

تحلیل آتش‌سوزی قطار به روش شبیه‌سازی دینامیکی آتش

چکیده: در این پژوهش انتشار دود، توزیع دما، میدان دید، نرخ انتقال حرارت و نحوه سرایت آتش به بخش‌های مختلف در یک واگن قطار مسافربری تهران به اهواز پس از شروع آتش‌سوزی شبیه‌سازی شده است. معادلات حاکم در حالت ناپایا، براساس کسر جرمی فرآورده‌ها و سوخت مصرف نشده به صورت لحظه‌ای نسبت به جرم کل در واکنش حل شده اند. تاثیر پارامترهای مختلف در سناریوی آتش‌سوزی مطالعه و با نتایج پیشین مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که کمتر از دو دقیقه پس از شروع حریق شرایط داخل واگن از لحاظ دما، دود و میدان دید به حالت بحرانی می‌رسد. جهت جلوگیری از سرایت آتش به بخش‌های دیگر واگن، عملیات اطفاء‌حریق باید کمتر از چهار دقیقه پس از توقف قطار انجام گیرد. مقایسه داده‌ها با نتایج جون و همکاران حداکثر اختلاف دمای $6/9$ و میدان دید 10 درصد را نشان می‌دهد.

واژه‌های راهنما: شبیه‌سازی عددی، آتش‌سوزی، دینامیک شبیه‌سازی آتش، انتشار دود، توزیع دما.

محمد رضا عساری*

دانشیار،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی جندی شاپور،
دزفول

گلشن زاده مبارک

دانشجوی کارشناسی ارشد

محسن پرور

کارشناسی ارشد،
مرکز پژوهشی جندی شاپور،
دزفول

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۸

Mohammad Reza
Assari*

Associate Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering,
Jundi-Shapur
University of
Technology, Dezful

Golshan
Zadehnoarak
MSc Student

Mohsen Parvar
MSc Jundi-Shapur
Research Institute,
Dezfu

Train fire analysis by dynamic fire simulation method

Abstract: A fire accident of a passenger train from Tehran to Ahvaz has been numerically simulated. In this study, emission patterns, temperature distribution and the other parameters have been investigated after the start of the fire. The transient governing equations have been solved by Pyrosim software for different scenario based on mass fraction of products, unused fuel and other fire parameters. The results are compared with an actual case. The results showed that less than two minutes after the start of the fire, the conditions inside the wagon reached a critical situation in terms of temperature, smoke and visibility. To prevent the fire from spreading to other parts of the wagon, firefighting operations must be performed in less than four minutes.

Keywords: Numerical simulation, Fire scenario, Dynamic fire simulation, Smoke emission, Temperature distribution.

۱- مقدمه

تونل مد نظر قرار گرفته و به موضوع آتش‌سوزی قطار در فضای باز کمتر پرداخته شده است. یک نمونه از قوی‌ترین ابزارهای شبیه‌سازی عددی آتش‌سوزی که بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی طراحی شده است نرم افزار پایروسیم، از مجموعه نرم-افزارهای FDS است. در این مطالعه سانحه آتش‌سوزی واگن مسافری قطار تهران به اهواز که در تاریخ ۱۳۹۵/۰۴/۲۷ در ساعت ۴:۱۵ صبح در حدفاصل ایستگاه اندیمشک به سبزاب رخ داده با استفاده از نرم‌افزار پایروسیم ۲۰۱۲ شبیه‌سازی شده است. در این سانحه بلافاصله قطار متوقف و واگنی که دچار حریق شده بود توسط مامورین از مسافران تخلیه و از بقیه قطار منفصل می‌گردد؛ حدود ۱۰ دقیقه بعد نیروهای آتش‌نشانی عملیات اطفاء حریق را آغاز کردند و طی این مدت آتش به تمام واگن سرایت کرده و واگن بطور کامل می‌سوزد. مصرف دخانیت توسط یکی از مسافرین در کوپه به عنوان علت این سانحه گزارش شده است. ابعاد، مشخصات هندسی، جنس مواد سازنده واگن و شرایط اولیه آتش‌سوزی مشخص هستند.

هدف اصلی از این مطالعه، بررسی الگوی انتشار دود ناشی از آتش، توزیع دما و نحوه سرایت آتش به بخش‌های مختلف واگن در زمان‌های مختلف تا شروع عملیات اطفاء حریق و تعیین زمان بحرانی برای تخلیه مسافران است. استفاده از روش شبیه‌سازی برای بررسی سوانح آتش‌سوزی نسبت به روش‌های آزمایشگاهی مزایای متعددی دارد. در روش‌های آزمایشگاهی نمونه‌ای از آنچه در سانحه واقعی آتش می‌گیرد در مقیاس کوچک‌تر در آزمایشگاه مدلسازی و ساخته می‌شود. سپس مدل ساخته شده را می‌سوزانند و با تعبیه ابزارهای اندازه‌گیری و کنترل‌کننده‌ها متغیرهای مختلف مورد نظر را اندازه‌گیری و بررسی می‌کنند. در مقابل، روش شبیه‌سازی به دلیل ساخت مدل در نرم‌افزار، بسیار کم هزینه است؛ علاوه بر این چون فرایند آتش‌سوزی نیز در نرم‌افزار انجام می‌شود نسبت به روش آزمایشگاهی، بی‌خطر است. مهمترین مزیت روش شبیه‌سازی، عدم وجود محدودیت در آن است چراکه امکان شبیه‌سازی سانحه در ابعاد واقعی، ساختن مدل‌ها و اشیاء موجود در سانحه با شکل‌های هندسی مختلف و جابجایی و تغییر عناصر در مدلسازی به آسانی وجود دارد.

۲- معادلات حاکم

سوانح آتش‌سوزی در راه آهن که حجم عظیمی از بار و مسافر را به وسیله قطارهای مسافری و باری حمل می‌کند، می‌تواند خسارت‌های جانی و مالی بسیار زیادی را به بار آورد. در یک مطالعه ژئی و همکاران [۱] رابطه بین سرعت جریان هوا، نرخ حرارت دهی، میدان دمایی اطراف قطار، الگوهای نفوذ آتش و دود را در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی عددی نمودند و محدوده ایمن سرعت سیر قطار را در زمان آتش‌سوزی تعیین کردند. ژو و همکاران [۲] یک شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار پایروسیم^۱ برای آتش‌سوزی در تونل فوق طویل دو خطه‌ای که به ایستگاه‌های نجات اورژانسی مجهز بود انجام دادند. نتایج نشان داد که به ازای یک دبی تهویه معین در تونل و راهروهای عرضی می‌توان به طور موثری ضخامت لایه دود و دمای هوای درون تونل را کنترل کرد. لونرمارک و همکاران [۳] یک ماکت از سالن مترو را که در مقیاس ۱:۳ از یک واگن واقعی بود طراحی کردند. نتایج نشان مدت زمانی که طول می‌کشد تا تمام سالن به طور کامل دچار حریق شود به شدت به نوع منبع اولیه آتش (چوب یا بنزین) بستگی دارد. جون و همکاران [۴] یک مطالعه عددی مقایسه‌ای روی نرخ حرارت دهی بر واحد سطح سالن‌های قطار مسافری سریع‌السیر نسبت به زمان در شرایط مختلف انجام دادند. نتایج نشان داد که هندسه، فاصله بین مواد اشتعال‌پذیر در واگن (میزان بارگذاری آتش)، عملکرد احتراقی مواد تشکیل دهنده بخش‌های داخلی واگن و شرایط تهویه از عوامل موثر بر نرخ حرارت دهی سالن‌های قطار سریع‌السیر هستند. شان و همکاران [۵] با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۲ روی خطر ناشی از تجمع دود در سالن مسافری قطار که دچار حریق شده بود مطالعه عددی انجام دادند. نتایج نشان داد که در مدت زمان ۱۰۰ الی ۲۰۰ ثانیه پس از شروع حریق دما و غلظت گاز منواکسیدکربن از میزان بحرانی بیشتر خواهد شد و میزان دید افقی به شدت کاهش می‌یابد، بنابراین عملیات تخلیه مسافران باید سریعتر از این زمان صورت پذیرد. بر اساس آمار منتشر شده توسط انجمن ملی حفاظت از آتش‌سوزی آمریکا^۳ هر ساله دو سوم تا سه چهارم از تلفات در آتش‌سوزی‌ها بعلت تنفس گازهای سمی است، که از میان آنها ۶۰ الی ۸۰ درصد افراد در مکانی دور از منبع آتش جان خود را از دست می‌دهند [۶].

تا به امروز تحقیقات زیادی برای تحلیل موردی سوانح آتش-سوزی انجام شده است؛ در بیشتر پژوهش‌ها، آتش‌سوزی قطار در

^۱ Large Eddy Simulation (LES)^۲ National Fire Protection Association (NFPA)^۳ Pyrosim

جدول ۱ معادلات حاکم

شماره	شرح
(۴)	معادله بقای جرم
	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = \dot{m}_b'''$
(۵)	معادله بقای مومنتوم (قانون دوم نیوتن)
	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij}$
(۶)	معادله بقای انرژی (قانون اول ترمودینامیک)
	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{q}'' + \varepsilon$
(۷)	معادله حالت گاز کامل
	$p = \frac{\rho RT}{\bar{W}}$

در مدلسازی احتراق در نرم‌افزار امکان تعریف سوخت مورد نظر به طور کامل با مشخص کردن فرمول شیمیایی آن وجود دارد. در معادله ۳ در نرم‌افزار فقط فرآورده‌های نهایی مد نظر نیست بلکه چون احتراق فرآیندی پویا است که طی زمان اتفاق می‌افتد و در هر لحظه فرآورده‌های مختلفی تولید می‌کند روش حل استفاده شده در نرم‌افزار روشی ناپایا و بر اساس کسر جرمی هر یک از فرآورده‌ها و سوخت مصرف نشده واکنش در هر لحظه نسبت به جرم کل موجود در واکنش است [۸].

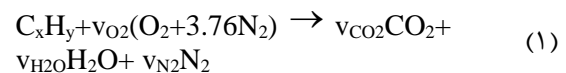
بر اساس قانون پایستگی جرم، بدیهی است که مجموع کسر جرمی‌های مواد موجود در واکنش (هوا، سوخت و فرآورده‌ها) در هر لحظه، برابر با یک است. شکل دیفرانسیلی معادلات حاکم برای سیال نیوتنی در این مدلسازی در جدول ۱ آمده است.

در این معادلات $\mathbf{u} = (u, v, w)$ سرعت در همه جهتها و h آنتالپی محسوس (تابعی از دما) است. کمیت‌های برداری، بصورت پررنگ نشان داده شده‌اند [۸]. کمیت‌های پرنرگی که با اندیس ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند تانسور هستند [۸]. τ_{ij} در معادله ۵، تانسور تنش را نشان می‌دهد و \mathbf{f}_b نیروهای خارجی از جمله نیروی درگ وارد شده بر قطرات سیال در حالت مایع است [۸]. q''' در معادله ۶ نرخ حرارت دهی بر واحد حجم ناشی از واکنش شیمیایی است؛ q_b''' انرژی منتقل شده به قطرات تبخیر شده است؛ q'' شار حرارتی ناشی از انتقال حرارتی رسانش و تشعشع و ε نرخ تبدیل انرژی جنبشی به انرژی حرارتی بواسطه لزجت سیال است [۸]. \bar{W} در معادله ۷ مجموع جرم مواد موجود در واکنش است.

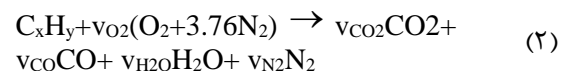
در این مطالعه به منظور مدلسازی و بررسی فرایند احتراق، شناخت ماهیت آتش ضروری است. فرآیند آتش سوزی را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد:

۱. از زمان شروع اشتعال تا رسیدن شعله به حداکثر دما و تابش، آتش در حالت در حال توسعه است.
۲. مدت زمانی که دمای شعله حداکثر مقدار خود را دارد مرحله توسعه یافتگی آتش در نظر گرفته می‌شود (در این مدت دمای شعله حدود ۷۶۰ درجه سانتیگراد است).
۳. مدت زمانی که آتش رو به خاموش شدن می‌رود مرحله برگشت شعله نامیده می‌شود.
۴. از مهمترین عوامل موثر بر رفتار آتش، نوع سوخت، فرآیند احتراق و میزان حرارت آزاد شده طی آن است. همچنین، این عوامل بر ویژگی‌های دود ناشی از آتش سوزی هم موثر هستند.

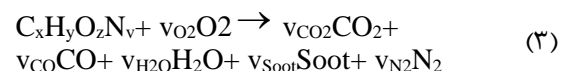
اولین قدم در شناخت آتش تشریح واکنش احتراق است. احتراق شامل واکنش شیمیایی بین سوخت (در حالت بخار) و اکسیژن است [۶]. اگر هوا را بصورت ترکیبی از گازهای نیتروژن (۷۹٪) و اکسیژن (۲۱٪) در نظر بگیریم، به ازای هر مول اکسیژن موجود در هوا ۳/۷۶ مول نیتروژن وجود دارد. بنابراین، می‌توان واکنش احتراق کامل یک سوخت هیدروکربنی با هوا را به شکل زیر نوشت [۷]:



در واکنش‌های احتراق حقیقی به دلیل نرسیدن اکسیژن کافی به واکنش و وجود اغتشاش و اختلاط، همیشه مقداری کربن منواکسید در فرآورده‌ها وجود دارد. بنابراین، واکنش احتراق واقعی را می‌توان به شکل زیر نوشت [۷]:



برای شبیه‌سازی احتراق یک ماده واقعی در نرم‌افزار بصورت پیش فرض از معادله زیر استفاده شده است:



جدول ۲ مشخصات فنی واگن مسافری مدل‌سازی شده (ابعاد برحسب میلیمتر)

ارتفاع از زمین	۴۰۵۰
ارتفاع اتاق (سالن)	۲۶۵۰
عرض	۲۸۲۵
سپر تا سپر	۲۴۵۰۰
سیستم تهویه	بدون تهویه
تاریخ ساخت	سال ۱۳۵۳
تعداد صندلی	۱۸
ظرفیت به نفر	۵۴
تعداد کوپه	۹
کشور سازنده	دانمارک
نوع واگن	درجه دو

یکی از پارامترهای مهم در بررسی رفتار آتش، نرخ حرارت دهی بر واحد سطح^۱ آن است؛ نرخ حرارت دهی بر واحد سطح عبارت است از میزان حرارت آزاد شده از واحد سطح آتش در واحد زمان که معمولاً با یکای وات بر مترمربع تعیین می‌شود که همان تعریف شار حرارتی است. نرخ حرارت دهی از رابطه $HRR = \dot{V}\Delta H$ بدست می‌آید که در آن HRR نرخ حرارت دهی بر واحد سطح آتش، \dot{V} دبی حجمی سوخت مصرفی (لیتر بر ثانیه) و ΔH آنتالپی سوختن سوخت یا ارزش حرارتی موثر احتراق (ژول بر لیتر) است [۹]. بنابراین نوع سوخت و سرعت واکنش سوختن از عوامل موثر بر نرخ حرارت دهی بر واحد سطح آتش هستند.

۳- مدل‌سازی واگن

جدول ۲ ضخامت و جنس مواد بکار رفته در ساختار واگن مسافری

بخش	جنس	ضخامت (میلیمتر)
بدنه واگن	تخته سه‌لا	۴۸
	پشم شیشه	۵۰
	فولاد	۲
کف واگن	PVC	۹۹۸
	تخته سه‌لا	۵۰
	پشم شیشه	۱۷۰
سقف واگن	فولاد	۲
	آلومینیوم	۲۸
	پشم شیشه	۱۲۰
صندلی‌ها	فوم سرد ^۲	۱۰۰
	فولاد	۲
دیواره‌های جداکننده کوپه‌ها	تخته سه‌لا	۵۰

۴- شرایط اولیه و شرایط مرزی شبیه‌سازی

بر اساس گزارشات تهیه شده توسط گروه ایمنی و نظارت بر شبکه راه‌آهن اندیمشک فاصله زمانی ۱۰ دقیقه‌ای بین توقف و انفصال واگن تا رسیدن مامورین آتش‌نشانی وجود داشته و اطلاعات دقیقی از زمان شروع آتش‌سوزی در واگن موجود نیست. با توجه به عکس‌های موجود از سانحه می‌توان حجم آتش‌سوزی واگن در لحظات ابتدایی و قبل از انفصال را مشاهده نمود. (شکل ۱). با توجه به اهمیت میزان سوختگی واگن در این

برای انجام شبیه‌سازی و تحلیل آتش ابتدا باید مدل سه بعدی از هندسه محل مورد نظر را تهیه و سپس با مشخص کردن شرایط اولیه و شرایط مرزی مدل، جنس مواد موجود در محیط، موقعیت و شدت حریق فرضی، نوع سوخت و نیز مشخص کردن تجهیزات و شرایط تهویه، شبیه‌سازی را اجرا کرد. چرا که در آتش‌سوزی میزان حرارت آزاد شده و به تبع آن دما و غلظت دود در محیط کاملاً وابسته به ابعاد، جنس، ضخامت، چگالی، ظرفیت حرارتی ویژه و ضریب رسانندگی حرارتی مواد سازنده واگن است که اینها پارامترهای ورودی به نرم‌افزار هستند. در این مطالعه واگن شماره ۲۹۲۰۲۱۶ مدل‌سازی شده که مشخصات کامل آن در جدول ۲ آمده است. با توجه به اینکه در تحلیل آتش‌سوزی حجم و جرم مواد از شکل هندسی آنها مهم‌تر است، در ساخت مدل از جزئیات ساختاری واگن چشم-پوشی شده و مدل ساده‌سازی شده واگن در نظر گرفته شده است.

همانطور که در ابتدای این بخش اشاره شد علاوه بر هندسه، جنس مواد نیز در مدل‌سازی احتراق حائز اهمیت است. همچنین ضخامت و جنس مواد بکار رفته در واگن در جدول ۲ آمده است.

² Polyurethane

¹ Heat Release Rate Per Unit Area (HRR)

جدول ۳ شرایط شبیه‌سازی آتش

شماره	زمان آتش سوزی	HRRPUA (MW)	موقعیت آتش	شرایط آتش سوزی	زمان تنظیم شده
۱	قبل از انفصال واگن	۱/۲	صندلی پنجم	پنجره‌ها باز	۲۵۰ ثانیه
۲	قبل از انفصال واگن	۱/۲	صندلی پنجم - صندلی- ها، کف و پنجره‌ها	پنجره‌ها بسته	۱۵۰ ثانیه
۳	بعد از انفصال واگن	۱/۲	دیواره- های (شیشه‌ها ذوب کوبه سوم)	بدون شیشه (شیشه‌ها ذوب شدند)	۱۰۰۰ ثانیه

با توجه به وقوع سانحه در فضای باز و توقف قطار و انفصال واگن در ابتدای آتش‌سوزی، شرایط اولیه جوی (دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و فشار ۱ اتمسفر) به عنوان شرایط اولیه شبیه‌سازی در نظر گرفته شد که همین شرایط روی مرزهای مش‌بندی برقرار است [۵]. در این نرم‌افزار آتش به صورت انتشار گاز ناشی از سوختن که از یک سطح جامد یا یک منفذ متصاعد می‌شود مدلسازی شده است؛ سطحی که مشتعل شده است دارای یک نرخ حرارت دهی مشخص بر واحد سطح (شار حرارتی) است [۱۰]. بنابراین شرایط مرزی در سطوحی که آتش‌سوزی از آنجا شروع می‌شود شار ثابت در نظر گرفته شده است (سطوح مذکور و شار حرارتی هر کدام در جدول ۳ آورده شده‌است. بدلیل استفاده از مواد عایق حرارت مثل پشم شیشه در لایه- های میانی بدنه واگن، شرایط مرزی در سطوح داخلی و خارجی واگن (سقف، کف و دیواره‌ها) از نوع عایق در نظر گرفته شده است. همچنین شرایط مرزی روی تمام مرزهای مش‌بندی از نوع جایجایی است. شرایط مرزی حاکم به اختصار در جدول ۴ آمده- اند.

جدول ۴ شرایط مرزی

ردیف	محل برقراری شرط مرزی	شرط مرزی حاکم
۱	موقعیت آتش (سطح شروع آتش‌سوزی)	شار ثابت (۱/۲ مگاوات)
۲	سطوح داخلی و خارجی واگن (سقف، کف و دیواره‌ها)	عایق
۳	مرزهای مش‌بندی	جایجایی

فاصله زمانی (چراکه تعیین کننده میزان خسارت مالی وارده به واگن است) و در نظر گرفتن این حجم از آتش به عنوان لحظه شروع و داشتن مدت زمان ۱۰ دقیقه‌ای رسیدن مامورین، این بخش از سانحه بصورت جداگانه شبیه‌سازی شد. همچنین جهت اعتبارسنجی مدلسازی، خروجی‌های نرم‌افزار با عکس‌هایی که از لحظه رسیدن مامورین در دسترس است و حجم آتش را در آن زمان نشان می‌دهد مورد مقایسه قرار گرفت. به همین خاطر شبیه‌سازی سانحه به دو بخش اصلی تقسیم شده است: بخش اول از زمان شروع آتش‌سوزی تا تخلیه مسافران از واگن و بخش دوم از زمان توقف قطار تا زمان رسیدن مامورین آتش‌نشانی. شرایط آتش بر اساس تفاوت بین موقعیت آتش، میزان آتش اولیه، باز یا بسته بودن پنجره‌های سالن مسافری، شرایط اولیه و شرایط مرزی به چندین حالت برای شبیه‌سازی تقسیم شد که در جدول ۳ نمایش داده شده‌اند. با توجه به نوع مواد به کار رفته در ساختار واگن و میزان تراکم تجهیزات و ملزومات داخل واگن، نرخ اولیه حرارت دهی بر واحد سطح آتش در شرایط مختلف آتش‌سوزی ۱/۲ مگاوات در نظر گرفته شده است [۵]. ابعاد شبکه مش‌بندی طراحی شده در این تحلیل، با توجه به ابعاد واگن که در جدول ۲ آورده شده، $6m \times 9m \times 30/5m$ در نظر گرفته شد که به ترتیب طول در عرض در ارتفاع هستند. شبکه مش‌بندی مذکور شامل $60 \times 90 \times 305$ سلول مکعبی است؛ بنابراین اندازه هر سلول $0/1 \times 0/1 \times 0/1$ متر خواهد بود. یکی از قابلیت‌های نرم‌افزار پایروسیم در زمینه مش‌بندی، توانایی پیشنهاد کردن مناسب‌ترین اندازه مش‌بندی بر اساس ابعاد شبکه می‌باشد، که از این قابلیت جهت تعیین اندازه‌های مش‌بندی مذکور استفاده شده است [۵].



شکل ۱ واگن در هنگام آتش‌سوزی

۵- مدل اغتشاش منتخب

در نرم‌افزار مورد استفاده در پژوهش حاضر (پایروسیم ۲۰۱۲) جهت حل عددی معادلات حاکم بر جریان، از روش LES یا شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است که مناسب‌ترین روش برای شبیه‌سازی فرآیندهای احتراق است. پدیده آتش-سوزی به دلیل تولید گازهای مختلف در طی فرآیند احتراق، انتشار سریع دود و نفوذ آتش به بخش‌های مختلف بصورت نامنظم و تصادفی و تغییرات سریع دما در زمان‌ها و مکان‌های مختلف بعد از شروع آتش‌سوزی، پدیده‌ای ناپایاست که نوع جریان‌های موجود در آن کاملاً آشفته است. گام زمانی حل در نرم‌افزار پایروسیم تابعی از اندازه مش‌بندی و سرعت مشخصه جریان است [۱۰]. بنابراین گام زمانی می‌تواند در هر مرحله از حل تغییر کند.

گام زمانی اولیه بصورت اتوماتیک از رابطه $\frac{5^3 \sqrt{\delta_x \delta_y \delta_z}}{gH}$ محاسبه می‌شود که در آن δ_x ، δ_y و δ_z به ترتیب طول، عرض و ارتفاع کوچکترین سلول مش‌بندی و g شتاب گرانش زمین و H ارتفاع دامنه محاسباتی است [۱۰]. در این مطالعه با توجه به ثابت بودن اندازه سلول‌ها در شبکه مش‌بندی گام زمانی در تمام مراحل حل توسط نرم‌افزار، ثابت است. با جایگزین کردن مقادیر ابعاد سلول‌های مش‌بندی و ارتفاع دامنه محاسباتی (با توجه به ابعاد شبکه مش‌بندی این مقدار ۶ متر است) در رابطه فوق، گام زمانی حل ۰/۰۶ ثانیه بدست می‌آید.

جهت حل معادلات حاکم بر سیال در دینامیک سیالات محاسباتی از روش‌هایی چون 1 DNS، روش 2 RANS و LES استفاده می‌شود. در روش DNS تمام معادلات بصورت مستقیم حل عددی می‌شوند و در روش RANS تمام معادلات مدل‌سازی و سپس حل می‌شوند اما در روش LES گردابه‌های اغتشاشی بزرگ به طور مستقیم با معادلات ناویر استوکس حل عددی و گردابه‌های کوچک مدل‌سازی می‌شوند؛ بنابراین روش LES نسبت به روش DNS هزینه محاسباتی کمتر و نسبت به روش RANS دقت بالاتری دارد.

باید توجه داشت که نرم‌افزارهای تخصصی حریق، صرفاً آتش را به صورت یک منبع گرما در نظر نمی‌گیرند، بلکه در این نرم‌افزارها، آتش به صورت یک واکنش شیمیایی پویا که خروجی‌های مختلفی مانند حرارت و گازهای ناشی از احتراق دارد، لحاظ می‌گردد.

۶- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

حداکثر دمای قابل تحمل برای چشم انسان ۶۰ درجه سانتیگراد است [۵]. جهت به دست آوردن زمان ایمن تخلیه مسافران یک صفحه برش در ارتفاع متوسط قد انسان (۱/۵ متر) در نظر گرفته شد [۵]. همچنین مدت زمانی را که دما در آن صفحه به حداکثر دمای قابل تحمل برای چشم انسان می‌رسد و همچنین مدت زمانی را که ارتفاع لایه دود که از سقف به سمت کف واگن تجمع می‌کند به ارتفاع مذکور می‌رسد (ضخامت لایه دود) به عنوان زمان‌های بحرانی تخلیه مسافران در نظر گرفته شده‌است.

۶-۱- تحلیل توزیع دما

تغییرات دما در درب خروجی سمت چپ واگن در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، ۵۰ ثانیه زمان برای تخلیه مسافران از این درب وجود دارد؛ چراکه پس از این زمان دما از ۶۰ درجه سانتیگراد بیشتر می‌شود و می‌تواند برای مسافران خطرناک باشد.

بخش عمده‌ای از این انتقال حرارت بصورت تشعشع است که باعث افزایش سریع دما می‌شود و بینایی افراد را به شدت تهدید می‌کند. به گونه‌ای که بعد از تنها ۱۰۰ و ۱۲۰ ثانیه دما به به ترتیب به حدود ۱۶۰ و ۲۷۵ درجه سانتیگراد خواهند رسید.

همچنین با توجه به شکل ۳ که تغییرات دما در درب خروجی سمت راست واگن را نشان می‌دهد، پس از ۱۰۰ ثانیه دما به ۶۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. به عبارتی دیگر ۵۰ ثانیه زمان بیشتر برای تخلیه مسافران از این درب وجود دارد. افزایش دما در سمت آن درب کمتر است به گونه‌ای که حداکثر دما در این حالت پس از ۲۰۰ ثانیه به حدود ۱۵۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. بنابراین، شرایط در درب سمت چپ واگن به دلیل نزدیکی به منبع آتش، بحرانی‌تر است.

² Reynolds Averaged Navier-Stokes¹ Direct Numerical Simulation

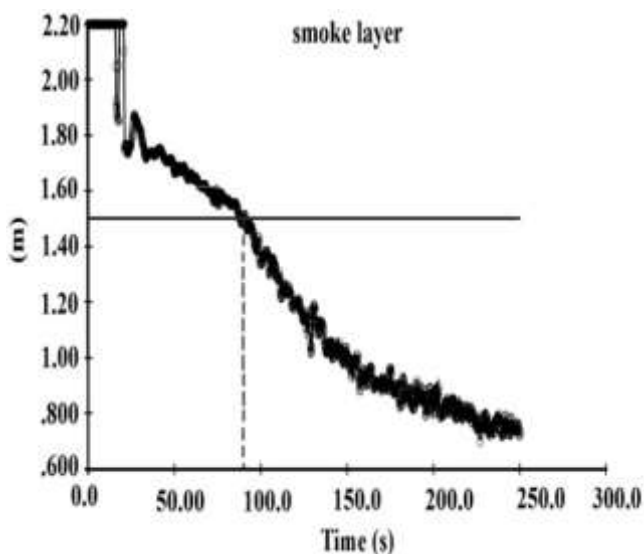
پس از شروع آتش‌سوزی ارتفاع لایه دود به حالت بحرانی می‌رسد. همچنین در شکل ۷ تغییرات ارتفاع لایه دود برای حالت شماره ۲ آتش‌سوزی نشان داده شده است که با گذشت ۷۵ ثانیه ارتفاع لایه دود به حالت بحرانی می‌رسد و پس از آن بدلیل نبودن تبادل با محیط بیرون و تجمع دود با گذشت اندک زمانی تمام فضای واگن را پر می‌کند که می‌تواند برای تنفس مسافران خطر آفرین باشد. بنابراین با بررسی نتایج می‌توان دریافت باز بودن پنجره‌ها سبب بهبود ۲۰ درصدی زمان بحرانی شده است و این به این معنی که مسافران فرصت بیشتری را جهت تخلیه می‌توانند داشته باشند.



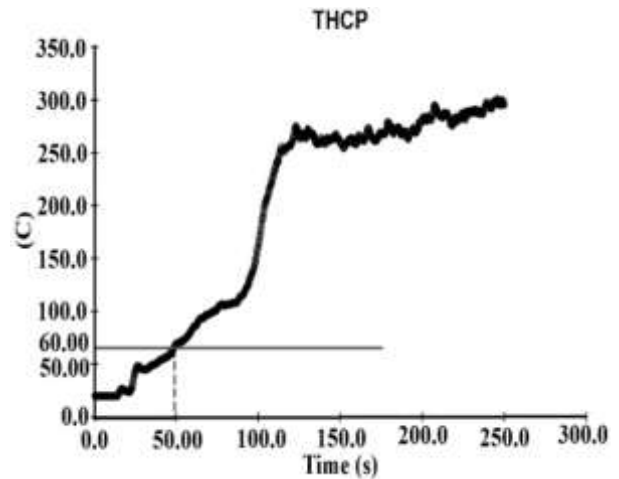
شکل ۴ توزیع دود پس از گذشت ۱۸۰ ثانیه از شروع آتش‌سوزی برای حالت شماره ۱ (باز بودن درب‌ها و پنجره‌ها)



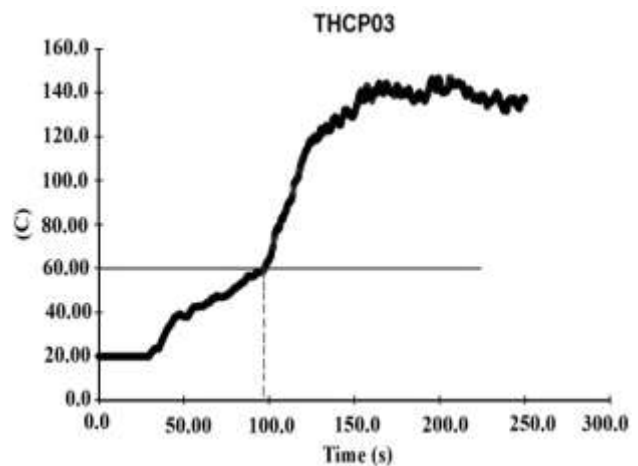
شکل ۵ توزیع دود پس از گذشت ۹۰ ثانیه از شروع آتش‌سوزی برای حالت شماره ۲ (بسته بودن درب‌ها و پنجره‌ها)



شکل ۶ تغییرات ارتفاع لایه دود برای حالت شماره ۱ (باز بودن درب‌ها و پنجره‌ها)، خط افقی (ارتفاع بحرانی)



شکل ۲ تغییرات دما در درب سمت چپ واگن برای حالت شماره ۱ (باز بودن درب‌ها و پنجره‌ها)، خط افقی (دمای بحرانی)



شکل ۳ تغییرات دما در درب سمت راست واگن برای حالت شماره ۱ (باز بودن درب‌ها و پنجره‌ها)، خط افقی (دمای بحرانی)

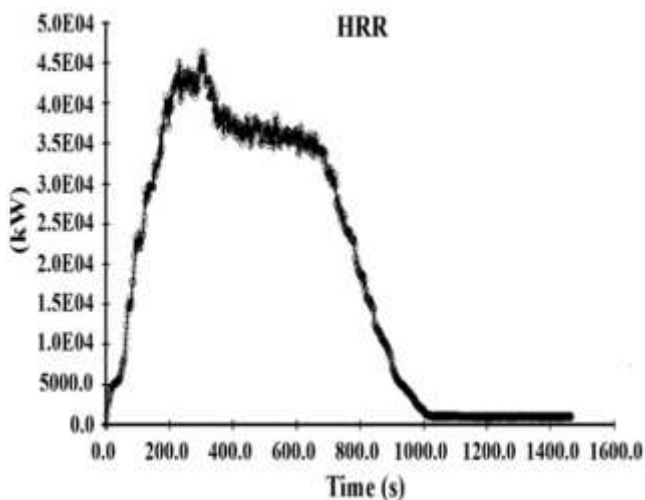
۶-۲ تحلیل توزیع دود

با مقایسه توزیع دود برای حالت شماره ۱ آتش‌سوزی در شکل ۴ و توزیع دود در حالت شماره ۲ در شکل ۵ نشان داده که اگر درب‌ها و پنجره‌های واگن مسافری باز نشوند خطری جدی جان مسافران را تهدید خواهد کرد چرا که همانگونه که شکل ۴ نشان داده؛ باز بودن پنجره سبب تهویه هوا و خروج دود از واگن شده و در این حالی است که در شکل ۵ به دلیل ایجاد پدیده همرفت به تدریج غلظت دود ناشی از آتش به سرعت بالا می‌رود و در مدت زمان کوتاهی تمام فضای داخل واگن را پر می‌کند و می‌تواند موجب خفگی مسافران شود در حالی که باز بودن پنجره‌های واگن سبب جابجایی هوای سرد با دود ناشی از آتش می‌شود.

تغییرات ارتفاع لایه دود برای حالت شماره ۱ آتش‌سوزی در شکل ۲ نشان داده شده است و با توجه به آن، حدود ۹۰ ثانیه

۴-۶- نرخ حرارت دهی بر واحد سطح

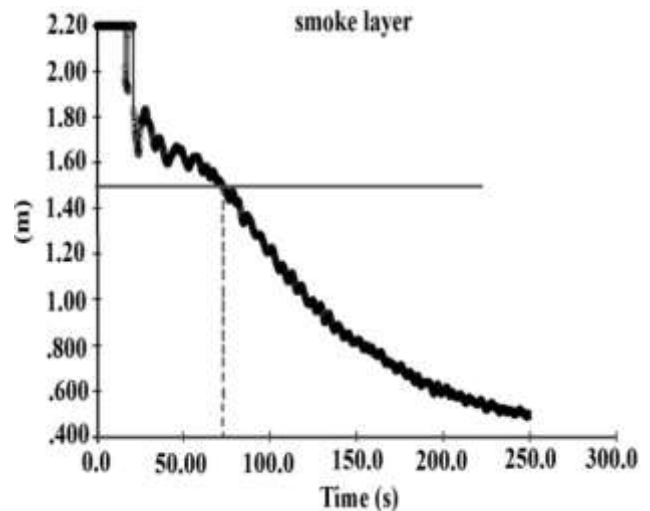
نرخ حرارت دهی بر واحد سطح آتش که عبارت است از میزان حرارت آزاد شده از واحد سطح آن در واحد زمان، در شکل ۹ برای حالت شماره ۳ آتش سوزی نشان داده شده است؛ که در آن پس از گذشت حدود ۲۲۰ ثانیه آتش به حالت توسعه یافته می-رسد (حالتی است که نرخ حرارت دهی بر واحد سطح آتش به حداکثر مقدار خود می-رسد و ثابت می-ماند). این می-تواند به دلایلی همچون وجود مواد قابل اشتعال و هوای کافی در کنار انتقال حرارت تشعشع و جابجایی هوا در محیط اطراف ایجاد گردد. به همین دلیل آتش سوزی با سرعت بالایی در واگن گسترش یافته به گونه‌ای که حداکثر نرخ حرارت دهی در واحد سطح آتش در این حالت به ۴۵ مگاوات بر متر مربع می-رسد. هر چه میزان نرخ حرارت دهی آتش به حالت توسعه یافته نزدیک تر شود مهار آتش با عملیات اطفاء حریق دشوارتر و ویرانی حاصل بیشتر می-شود.



شکل ۹ نرخ حرارت دهی بر واحد سطح آتش برای حالت شماره ۳ (بعد از انفصال)

۷- اعتبارسنجی نتایج

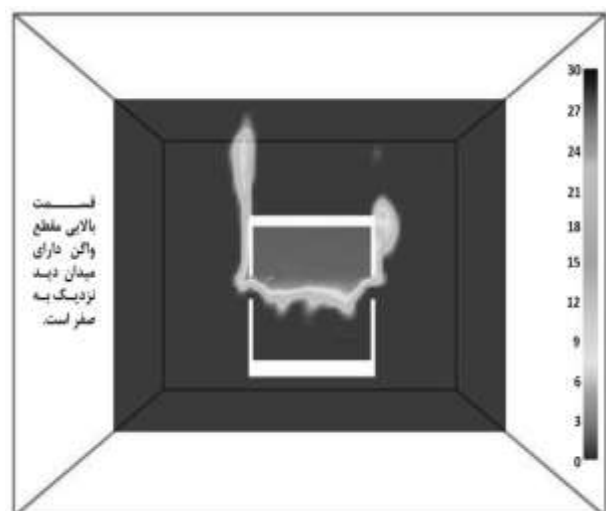
همانطور که در بخش ۴ اشاره شده، جهت بررسی دقیق تر، سانحه به دو بخش اصلی تقسیم شد. جهت سنجش اعتبار نتایج، در شبیه سازی بخش دوم سانحه (بعد از انفصال واگن) تمام شرایط از جمله مدت زمان سوختن واگن (حدود ۱۰ دقیقه) براساس سانحه واقعی تنظیم و در خروجی های نرم افزار شرایط آتش (حالت شعله ها) و شرایط واگن (میزان سوختگی و از بین رفتن بخش های مختلف در اثر نفوذ آتش) در هر لحظه و بخصوص در



شکل ۷ تغییرات ارتفاع لایه دود برای حالت شماره ۲ (بسته بودن دربها و پنجره ها)، خط افقی (ارتفاع بحرانی)

۳-۶- بررسی میدان دید فضایی در واگن

میدان دید زیر ۵ متر میدان دید بحرانی است که ایمنی مسافران را تهدید می-کند [۵]. کانتورهای میدان دید فضایی از نمای سمت چپ واگن و صفحه گذرا از وسط آن بر حسب متر پس از گذشت ۵۰ ثانیه از شروع آتش سوزی در شکل ۸ نشان داده شده اند. پس از گذشت فقط ۵۰ ثانیه از شروع آتش سوزی میدان دید فضایی در ارتفاع گذرا از متوسط چشم انسان ها از میزان بحرانی ۵ متر کمتر می-شود که این موضوع می-تواند کار تخلیه و نجات مسافران را با مشکل جدی مواجه کند.

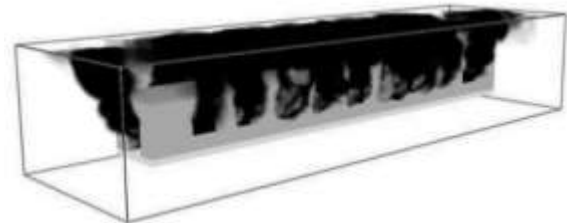


شکل ۸ کانتورهای میدان دید فضایی از نمای سمت چپ واگن و صفحه گذرا از وسط آن بر حسب متر پس از گذشت ۵۰ ثانیه از شروع آتش سوزی

بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد ایمنی مسافران در مدت زمان خیلی کوتاهی شرایط داخل واگن در این زمان از لحاظ دما، توزیع دود و میدان دید به حالت بحرانی می‌رسد که نشان از ضرورت سرعت عمل در تخلیه مسافران است. به علاوه تغییرات ضخامت لایه دود برای حالت باز بودن و بسته بودن درب‌ها و پنجره‌های واگن نشان داد زمان بحرانی در حالت باز بودن درها و پنجره‌ها ۲۰ درصد بهبود یافته که این امر به دلیل ایجاد جریان جابجایی بین محیط سرد و گرم و به عبارتی دود ناشی از آتش سوزی و هوای سردتر بیرون از واگن رخ داده است. در نتیجه بسیار ضروری است که درب‌ها و پنجره‌های واگن مسافری در مواقع اضطراری به آسانی باز و نیز چکش‌های مخصوص جهت شکستن شیشه پنجره‌ها هنگام خطر در محلی در دسترس برای مسافران تعبیه شود.

نرسیدن اکسیژن کافی به آتش از رسیدن آن به حالت توسعه یافته جلوگیری و دمای شعله را کاهش می‌دهد که دانستن این موارد برای عملیات امداد و نجات بسیار کمک‌کننده باشد. همچنین با توجه به اینکه لایه دود در سقف واگن تجمع و به تدریج ضخامت آن افزایش می‌یابد با تعبیه فن‌های مخصوص می‌توان از تجمع دود سمی در واگن جلوگیری کرد. تعبیه سنسورهای دود و مه‌پاش در سقف واگن مسافری و بررسی تاثیر آن روی توزیع دما، انتشار دود، میدان دید فضایی و نرخ حرارت دهی بر واحد سطح از جمله مواردی است که می‌توان در مطالعات آینده بررسی نمود.

لحظه پایان زمان ۱۰ دقیقه با عکس‌های تهیه شده از سانحه مقایسه شده است. مقایسه شعله‌ها در شکل ۱۰ داده شده است. علاوه بر این، در مطالعه جون و همکاران [۵] آتش‌سوزی یک واگن مسافری با نرم‌افزار پایدروسیم شبیه‌سازی عددی شده است و با توجه به تشابه آن با مطالعه حاضر می‌توان جهت اعتبارسنجی، نتایج دو مطالعه را با هم مقایسه کرد که در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج حاصل از بررسی حاکی از آن بوده که حداکثر دما ۶/۹٪ و میدان دید ۱۰٪ با نتایج جون تفاوت داشته است؛ لذا واگن بررسی شده در مطالعه حاضر در حالت بحرانی تری قرار دارد. با توجه به کوچک‌تر بودن ابعاد واگن این مطالعه نسبت به واگن جون، تفاوت در موقعیت منبع آتش و نیز موقعیت فضای آتش سوزی که در هوای آزاد و خارج از تونل بوده، می‌توان گفت نتایج از هماهنگی خوبی برخوردارند.



شکل ۱۰ مقایسه نتایج (حالت شعله‌های آتش و میزان نفوذ آن در بخش‌های مختلف واگن بعد از ۶۰۰ ثانیه از شروع آتش‌سوزی) نرم-افزار با سانحه واقعی

جدول ۵ مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج جون و همکاران

پارامتر مورد مطالعه	نتایج جون [۵] برای مورد I	نتایج مطالعه حاضر برای حالت شماره ۱
مدت زمانیکه طول می‌کشد تا دما در ارتفاع ۱/۵ متری از کف واگن به ۶۰ درجه سانتیگراد برسد	۲۰۰ ثانیه	۱۰۰ ثانیه
حداکثر دمای داخل سالن	۷۲۰ درجه سانتیگراد	۷۷۰ درجه سانتیگراد
مدت زمان بحرانی برای میدان دید در ۱/۵ متری از کف واگن	۱۰۰ ثانیه	۹۰ ثانیه

۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه سانحه آتش‌سوزی واگن قطار مسافری تهران به اهواز که در تاریخ ۹۵/۰۴/۲۷ رخ داد با استفاده از نرم افزار پایدروسیم شبیه‌سازی و پارامترهای گرمایی و انتشاردود مورد

علامه انگلیسی

T	دما
p	فشار
$u = (u, v, w)$	سرعت در دستگاه مختصات کارتزین
h	آنتالپی محسوس (KJ)
τ_{ij}	تانسور تنش
f_b	نیروهای خارجی مثل نیروی درگ (N)
q'''	نرخ حرارت دهی بر واحد حجم ناشی از واکنش شیمیایی (kJ/m^3)
q_b''''	انرژی منتقل شده به قطرات تبخیر شده (KJ)
q''	شار حرارتی ناشی از انتقال حرارت‌های رسانش و تشعشع (KW)
ϵ	نرخ تبدیل انرژی جنبشی به انرژی حرارتی
\bar{W}	مجموع جرم مواد موجود در واکنش
R	ثابت جهانی گازها ($8.314472 J/kmol$)
C_xH_y	سوخت هیدروکربنی
CO_2	دی اکسید کربن

- [3] Lönnermark, A., Ingason, H., Li, Y. Z., Kumm, M., Fire development in a 1/3 train carriage mock-up, Fire Safety Journal Vol. 91, pp. 432-440, (2017).
- [4] Jun-min, C., Xiao-lin, Y., Gang, Y., Xiao-han, G., Comparative Study on Heat Release Rate of High-speed Passenger Train Compartments, Procedia Engineering Vol. 71, p. 107 – 113, (2014).
- [5] Shan-jun, M., Zi-rong, L., Dong, L., Jia-xin, L., Nan-jiang, Z., Analysis of Smoke Hazard in Train Compartment Fire Accidents Base on FDS, Procedia Engineering Vol. 52, p. 284 – 289, (2013).
- [6] Thunderhead Engineering, PyroSim User Manual, finland: National Science Foundation, (2012).
- [7] Sonntag, R. E., Borgnakke, C., Van Wylen, G. J., Fundamentals of Thermodynamics, Michigan: WILY Press, (2003).
- [8] McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., Baum, H., Rehm, R., Mell, W., McDermott, R., Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, Espoo: National Institute of Standards and Technology Special Publication 1018-5, (2010).
- [9] Zeng, Z., Xiong, K., Xin-Ling, L., Weng, M.-C., Liu, F., Study on the smoke stratification length under longitudinal ventilation in tunnel fires, International Journal of Thermal Sciences Vol. 132, p. 285–295, (2018).
- [10] McGrattan, K., Hostikk, S., McDermott, a R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K., Fire Dynamics Simulator User's Guide, Baltimore, Maryland, USA: NIST Special Publication 1019, (2014).

مونوکسید کربن	CO
ماده ای که می سوزد (سوخت)	$C_xH_yO_zN_vOther_w$
آب	H ₂ O
نرخ حرارت دهی بر واحد سطح آتش (KW)	HRRPUA
نیتروژن	N ₂
اکسیژن	O ₂
دود ناشی از احتراق	Soot
دبی حجمی سوخت مصرفی (lit/s)	\dot{V}
آنتالپی سوختن سوخت یا ارزش حرارتی موثر احتراق (kJ/lit)	ΔH
	علایم یونانی
چگالی (kg/m ³)	ρ
ضریب استوکیومتری واکنش	Y

مراجع

- [1] Xi, Y., Mao, J., Bai, G., Hu, J., Safe velocity of on-fire train running in the tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 60 p. 210–223, (2016).
- [2] Xu, Z. S., You, W., Kong, J., Cao, H., Zhou, C., A study of fire smoke spreading and control in emergency rescue stations of extra-long railway tunnels, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 49, pp. 155-161, (2017).