adapte edilebilmektedir. Yanma ürünleri

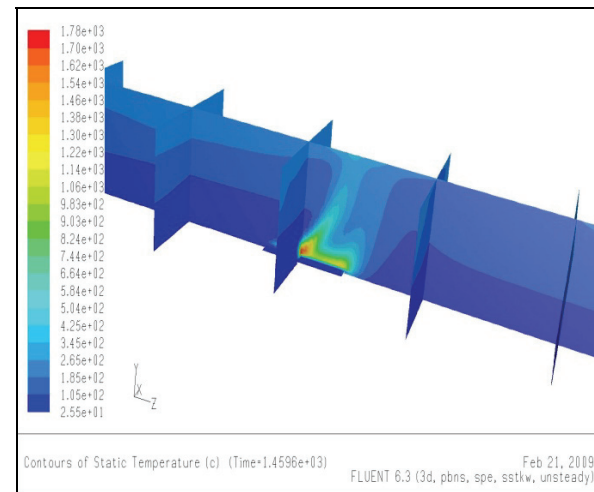
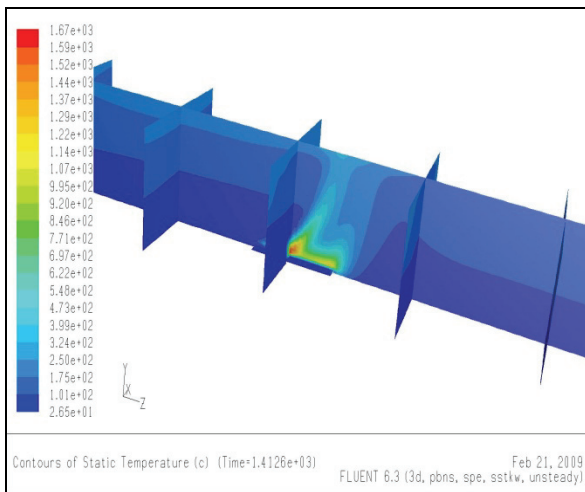
tanımlanabilmekte, kimyasal reaksiyon denklemleri son halini almaktadır. Reaksiyona giren ürünlerin kütle oranı (mass fraction) hesaplanarak çözücüye tanıtılmakta ve simülasyonlar için bir başlangıç şartı haline gelmektedir. Kullandığımız kimyasal tepkime denge durumu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.



Yakıt havuzu üzerinden difüzyon ile verilen kütle oranları hesaplandığında 0,3125 C₇H₁₆ ile 0,6875 O₂ olarak modele tanıtılmıştır. Species transport Eddy dissipation yanma modeli hacimsel reaksiyon prensibi kullanılarak çalıştırılmıştır. Modelde, girişte difüzyon ve enerji kaynağı difüzyon modülleri aktive edilmiştir. Yapılan nümerik çözümlemede her zaman adımı için artıklar/residuals 10⁻⁴ ile başlayıp zaman adımının sonundaki iterasyonda 10⁻⁶ değerine gelmiştir. Bu model kullanılarak elde edilen çözümlerin bazı zaman adımları için sıcaklık konturları sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 7. Eddy dissipation model çözümünün 20. ve 80. saniyelerindeki sıcaklık dağılımı. (Temperature distribution of the fire at 20th and 80th seconds by using eddy dissipation model for cross sections of station)



Şekil 8. Eddy dissipation model çözümünün 100. ve 127. saniyelerindeki sıcaklık dağılımı. (Temperature distribution of the fire at 100th and 127th seconds by using eddy dissipation model for cross sections of station)

Grafikler incelendiğinde, zaman adımı ile birlikte yangın kaynaklı sıcak gazlar önce yangın havuzunun üstündeki tavan bölgesine ilerlemekte ve gaz yığını sıcaklığı ile alev sıcaklığının zamanla birlikte artmakta olduğu görülmektedir. Alev sıcaklığı ve tavan bölgesinde oluşan yanma ürünü gazlarının sıcaklık dağılımı non-premixed model ile elde edilen sonuçlara kıyasla daha düşük olmaktadır. Li ve Chow'un yapmış olduğu nümerik çalışmada, elde alev bölgesi sıcaklık dağılımları 20 MW için yaklaşık 1300 °C; 50 MW için 1700 °C olarak hesaplanmıştır. Bu sıcaklık değerleri, Eddy Dissipation model kullanarak elde ettiğimiz sonuçlarla uyumludur [12]. Ancak FIRETUN projesi kapsamında deneysel olarak elde edilen verilerde bu kadar yüksek sıcaklık değerleri ölçülmemiştir. Ayrıca tarafımızdan gerçekleştirilen ölçekli model üzerindeki kapsamlı deneysel çalışmada da maksimum sıcaklık 600 °C olarak ölçülmüştür. FIRETUN projesi kapsamında MEMORIAL tüneli için yapılan deneysel çalışmalarda 10 MW ve 50 MW ısı yayılım oranları için bulunan maksimum sıcaklık değerleri 300-700 °C civarında ölçülmüştür [7]. Bu değerlendirmeler çerçevesinde Eddy Dissipation model ile yapılan simülasyon sonuçları nispeten gerçeğe daha yakın olmasına rağmen literatürde yer alan deneysel verilerle tam uyumlu değildir [1,3]. Eddy Dissipation modelinde kullanılacak olan molar denge oluşumunun; yanma kimyasının net bir şekilde ortaya koyulduğu ve özellikle kimyasal reaksiyon olasılıklarının tam olarak anlaşılabilirdiği detaylı bir çalışma ile bu modelin yangın simülasyonlarında kullanılabilirliğinin artacağı kanaatindeyiz.

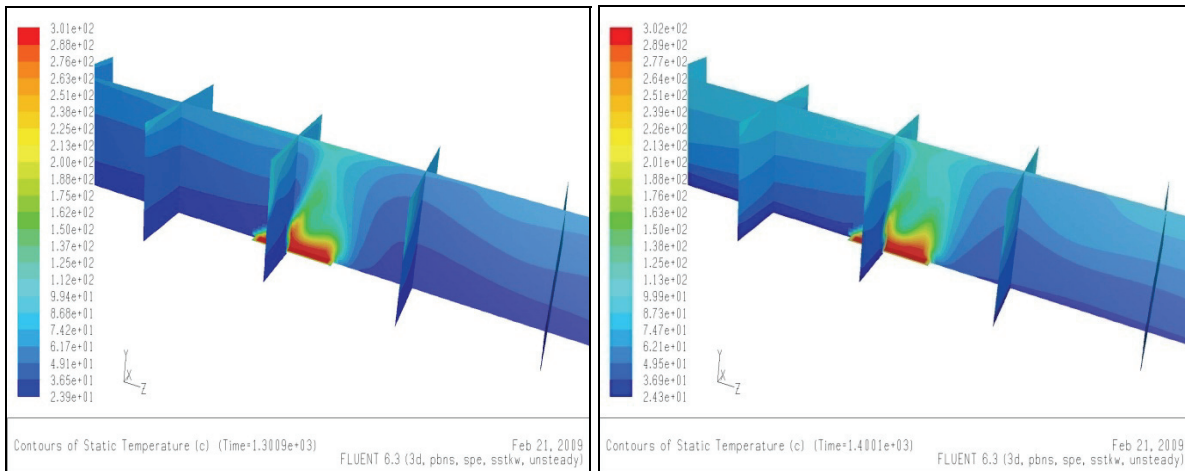
Literatürde yapılan sayısal simülasyonlarda genellikle yanma, elde edilmiş deneysel veriler esas alınarak yakıt havuzu bölgesinden tepkimesi sonucu ortaya çıkan yangın kaynaklı dumanın tanımlanması ile sağlanmaktadır [7,10]. Bu çalışma kapsamında Species Transport yanma modeli kullanılmıştır. EUREKA EU:499 FIRETUN, 1995 projesi ve PIARC and Committee on Road Tunnels, 1999 projelerinin

deneysel sonuçları Species Transport modelinin kullanılması sırasında kaynaklık teşkil etmişlerdir. Yakıt havuzundan karbondioksit/hava karışımı istasyon ortamına yayılmıştır. Tüm simülasyonlarda simetri eksenine göre yarım model geometrisi kullanılmıştır. Simetri eksenine Şekil 1'de gösterilen koordinat sistemi temel alındığında $x=0$ noktasındaki yz-düzlemi olarak tanımlanmaktadır. İki farklı tren hattının (gidiş-geliş) mevcut olduğu bu modelin her iki yolcu platformunda ortaya çıkan eş zamanlı yangın senaryosunun varlığı düşünülmüştür. Çözümler yarım model üzerinde gerçekleştirildiği için, hesaplamalarımız ısı yayılım oranlarının yarısı esas alınarak yapılmıştır. Karışım gaz debileri denklem (2.7) formülleri kullanılarak hesaplanmıştır [7]. İstasyon merkezine konumlandırılmış olan yakıt havuzu için çözüm alanında giriş hızı sınır şartı tanımlanmıştır. Karışım için giriş hız değeri denklem (2.8) kullanılarak hesap edilmiştir. Model içerisinde tanımlanması gereken kütle oranı ve çıkış sıcaklık değerleri için MEMORIAL TUNNEL üzerinde gerçekleştirilmiş olan 10 MW ve 50 MW ısı yayılım oranı yangınlarındaki CO₂-hava karışım oranı ve PIARC çıkış sıcaklık değerleri kullanılarak adapte edilmiştir [7,14].

$$m_{gaz} = \frac{Q(1-\lambda)}{C_{pg}(T_{gaz} - T_o)} \quad (7)$$

$$V_{gaz} = \frac{m_{gaz}}{\rho_{gaz} A_{havuz}} \quad (8)$$

İstasyon hacmine enjekte edilen gaz miktarı Denklem (7) kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada (λ) alev radyasyon oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu oran literatürde %50'ye kadar alınabilmektedir [19]. Bu çalışmada da simülasyonlarda alevin ısı yayılım oranı %35 olarak alınmıştır [7,17]. 10 MW için gaz karışımı giriş sıcaklığı 300 °C ve hava 0,95, CO₂ 0,05



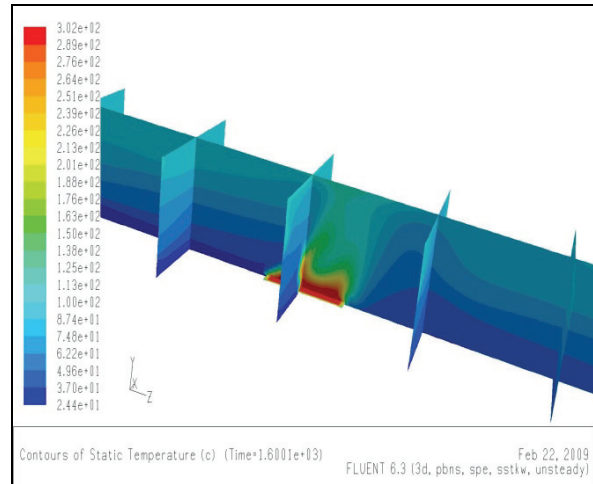
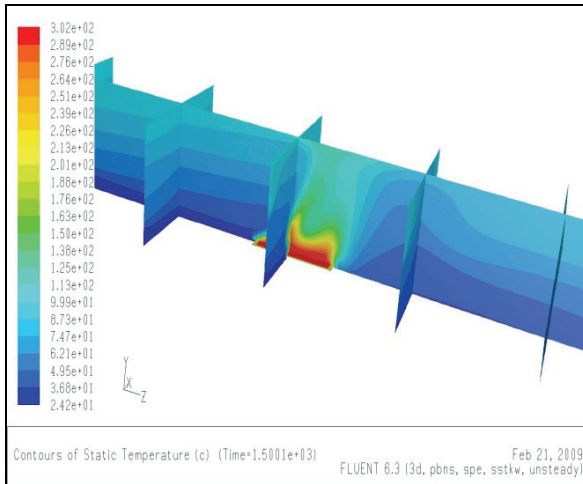
Şekil 9. Species transport model çözümünün 100. ve 200. saniyelerindeki sıcaklık kontur dağılımı (10 MW). (Temperature Distribution of the fire at 100th and 200th seconds by species transport model model for cross sections of station -10 MW)

kütle oranları (mass fraction), 50 MW için gaz karışımı giriş sıcaklığı 677 °C ve hava 0,91, CO₂ 0,09 kütle oranları (mass fraction) kullanılmıştır. 10 MW'lık yangın senaryosunda $m_g=18,31$ kg/s ve $V_{gaz}=1,14$ m/s ve $\rho_{gaz}=0,64$ kg/m³ olarak, 50 MW'lık yangın için $m_g=38,46$ kg/s ve $V_{gaz}=3,98$ m/s $\rho_{gaz}=0,386$ kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Piston etkisinin 3 m/s, ısı yayılım oranının 10 MW olduğu durum için zamana bağlı olarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonların 100s, 200s, 300s ve 400s zaman adımlarındaki sıcaklık konturları yanma düzlemi ve istasyon derinliğini tanımlayan düzlemler için sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir.

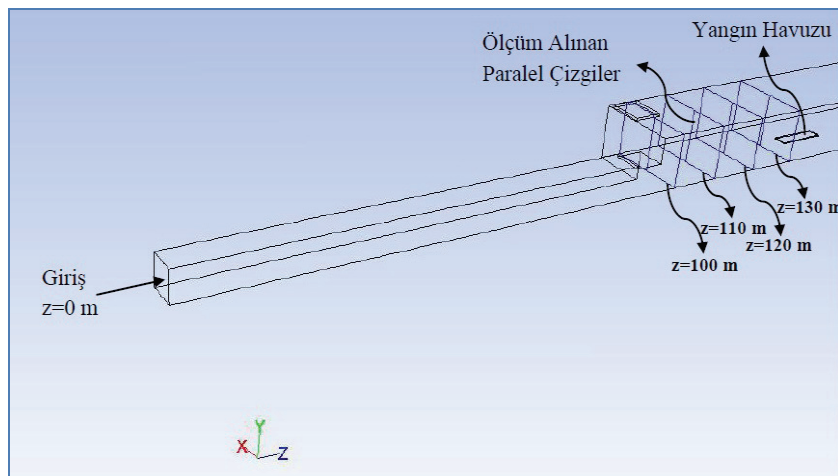
İlk 200 s lik zaman adımının belirlenen düzlemlerdeki sıcaklık dağılımları incelendiğinde yakıt havuzu üstünden çıkan sıcak gaz karışımı giriş tünel hızı nedeni ile çıkışa doğru yatmakta ve tavan bölgesine doğru hareket etmektedir. Her iki zaman adımı için de istasyon hacmi içerisindeki tüm noktalar yangından etkilenmiş ve sıcaklıkları değişmiştir. Özellikle

yangın havuzundan sonraki istasyon tabanından 2 m yükseklikteki bölgelerdeki sıcaklık insan sağlığını tehdit edici değerlere ulaşmıştır.

Yangının başlamasından sonraki şekiller incelendiğinde 300 s ve 400 s deki sıcaklık dağılımlarının aynı olduğu görülmekte olup, sıcaklık dağılımları zamandan bağımsız (kararlı) hale gelmiştir. Tavan bölgesinde oluşan maksimum sıcaklık değeri 170 °C civarında olup alev bölgesinin gördüğü kesit üzerinde oluşmaktadır. Bu sıcaklık tünel girişine doğru geriye hareket eden gaz yığını ile taşınmakta, istasyonun giriş bölümünün tavan bölgesinde ortalama 100 °C olarak hesaplanmaktadır. İstasyonun taban bölgesine inildikçe azalma gösteren sıcaklık dağılımları yolcu hattında 60 °C mertebesinde olup, insan sağlığı açısından tehlikeli bir durum yaratmaktadır. Sıcak gazlar tavan bölgesinde yoğunlaşmakta olup aksel havalandırma (Piston Etkisi) olmasına rağmen bu havalandırma hızının kritik hız değerlerinden düşük olması nedeni ile



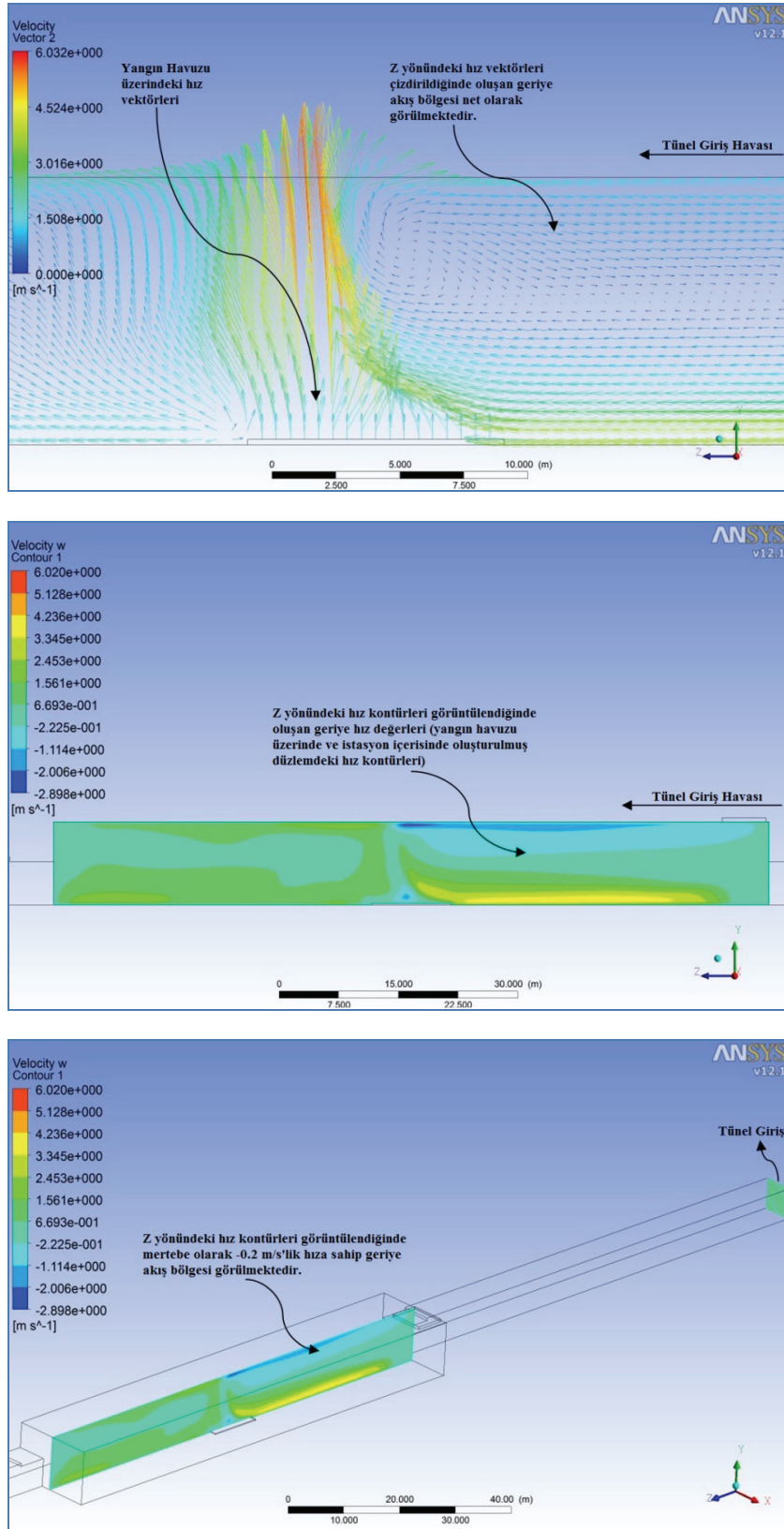
Şekil 10. Species transport model çözümünün 300. ve 400. saniyelerindeki sıcaklık dağılımı (10 MW) (Temperature Distribution of the fire at 300th and 400th seconds by Species Transport Model model for cross sections of station -10 MW)



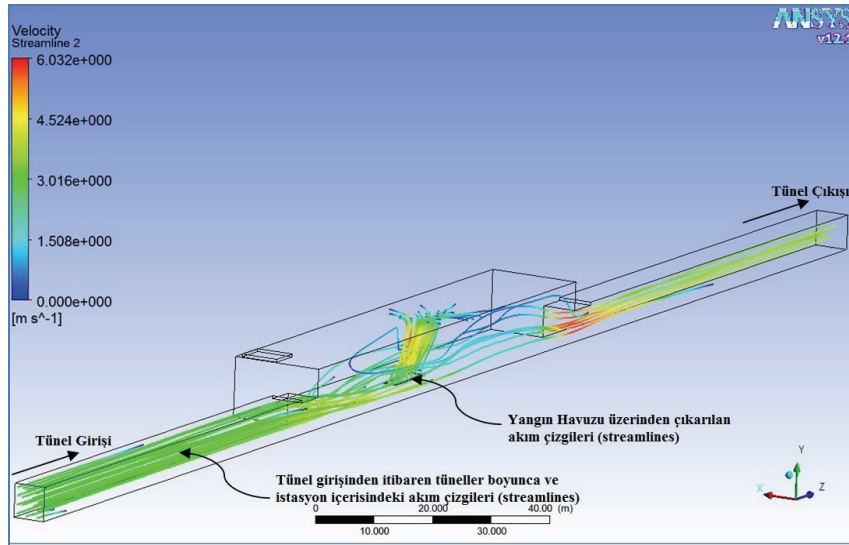
Şekil 11. Geriye akış hızlarının hesaplandığı referans kesit ve çizgilerin şematik görünümü (Schematic layout of computed backflow velocities on planes and lines)

geriye doğru (backflow) akış alanları oluşmaktadır. Geriye akış hareketini daha iyi görmek için giriş tüneli başlangıcından itibaren sırasıyla 100 m, 110 m, 120 m ve 130 m uzaklıktaki kesitler oluşturulmuştur.

Bu kesitlerin üzerinde referans çizgiler oluşturulmuştur. Hesaplanan hız değerlerinin alındığı kesit ve referans çizgilerin şematik görünümü Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 12. 10 MW lık ısı yayılım oranı ve 3 m/s lik tünel giriş hızı şartlarındaki yangın havuzu merkezinden geçen yz-düzlemindeki hız kontur ve vektörleri (Velocity contour and vector at fire pool centre plane of 10 MW heat release rate with 3 m/s tunnel entrance velocity condition)

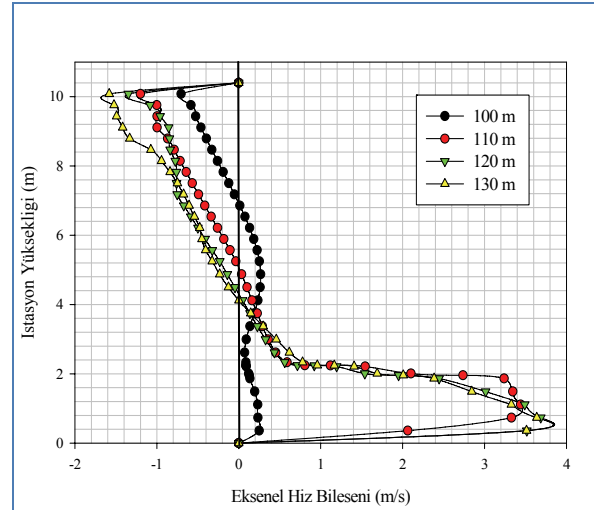


Şekil 13. 10 MW lık ısı yayılım oranı ve 3 m/s lik tünel giriş hızı şartlarındaki yangın havuzu merkezinden geçen yz-düzlemindeki akım çizgileri (Streamlines at fire pool centre plane of 10 MW heat release rate with 3 m/s tunnel entrance velocity condition)

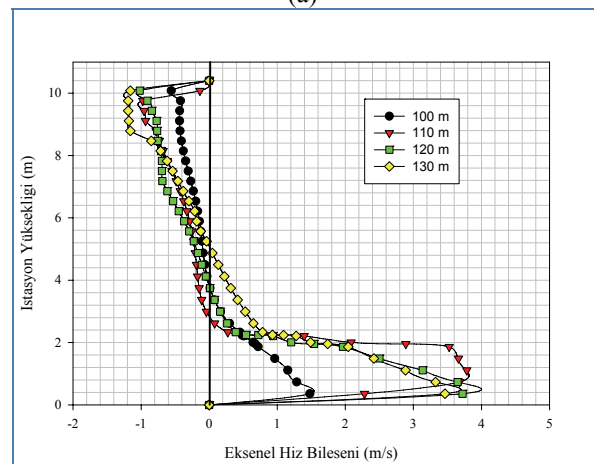
Tünel-istasyon tünel modelinin yz-düzleminde oluşturulan kesitte geriye akış hareketini ve bu akışın hız değerlerini görebilmek için hız konturları, vektörleri ve akım çizgileri sırasıyla Şekil 12 ve Şekil 13'de verilmiştir. Ayrıca yakıt havuzunun z-yönündeki eksen boyunca oluşturulan referans çizgiler üzerinden geriye akış hareketini göstermek için hız değerleri alınarak grafikler halinde sırasıyla Şekil 14 ve Şekil 15'de sunulmuştur. Şekil 12 incelendiğinde yangın havuzunun merkezinden geçen düzlem üzerinde z-yönündeki hız vektör ve konturları görülmektedir. Hız vektörlerinin olduğu görselde, alevin giriş tüneline gelen giriş havası ile çıkış tüneline doğru yatma eğiliminde olduğu görülmektedir. Ayrıca, tünel tavanına ilerledikçe hızlanan geriye akış hareketini temsil eden hız vektörleri de açıkça görülmektedir. Hız konturlarının verildiği görsel incelendiğinde, yangın havuzundan tünel girişine doğru istasyon tavanında meydana gelen geriye akış bölgesinin oluşumu hissedilmektedir. Bu bölgede geriye akış hızı ortalama 0,2 m/s mertebesindedir.

Şekil 14 incelendiğinde yakıt havuzu öncesinde oluşturulan tüm kesitlerde z-yönündeki hız değerleri istasyon yüksekliği boyunca azalmakta, belli bir yükseklikten sonra ters yöne doğru değerler artmaktadır. Tavan bölgesine doğru ilerledikçe geriye akış hızı değerlerinin arttığı görülmektedir. Maksimum geriye akış hızı değeri simülasyonun 100. saniyesinde giriş tüneline 130 m uzaklıkta oluşturulan referans çizginin yaklaşık 9,8 m tünel yüksekliğindeki noktasında merkeze olarak 1,65 m/s olarak hesaplanmıştır.

Yakıt havuzundan tünel girişine doğru kalan kesitlerde beklenildiği gibi tavan bölgesinde geriye doğru akış alanları oluşmaktadır. Hesaplanan kritik hız değerleri, istasyon içerisindeki ortalama hız değerlerinin üzerinde



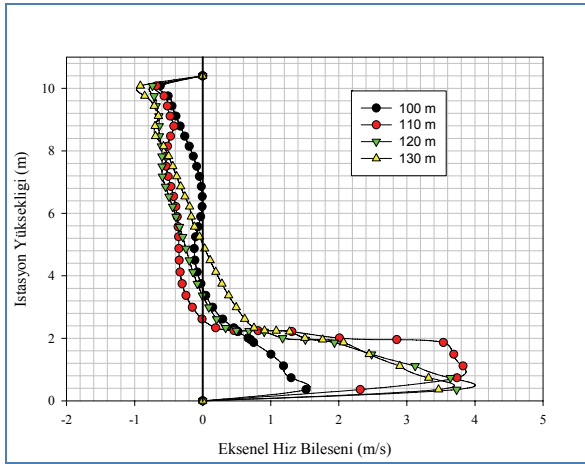
(a)



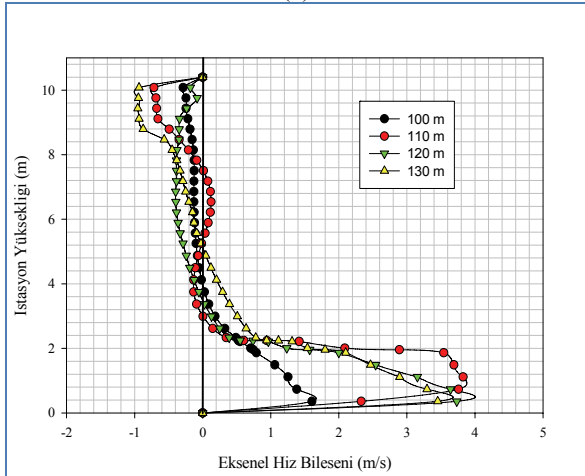
(b)

Şekil 14. Species transport model çözümünün soldan sağa sırasıyla 100. ve 200. saniyelerinde belirlenen kesitlerdeki istasyon yüksekliği boyunca oluşan hız dağılımı (Velocity distribution at time step solutions of 100. and 200. seconds for species transport combustion model at the reference sections along the tunnel height)

olduğu için istasyon içerisinde geriye doğru akış (backflow) olması beklenen bir sonuç olup, Şekil 14 ve Şekil 15'den de bu sonuçlar görülebilmektedir. Şekil 15 incelendiğinde simülasyonun 300. ve 400. saniye çözümlerinde maksimum geriye akış hızı 130 metredeki referans çizginin yaklaşık 10 m tünel yüksekliği noktasında yaklaşık -0,9 m/s olarak hesaplanmıştır. Tünel girişinden yangın havuzuna kadar olan bölgede, tünel yüksekliği boyunca konumlandırılan dört çizginin herbirinde tavan bölgesinde geriye akışlar olduğu söylenebilir. Sonuçları Şekil 14 ve Şekil 15'de verilen farklı zaman adımlarındaki sonuçlar incelendiğinde, istasyon tabanından yaklaşık 2,5 m yukarı çıktığında referans çizgilerde geriye akışın başladığı anlaşılmaktadır.



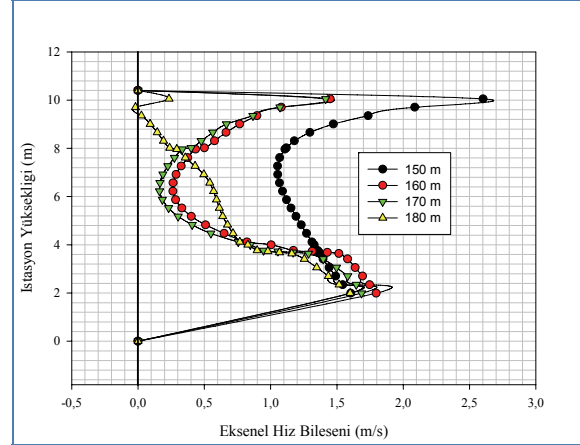
(a)



(b)

Şekil 15. Species transport model çözümünün soldan sağa sırasıyla 300. ve 400. saniyelerinde belirlenen kesitlerdeki istasyon yüksekliği boyunca oluşan hız dağılımı grafiği (Velocity distribution at time step solutions of 300. and 400. seconds for species transport combustion model at the reference sections along the tunnel height)

İstasyonun çıkış duvarına yakın kesitlerde istasyon çıkış duvarına çarparak geriye dönen akış alanlarının olduğu görülmektedir. Tünel girişinden itibaren $z=150$ m, 160 m, 170 m ve 180 m de oluşturulan referans çizgilerdeki soğuk akış simülasyonlarında



Şekil 16. Soğuk Akış için yakıt havuzu sonrasında kesitlerde eksnel hız dağılımı (Axial velocity distribution at the sections after fire-pool for cold flow simulations)

elde edilen hız dağılımları Şekil 16'da görülmektedir. Şekil 16 incelendiğinde istasyon çıkış duvarına yaklaştıkça eksnel hız bileşeninin değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Bu durum istasyondan çıkış tüneline olan ani daralma ile açıklanabilir. İstasyonu terk etmeye çalışan akışın bir kısmı istasyon çıkış duvarına çarpıp geriye doğru dönerek ana akışa karışmaktadır. Bu sonuç tavan bölgesinde ısınan gaz karışımının hızının artmasını ve geriye doğru olan hareketinin ataletinin kuvvetlenmesini sağlamaktadır.

3. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Bu çalışmada gerçek boyutlardaki istasyon modelinde öncelikle akış, Fluent 6.3.26 yazılımı kullanılarak modellenmeye çalışılmış, gerçek bir durumu sayısal simülasyonlarla temsil etmek için en uygun akış modelleri belirlenmiştir. Akış çözümlerinden elde edilen veriler daha önce gerçekleştirilen deneysel modelde yapılmış akış deneylerinin ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Akış simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle tamamen uyumlu olduğu türbülans modeli SST $k-\omega$ seçimi yapılmıştır. Fluent yazılımında yer alan yanma modelleri incelenmiştir. Ancak Fluent yazılımında yer alan yanma modellerinin birçoğunda; sıcaklık dağılımları nitelik olarak doğru olsa da simülasyon sonunda elde edilen sıcaklık değerlerinin, literatürde yapılmış deneysel çalışmalarda yer alan sıcaklık değerlerinin üzerinde olduğu görülmüştür. Literatürde yapılan sayısal çalışmalar incelendiğinde yangın simülasyonları için en uyumlu sonuçları veren Species Transport modelinin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu modelin uygun bir şekilde çalıştırılması için deneysel verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Birçok Avrupa ülkesinin katılımı ile MEMORIAL tüneline gerçekleştirilen (EUREKA EU:499 FIRETUN, 1995) [7] çok kapsamlı deneysel çalışmanın sonuçlarından gaz karışımı oranı ile ilgili ihtiyaç duyulan fiziksel veriler bu modelde kullanılmıştır. Piston etkisinin istasyon içindeki hacimde kritik hız değerinin altında

olması nedeni ile istasyon girişine doğru tavanda geriye akış görülmüştür. Yangın kaynaklı dumanın geriye akış miktarı, yangının ısı yayılım oranının artması ile hızlanmış ve daha yoğun ve daha sıcak bir tabaka halinde hareket etmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer geometri ve ısı yayılım oranına sahip çalışma sonuçları ile uyum içindedir.

4. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Tübitak 1001 Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 106M370 Kodlu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Tübitak'a teşekkürlerimizi sunarız.

5. SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

A_C	Kesit Alanı (m^2)
$A_{istasyon}$	İstasyon kesit alanı (m^2)
$A_{tünel}$	Tünel kesit alanı (m^2)
c_p	Özgül Isı (kJ/kgK)
C_{pg}	Gaz karışımının özgül ısısı (J/kgK)
C_{ph}	Havanın özgül ısısı (J/kgK)
D_h	İstasyon ortalama hidrolik çapı(m)
Fr	Froude Sayısı (birimsiz)
g	Yerçekimi İvmesi (m/s^2)
L	Karakteristik Uzunluk (m)
\dot{m}_{air}	Hava Debisi (kg/s)
\dot{m}_{CO_2}	CO ₂ Gazının Çıkış Debisi (kg/s)
\dot{m}_{gaz}	Yakıt havuzundan verilen gaz karışım debisi (kg/s)
P	Perimetre (m)
Q	Yangın senaryosunda kullanılan ısı yayılım oranı (MW)
Re	Reynolds Sayısı (birimsiz)
Ri	Ricahardson Sayısı (birimsiz)
T	Ortam Sıcaklığı (K)
T_{gaz}	Gaz karışımının giriş sıcaklığı (K)
T_o	Çevre hava sıcaklığı ($^{\circ}C$)
U, V	Hız (m/s)
V_C	Kritik Hız (m/s)
V_{gaz}	Yakıt havuzundan verilen gaz giriş hızı (m/s)
$V_{ortalama}$	İstasyon içerisindeki ortalama hız (m/s)
$V_{tünel}$	Tünel içerisindeki ortalama hız (m/s)
μ	Viskozite (Pa.s)
v	Kinematik Viskozite (m^2/s)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
ρ_o	Çevre hava yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_{gaz}	Gaz karışımının verilen sıcaklıktaki yoğunluğu (kg/m^3)

7. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Hu, L.H., Huo, R., Peng, W., Chow, W.K. ve Yang, R.X., "On the Maximum Smoke Temperature Under The Ceiling in Tunnel Fires", **Tunnelling and Underground Space Technology**, Cilt 21, 650-655, 2006.
- Hu, L.H., Huo, R., Wang, H.B., Li, Y.z. ve Yang R.X., "Experimental Studies on Fire-Induced Buoyant Smoke Temperature Distribution Along Tunnel Ceiling", **Building and Environment**, Cilt 42, No 11, 3905-3915, 2006.
- Roh, J.S., Yang, S.S., Ryou, H.S., Yoon M.O. ve Jeong Y.T., "An Experimental Study on the Effect of Ventilation Velocity on Burning Rate in Tunnel Fires-Heptane Pool Fire Case", **Building and Environment**, Cilt 43, No 7, 1225-1231, 2007.
- Chow, W.K., "Simulation of Tunnel Fires Using a Zone Model", **Tunneling and Underground Space Technology**, Cilt 11, 221-236, 1996a.
- Chow, W.K., "Application of Computational Fluid Dynamics in Building Services Engineering", **Building and Environment**, Cilt 31, Sayı 5, 425-436, 1996b.
- Xue H., Ho J.C. ve Cheng Y.M., "Comparison of Different Combustion Models in Enclosure Fire Simulation", **Fire Safety Journal**, Cilt 36, 37-54, 2001.
- Vega, M. G., Diaz, K. M. A., Oro, J. M. F., Tajadura, R. B. ve Morros, C. S., "Numerical 3D Simulation of a Longitudinal Ventilation System: Memorial Tunnel Case", **Tunnelling and Underground Space Technology**, Cilt 23, 539-551, 2008.
- Olivier, V., "Experimental Simulation Of Fire-Induced Smoke Control in Tunnels Using An 'Air-Helium Reduced Scale Model': Principle, Limitations, Results and Future", **Tunnelling and Underground Space Technology**, Cilt 23 No 2, 171-178, 2008.
- Seong Roh J., Shin Yang S., Sun Ryou H., O Yoon M. ve Tae Jeong Y., "An Experimental Study On The Effect Of Ventilation Velocity On Burning Rate In Tunnel Fires- Heptane Pool Fire Case", **Building and Environment**, Cilt 43 Sayı 7, 1225-1231, 2008.
- Wu Y. ve Bakar, M. Z. A., "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation Systems – A Study of Critical Velocity," **Fire Safety Journal**, Cilt 35, 363-390, 2000.
- Thomas, P. H., "The movement of smoke in horizontal passages against an air flow," Fire Research Station Note No.723, *Fire Research Station UK*, September, 1968.
- Li J.S.M. ve Chow W.K., "Numerical Studies on Performance Evaluation of Tunnel Ventilation Safety Systems", **Tunnelling and Underground Space Technology**, Cilt 18, 435-452, 2003.

13. Fluent® User Guide and Fluent Documentation, 2003.
14. ASHRAE Applications, **Enclosed Vehicular Facilities, Chapter 12**, 1791 Tullie Circle, GA 30329 N.E., Atlanta, USA, 1999.
15. Karaaslan S., Dinler N., Berberoğlu İ. ve Yücel N., “**Yeraltı Raylı Taşıma Sistemi İstasyonu İçin Yangın Modellenmesi ve Simülasyonu**” 106M370 kodlu Tübitak 1001 Araştırma Projesi Kesin Raporu, 2009.
16. Colella, F., “**Multiscale Modelling of Tunnel Ventilation Flows and Fires**” PhD. Thesis, Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica. May 2010.
17. Cox, G. ve Kumar, S., Modelling enclosure fires using CFD. In: **The SFPE Handbook For Fire Safety Engineering**, 3rd edn. NFPA, Massachusetts International, Quincy 2002.

