مجله مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1393، دوره 14، شماره 11، ص‌ص 37-46

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تأثیر شیب و انسداد تونل روی سرعت بحرانی در آتش‌سوزی بزرگ در تونل بین شهری

معصومه رئوفی[1]، کیومرث مظاهری[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 143-14115، kiumars@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 بهمن 1392

پذیرش: 16 فروردین 1393

ارائه در سایت: 06 مهر 1393

کلید واژگان:

آتش‌سوزی

تونل

سرعت بحرانی

شیب تونل

انسداد تونل

چکیده

در چند سال اخیر موضوع آتش‌سوزی در تونل‌های حمل و نقل به یک نگرانی مهم تبدیل شده است. ایمنی در برابر آتش‌سوزی در حال حاضر یکی از عناصر مهم در طراحی تونل‌ها است. به همین علت بسیاری از تونل‌ها به سیستم‌های تهویه طولی برای کنترل دود در صورت آتش‌سوزی مجهز هستند. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار اف‌دی‌اس آتش‌سوزی در تونل شبیه‌سازی شده است و به مطالعه بر روی سرعت بحرانی در شرایط آتش‌سوزی در تونل پرداخته شده است. موارد بررسی شده در پژوهش حاضر، تأثیر پارامترهای هندسی روی سرعت بحرانی هستند. در کار حاضر برای مطالعه تأثیر پارامترهای هندسی، تأثیر شیب تونل و انسداد تونل مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی تأثیر شیب تونل، رفتار دود برای شیب‌های 10- تا 10+ مورد مطالعه قرار گرفته است. مشاهده شد که در شیب‌های مثبت، ستون دود به سمت خروجی تونل و در شیب‌های منفی، ستون دود به سمت ورودی تونل منحرف می‌شود. همچنین مشاهده شد که با افزایش شیب تونل از شیب‌های منفی به مثبت، سرعت بحرانی به صورت خطی کاهش می‌یابد. انسداد تونل در شرایط یک وسیله نقلیه و 30 وسیله نقلیه بررسی شد. بررسی انسداد توسط وسیله نقلیه نشان داد که با افزایش درصد انسداد، سرعت بحرانی کاهش می‌یابد.

Study on the effect of tunnel slope and blockage on critical velocity in urban tunnels

Masoomeh Raoufi, Kiumars Mazaheri*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, kiumars@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 15 February 2014
Accepted 05 April 2014
Available Online 28 September 2014

Keywords:
Fire
Tunnel
Critical Velocity
Tunnel Slope
Vehicle Blockage

ABSTRACT

Over the past years, the issue of fire in transport tunnels has become an important concern. Fire safety is now one of the important elements in tunnel design. For this reason, many tunnels are equipped with longitudinal ventilation systems to control smoke in the event of fire. In this study, tunnel fire simulation is done with open-source software FDS, and study on the critical velocity is done in tunnel fire. The effects of geometrical parameters on the critical velocity is studied. Tunnel slope and blockage is studied to investigate the effects of geometrical parameters. In tunnel slope study part, propagation and behavior of smoke is studied for slopes between -10 and +10 degrees. In positive slopes of tunnel, fire plume is spread to the downstream of tunnel and in negative slopes of tunnel, fire plume is spread to the upstream of tunnel. It is observed that with increasing from negative slopes to positive slopes of the tunnel, the critical velocity decreases linearly with increasing tunnel slope. Tunnel blockage is studied for one vehicle and 30 vehicles. The results of study on vehicular blockage show that the critical velocity decreases with increasing percent of blockage.

1- مقدمه

ایمنیِ تونل یکی از مسائل مهم و مطرح در شرایط عادی و اضطراری (آتش-سوزی) است. سیستم تهویه، در شرایط عادی، به منظور حفظ کیفیت و غلظت آلاینده‌ها در محدوده سلامت، و در شرایط اضطراری، برای کنترل و استخراج دود بکار می‌رود. همگام با ازدیاد تونل‌های جاده‌ای و افزایش تعداد وسایل نقلیه عبوری از این تونل‌ها مسأله افزایش خطرات و سوانح در داخل تونل‌ها نیز رو به افزایش است. بسته بودن محیط تونل‌ها، عواقب ناشی از تصادفات و سوانح را بسیار زیاد می‌کند. آتش‌سوزی در تونل‌ها، به دلیل تصادفات و یا جاری‌شدن سوخت و تحریک (جمع شدن گرما در سوخت) آن اتفاق می‌افتد. معمولاً نرخ تصادفات در داخل تونل‌ها کمتر از نرخ تصادفات جاده‌ای است، ولی به علت محدود بودن فضای داخل تونل‌ها و احتمال بروز آتش‌سوزی می‌توان تونل‌ها را محیط خطرناک‌تری دانست.

سال‌های متمادی روش‌های تهویه در تونل‌های وسایل نقلیه در سراسر جهان در میان مهندسان، دانشمندان و اخیراً متخصصان محیط زیست مورد

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Raoufi, K. Mazaheri, Study on the effect of tunnel slope and blockage on critical velocity in urban tunnels, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 37-46, 2014 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.7.6]

بحث و مناظره بوده‌است. کیفیت هوا، آلودگی آن و ایمنی در برابر آتش‌سوزی از موارد عمده بوده‌اند. از عمده‌ترین مسائل در طراحی سیستم تهویه تونل‌ها، تعیین دبی هوای لازم برای رقیق کردن گازهای موجود در تونل است. آلودگی ناشی از دود وسایل نقلیه از یک طرف، و از طرف دیگر بحث دود ناشی از آتش‌سوزی در تونل‌ها، طراحی و مدل‌سازی سیستم تهویه در تونل‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند.در هنگام آتش‌سوزی، با اعمال تهویه اضطراری سعی بر کنترل دود و هدایت دود به یک سمت است. هنگام آتش‌سوزی در تونل ستون دود به دلیل نیروی شناوری به سمت سقف حرکت می‌کند و دود زیر سقف تونل پخش می‌شود. یکی از مسائلی که از نظر ایمنی مطرح می‌شود، بحث خفگی بر اثر گسترش دود در تونل است. یک تحلیل آماری از سال 1994 تا 1999 نشان می‌دهد کل آتش‌سوزی تونل‌ها بین 60 تا 90 مورد در هر سال بوده است. این تعداد آتش‌سوزی حدود 0/1 درصد کل آتش‌سوزی وسایل نقلیه و حدود 6/7 تا 10 درصد کل آتش‌سوزی در نتیجه تصادفات در جاده‌ها و تونل‌ها را شامل می‌شود [1]. چند نمونه آتش‌سوزی‌هایی که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته در جدول 1 آورده شده است.

به دلیل تازه بودن مبحث تونل داخل شهری در ایران، مسئله آتش‌سوزی در آن پیشینه تاریخی ثبت شده ندارد. با این وجود، همچنان که در جدول 1 مشاهده می‌شود، با توجه به آسیب‌های جانی بالای آتش‌سوزی در تونل، مطالعه و تحقیق در این زمینه از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

1-1- پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر فعالیت‌های زیادی برای کاهش خطرات ناشی از آتش‌سوزی در تونل‌ها انجام‌شده‌است. با توجه به طراحی سیستم تهویه در تونل‌ها برای کاهش آلودگی و خطرات ناشی از آن، بحث آتش‌سوزی در تونل با سیستم تهویه مکانیکی ارتباط پیدا می‌کند. مطالعات تئوری و آزمایشگاهی بسیاری روی سرعت بحرانی[1] تهویه (به حداقل سرعت جریان هوایی که به ازای آن برگشت دود به سمت ورودی تونل وجود نداشته باشد، سرعت بحرانی می‌گویند.) در هنگام آتش‌سوزی در تونل انجام شده است.

توماس [3] اولین فردی بود که از عدد فرود در موقعیت‌های آتش‌سوزی استفاده کرد. او تأثیر سرعت تهویه را بر روی آتش‌سوزی مورد مطالعه قرار داد. او بیان کرد در شرایط بحرانی (درشرایط عادی درون تونل، یک نوع سیستم تهویه بر تونل حاکم است. این در حالی است که در شرایط آتش‌سوزی در تونل که با عنوان شرایط بحرانی یا اضطراری معرفی می‌شود، نیاز به جریان تهویه با سرعت بالاتر ازحالت عادی است.) نیروی شناوری و نیروی اینرسی برابر بوده و برگشت جریان رخ نمی‌دهد.

اوکا و آتکینسون [4] با مطالعه آزمایشگاهی تونل با مقیاس 10به 1 تغییرات سرعت بحرانی با نرخ گرمای آزاد شده را مورد مطالعه قرار دادند و در این بررسی به این مهم دست یافتند که در نرخ گرمای آزاد شده بدون بعد کمتر از 0/12، سرعت بحرانی با توان یک سوم نرخ گرمای آزاد شده بدون بعد مرتبط می‌باشد. در حالی که در نرخ گرمای آزاد شده بدون بعد بزرگ‌تر از 0/12، سرعت بحرانی مستقل از نرخ گرمای آزاد شده است. وو و باکار [5] به بررسی جریان دود در آتش‌سوزی تونل با استفاده از تهویه طولی پرداختند. آنها در این مطالعه به صورت تجربی و عددی به مطالعه 5 تونل با ارتفاع یکسان و با سطح مقطع متفاوت پرداختند. نتایج تجربی نشان داد که سرعت بحرانی با هندسه تونل تغییر می‌کند. ایشان بیان داشتند دو حالت متفاوت برای ارتباط رفتار سرعت بحرانی و نرخ آزاد سازی گرما وجود دارد.

1- Critical Velocity

جدول 1 نمونه‌های آتش‌سوزی در تونل در سال‌های اخیر[2]

افراد آسیب دیده	مدت آتش-سوزی	وسایل در محل آتش‌سوزی	محل آتش‌سوزی	نام و طول تونل	سال
66زخمی (دود)	4 ساعت	1 وسیله حمل و نقل سنگین	آمریکا	هلند 25550 متر	1949
39 کشته	53 ساعت	وسیله حمل و نقل سنگین	فرانسه - ایتالیا	مونت بلانس[2] 11600 متر	1999
11 کشته	2 روز	برخورد دو وسیله حمل و نقل سنگین	سوئیس	گوت هارد3 16322 متر	2001
2 کشته و 21 زخمی	-	1وسیله حمل و نقل سنگین	فرانسه - ایتالیا	فرجوس4 12900 متر	2005

در نرخ آزاد سازی گرمای پایین ($Q^* \leq 0.2$)، سرعت بحرانی با توان یک سوم نرخ آزادسازی گرما مرتبط است و این در حالی است که در نرخ بالاتر آزادسازی گرما، سرعت بحرانی مستقل از آن است.

تسای و همکاران [6] با روش تجربی به بررسی سرعت تهویه بحرانی برای حالتی که آتش‌سوزی در نزدیکی خروجی تونل اتفاق می‌افتد پرداختند. در این مطالعه آتش‌سوزی در تونل در مقیاس کوچک بررسی و سرعت بحرانی در حالتی که آتش‌سوزی در مکانی نزدیک خروجی تونل رخ می‌دهد، بدست آمد. مشاهدات ایشان نشان داد سرعت بحرانی با افزایش سطح سوخت و با افزایش فاصله از خروجی تونل افزایش می‌یابد. در واقع با کاهش فاصله منبع آتش با خروجی تونل، مقاومت دود در برابر جریان تهویه کمتر می‌شود و سرعت بحرانی در این حالت کاهش می‌یابد. روح و همکاران [7] در یک کار تجربی، با مدل هندسی20 به 1 بر اساس تشابه عدد فرود اثر سرعت تهویه را بر نرخ سوختن، آزادسازی انرژی و پدیده برگشت دود در تونل بررسی کردند. ایشان به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت تهویه در تونل نرخ سوختن سوخت افزایش می‌یابد که علت آن را افزایش در میزان دسترسی به اکسیژن بیان نمودند. البته نمی‌توان گفت این رفتار همیشه اتفاق می‌افتد، زیرا هم به زمان ماندگاری، هم به شرایط دمایی و هم به نرخ گرمای آزاد شده از سطح سوخت بستگی دارد. آتکینسون و وو [8] در مطالعه آزمایشگاهی به بررسی تأثیر شیب (مثبت و منفی) تونل روی سرعت بحرانی پرداختند. ایشان یک رابطه خطی برای تغییرات سرعت بحرانی با شیب تونل پیشنهاد دادند. چو و همکاران [9] در مطالعه آزمایشگاهی، به بررسی تونلی با مقیاس 50 به 1، در حالتی که آتش‌سوزی استخری رخ می‌دهد پرداختند. ایشان در این تحقیق تونل را با سه شیب 5، 15 و 25 درجه بررسی کردند. در این مطالعه با توجه به اهمیت هندسه تونل در بررسی آتش‌سوزی‌ها به بررسی رفتار دود حاصل از آتش‌سوزی در تونل با شیب‌های مختلف پرداخته شد. ایشان بیان داشتند که شکل ستون آتش با تغییر زاویه تونل تغییر می‌کند. ستون آتش با تغییر زاویه تونل، به سمت کف تونل منحرف می‌شود. با افزایش شیب تونل ستون آتش به علت نیروی شناوری، بیشتر به کف تونل نزدیک می‌شود.

لی و تسای [10] به بررسی تأثیر انسداد وسایل نقلیه روی سرعت تهویه بحرانی و رفتار آتش‌سوزی در تونل تحت تهویه طولی پرداختند. آنها با در نظر گرفتن دو حالت چیدمان وسایل نقلیه، بررسی خود را انجام دادند. چیدمان وسایل نقلیه در بالادست محل آتش‌سوزی و در دو حالت دو و سه ردیفه بود. ایشان به این نتیجه رسیدند که سرعت بحرانی با افزایش انسداد تونل، کاهش می‌یابد. آنها علت کاهش سرعت بحرانی با افزایش انسداد تونل را شار جرمی

2- Mont Blanc
3- Gotthard
4- Ferjus

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.7.6]

ثابت بیان کردند. در واقع با ثابت ماندن شار جرمی، در صورتی که سطح عبور شار جرمی کاهش یابد، سرعت افزایش می‌یابد. به این ترتیب سرعت بحرانی لازم که از ورودی تونل وارد می‌شود، کاهش می‌یابد.

شاهسون [11] به شبیه‌سازی آتش‌سوزی در تونل با استفاده از نرم‌افزار اف‌دی‌اس[1] پرداخت. ایشان در بررسی خود تأثیر نسبت انسداد تونل و شیب تونل را مورد مطالعه قرار داد. ایشان برای بررسی انسداد تونل، عرض و ارتفاع محل آتش‌سوزی را تغییر داده و مشاهده نمود که با افزایش نسبت انسداد، سرعت کاهش می‌یابد. شاهسون برای بررسی شیب تونل، شیب‌های مثبت و منفی را مطالعه نمود. نتایج ایشان نشان می‌دهد که در شیب‌های مثبت، سرعت بحرانی ثابت و در شیب‌های منفی سرعت بحرانی رابطه خطی با شیب تونل دارد.

همان‌طور که بیان شد خطر آفرین بودن آتش‌سوزی در تونل نسبت به فضای خارج تونل، بررسی رفتار آتش و دود در تونل را امری مهم می‌نماید. عوامل مختلفی در چگونگی گسترش دود در تونل و سرعت بحرانی مؤثر هستند. هندسه تونل در رفتار دود و تعیین سرعت بحرانی نقش مهمی دارد. همچنین با توجه به مطالب ذکر شده شیب تونل روی آتش‌سوزی تأثیرگذار است. با توجه به مطالعات انجام شده نتایج کار شاهسون با کار آتکینسون و وو متفاوت بوده و شاهسون در شیب‌های منفی و مثبت دو رفتار متفاوت را مشاهده کرده است. به همین علت در کار حاضر سعی شده است تا تأثیر شیب‌های مثبت و منفی تونل روی رفتار دود و سرعت بحرانی در شرایطی که در تونل آتش‌سوزی رخ می‌دهد، مورد بررسی مجدد قرار گیرد. لی و تسای به بررسی انسداد تونل در شرایطی که وسایل نقلیه در بالادست محل آتش‌سوزی قرار گرفته‌اند، پرداخته‌اند و شاهسون انسداد تونل را از منظر تغییر عرض و ارتفاع منبع آتش‌سوزی مورد مطالعه قرار داده است. در کار حاضر به بررسی انسداد تونل در شرایط تک وسیله نقلیه و شرایطی که وسایل نقلیه در کل تونل چیده شده است پرداخته شده است. در کار حاضر برای مدل‌سازی آتش‌سوزی در تونل از نرم‌افزار منبع باز اف‌دی‌اس استفاده شده است. با استفاده از این نرم‌افزار محیط آتش‌سوزی با یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی از جریان سیال واکنشی، شبیه‌سازی می‌شود [12].

2- مدل‌سازی میدان جریان

در نرم‌افزار اف‌دی‌اس برای مدل‌سازی احتراق، معادلات ناویر استوکس به همراه معادله انرژی و بقای گونه‌ها با استفاده از فرمول‌بندی عدد ماخ پایین[2] حل می‌شوند [12].

- بقای جرم (رابطه (1)):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot\rho u=\dot{m}_b''' \qquad (1)$$

- بقای گونه‌ها (رابطه (2)):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_\alpha)+\nabla\cdot\rho Y_\alpha u=\nabla\cdot\rho D_\alpha\nabla Y_\alpha+\dot{m}_\alpha'''+\dot{m}_{b,\alpha}''' \qquad (2)$$

در معادلات بقای جرم و گونه‌ها، $\dot{m}_b'''=\sum_\alpha \dot{m}_{b,\alpha}'''$ که نرخ تولید گونه‌هایی که از تبخیر قطرات و ذرات سوخت حاصل می‌شود، هستند و به صورت جمله چشمه ظاهر شده‌اند.

- بقای مومنتم (رابطه (3)):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u)+\nabla\cdot\rho uu+\nabla p=\rho g+f_b+\nabla\cdot\tau_{ij} \qquad (3)$$

- بقای انرژی (رابطه (4)):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s)+\nabla\cdot\rho h_s u+\nabla p=\frac{Dp}{Dt}+\dot{q}'''-\dot{q}_b'''-\nabla\cdot\dot{q}''+\varepsilon \qquad (4)$$

در معادله انرژی جمله $\dot{q}'''$ نرخ انرژی آزاد شده بر واحد حجم توسط واکنش شیمیایی است (رابطه (5)).

$$\dot{q}''=-k\nabla T-\sum_\alpha h_{s,\alpha}\rho D_\alpha\nabla Y_\alpha+\dot{q}_r'' \qquad (5)$$

- معادله حالت (رابطه (6)):

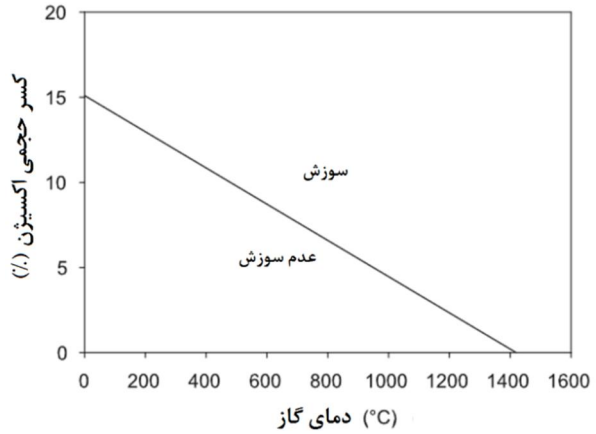
$$P=\frac{\rho RT}{\overline{W}} \qquad (6)$$

در معادله انرژی نرخ گرمای آزاد شده بر واحد حجم که جمله چشمه است، توسط واکنش شیمیایی از رابطه (7) محاسبه می‌شود [12].

$$\dot{q}'''=\min\left[\frac{\rho\max(Y_F,sY_{O_2})}{\delta t}\Delta H,\dot{q}_{max}'''\right]$$

$$s=\frac{W_F}{\nu_{O_2}W_{O_2}}\quad;\quad \dot{q}_{max}'''=\frac{\dot{q}_{max}''}{(\delta x\,\delta y\,\delta z)^{\frac{1}{3}}} \qquad (7)$$

در رابطه (7)، $\dot{q}_{max}'''$ نرخ گرمای آزاد شده بر واحد حجم و $\dot{q}_{max}''$ ماکزیمم مقدار نرخ گرمای آزاد شده بر واحد سطح شعله می‌باشد. در این معادله فرض شده است که به محض اختلاط سوخت و هوا، واکنش رخ داده است. این فرض برای آتش‌سوزی با مقیاس بزرگ و در شرایطی که نرخ هوای ورودی تازه بالا باشد، فرض مناسبی می‌باشد. با این حال اگر هوای تازه در دسترس کم باشد و یا مواقعی که تجهیزات خاموش‌سازی احتراق مانند اسپری آب یا دی‌اکسیدکربن فعال شود، سوخت و هوا مخلوط شده اما محترق نمی‌شود. این پدیده به عنوان خاموشی محلی[3] شناخته می‌شود. مکانیزم فیزیکی این پدیده بسیار پیچیده بوده و امروزه مطالعات بسیاری بر روی آن انجام می‌گردد. در نرم‌افزار منبع باز اف‌دی‌اس، روشی ساده برای شبیه‌سازی این پدیده اعمال شده است. خاموشی محلی براساس غلظت محلی اکسیژن و دمای گاز مجاور آتش مطابق شکل 1 محاسبه می‌شود. در این شکل محدوده‌ای که شرایط انجام واکنش وجود داشته و یا واکنش رخ نمی‌دهد، تعیین شده است. بنابراین در هر سلول محاسباتی برای بررسی انجام واکنش و در نتیجه محاسبه نرخ گرمای آزاد شده بر واحد حجم باید شرط موجود در شکل 1 ارضاء شود[12]. با توجه به این شکل، اگر در سلول محاسباتی شرایط دما و درصد حجمی اکسیژن به صورتی باشد که در ناحیه سوزش[4] قرار گیرد، نرخ گرمای آزاد شده بر واحد حجم از رابطه (7) محاسبه می‌شود [12].



شکل 1 محل مجاز و غیر مجاز احتراق [12]

1- Fire Dynamics Simulator
2- Low Mach Number

3- Local Extinction
4-Burn

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.7.6]

در کار حاضر برای مدل‌سازی آشفتگی جریان از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. با متوسط گیری مکانی از معادلات حاکم با استفاده از فیلتری با پهنای Δ، تنش رینولدز زیر شبکه τ_{ij}^{s} با روش اسماگورینسکی مدل می‌شود. لزجت اغتشاشی به صورت رابطه (8) مدل می‌شود.

$$\mu_{LES} = \rho(C_s\Delta)^2(2\bar{S}_{ij}\cdot\bar{S}_{ij} - \frac{2}{3}(\nabla\cdot\bar{u})^2)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

که C_s یک ثابت تجربی است. ضریب C_s ضریب تطبیقی در مدل اسماگورینسکی است و مقدار آن در جریان‌های متفاوت از 0/094 تا 0/2 تغییر می‌کند که در یک جریان معین مقدار آن عدد ثابتی خواهد بود [13]. ضریب C_s در کد اف‌دی‌اس، به صورت پیش‌فرض 0/2 در نظر گرفته شده است [12].

پارامترهای نفوذ مثل هدایت حرارتی و نفوذ جرم به صورت رابطه (9) تعریف می‌شوند.

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES}c_p}{\mathrm{Pr}_t};(\rho D)_{l,LES} = \frac{\mu_{LES}}{\mathrm{Sc}_t} \quad (9)$$

عدد پرانتل Pr و عدد اشمیت Sc ثابت در نظر گرفته می‌شوند و در کد اف-دی‌اس به صورت پیش‌فرض 0/5 در نظر گرفته شده‌اند [12].

2-1- مدل شیمی سریع با استفاده از روش کسر مخلوط

در بسیاری از سیستم‌های احتراقی، واکنش دهنده‌ها از مسیرهای مجزایی به صورت سوخت و اکسیدکننده وارد می‌شود. این‌گونه مسائل که به نام احتراق غیرپیش‌آمیخته شناخته می‌شوند، یکی از پیچیده‌ترین مسائل در بین پدیده-های حل نشده علوم مهندسی می‌باشد. مرور بسیار مناسبی توسط بیلگر برای شبیه‌سازی احتراق غیرپیش‌آمیخته آشفته ارائه شده است. در این‌گونه مسائل فرضیات مختلفی به منظور ساده‌سازی جریان احتراقی غیرپیش‌آمیخته آشفته ارائه شده است. از آن جمله می‌توان به فرض واکنش سریع در شرایط با دمای بالای محیط یا اختلاط سریع در شرایط با نرخ آشفتگی بالا اشاره نمود [14]. در بسیاری از شرایط مانند آتش‌سوزی در تونل، می‌توان فرض نمود که واکنش با نرخ بالایی رخ داده و از این رو می‌توان فرض نمود که به محض اختلاط سوخت و هوا، واکنش به صورت کامل رخ می‌دهد. در صورتی که مقیاس زمانی احتراق در مقایسه با مقیاس زمانی اختلاط بسیار کم باشد، می‌توان از فرض شیمی سریع بهره جست. از این رو می‌توان در این شرایط غلظت لحظه‌ای گونه‌ها و دما را براساس غلظت لحظه‌ای یک متغیر اسکالر پایا بیان نمود [15]. یک روش عمومی بهره‌گیری از متغیری به نام کسر مخلوط[1] به عنوان یک متغیر اسکالر پایا می‌باشد. در صورتی که در سیستم احتراقی تنها دو مسیر ورودی شامل ورودی سوخت و ورودی هوا وجود داشته و بر اثر واکنش تنها یک محصول تولید شود، می‌توان اسکالر پایای کسر مخلوط را به صورت رابطه (10) تعریف کرد [16].

$$z = \frac{\text{جرم عناصری که منشأ آنها از جریان سوخت می‌باشد}}{\text{جرم کل مخلوط}} \quad (10)$$

اگر واکنش کلی به صورت زیر باشد:

$$\{(F/O)_{st}\ \text{kg of F}\} + \{1\ \text{kg of O}\} \rightarrow \{[1+(F/O)_{st}]\ \text{kg of P}\}$$

کسر جرمی سوخت و اکسیدکننده به صورت رابطه (11) به هم مرتبط می‌شوند.

$$Z = \frac{[Y_F - (F/O)_{st}Y_O]_M - [Y_F - (F/O)_{st}Y_O]_A}{[Y_F - (F/O)_{st}Y_O]_F - [Y_F - (F/O)_{st}Y_O]_A} \quad (11)$$

که در آن اندیس M مربوط به مخلوط، F مربوط به سوخت و A مربوط به هواست.

با فرض نفوذ یکسان، معادلات بقای گونه‌ها به یک معادله برای کسر مخلوط کاهش می‌یابد و به صورت رابطه (12) بیان می‌شود [17،18].

1- Mixture Fraction

$$\frac{\partial\rho Z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Z) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho D\frac{\partial Z}{\partial x_i}) \quad (12)$$

اگر فرض شود که واکنش سوخت و هوا سریع و کامل رخ دهد، میزان اختلاط سوخت و هوا کنترل کننده میدان حل می‌باشد. در کد اف‌دی‌اس مدل احتراقی کسر مخلوط، برای دو حالت واکنش تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای اعمال می‌شود. با در نظر گرفتن اینکه واکنش تک مرحله‌ای یا دو مرحله‌ای باشد، کسر مخلوط به دو یا سه جزء تقسیم می‌شود. در کار حاضر مدل احتراقی کسر مخلوط برای واکنش تک مرحله‌ای در نظر گرفته شده است.

2-2- مدل شیمی سریع با استفاده از روش کسر مخلوط

با در نظر گرفتن واکنش تک مرحله‌ای به صورت زیر [12]:

$$C_xH_yO_zN_aM_b + v_{O_2}O_2 \rightarrow v_{CO_2}CO_2 + v_{H_{2O}}H_2O + v_{CO}CO + v_S S + v_{N_2}N_2 + v_M M$$

رابطه کسر مخلوط را می‌توان به صورت رابطه ساده (13) در نظر گرفت [12].

$$Z = \frac{sY_F - Y_O + Y_O^{\infty}}{sY_F^{I} + Y_O^{\infty}} \quad (13)$$

در واکنش یک مرحله‌ای، s دوده و M مربوط به ترکیبات غیر از کربن، هیدروژن، اکسیژن موجود در سوخت است. در رابطه (13)، I مربوط به جایی است که فقط سوخت وجود دارد و ∞ مربوط به جایی است که فقط هوا وجود دارد [12].

در واکنش یک مرحله‌ای، کسر مخلوط از دو جزء تشکیل شده است و به صورت $Z = Z_1 + Z_2$ که از روابط (14) و (15) بدست می‌آیند، تعریف می‌شود [12].

$$Z_1 = Y_F \quad (14)$$

$$Z_2 = \frac{W_F}{xW_{CO_2}}Y_{CO_2} + \frac{W_F}{xW_{CO}}Y_{CO} + \frac{W_F}{xW_S}Y_S \quad (15)$$

دوده[2] به صورت ترکیبی از کربن و هیدروژن در نظر گرفته می‌شود [12].

دو متغیر y_{CO} و y_S مقداری از سوخت هستند که به منوکسیدکربن و دوده تبدیل می‌شوند. مقادیر آنها از طریق نتایج تجربی و با استفاده از نتایج بعد از شعله[3] در نظر گرفته می‌شود. در این حالت اجزایِ کسر مخلوط به صورت روابط (16) و (17) بدست می‌آیند [12].

$$Z_1 = \frac{Y_F}{Y_F^{I}} \quad (16)$$

$$Z_2 = \frac{W_F}{[x - v_{CO} - (1-X_H)v_S]W_{CO_2}}\frac{Y_{CO_2}}{Y_F^{I}} \quad (17)$$

3- مشخصات هندسه مورد مطالعه

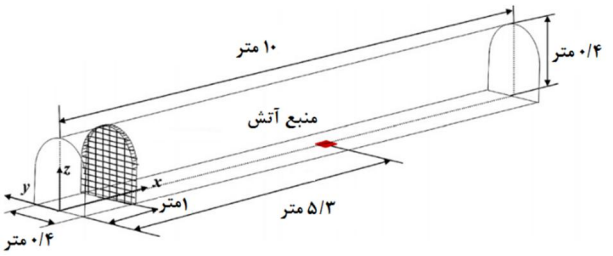
جهت مطالعه آتش‌سوزی و بررسی تهویه در تونل، هندسه مورد مطالعه توسط روح و همکارانش [7] که یک تونل یک طرفه است، مبنای مطالعه در این مقاله قرار گرفته است.

آزمایش انجام شده توسط روح و همکاران در تونلی به طول 10 متر و عرض و ارتفاع 0/4 متر انجام گرفت. در واقع آنها با استفاده از رابطه تشابهی عدد فرود، ابعاد یک تونل واقعی با طول 200 متر و عرض و ارتفاع 8 متر را به مقیاس طولی 20 به 1 بردند. همچنین نرخ گرمای آزاد شده از سطح سوخت برای تونل مورد بررسی، با استفاده از رابطه (18) که از رابطه تشابهی عدد فرود بدست آمده، محاسبه می‌شود [7،19].

$$Q^M = Q^F\left(\frac{l^M}{l^F}\right)^{5/2} \quad (18)$$

2- Soot Yield
3- Post Flame

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.7.6]



شکل 2 شکل و ابعاد تونل مدل شده [19]

دررابطه (18) Q نرخ گرمای آزاد شده، بالانویس M مربوط به مدل و بالانویس F مربوط به مقیاس واقعی است. ورودی تونل به یک تونل باد متصل است و خروجی تونل با محیط در ارتباط است. منبع آتش‌سوزی در فاصله 5/3 متری از ورودی تونل قرار دارد. برای اندازه‌گیری دما و دود، از 31 عدد ترموکوپل در عرض 0/2 متر و در فاصله 2 سانتی‌متری از سقف تونل استفاده شده است. آزمایش برای آتش‌سوزی استخری سوخت هپتان با گرمای احتراق 44600 کیلوژول بر کیلوگرم، انجام شده است. سطح سوخت در ابعاد (8/5 در 8/5) سانتی‌متر مربع و در ارتفاع 2 سانتی‌متری از کف تونل قرار دارد. هندسه مورد بررسی در شکل 2 نشان داده شده است. در تمامی بررسی‌های انجام شده در کار حاضر نیز سوخت هپتان با سطح (8/5 در 8/5) سانتی‌مترمربع و در ارتفاع 2 سانتی‌متری از کف تونل و در فاصله 5/3 متری از ورودی تونل، در نظر گرفته شده است.

برای شبیه‌سازی عددی با در نظر گرفتن هندسه تونل مورد بررسی، نرخ گرمای آزاد شده 12/9 کیلووات انتخاب شده است. دمای اولیه محیط نیز مطابق مرجع [7] 20 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

4- روش عددی حل معادلات

هسته اصلی الگوریتم نرم‌افزار اف‌دی‌اس براساس تئوری صریح پیش بینی و تصحیح[1] و روش رانگ کوتا مرتبه دوم با دقت از مرتبه دو زمان و مکان است. این کد معادلات بقاء را با روش اختلاف محدود[2] حل می‌کند [12]. در نرم‌افزار اف‌دی‌اس، عبارات جابه‌جایی در مرحله پیش‌بینی به روش بالادست گسسته شده و در مرحله تصحیح به روش پایین‌دست گسسته شده‌اند. جملات دیورژانس یا نفوذ مواد و نفوذ گرمایی نیز در دو مرحله پیش‌بینی و تصحیح با استفاده از روش گسسته‌سازی مرکزی، گسسته می‌شوند [12].

شبیه‌سازی آتش‌سوزی برای هندسه مورد نظر بصورت پردازش موازی صورت گرفته است. پردازش موازی کار حاضر با استفاده از روش MPI[3] و بر روی سیستمی با حافظه اشتراک گذاشته شده صورت گرفته است. این شبیه-سازی با استفاده از یک سامانه 8 هسته‌ای با قدرت پردازش 3/4 گیگا هرتز و 16 گیگا بایت حافظه جانبی انجام شده است.

4-1- شرایط مرزی

برای مدل کردن آتش‌سوزی، سطح سوخت هپتان در کف تونل در نظر گرفته شده است. در واقع برای اعمال شرط مرزی سوخت، شدت گرمای آزاد شده از سطح سوخت تعریف می‌شود.

در حالت بدون تهویه از شرایط محیطی و در حالت با تهویه، از سرعت ورودی[4] به عنوان شرط مرزی در ورودی تونل استفاده شده است. در خروجی تونل از شرط مرزی محیط باز[5] استفاده شده است. در این نوع شرط مرزی، با توجه به جهت جریان که وارد شونده[6] یا خارج شونده[7] باشد، مقدار فشار تعیین می‌شود. نحوه محاسبه فشار برای جریان خارج شونده به صورت رابطه (19) و برای جریان وارد شونده به صورت رابطه (20) می‌باشد.

$$P=\frac{\tilde{p}}{\rho_\infty}+\frac{|u|^2}{2} \tag{19}$$

$$P=\frac{\tilde{p}}{\rho_\infty} \tag{20}$$

در رابطه (19)، u، آخرین مقدار سرعت روی مرز است.

4-2- شبکه محاسباتی

برای شبیه‌سازی مناسب آتش‌سوزی که جریان آشفته آن با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ شبیه‌سازی می‌شود، نیاز به تخمینی قابل قبول از ابعاد سلول‌های شبکه محاسباتی است تا پدیده‌های غالب نیز مدل‌سازی شوند. بام، مک گراتان و رهم [20] مک کافری [21] با تعریف طول مقیاس مشخصه به صورت رابطه (21)، بیان کردند که دقت کافی برای شبیه‌سازی وقتی بدست می‌آید که این طول مقیاس حداقل با 10 سلول شبکه محاسباتی پوشش داده شود. این طول مقیاس با استفاده از نرخ گرمای آزاد شده تعریف می‌شود (رابطه (21)).

$$D^*=\left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}}\right)^{\frac{2}{5}} \tag{21}$$

البته در بعضی مراجع بیان شده است که طول مقیاس می‌تواند با 4 تا 16 سلول محاسباتی پوشش داده شود [12].

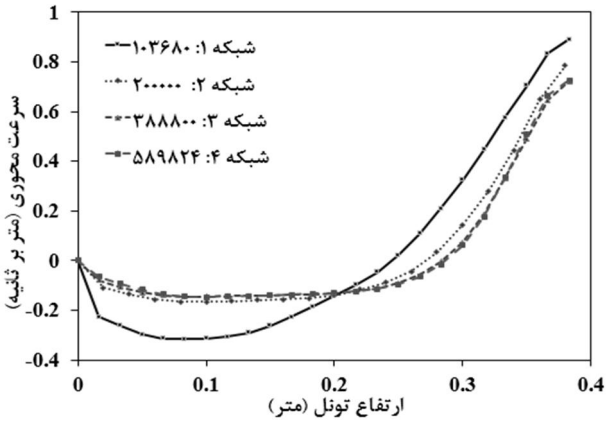
برای شبیه‌سازی آتش‌سوزی در تونل از شبکه‌ای شش وجهی مستطیلی با ساختار منظم استفاده شده است. شکل 3، نمودار تغییرات سرعت محوری[8] حاصل از آتش‌سوزی هپتان با هوادر فاصله طولی 2/7 متری از محل آتش‌سوزی (به سمت خروجی) و روی خط مرکزی، در پنج شبکه‌بندی مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل محور عمودی سرعت محوری و محور افقی مختصات ارتفاع تونل را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 3 مشاهده می‌شود، نمودار تغییرات سرعت شبکه‌های 2، 3 و 4 بسیار مشابه بوده و اختلاف نمودارهای تغییرات سرعت با افزایش تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی، کاهش یافته است. روند کاهش اختلاف نمودارهای تغییرات سرعت، نشان از استقلال نتایج حل (یا مشابه) شبکه 3 از شبکه محاسباتی دارد. از این‌رو مطالعات انجام شده در کار حاضر، با بهره‌گیری از شبکه 3 انجام شده است.

به ترتیب تعداد سلول‌های محاسباتی در جهت طول، عرض و ارتفاع تونل، 675، 24 و 24 در نظر گرفته شده‌اند. شبکه محاسباتی انتخاب شده به صورت شکل 4 نمایش داده شده است. انتخاب شبکه محاسباتی به این صورت بوده است که 4 متر وسط تونل که ناحیه آتش‌سوزی در آن واقع شده است به دلیل اینکه اغلب پدیده‌های غالب و تغییرات شدید در این ناحیه رخ می‌دهد، ریزتر و بقیه نواحی درشت‌تر هستند.

با توجه به این که هندسه سطح مقطع تونل، به صورت نعل اسبی است، در کار حاضر سطح مقطع به صورت پله‌ای اعمال شده است. این مهم به علت محدودیت نرم‌افزار مورد استفاده است. زیرا در نرم‌افزار اف‌دی‌اس امکان تعریف سطوح منحنی و انتخاب شبکه محاسباتی مناسب آن نیست. به همین علت هندسه سطح مقطع به صورت پله‌ای تعریف شده است و شبکه محاسباتی متناسب با آن انتخاب شده است. شکل 5 هندسه سطح مقطع تونل را نشان می‌دهد.

1- Explicit Predictor-Corrector Scheme
2- Finite Difference
3- Message Passing Interface
4- Velocity Inlet
5- Open Boundary Condition
6- Ingoing
7- Outgoing
8- منظور از سرعت محوری، سرعت در راستای طول تونل می‌باشد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.7.6]



شکل 3 توزیع سرعت نسبت به ارتفاع در فاصله 2/7 متری از محل آتش‌سوزی در شبکه‌های مختلف محاسباتی برای نرخ گرمای آزاد شده 12/9 کیلووات

4-3- صحت‌آزمایی شبیه‌سازی انجام شده

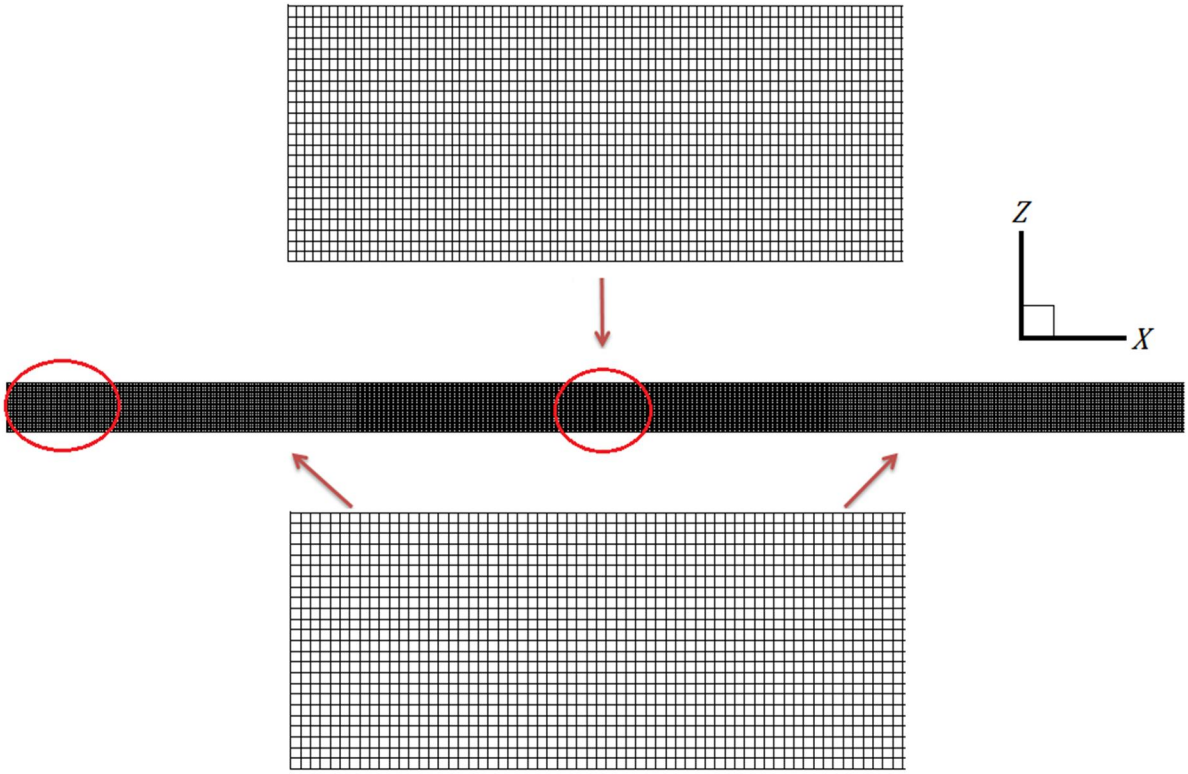
به منظور اعتباربخشی شبیه‌سازی‌های انجام شده در پژوهش حاضر، نتایج عددی بدست آمده از نرم‌افزار اف‌دی‌اس با نتایج تجربی مرجع [7] مقایسه شده‌اند. در شکل 6 طول برگشت دود پیش‌بینی شده با استفاده از شبیه‌سازی عددی برای سرعت‌های مختلف جریان هوای ورودی برای نرخ گرمای آزاد شده 12/9 کیلووات، نشان داده شده است. در این شکل محور افقی سرعت جریان ورودی هوا و محور عمودی مسافت برگشت دود را نشان می‌دهد. در این شکل نتایج کار حاضر با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. برای نرخ گرمای آزاد شده 12/9 کیلووات، در کار تجربی، سرعت 1/12 متر بر ثانیه که محل برخورد نمودار با محور افقی است، به عنوان سرعت بحرانی در نظر گرفته شده است. در کار حاضر به ازای سرعت 0/56، 0/75 و 0/8 متر بر ثانیه، 2/5، 1/24 و 0/84 متر برگشت دود در جهت خلاف سرعت جریان هوا و به سمت ورودی تونل مشاهده می‌شود و به ازای سرعت‌های 1/12 و 1/05 متر بر ثانیه برگشت دود وجود ندارد و دود از محل آتش‌سوزی به ترتیب 0/35 و 0/15 متر به سمت خروجی منحرف می‌شود. در نهایت می‌توان با توجه به شکل 6، محل برخورد نمودار با محور افقی برای نرخ گرمای آزاد شده 12/9 کیلووات، که سرعت 1 متر بر ثانیه است را با 11 درصد خطا به عنوان سرعت بحرانی در نظر گرفت. در واقع به ازای سرعت 1 متر بر ثانیه برگشت دود از محل آتش‌سوزی وجود ندارد.

5- نتایج و بحث

5-1- بررسی تأثیر شیب تونل

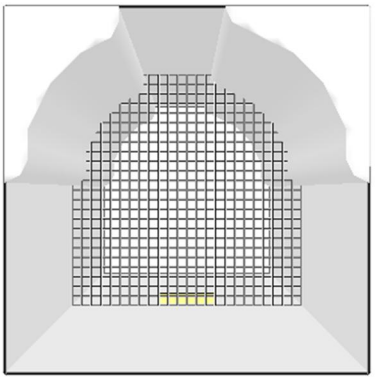
همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، هندسه تونل نقش پر رنگی در رفتار دود ایفا می‌کند. از این رو در این بخش به بررسی تأثیر شیب تونل بر روی توزیع دود در محدوده 10- درجه تا 10+ درجه پرداخته شده است. شیب مثبت در حالتی است که ورودی هوا در ارتفاع کمتری نسبت به منبع آتش قرار گرفته باشد. اگر ورودی هوا در ارتفاع بیشتری از منبع آتش باشد شیب منفی در نظر گرفته می‌شود. در شکل 7 جریان سیال (دود) در تونلی با شیب 5+ درجه مشاهده می‌شود و جریان سیال (دود) برای تونل با شیب 5- عکس این شکل است.

در شرایطی که تونل شیب مثبت دارد، ستون آتش به سمت کف تونل در جهت خروجی تونل، نزدیک می‌شود و در تونل با شیب منفی، عکس این حالت برقرار است و ستون آتش در جهت ورودی تونل به کف تونل نزدیک شده است. این پدیده به این دلیل است که دود به دلیل داشتن دمای بالا، چگالی کمتری دارد و در نتیجه در جهت ارتفاع بیشتر حرکت می‌کند.

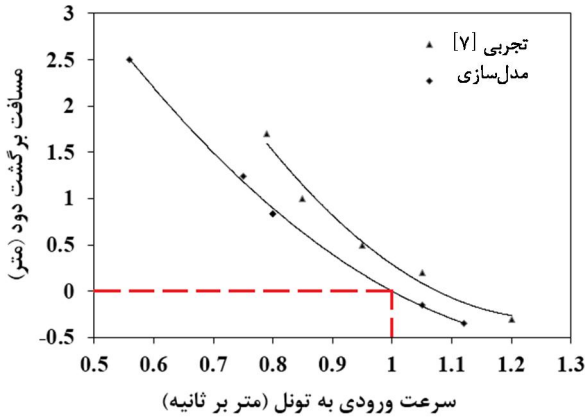


شکل 4 نمای دو بعدی شبکه محاسباتی انتخاب شده

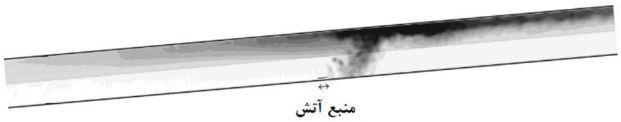
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.7.6]



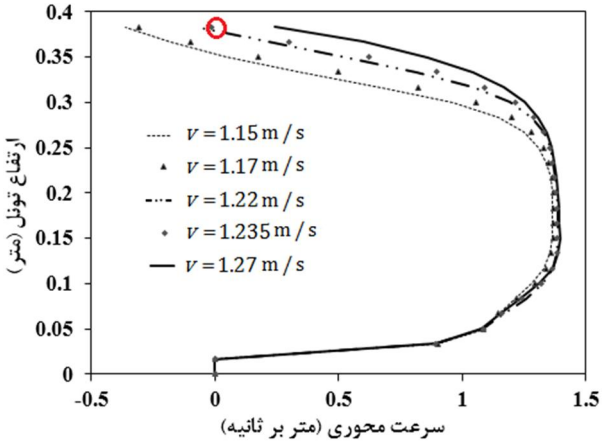
شکل 5 هندسه سطح مقطع تونل و شبکه‌بندی منتخب



شکل 6 مسافت برگشت دود به ازای سرعت‌های مختلف جریان ورودی هوا برای نرخ گرمای آزاد شده 12/9 کیلووات از سطح سوخت

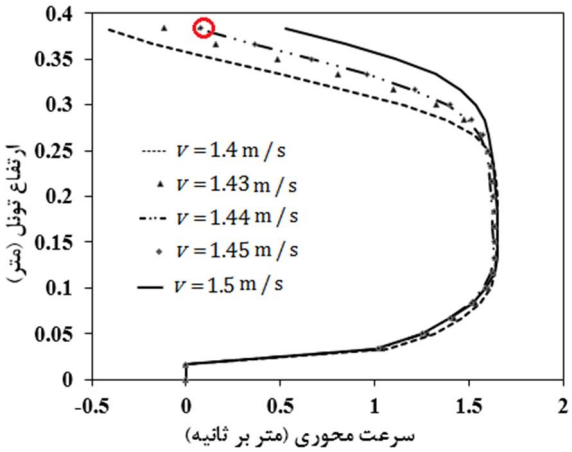


شکل 7 جریان سیال (دود) در تونلی با شیب (+5) درجه– محل آتش‌سوزی در فاصله 5/3 متری از ورودی تونل و روی خط مرکزی– نرخ گرمای آزاد شده 55/9 کیلووات

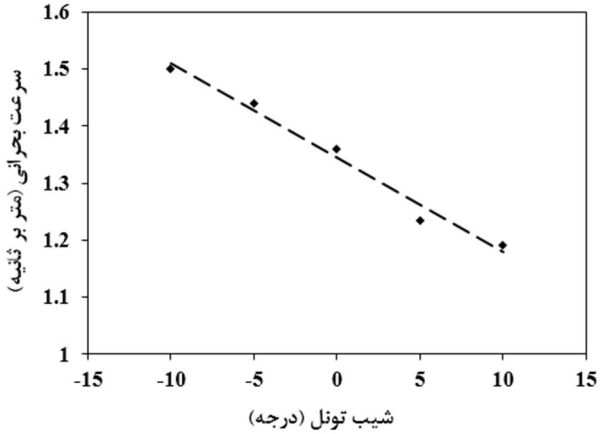


شکل 8 تغییرات سرعت افقی سیال در محل آتش‌سوزی برای نرخ گرمای آزاد شده 55/9 کیلووات با ارتفاع تونل برای تونل با شیب +5 درجه

تغییرات سرعت افقی جریان سیال با ارتفاع در محل آتش‌سوزی (فاصله 5/3 متری از ورودی تونل) و در خط مرکزی تونل، با تغییر سرعت جریان هوای ورودی برای تونل با شیب +5 درجه در شکل 8 و برای تونل با شیب 5-درجه در شکل 9 مشاهده می‌شود.



شکل 9 تغییرات سرعت افقی سیال در محل آتش‌سوزی برای نرخ گرمای آزاد شده 55/9 کیلووات با ارتفاع تونل برای تونل با شیب 5- درجه



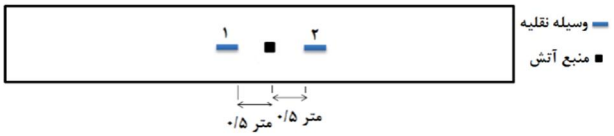
شکل 10 تغییرات سرعت بحرانی با شیب تونل برای نرخ گرمای آزاد شده 55/9 کیلووات

در این شکل‌ها محور افقی سرعت سیال در جهت طول تونل و محور عمودی ارتفاع تونل را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل 8 با علامت دایره نشان داده شده است، برای تونل با شیب +5 درجه، به ازای سرعت جریان هوای ورودی 1/24 متر بر ثانیه برگشت دود وجود ندارد و سرعت محوری در نزدیکی سقف تونل تقریباً صفر می‌باشد. همچنین به ازای شیب 5- درجه همان‌طور که در شکل 9 با علامت دایره نشان داده شده است، تقریباً به ازای سرعت 1/44متر بر ثانیه برگشت دود وجود نخواهد داشت و سرعت محوری صفر می‌باشد.

در این قسمت برای تونل با هر شیب، طول برگشت دود از محل آتش-سوزی به سمت ورودی تونل اندازه‌گیری شده و سرعت بحرانی مناسب برای آتش‌سوزی در تونل مورد نظر بدست می‌آید.

از نظر فیزیکی در تونل با شیب مثبت دود به سمت خروجی تونل حرکت می‌کند. با افزایش شیب تونل انحراف ستون آتش به سمت کف تونل در جهت خروجی بیشتر خواهد شد و در نتیجه سرعت لازم برای خروج دود و جلوگیری از برگشت آن کمتر خواهد شد. در تونل با شیب منفی عکس حالت بالا حاکم است و علاوه بر جلوگیری از برگشت معمول جریان، باید از برگشت جریان به دلیل نیروی شناوری هم جلوگیری شود. بنابراین جریانی با سرعت بالاتر به عنوان سرعت بحرانی لازم است. شکل 10 تغییرات سرعت بحرانی با شیب تونل را نشان می‌دهد. در این شکل محور افقی شیب تونل بر حسب درجه و محور عمودی سرعت بحرانی لازم برای جلوگیری از برگشت دود به سمت ورودی تونل به ازای شیب‌های مختلف تونل را نشان می‌دهد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.7.6]



شکل 11 تونل مورد بررسی با حضور منبع آتش با نرخ گرمای آزاد شده 55/9 کیلووات و وسیله نقلیه برای حالت 1 و 2

همان‌گونه که در شکل 10 مشاهده می‌شود، سرعت بحرانی به صورت خطی با شیب تونل تغییر می‌کند. از این رو رابطه خطی (22) را می‌توان برای آن پیشنهاد کرد.

$$V_c \approx V_{c,s=0}\left(1-0.0123\theta\right) \qquad (22)$$

در رابطه (22)، θ زاویه تونل بر حسب درجه و $V_{c,s=0}$ سرعت بحرانی برای تونل بدون شیب است. در این رابطه θ برای شیب‌های مثبت با علامت مثبت و برای شیب‌های منفی با علامت منفی اعمال می‌شود. همان‌گونه که در این رابطه مشاهده می‌شود، با افزایش شیب تونل (θ)، سرعت بحرانی کاهش و با کاهش شیب تونل (θ)، سرعت بحرانی افزایش می‌یابد. آتکینسون و وو [8] رابطه خطی (23) را برای تغییرات سرعت بحرانی با شیب‌های مثبت و منفی تونل ارائه نموده‌اند که بسیار به رابطه (22) نزدیک است.

$$V_c \approx V_{c,s=0}\left(1-0.014\theta\right) \qquad (23)$$

لازم به ذکر است شاهسون [11] در بررسی خود به این نتیجه رسید که در شیب‌های مثبت، سرعت بحرانی ثابت بوده و در شیب‌های منفی، سرعت بحرانی به صورت خطی با شیب تونل تغییر می‌کند. ایشان برای شرایطی که نرخ گرمای آزاد شده 6/7 کیلووات از سطح سوخت پروپان با ابعاد 0/1×0/1×0/1 متر مکعب آزاد می‌گردد، رابطه (24) را پیشنهاد دادند:

$$V_c = \begin{cases} 1 & s \geq 0 \\ 1+0.5s & s < 0 \end{cases} \qquad (24)$$

که s شیب تونل بر حسب (%) در رابطه قرار داده می‌شود.

با توجه به نتایج بدست آمده به نظر می‌رسد رابطه خطی تغییرات سرعت بحرانی با شیب تونل (بدست آمده در کار فعلی و مرجع [8]) به واقعیت نزدیکتر باشد.

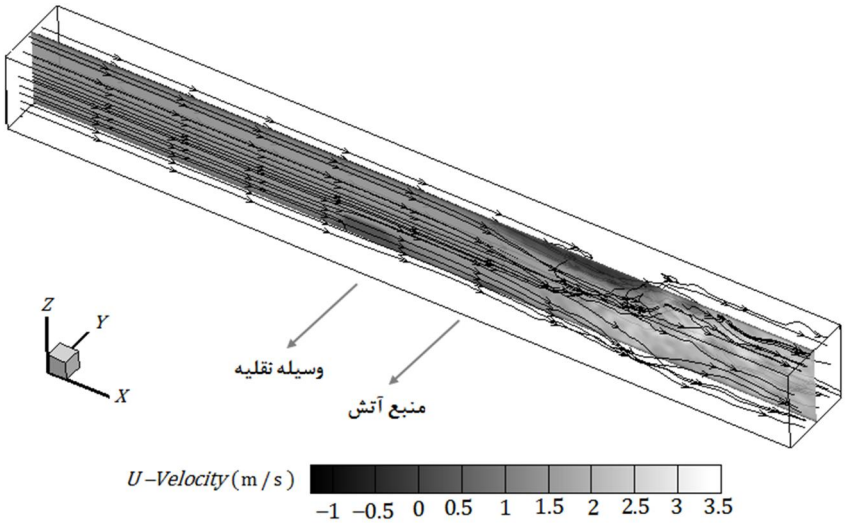
5-2- بررسی انسداد تونل

در این بخش، با ثابت ماندن محل آتش‌سوزی مانند قبل و در نظر گرفتن نرخ حرارت آزاد شده 55/9 کیلووات برای آتش‌سوزی بزرگ، تأثیر وجود وسیله نقلیه در تونل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شکل 11 دو موقعیت مورد بررسی حضور وسیله نقلیه که باعث مسدود شدن بخشی از تونل شده‌اند را نشان می‌دهد. وسیله نقلیه به صورت مکعب مستطیل، به طول 20 سانتی‌متر و سطح مقطع 8 در 8 سانتی‌مترمربع در نظر گرفته شده است. در حالت اول وسیله نقلیه قبل از محل آتش‌سوزی و در بالادست تونل قرار دارد. در حالت دوم وسیله نقلیه در پایین دست تونل قرار گرفته است. در حالت اول سرعت بحرانی 1/1725 متر بر ثانیه و در حالت دوم 1/295 متر بر ثانیه بدست آمد. وجود وسیله نقلیه در تونل باعث فشردگی جریان شده و سطح مقطع تونل را در آن ناحیه کاهش می‌دهد. از طرفی با توجه به بحث پیوستگی جریان، با کاهش سطح عبور جریان، سرعت جریان در محل انسداد تونل افزایش یافته است. از این رو در ورودی تونل که سطح عبور جریان بزرگ‌تر است، سرعت کمتری از جریان لازم است. این نکته نیز قابل توجه است که در حالت اول جریان هوای ورودی ابتدا به وسیله نقلیه می‌رسد و بعد به ناحیه آتش‌سوزی می‌رسد. انسداد تونل در آن ناحیه باعث می‌شود که جریان با سرعت بیشتری به سمت ستون دود و آتش منتقل شده و به همین دلیل سرعت در ورودی تونل کاهش می‌یابد. ولی در حالت دوم جریان ورودی به تونل ابتدا به محل آتش‌سوزی می‌رسد و در آن ناحیه با نزدیک شدن به وسیله نقلیه، سرعت کاهش می‌یابد. به همین علت سرعت بحرانی در حالت اول کمتر از حالت دوم است. در واقع می‌توان گفت محل قرار گرفتن وسیله نقلیه نیز در سرعت بحرانی تأثیرگذار است.

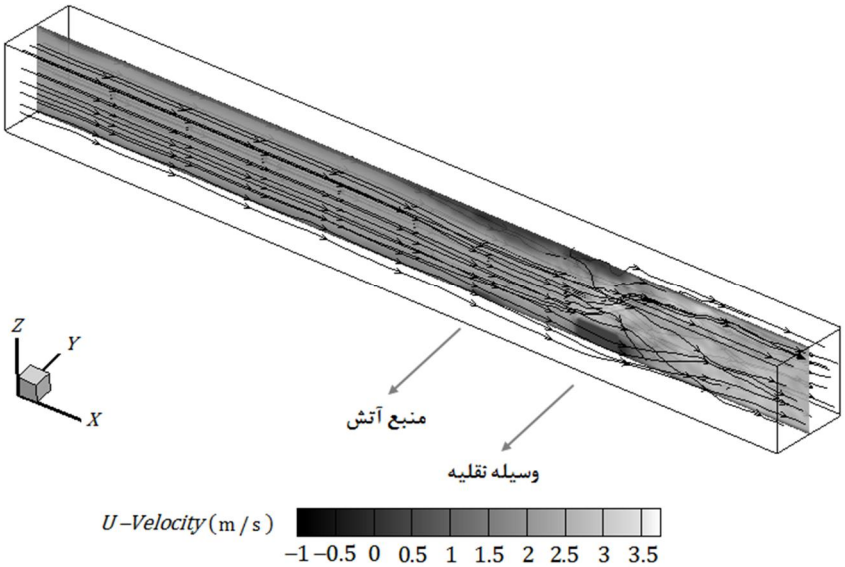
شکل‌های 12 و 13 خطوط جریان در تونل برای شرایطی که یک وسیله نقلیه در تونل وجود دارد، به ترتیب برای حالت 1 و 2 را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که خطوط جریان تقریباً به صورت مستقیم بوده و گردابه‌های بسیار ضعیفی در جلوی مانع تشکیل شده است. در واقع می‌توان گفت کاهش سرعت بحرانی در شرایطی که وسیله نقلیه در بالادست محل آتش‌سوزی قرار دارد نسبت به شرایطی که در پایین‌دست محل آتش‌سوزی قرار دارد به علت گردابه‌های ضعیف جلوی وسیله نقلیه نمی‌باشد.

شکل 14 حالتی را که 30 وسیله نقلیه به طول 20 سانتی‌متر و سطح مقطع 8 در 8 سانتی‌مترمربع در تونل در نظر گرفته شده است نشان می‌دهد. سرعت بحرانی لازم برای جلوگیری از برگشت دود در این شرایط 0/97 متر بر ثانیه بدست آمد.

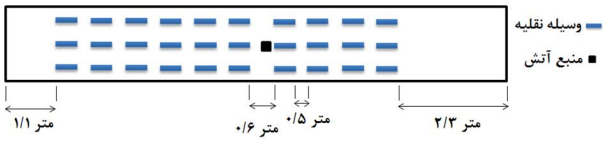


شکل 12 خطوط جریان در سه عرض از تونل برای شرایطی که وسیله نقلیه در بالادست محل آتش‌سوزی قرار گرفته است

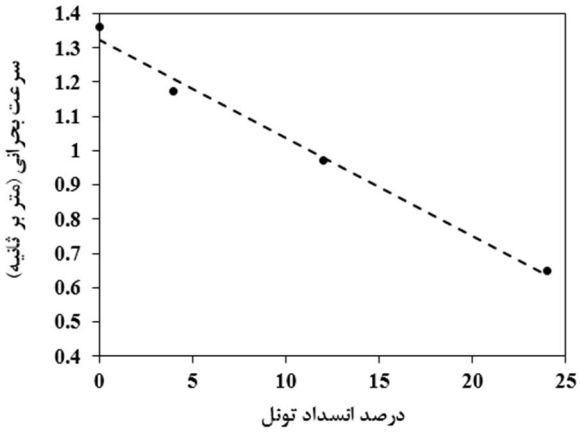
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.7.6]



شکل 13 خطوط جریان در سه عرض از تونل برای شرایطی که وسیله نقلیه در پایین دست محل آتش‌سوزی قرار گرفته است



شکل 14 تونل مورد بررسی با حضور منبع آتش با نرخ گرمای آزاد شده 55/9 کیلووات و 30 وسیله نقلیه



شکل 15 تغییرات سرعت بحرانی با درصد انسداد تونل برای نرخ گرمای آزاد شده 55/9 کیلووات

در این شرایط سرعت بحرانی از حالتی که وسیله نقلیه در تونل وجود نداشت، کمتر است. در این حالت نیز می‌توان گفت علت کاهش سرعت بحرانی همان قانون پیوستگی جریان است.

شکل 15 روند تغییرات سرعت بحرانی را با درصد انسداد تونل نشان می‌دهد. در این شکل محور افقی درصد انسداد (درصد نسبت سطح مقطع وسایل نقلیه به سطح مقطع تونل) و محور عمودی سرعت بحرانی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد انسداد برای شرایطی که آتش‌سوزی در خط مرکزی تونل قرار دارد، سرعت بحرانی کاهش می‌یابد.

6- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، به منظور بررسی آتش‌سوزی در تونل‌های بین شهری، تونل مدل به‌کار رفته در مطالعات روح و همکاران مبنای مطالعه قرار گرفت. این شبیه‌سازی به صورت سه بعدی و با استفاده از نرم‌افزار منبع باز اف‌دی‌اس به صورت پردازش موازی انجام شد. با توجه به اهمیت پارامترهای هندسی در شبیه‌سازی آتش‌سوزی در تونل‌ها، تأثیر پارامترهای هندسی شیب و انسداد تونل بر رفتار دود و سرعت بحرانی مورد بررسی قرار گرفت.

مشاهده شد که در شیب‌های مثبت ستون دود به سمت خروجی تونل منحرف می‌شود و در شیب‌های منفی عکس این حالت اتفاق می‌افتد و ستون دود به سمت ورودی تونل منحرف می‌شود. همچنین مشاهده شد که با افزایش شیب تونل، از شیب‌های منفی به سمت شیب‌های مثبت، سرعت بحرانی به صورت خطی کاهش می‌یابد.

در بررسی تأثیر انسداد تونل توسط وسایل نقلیه، یک بار بررسی در شرایط تک وسیله نقلیه و یک بار برای شرایطی که 30 وسیله نقلیه در تونل چیده شده است، صورت پذیرفت. در بررسی تک وسیله نقلیه، مشاهده شد که سرعت بحرانی نسبت به شرایطی که وسیله نقلیه در تونل حضور ندارد، کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که وقتی وسیله نقلیه در بالادست محل آتش‌سوزی قرار دارد سرعت بحرانی نسبت به زمانی که وسیله نقلیه در پایین دست محل آتش‌سوزی قرار دارد، کاهش بیشتری خواهد داشت. در بررسی انسداد تونل توسط 30 وسیله نقلیه نیز مشاهده شد که با افزایش درصد انسداد تونل سرعت بحرانی به دلیل شار جرمی ثابت کاهش می‌یابد.

7- فهرست علائم

C_p	گرمای ویژه در فشار ثابت ($Jkg^{-1}k^{-1}$)
C_s	ثابت اسماگورینسکی
D	نفوذ جرمی (m^2s^{-1})
D^*	طول مقیاس چشمه آتش
f_b	نیروی خارجی (kgm^1s^{-2})
g	شتاب گرانشی (ms^{-2})
h_s	آنتالپی محسوس (J)
K	ضریب هدایت حرارتی ($Js^{-1}m^{-1}k^{-1}$)
L	مقیاس طول (m)
$\dot{m}'''$	شار جرمی ($kgm^{-3}s^{-1}$)
$\dot{m}_b'''$	نرخ تبخیر گونه‌ها ($kgm^{-3}s^{-1}$)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.7.6]

p	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
Pr	عدد پرانتل
Q	نرخ گرمای آزاد شده (Js^{-1})
$\dot{q}''$	شار حرارتی هدایتی و تشعشعی ($Js^{-1}m^{-2}$)
$\dot{q}''_b$	انرژی منتقل شده به منظور تبخیر قطرات مایع($Js^{-1}\ m^{-2}$)
$\dot{q}'''$	نرخ انرژی آزاد شده بر واحد حجم ($Js^{-1}\ m^{-3}$)
R	ثابت جهانی گازها ($Jmol^{-1}$)
Sc	عدد اشمیت
t	زمان (s)
T	دما (k)
u	سرعت در جهت محور طولی (ms^{-1})
V	سرعت (ms^{-1})
x	مختصات طولی (m)
Y	کسرجرمی
z	کسرمخلوط

علایم یونانی

μ_{LES}	لزجت دینامیکی آشفتگی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
Δ	پهنای فیلتر (m)
τ_{ij}	تانسور نرخ کرنش ($kgm^{-1}s^{-2}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
ε	نرخ اتلاف انرژی
α	گونه‌ها

بالانویس‌ها

F	مقیاس کلی
I	کسر جرمی سوخت در مسیر تأمین سوخت
M	مقیاس مدل
∞	کسر جرمی اکسیژن در هوای محیط

زیرنویس‌ها

A	هوا
C	شرایط بحرانی
CO	منوکسیدکربن
CO_2	دی اکسیدکربن
F	سوخت
H	هیدروژن
M	مخلوط
O	اکسیژن
S	دوده
st	استوکیومتریک
∞	شرایط جوی

8- مراجع

[1] M. Pourghasemi, *Numerical simulating of a railcar fire in tunnel,* M.S Thesis, Sharif University, Tehran, Iran, 2011. (In Persian)

[2] A. Lonnermark, *On the Characteristics of Fires in Tunnels,* PhD Thesis, Lund University, Scandinavia, 2005.

[3] P. H. Thomas, The movement of smoke in horizontal passages against an air flow*, Fire Research Station Note No. 723, Fire Research Station, UK,* 1968.

[4] Y. Oka, G. T. Atkinson, Control of smoke flow in tunnel fires", *Fire Safety Journal,* Vol. 25, pp. 305-322, 1995.

[5] Y. Wu, M. Z. A. Bakar, Control of smoke FLow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems a study of the critical velocity", *Fire Safety Journal,* Vol. 35, pp. 363-390, 2000.

[6] K. C. Tsai, Y. P. Lee, S. K. Lee, Critical ventilation velocity for tunnel fires occurring near tunnel exits, *Fire Safety Journal,* Vol. 46, No. 8, pp. 556-557, 2011.

[7] J. S. Roh, S. S. Yang, H. S. Ryou, M. O. Yoon, Y. T. Jeong, An experimental study on the effect of ventilation velocity on burning rate intunnel fires—heptane pool fire case, *Building and Environment,* Vol. 43, No. 7, pp. 1225-1231, 2008.

[8] L. H. Hu, L. F. Chen, L. Wu, Y. F. Li, J. Y. Zhang, N. Meng, An experimental investigation and correlation on buoyant gas temperature below ceilingin a slopping tunnel fire, *Applied Thermal Engineering,* Vol. 51, No. 1-2, pp. 246-254, 2013.

[9] W. K. Chow, K. Y. Wong, W. Y. Chung, Longitudinal ventilation for smoke control in a tilted tunnel by scale modeling, *Tunnelling and Underground Space Technology,* Vol. 25, No. 2, pp. 122-128, 2010.

[10] Y. P. Lee, K. C. Tsai, Effect of vehicular blockage on critical ventilation velocity and tunnel fire behavior in longitudinally ventilated tunnels, *Fire Safety Journal,* Vol. 53, pp. 35-42, 2012.

[11] M. Shahsavan, *Fire modeling in tunnel with FDS,* M.Sc Thesis, Sharif University, Tehran, Iran, 2011. (In Persian)

[12] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm, W. Mell, R. McDermott, Fire dynamics simulator (version 5) technical reference guide, National Institute of Standards and Technology, 2010.

[13] G. Heidarinejad, *An introduction to turbulence,* 2009. (In Persian)

[14] R. W. Bilger, Turbulent diffusion flames, *Fluid Mech,* Vol. 21, pp. 101-135, 1989.

[15] K. K. Kuo, *Principles of combustion,* 1986.

[16] S. R. Turns, *An introduction to combustion*: McGraw-Hill Higher Education, 2000.

[17] Fluent 6.3 user guide, Fluent Inc.Centerra Resource Park, 2006.

[18] T. Poinsot, D. Veynante, *Theoretical and numerical combustion*: R.T.Edwards, 2005.

[19] J. S. Roh, H. S. Ryou, D. H. Kim, W. S. Jung, Y. J. Jang, Critical velocity and burning rate in pool fire during longitudinal ventilation, *Tunnelling and Underground Space Technology,* Vol. 22, No. 3, pp. 262-271, 2007.

[20] H. R. Baum, K. B. Mcgrattan, R. G. Rehm, Three dimensional simulation of fire plume dynamics, *Fire Safety Science-Proceedings of The Fifth International Symposium,* pp. 511-522.

[21] H. R. Baum, B. J. Mccaffrey, Fire induced flow field-theory and experiment, *Fire Safety Journal,* pp. 129-148, 1989.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.11.7.6]