مجله مهندسی مکانیک و ارتعاشات زمستان ۱۴۰۰، دوره ۱۲، شماره ٤ ، ص‌ص .۲۵-۳۰.

فصلنامه

مهندسی مکانیک و ارتعاشات

jvibme.semnaniau.ac.ir

شبیه سازی عددی رفتار دود در شرایط حریق در یک تونل کوتاه شهری

مهدی رفیعی [۱ و ۲*]

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران

۲- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران

* سمنان، ۳۵۱۴۵-۱۷۹، mehdierafiei@gmail.com

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱ مرداد ۱۴۰۰

پذیرش: ۲۰ آبان ۱۴۰۰

ارائه در سایت: ۲۰ بهمن ۱۴۰۰

کلید واژگان

تهویه طبیعی

شبیه سازی CFD

مدیریت دود

ایمنی تونل

چکیده

همزمان با توسعه روزافزون کشورها، نیاز روزمره به حمل و نقل کالاها و تجهیزات مختلف و بطورکلی مسافرت به دلایل متعدد، در حال افزایش است و به همین دلیل در سال های اخیر تعداد انواع خودورها افزایش چشمگیری داشته است، به نحوی که در کلان شهرها این موضوع باعث ترافیک سنگین در بزرگراه ها و معابر مختلف گردیده است. برای تسهیل و روان سازی ترافیک اقدامات و رویکردهای مختلفی از جمله حمل و نقل عمومی مورد توجه قرار گرفته است. اما به هر حال، راه حل رفع برخی از گره های ترافیکی به ویژه در کلان شهرها، ساخت تونل های شهری می باشد. از این روی، در سال های اخیر تونل های شهری به عنوان راهکاری برای تسهیل ترافیک مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، مطالعه ایمنی در تونل ها اهمیت زیادی پیدا می کند. هدف این مقاله شبیه سازی حریق در یک تونل کوتاه با تهویه طبیعی برای ملاحظه رفتار دود در سناریوهای مختلف جریان طبیعی هوا در تونل می باشد. نتایج مدل سازی CFD نشان داد که حریق محدود (خودرو سواری) مشکلی برای افراد و همچنین تیم های امدادی به ویژه اطفاء حریق ایجاد نخواهد کرد.

Numerical simulation of smoke behavior in fire conditions in a short urban tunnel

Mehdi Rafiei

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran
2- Energy and Sustainable Development Research Center, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran

Article Information

Original Research Paper
Received 23 July 2021
Accepted 11 November 2021
Available Online 9 February 2022

Keywords
Natural ventilation
CFD simulation
Smoke management
Tunnel safety

ABSTRACT

Along with the increasing development of countries, the daily need to transport various goods and equipment and travel in general for many reasons is increasing and for this reason, the number of different types of cars has significantly increased in recent years. In this way, this issue has caused heavy traffic on highways and various roads in big cities. Various actions and approaches, including public transportation, have been taken into consideration to facilitate the traffic. However, in some cases the solution to facilitate traffic jams, especially in big cities, is to build urban tunnels. Therefore, in recent years, urban tunnels have been considered as a solution to facilitate traffic. In this regard, the study of safety in tunnels becomes very important. The aim of this article is to simulate a fire in a short tunnel with natural ventilation to consider the behavior of smoke in different scenarios of natural air flow in the tunnel. The results of CFD simulation showed that limited fire (usual small passenger cars) will not cause problems for people as well as rescue team, especially fire extinguishing.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Mehdi Rafiei, simulation of fire and smoke behavior in fire conditions in a short urban tunnel, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 12, No. 4, pp. 25-30, 2022 (In Persian)

۱- مقدمه

ایمنی در تونل ها همواره به عنوان یکی از مباحث مهم و کلیدی در مراجع علمی و استانداردها مطرح شده است[1-3]. در مقوله ایمنی تونل ها مباحث مهمی در نظر گرفته می شود که امکان بررسی همه آنها در اینجا مقدور نیست اما یکی از بحث های مهم در ایمنی تونل ها در حقیقت شیوه برخورد با شرایط اضطراری به ویژه در شرایط حریق می باشد. در این راستا مطالعات زیادی انجام شده و موضوعات مهمی نظیر سرعت بحرانی، توزیع دما و دود و ... در حوادث منجر به حریق در تونل ها در کشورهای مختلف بررسی و تحلیل شده است[4] . هدف از بررسی سرعت بحرانی و توزیع دود داغ در شرایط حریق در واقع ارائه تصویری از تونل و ارزیابی آثار حریق احتمالی برای افراد، سازه و تجهیزات تونل می باشد[5,7]. نتایج این مطالعات که معمولاً قبل از ساخت و راه اندازی تونل ها انجام می گردد، می تواند به طراحی درست تجهیزات و آمادگی های لازم برای شرایط اضطراری کمک کند و هدف نهایی همه تلاش ها در حقیقت به حداقل رساندن آثار مخرب حریق احتمالی در تونل ها می باشد[8]. سیستم تهویه در مدیریت دود و بطور کلی ایمنی تونل ها نقش اصلی و کلیدی را به عهده دارد. با توجه به هزینه های بسیار بالای سیستم تهویه مکانیکی، در صورت امکان تحت شرایطی از سیستم تهویه طبیعی برای تخلیه دود در شرایط حریق در تونل ها استفاده می شود[9] . سیستم تهویه طبیعی در تونل در شرایط خاص قابل استفاده می باشد، اما در تونل های کوتاه اولین گزینه همان تهویه طبیعی می باشد. هدف اصلی این مقاله شبیه سازی عددی و بررسی رفتار دود در شرایط حریق در یک تونل کوتاه با تهویه طبیعی می باشد.

۲- شرایط مرزی شبیه سازی و هندسه تونل

طول تونل مورد مطالعه در این مقاله ۱۲۰ متر می باشد که طرح اولیه ای از آن برای عبور عرضی ترافیک (عمدتاً سواری) از زیر بزرگراه شهید همت (تهران) ارائه شده است. مقطع تونل مورد بحث در این مقاله به صورت نعل اسبی بوده و مساحت سطح مقطع آن حدود ۶۳ متر مربع می باشد. این تونل با این ابعاد امکان بهره برداری با دو خط ترافیک را خواهد داشت. شیب طولی تونل مورد مطالعه 3.6%- (شیب منفی به سمت پرتال راست) می باشد و از آنجا که پروفیل طولی در محاسبات سرعت بحرانی در شرایط حریق، نقش تعیین کننده دارد بنابراین در این شبیه سازی عددی اثر آن هم ملاحظه شد. با توجه به طول کوتاه تونل، در محاسبات تهویه برای حالت نرمال می توان از آثار اختلاف فشار هوا در پرتال ها صرف نظر کرد اما با توجه به طبیعی بودن سیستم تهویه، اثر باد در پرتال ها می تواند در شیوه تخلیه دود موثر باشد. از این روی، در این مطالعه سه حالت برای سرعت باد در پرتال ها در نظر گرفته شده است. قدرت حریق احتمالی در تونل برای شبیه سازی یکی از شروط مرزی اصلی محسوب می شود و در این مطالعه با توجه به موقعیت تونل و همچنین ترافیک عبوری عمدتاً سواری، حداکثر نرخ انتشار گرما (Heat release rate) برای شبیه سازی ۵ مگاوات در نظر گرفته شد[1,2]. با توجه به آثار تایید شده ترافیک در سرعت هوا و توزیع دود در شرایط حریق در تونل ها [6] اثر ترافیک هم در این مطالعه ملاحظه شد **شکل ۱** دامنه محاسباتی به همراه ترافیک را نشان می دهد همانطور که در **شکل ۱** مشخص است، خودروها بعد از حریق توانسته اند تونل را ترک کنند اما خودروهای قبل از آن، پشت حریق گیر افتاده اند.

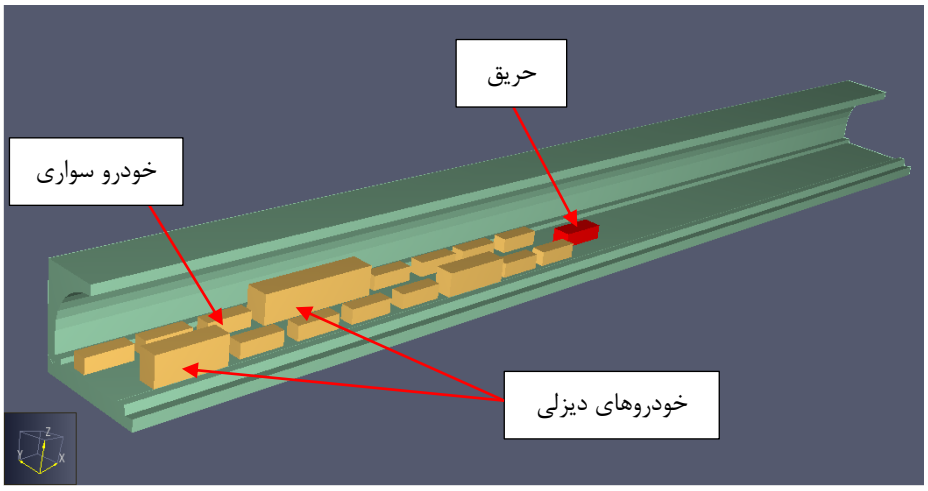
۳- نرم افزار شبیه سازی سازی

شبیه ساز دینامیک آتش (FDS) در مطالعات متعددی برای شبیه سازی عددی حریق در تونل برای نشان دادن رفتار دود و سرعت جریان هوا استفاده می شود. نرم افزار منبع باز FDS معادلات نایور-استوکس بر اساس هدایت حرارتی را حل می کند[10]. تحقیقات عددی مختلفی با پشتیبانی مطالعات تجربی برای تأیید عملکرد نرم‌افزار انجام شده که اسناد ارزیابی ها منتشر شده است[10,5,6] . بدیهی است که با تعریف مرزی مناسب، به ویژه اندازه‌های مش مناسب و همچنین اعتبار سنجی نتایج، می‌توان انتظار قابل قبولی از شبیه‌سازی‌های عددی داشت. با این حال، برای اثبات نتایج، ارزیابی های نظری و

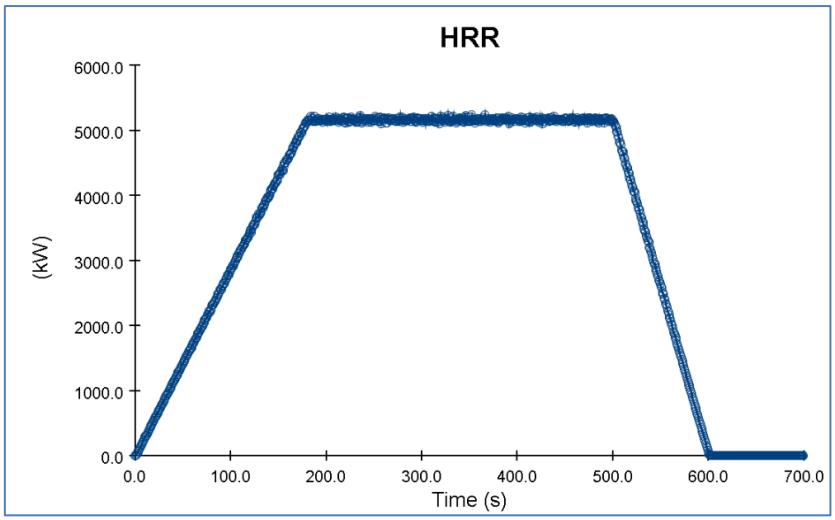
تجربی رویکردهای اثبات شده علمی هستند و برای تأیید ضروری هستند. برای صحت و اعتبار سنجی شبیه سازی ها از مطالعات و تجارب قبلی استفاده شد[8,9].

۴- نتایج و بحث

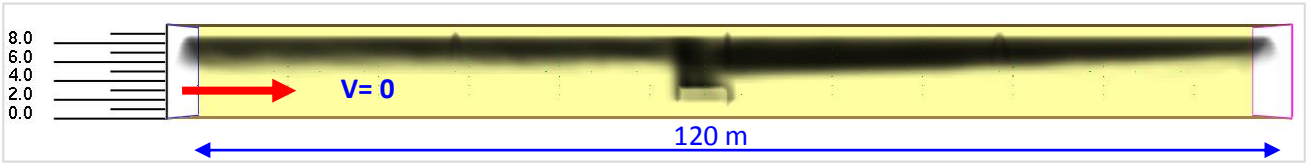
بدترین محل برای حریق در تونل مورد بحث، محدوده میانی آن خواهد بود بنابراین محل حریق فرضی برای شبیه سازی عددی در وسط تونل در نظر گرفته شد و تعدادی خودرو (۱۳ دستگاه خودرو سواری، ۲ دستگاه خودرو کامیونت یا مینی بوس و یک دستگاه اتوبوس) پشت حریق گیر افتاده اند و ابعاد خودروهای گیرافتاده هم مطابق ابعاد خودروهای ایرانی در نظر گرفته شد (**شکل ۱**). پس از انجام تنظیمات مربوط به نرم افزار تحلیل سه بعدی حریق در تونل (FDS)، از قبیل شرایط مرزی و ابعاد مش ها و سایر پارامترهای لازم برای سناریوهای مختلف، مدل مناسب برای شبیه سازی ها تهیه شد. **شکل ۲** نمودار افزایش قدرت حریق در طول زمان شبیه سازی را نشان می دهد همانطور که در شکل مشخص است در این شبیه سازی فرض شده که در طول ۱۸۰ ثانیه حریق به حداکثر ظرفیت خود برسد و بعد یک روند ثابتی طی شده و در نهایت خاموش شود. البته در عمل، این شرایط سخت گیرانه معمولاً رخ نمی دهد و رشد حریق با نوسان قدرت آن همراه است از سوی دیگر رسیدن به حداکثر قدرت معمولاً در حریق ها می تواند تا ۱۰ الی ۱۵ دقیقه طول بکشد. اما با این حال، در این مطالعه شرایط سختگیرانه برای ملاحظه بدترین اتفاقات در نظر گرفته شده است. **شکل ۱** مدل سه بعدی از تونل و محل قرارگیری حریق ۵ مگاواتی را نشان می دهد. طول تونل مورد مطالعه در حدود ۱۲۰ متر، مساحت مقطع نعل اسبی آن ۶۳ متر مربع و ارتفاع حدود ۸ متر می باشد.



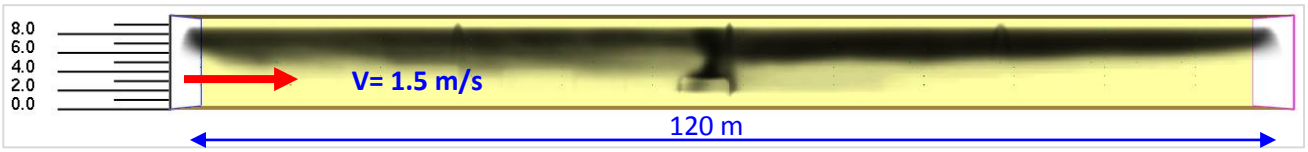
شکل ۱ مدل سه بعدی از تونل و محل قرارگیری حریق ۵ مگاواتی (طول تونل ۱۲۰ متر، مساحت مقطع نعل اسبی حدود ۶۳ متر مربع و ارتفاع حدود ۸ متر)



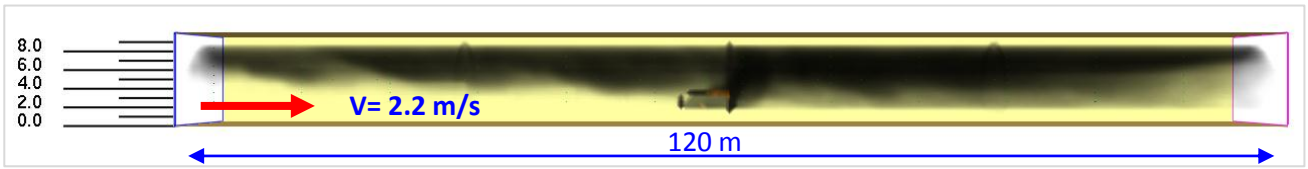
شکل ۲ نمودار نرخ رشد قدرت حریق با گذشت زمان، ۵ مگاوات



شکل ۳ نحوه توزیع و گسترش دود در طول شبیه سازی در حالت حل پایدار برای حریق ۵ مگاوات، سناریو **۰۱**



شکل ۴ نحوه توزیع و گسترش دود در طول شبیه سازی در حالت حل پایدار برای حریق ۵ مگاوات، سناریو **۰۲**



شکل ۵ نحوه توزیع و گسترش دود در طول شبیه سازی در حالت حل پایدار برای حریق ۵ مگاوات، سناریو **۰۳**

بطور کلی سه سناریو در این شبیه سازی عددی در نظر گرفته شد. مشخصات مدل در هر سه سناریو تقریباً مشابه می باشد و تنها تفاوت عمده در سرعت جریان طبیعی در داخل تونل می باشد که سناریوهای مختلف بر اساس آن تعریف شده است. از طرف دیگر به دلیل وجود جریان طبیعی هوا، رسیدن به حالت پایدار در سناریوها کمی متفاوت می باشد. بر این اساس، سناریو **۰۱** مربوط به حالتی است که سرعت باد در پرتال ها وجود ندارد این بدین معنی می باشد که از اختلاف فشار و دما و همچنین اثر طبیعی باد در پرتال ها صرف نظر شده است. **شکل ۳** نتیجه شبیه سازی عددی حریق و برای توزیع دود در طول تونل را نشان می دهد همانطور که در کانتور دود مشخص است، دود در هر دو سمت حریق در ارتفاع نسبتاً بالایی (بالای ۶ متر) قرار گرفته و به دلیل جریان آرام در تونل، که به دلیل خود حریق ایجاد شده است، تخلیه دود بدون هیچ اغتشاشی از سطوح فوقانی و از هر دو پرتال انجام می گیرد. از این روی عملیات امداد و نجات بدون هیچ مشکلی انجام خواهد شد، از طرف دیگر امکان دسترسی و اطفاء حریق از هر دو طرف تونل فراهم است. سناریو **۰۲** مربوط به حالتی است که باد در پرتال سمت چپ

وجود دارد و این باعث جریان طبیعی هوا از پرتال چپ به سمت راست شده است. **شکل ۴** نتیجه شبیه سازی عددی حریق برای توزیع دود در طول تونل را نشان می دهد همانطور که در کانتور دود مشخص است در این سناریو هم دود در امتداد تونل و در ارتفاع نسبی بالایی (بالای ۴ متر) قرار گرفته و به دلیل جریان آرام در تونل، تخلیه دود از سطوح بالای مقطع و از هر دو پرتال انجام می گیرد. اما در مقایسه با سناریو قبلی دود به سطوح پایینی هم رخنه کرده است و این به وجود جریان هوای ۱,۵ متر بر ثانیه در تونل مربوط است. با توجه به وجود جریان هوا در سمت چپ، اغتشاش نسبی به ویژه در محل حریق در مقایسه با سناریوی قبلی رخ داده است که می تواند برای افرادِ خودروهای نزدیک حریق تا حدودی مشکل ایجاد کند اما به دلیل طول کوتاه تونل، این افراد می توانند به راحتی از تونل خارج شوند. مشابه سناریوی قبلی در این سناریو هم عملیات امداد و نجات بدون هیچ مشکلی انجام خواهد شد و امکان دسترسی و اطفاء حریق از هر دو طرف تونل فراهم است. سناریو **۰۳** مربوط به حالتی است که سرعت باد نسبتاً بالایی در پرتال سمت چپ وجود دارد و این موضوع باعث جریان طبیعی هوا در حدود ۲,۲ متر بر ثانیه (سرعت بحرانی) از پرتال چپ به سمت راست شده است. در این سناریو به دلیل وجود جریان هوای نسبی بالا و در حدود سرعت بحرانی، رفتار دود کمی متفاوت است. **شکل ۵** نتیجه شبیه سازی عددی حریق برای توزیع دود در طول تونل را نشان می دهد همانطور که در کانتور دود مشخص است در این سناریو دود در امتداد تونل و در سمت چپ حریق در ارتفاع نسبتاً بالایی (بالای از ۶ تا ۴ متر) قرار گرفته است، اما به دلیل ایجاد جریان اغتشاشی در سمت راست حریق در اثر جریان طبیعی هوا، بخش عمده ایی از مقطع را دود گرفته است و تخلیه دود بیشتر از سمت راست صورت می گیرد. در این سناریو هم عملیات امداد و نجات از سمت چپ بدون هیچ مشکلی انجام خواهد شد اما این امکان از سمت راست به دلیل رخنه دود برای افراد آموزش ندیده کمی با مشکل و چالش همراه خواهد بود. لازم به توضیح است که قبل از رسیدن حریق به قدرت نهایی و پایداری حل (حدود سه دقیقه از لحظه شروع حریق با توجه به فرضییات این مطالعه)، دود در هر سه سناریو در سطوح بالایی مقطع قرار می گیرد و فرصت برای خروج، اطفاء و امداد و... به خوبی فراهم است. اما خروجی شبیه سازی ها برای بدترین حالت ها و عدم اطفاء و... را نشان می دهد و در شرایط واقعی احتمال اطفاء حریق قبل از پایداری حل وجود دارد.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه سه سناریو محتمل برای حریق در تونل در نظر گرفته شد و این سناریوها بر اساس واقعیت های مربوط به هواشناسی محل و باد غالب در تهران (در حدود ۲,۶ متر بر ثانیه) و جهت قرارگیری تونل نسبت به آن (شمالی - جنوبی) تعریف شد. مطابق نتایج حاصل از شبیه سازی عددی، رفتار دود در تونل برای سه سناریو محتمل استخراج گردید. نتایج حاصل از شبیه سازی ها نشان داد که در شرایط رخداد حریق در خودرو سواری (حداکثر ۵ مگاوات)، تخلیه طبیعی دود بدون مشکل انجام خواهد شد و این موضوع باعث می شود که امکان عملیات امداد و نجات و همچنین اطفاء حریق در کوتاه ترین زمان ممکن فراهم شود. عملیات امداد و نجات و اطفاء حریق برای سناریوهای اول و دوم در طول حریق از هر دو طرف ممکن خواهد بود اما این موضوع برای سناریو سوم از سمت راست با چالش همراه است. لازم به ذکر است که امکان امداد و نجات و اطفاء برای نیروهای حرفه ای و آموزش دیده در سناریو سوم هم از هر دو طرف مقدور می باشد و فقط برای افراد عادی تردد از پرتال سمت راست تونل در سناریو سوم قدری با چالش مواجه خواهد شد.

۶- تقدیر و تشکر

در اینجا لازم است از همکاری و مساعدت شرکت مهندسین مشاور رهاب در انجام این مطالعه قدردانی و تشکر شود.

۷- مراجع

[1] PIARC (2011): Road tunnels, operational strategies for ventilation; PIARC Technical Committee C3.3 Tunnel Operations, Report No. 2011, R02, ISBN: 2-84060-234-2.
[2] RVS 09.02.31 Tunnel Equipment, Ventilation – basic principles; FSV Working group tunnel, section operation and safety equipment, Vienna, Austria; version August 2008.

[3] RABT (2006) German guideline for the equipment and operation of street tunnels, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, May 2006.
[4] Ingason H., Li Y. Z., Lönnermark A., Runehamar Tunnel Fire Tests, Fire Saf. J., 71:134-149 (2015).
[5] Rafiei M., Sturm P.J., Influence of fires on-air velocity measurements at downstream measurement locations, In: 7th International Conference Tunnel Safety and Ventilation, Graz, Austria, 265-272 (2014).
[6] Gannouni S., BenMaad R., Numerical study of the effect of blockage on critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires, Tunnelling and Underground Space Technol., 48: 147-155 (2015).
[7] Fan C., Zhang L., Jiao S., Yang Z. , Li M., Liu X., Smoke spread characteristics inside a tunnel with natural ventilation under a strong environmental wind, Tunnelling and Underground Space Technol., 82: 99-110 (2018).
[8] Rafiei M., Full scaled numerical simulation of the critical velocity in sloping tunnels during the high load fire incidents, Int. J. Comput. Appl. Technol., 126 (10): 38-42 (2015).
[9] Rafiei, M., Numerical simulation of a full scaled fire test of the tunnel with natural ventilation, Int. J. Comput. Appl. Technol., 115 (1): 9-16 (2015).
[10] K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, J.E. Floyd, Fire Dynamics Simulator (Version6) User's Guide, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2020.