مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1394، دوره 15، شماره 10، ص‌ص 1-11

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه عددی پدیده گسترش آتش‌سوزی از یک منبع آتش به جسم مجاور در تونل

حمیدرضا بزرگ‌عصاره[1]، علی کاظمی‌پور[2]، حسین افشین[3*]، بیژن فرهانیه[4]

1- کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
2- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
4- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
* تهران، صندوق‌پستی 11155-9567، afshin@sharif.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 17 فروردین 1394
پذیرش: 03 مرداد 1394
ارائه در سایت: 08 شهریور 1394

کلید واژگان:
آتش در تونل
دینامیک سیالات محاسباتی
شبیه‌ساز دینامیکی آتش
گسترش آتش

چکیده

در مطالعه حاضر، انتقال آتش از یک جسم به جسم دیگر در یک تونل و پدیده‌های فیزیکی حاکم بر آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش تحقیق به‌صورت عددی است و از نرم‌افزار متن‌باز شبیه‌ساز دینامیک آتش استفاده می‌شود. دو جسم از جنس چوب با ابعادی نزدیک به ابعاد یک خودرو در تونلی به طول 40 متر با تهویه اجباری به‌صورت طولی قرار داده می‌شوند و انتقال آتش از جسم اول به جسم دوم بررسی می‌گردد. جهت انتقال آتش به جسم هدف، معیار دمای اشتعال مورد استفاده قرار خواهد گرفت، به‌گونه‌ای که آغاز اشتعال مشروط به رسیدن دمای سطح جسم به مقدار خاصی است که از داده‌های آزمایشگاهی استخراج می‌شود. با اندازه‌گیری زمان آغاز اشتعال جسم دوم، چگونگی تأثیر هر پارامتر آشکار می‌شود، همچنین با ارائه کانتورها و نمودارهای مختلف، پدیده‌های دخیل در انتقال آتش به‌صورت کمی و کیفی مورد تحلیل قرار می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت تهویه، زمان انتقال آتش ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد که این پدیده به دلیل کارکرد هم‌زمان اثرات خنک‌کنندگی و انحراف پلوم دود است، همچنین در نرخ‌های رهایش گرمای کمتر، با افزایش فاصله، زمان اشتعال با نرخ سریع‌تری افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که اثر کاهش ارتفاع بر کاهش زمان اشتعال در نرخ‌های رهایش کمتر به مراتب شدیدتر است. همچنین، اثر تغییر شیب تونل در سرعت تهویه بالا به دلیل غالب‌شدن سرعت تهویه اجباری و افزایش عدد فرود، چندان محسوس نیست. برای تأیید کارایی مدل عددی به کار گرفته شده، اعتبارسنجی با کارهای تجربی نیز ارائه می‌شود.

Numerical Investigation of Fire Spread from a Fire Source to a Near Body in a Tunnel

Hamidreza Bozorgasareh, Ali Kazemipour, Hossein Afshin*, Bijan Farhanieh

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
* P.O.B. 111559567 Tehran, Iran, afshin@sharif.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 April 2015
Accepted 25 July 2015
Available Online 30 August 2015

Keywords:
Fire in tunnel
CFD
FDS
Fire spread

ABSTRACT

Fire spread from one body to another in a road tunnel is investigated in this study, with respect to the phenomena and the physical concept. Fire Dynamics Simulator will be used as a CFD tool. Two wood boxes representing cars are modeled in a 40m long tunnel with longitudinal ventilation and fire transmission from one to another is considered. Ignition temperature is assigned to the second box surface as the ignition start condition. Indeed, ignition start of the second box depends on its temperature rise to a certain value that is extracted from experimental data. At each case, ignition time of the second box is captured. Furthermore, fire spread phenomena is considered quantitatively and qualitatively. The results show that increase of ventilation velocity causes first an increment and then a decrease in ignition time, due to both cooling and smoke plume inclination effects. Also, with increasing the distance, ignition time increment rate is faster at low HRRs. In addition, the results show that the tunnel height reduction has stronger effect on ignition time for lower HRRs. Finally, because of forced ventilation dominance in high ventilation velocities, no noticeable influence on ignition time is observed by changing the tunnel slope. To confirm accuracy of the numerical model, validation with experiments will be presented too.

1- مقدمه

در دهه‌های اخیر استفاده از تونل‌ها به‌عنوان یک راه‌حل برای مشکل ترافیک شهری، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در مواقع اضطراری، آتش‌سوزی در تونل به دلیل آسیب‌های جانی و مالی که با خود به همراه دارد همواره موضوع چالش‌آوری برای محققان و طراحان بوده است. سیستم‌های تهویه اضطراری، دود و حرارت ناشی از آتش را از تونل تخلیه می‌کند. در سال‌های اخیر، تحقیقات بر تهویه تونل در شرایط اضطراری نشان داده که افزایش سرعت تهویه، اگرچه می‌تواند سبب خروج بهتر دود و گازهای آلاینده از تونل شود، اما ممکن است سبب انتقال آتش به خودروهای مجاور شود و شرایط را وخیم‌تر کند. در تونل‌های پرتردد، انتقال آتش از یک وسیله نقلیه در حال

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
H. Bozorgasareh, A. Kazemipour, H. Afshin, B. Farhanieh, Numerical Investigation of Fire Spread from a Fire Source to a Near Body in a Tunnel, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 10, pp. 1-11, 2015 (In Persian)

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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.17.1]

آتش‌سوزی به وسایل و تجهیزات مجاور می‌تواند فاجعه را به‌مراتب وخیم‌تر کند؛ بنابراین مطالعه پارامترهای دخیل در انتقال آتش می‌تواند سبب افزایش آگاهی جهت جلوگیری از رشد آتش به خودروها و تجهیزات دیگر در تونل و به‌کارگیری فنون حاصل از این مطالعات، منجر به کمینه‌شدن خسارات وارده شود.

در سال‌های گذشته مطالعات تجربی فراوانی در مقیاس‌های واقعی یا مدل‌های کوچک روی پدیده آتش‌سوزی در تونل انجام گرفته است که ضمن ارائه نتایج کارهای خود، ابزاری برای اعتبارسنجی کارهای عددی محسوب می‌شوند. در سال 2006، لونرمارک و اینگاسون [1] برای بررسی پدیده گسترش آتش، چهار آزمایش در تونل رانهامر انجام دادند. در این آزمایش‌ها که منبع آتش مشابه یک کامیون بود، انتقال آتش به اجسام هدف در پایین‌دست شامل بخش‌های انتهایی منبع آتش و قطعات کوچک پلاستیکی و چوبی بررسی شد. هدف این تحقیق، بررسی پدیده‌های مختلف انتقال آتش و تعیین فاصله بحرانی بین کامیون و اجسام هدف در نرخ‌های مختلف تولید گرما بود. هندسه اجسام در این تحقیق، کاملاً فرضی بوده و تشابهی با وسایل نقلیه نداشته است، همچنین سری آزمایش‌های پروژه یورکا ای یو 499[1] [2]، کارهای تجربی پروژه تونل مموریال[2] [3]، و آزمایش‌های صورت‌گرفته بر تونل رانهامر[3] [4] از دیگر کارهای تجربی در تونل‌های با مقیاس واقعی هستند که البته بیشتر به بحث عملکرد سیستم تهویه در تونل‌ها پرداخته شده است.

در کنار تحقیقات تجربی در اندازه واقعی، پژوهشگران با استفاده از تکنیک تشابه به مطالعه آتش‌سوزی در تونل با مقیاس متوسط و کوچک به شکلی مقرون به‌صرفه‌تر پرداخته‌اند. برای نمونه، هانسن و اینگاسون [5] در سال 2011 قطعات چوب را در فواصل یکسان از یک منبع آتش در تونلی مستطیلی قرار دادند و با اندازه‌گیری مجموع نرخ رهایش گرما، تلاش کردند تا معیار اشتعال قطعات را تعیین و روابطی ساده برای تعیین محاسبه نرخ رهایش گرما به‌صورت تحلیلی ارائه کنند. ایشان مشاهده کردند که بهترین معیار برای اشتعال، شار حرارتی است، همچنین در کار دیگری [6] در سال 2012، آزمایش مقیاس متوسط تجربی خود را برای فواصل دیگر اجسام تکرار و مشاهده کردند که معیار شار حرارتی برای مواردی که فاصله جسم هدف و منبع آتش کم و رشد آتش منبع سریع و مناسب است، ولی برای مدل‌هایی که فاصله جسم هدف تا منبع آتش زیاد بوده و نرخ رشد آتش سریع نیست، دمای اشتعال معیار بهتری ارائه می‌کند. البته تعریف دقیقی از فاصله زیاد و نرخ رشد سریع ارائه نگردید و پدیده‌ها به‌صورت کیفی تشریح شد.

هوروات و همکاران [7] در سال 2009 در یک کار تجربی مقیاس کوچک، انتقال آتش از یک مشعل گازی را به سه قطعه چوب در فواصل مختلف از آن در زیر یک هود بررسی کردند. در این تحقیق، دمای قطعات چوب هدف و میزان انتقال حرارت تشعشعی به سطح آن‌ها اندازه‌گیری و مکانیزم انتقال آتش بررسی شد، همچنین کار تجربی خود را با نرم‌افزار انسیس[4] به روش عددی تکرار کردند. مدل عددی آن‌ها برای قطعه چوب نزدیک‌تر، نتایج خوبی در مقایسه با کار تجربی پیش‌بینی می‌کرد، اما برای قطعات دوم و سوم، زمان پیش‌بینی‌شده برای مشتعل شدن کوتاه‌تر از مقدار تجربی بود. این تحقیق همچنین معیارهایی برای پیش‌بینی اشتعال قطعات ارائه کرد.

1- EUREKA EU499
2- Memorial
3- Runehamar
4- ANSYS

یکی از موارد مورد مطالعه در ارتباط با پدیده انتقال آتش، بررسی تأثیر آبپاش است. اینگاسون [8] در سال 2008 تأثیر آبپاش را بر گسترش آتش در تونلی مستطیلی با مقیاس 1:23 با تهویه طولی به روش تجربی بررسی کرد. یک قطعه چوب به‌عنوان منبع آتش، یک کامیون در ابعاد واقعی را مدل‌سازی می‌کرد و قطعه چوب دیگر در پایین‌دست به‌عنوان وسیله نقلیه هدف قرار داشت. این تحقیق نشان داد که برای آبپاشی با بیش از مقدار خاصی انتقال آتش اتفاق نمی‌افتد، ولی در کمتر از آن، قطعه هدف تحت تأثیر آتش قرار گرفته و کاملاً می‌سوزد. لی و اینگاسون [9] در سال 2013 در تونلی مستطیلی با مقیاس 1:15 سیستم آبپاش خودکار را مطالعه کردند. بخش نخست این تحقیق به بررسی انتقال آتش از چند قطعه چوب در حال سوختن به‌عنوان منبع آتش به قطعات چوب دیگری که در فاصله 1/05 متری از آن‌ها (معادل 15/75 متر در تونل واقعی) قرار داشتند اختصاص داشت. ایشان جهت تعیین معیاری برای انتقال یا فقدان انتقال آتش به قطعات چوب هدف، دمای سقف تونل در مقطع لبه بالادستی جسم هدف را مورد ارزیابی قرار دادند، همچنین نشان دادند که عبور دمای این نقطه به بیش از 600 درجه سانتی‌گراد معیار خوبی برای بررسی انتقال آتش است.

در سال‌های اخیر با قدرت گرفتن ابزار محاسباتی، روش‌های عددی سهمی قابل توجه از تحقیقات در حوزه آتش را به خود اختصاص داده‌اند. کارول و همکاران [10] در سال 2005 انتقال آتش به روش برخورد شعله را به یک کامیون در پایین‌دست آتش در تونل به روش احتمالی بیز[5] بررسی کردند. آن‌ها براین باورند که رفتار آتش در برخورد شعله قطعی نیست و باید از دیدگاه احتمالات مسئله را بررسی کرد. آن‌ها تأثیر پارامترهای ابعاد تونل، سرعت تهویه و فاصله جسم هدف تا آتش را بر احتمال انتقال آتش ارزیابی کردند. در سال 2007، ژانگ و همکاران [11] گسترش آتش و دود در یک پارکینگ زیرزمینی با 50 خودرو را به روش عددی با استفاده از شبیه‌ساز دینامیک آتش (اف دی اس)[6] مطالعه کردند. ابتدا رفتار آتش در یک خودرو را با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مدل کردند و سپس مدل خود را به گسترش آتش بین وسایل نقلیه تعمیم دادند. نشان دادند که پس از مصرف اکسیژن محیط توسط آتش و ضعیف شدن موقتی آن، تزریق هوای تازه به محل توسط سیستم‌های تهویه سبب قدرت گرفتن دوباره آتش می‌شود.

همان‌طور که پیشتر نیز یاد شد، افزایش نرخ تهویه علی‌رغم کاربرد مهم در تخلیه دود، احتمال گسترش آتش به خودروهای مجاور را بیشتر می‌کند؛ بنابراین در طراحی سیستم تهویه اضطراری، دو بحث تخلیه آلاینده‌ها و انتقال آتش باید به‌طور هم‌زمان بررسی شوند. این موضوعی است که در تحقیقات متعدد و بی‌شمار در ارتباط با روش‌های تخلیه دود مدنظر قرار نگرفته است. به‌طوری که تاکنون تحقیقات و پیشرفت‌های فراوانی در مورد تعیین سرعت تهویه بحرانی برای خروج آلاینده‌ها صورت گرفته است، ولی تحقیقات در زمینه تأثیر تهویه طولی بر انتقال آتش بسیار محدود است. مطالعه حاضر با هدف بررسی فیزیکی پدیده‌های مرتبط با انتقال آتش در اثر تهویه طولی در تونل به روش عددی پایه‌ریزی شده است، همچنین نحوه اثر پارامترهای مختلف بر انتقال آتش بین دو جسم مدل که ابعادی نزدیک به ابعاد خودرو را دارند مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برخلاف بیشتر مطالعات مشابه گذشته که صرفاً انتقال یافتن یا نیافتن آتش را مورد مطالعه قرار داده‌اند و پیشتر شرح داده شد، در این تحقیق سرعت انتقال آتش با استفاده از بررسی پارامتر زمان انتقال مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترهای بررسی‌شده در این تحقیق،

5- Bayesian method
6- Fire Dynamics Simulator (FDS)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.17.1]

سرعت تهویه، نرخ رهایش گرمای منبع آتش، فاصله دو جسم، ارتفاع و شیب تونل هستند. جهت تأیید روش عددی به‌کار گرفته شده و حصول اطمینان از کارایی آن، نتایج ابتدا با یک آزمایش عددی مقیاس کوچک اعتبارسنجی شده‌اند.

2- مکانیزم انتقال آتش

جهت بررسی انتقال آتش در یک مورد خاص، نخست باید مکانیزم انتقال آتش در آن تعیین شود. با توجه به بررسی‌های کارول و همکاران [10]، مکانیزم‌های انتقال آتش را می‌توان به چهار گروه زیر تقسیم کرد.

- برخورد شعله
- اشتعال خودبه‌خودی
- انتقال سوخت (شامل انتقال جریان سوخت مایع در حال احتراق یا انتقال گدازه‌ها و قطعات جامد پرتاب‌شده از آتش)
- انفجار

در مکانیزم برخورد شعله، اشتعال در «نقطه اشتعال» جسم هدف اتفاق می‌افتد، اما در مکانیزم اشتعال خودبه‌خودی، آغاز اشتعال در «نقطه اشتعال خودبه‌خودی[1]» جسم هدف است؛ بنابراین از آن‌جا که نقطه اشتعال از نقطه اشتعال خودبه‌خودی کمتر است، پس در مکانیزم برخورد شعله، انتقال آتش زودتر اتفاق خواهد افتاد. هنوز معیاری دقیق برای این‌که بتوان تعیین کرد در هر مورد آیا برخورد شعله یا اشتعال خودبه‌خودی اتفاق می‌افتد تعیین نشده است [10]. در روش برخورد شعله، شعله که ناحیه‌ای با دمای بسیار بالاست یک نقطه از جسم هدف را به سرعت گرم می‌کند، اگرچه دمای باقی جسم هنوز پایین‌تر است.

پارامتر مهم در بحث اشتعال اجسام جامد، آتش‌کافت یا تجزیه حرارتی است. بدین‌معنی که جسم جامد باید از خود گازهایی متصاعد کرده و آن گازها دچار احتراق شوند. تجزیه حرارتی تابعی از دما بوده و نرخ تولید گاز به‌طور نمایی با دما افزایش پیدا می‌کند. آزمایش‌های متعدد نشان می‌دهد که برای تولید دبی کافی از گاز، باید دمای سطح به مقدار خاصی برسد. این دما تقریباً مستقل از پارامترهای بیرونی مانند شار حرارتی، نرخ انتقال حرارت و ... است؛ بنابراین تعریف دمای اشتعال، یک مدل ساده ولی دقیق از فرآیند احتراق ایجاد می‌کند.

با رسیدن شعله به‌عنوان ناحیه گازی دما بالا به جسم هدف، یک نقطه از جسم به دمای اشتعال رسیده و گرمای ناشی از شعله آن، باقی جسم را سریع گرم می‌کند. بدین‌ترتیب آتش به تمام جسم گسترش می‌یابد که این مکانیزم سوختن به روش برخورد شعله است. در حالت دیگر، با گرم شدن گازهای اطراف جسم و دیواره‌ها، دمای تمام جسم می‌تواند به‌طور یک‌پارچه بالا رفته و به نقطه اشتعال نزدیک شود تا این‌که اشتعال از یک نقطه در جسم آغاز و به باقی جسم گسترش یابد. در این حالت که در آن سوختن با مکانیزم اشتعال خودبه‌خودی اتفاق افتاده، سطح ماده با دریافت گرما از سلول‌های گازی اطراف از طریق مکانیزم‌های مختلف گرم شده است.

این پدیده در شبیه‌سازی عددی نیز پیاده‌سازی شده است، جسم جامد به شبکه‌های ریز تقسیم می‌شود و هر سلول با رسیدن به دمای خاصی به نام دمای اشتعال، آغاز به سوختن می‌کند؛ بنابراین هر دو مکانیزم برخورد شعله و اشتعال خودبه‌خودی، با روش تقسیم جسم هدف به سلول‌های کوچک و تعیین دمای اشتعال، قابل اعمال در شبیه‌سازی هستند.

1- Auto ignition temperature (AIT)

3- معادلات حاکم و ابزار حل

در این مطالعه از نرم‌افزار منبع‌باز اف‌دی‌اس که توسط مؤسسه ملی فناوری و استانداردهای ایالات متحده امریکا[2] منتشر شده است، برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شده است. در این نرم‌افزار، شکلی از معادلات ناویر- استوکس برای جریان‌های سرعت پایین ناشی از آتش‌سوزی به همراه معادلات انرژی و احتراق حل می‌شود. اف‌دی‌اس به‌عنوان یک ابزار عددی قدرتمند، به‌طور گسترده در تحقیقات مرتبط با گسترش آتش و دود مورد استفاده قرار گرفته است. دقت و صحت نتایج حاصل از اف‌دی‌اس در شبیه‌سازی‌ها توسط محققان زیادی به اثبات رسیده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات هو و همکاران [12]، چالاسانی و همکاران [13]، روه و همکاران [14] و فرایدی و مورر [15] اشاره کرد.

هسته اصلی کد به‌صورت پیش‌بینی‌کننده- اصلاح‌گر[3] صریح و با دقت مرتبه دوم در فضا و زمان است. مشتقات جزئی معادلات بقایی توسط روش تفاضل محدود گسسته شده‌اند و فرآیند حل در هر گام زمانی با استفاده از روش رانج- کوتای مرتبه دوم اعمال می‌شود. شبکه محاسباتی مستقیم‌الخط بوده و سلول‌ها به شکل مکعب مستطیل هستند. منحنی‌های موجود در هندسه باید با پله‌های متوالی مدل‌سازی شوند.

اف‌دی‌اس برای حل جریانی که توسط آتش‌سوزی کنترل می‌شود، از فرض عدد ماخ پایین استفاده می‌کند. این فرض با استفاده از تعریف مفهوم فشار پایه[4] اعمال می‌گردد. فرض عدد ماخ پایین به این معنی است که سرعت صوت در مقابل سرعت سیال بسیار زیاد فرض می‌شود؛ بنابراین با تغییر در میدان جریان، فشار در تمام دامنه محاسباتی به سرعت تغییر می‌کند. از سوی دیگر در فرمول‌بندی، فشار به دو بخش جمله فشار پایه و جمله نوسان فشاری ناشی از جریان تقسیم شده است. فشار پایه صرفاً تابعی از ارتفاع و زمان است. حال با استفاده از فرض جریان عدد ماخ پایین و در نبود پالس‌های نوسانی فشار، در معادلات حالت و انرژی به‌جای پارامتر فشار، فشار پایه جایگزین می‌شود. با این فرض حل معادلات ساده‌تر و سریع‌تر می‌شود و گام زمانی بجای سرعت صوت، صرفاً تابع سرعت جریان خواهد بود. آشفتگی با روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ[5] و مدل زیرشبکه اسماگورینسکی[6] مدل می‌شود. معادله انتقال تشعشع با فرض گاز خاکستری (دود به‌عنوان گاز ساطع‌کننده تشعشع) و با روش حجم محدود روی شبکه محاسباتی حل می‌شود. تشعشع دیواره‌ها را گرم می‌کند و به این ترتیب جریان هوا نیز گرم می‌شود. گرم شدن ناشی از تشعشع می‌تواند الگوی جریان را تحت تأثیر قرار دهد، همچنین شار حرارتی جابه‌جایی به سطح از ترکیب روابط تجربی جابه‌جایی اجباری و آزاد محاسبه می‌شود. به‌صورتی‌که ضریب جابه‌جایی، برابر مقدار بیشینه ضرایب جابه‌جایی اجباری و آزاد بوده و این دو از روابط (1،۲) به‌دست می‌آید.

$$h_{\text{natural}} = C_1|\Delta T|^{1/3} \quad (1)$$

$$h_{\text{free}} = \frac{k}{L} C_2 Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad (2)$$

واحد هر دو ضریب وات بر مترمربع بر درجه کلوین است. C_1 برای صفحه افقی 1/52 و برای صفحه عمودی 1/31 و همچنین C_2 برابر 0/037 است.

مدل احتراقی فاز گازی، به‌صورت تک مرحله‌ای بوده و توسط میزان اختلاط کنترل می‌شود. در واقع سوخت با اکسیژن به‌صورت تک‌مرحله‌ای واکنش

2- United States National Institute of Standards and Technology (NIST)
3- Predictor-corrector
4- Background pressure
5- Large eddy simulation
6- Smagorinsky

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.17.1]

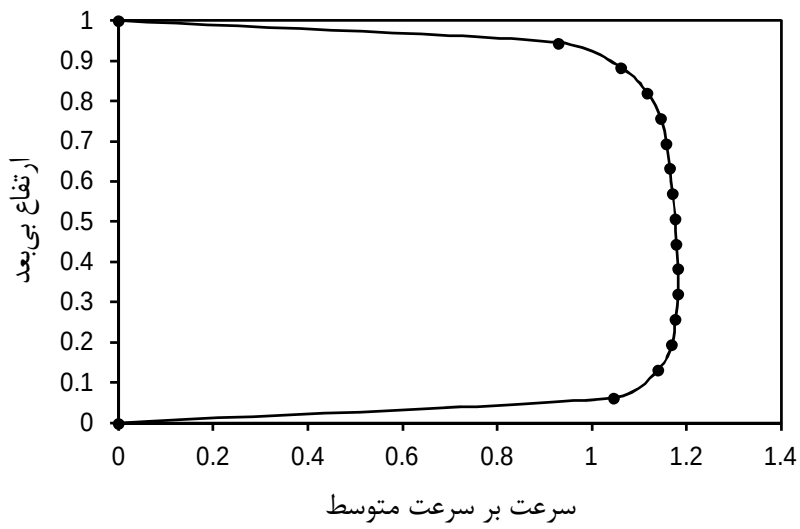
می‌دهد و بخار آب، دی‌اکسید کربن، دوده و مونوکسیدکربن تولید می‌شود. مشخصات گونه سوخت مطابق با خواص پروپان است و نرخ تولید[1] کربن‌مونوکسید و دوده به‌ترتیب 0/04 و 0/1 است، همچنین خاموشی موضعی شعله بر پایه دمای بحرانی شعله در کد فعال شده است، به این صورت که کد، دمای هر سلول را بررسی می‌کند و اگر دما از دمای اشتعال خودبه‌خودی برای سوخت پایین‌تر باشد احتراق اتفاق نمی‌افتد. برای احتراق، هم شرط اختلاط باید برقرار باشد و هم شرط دما. هردو شرط لازم هستند و درصورت صادق بودن هر دو شرط، احتراق در سلول آغاز می‌شود. در ادامه، سرعت احتراق با اختلاط کنترل می‌شود. برای توضیح دقیق‌تر معادلات حاکم در کد به مرجع [16،17] مراجعه شود.

ابزار حل مورد استفاده در کنار مزایای منحصر به‌فرد خود در شبیه‌سازی پدیده آتش، شامل محدودیت‌هایی بر مدل خود است که می‌تواند موجب فاصله گرفتن نتایج از واقعیت شود. فقدان توانایی اف‌دی‌اس در تولید مش بی‌سازمان، مقید بودن به مختصات کارتزین، سرعت پایین جریان، مدل کردن انتقال حرارت در جسم جامد با روابط یک‌بعدی، عدم امکان تعیین دقیق ضرایب انتقال حرارت به دلیل شبکه درشت کنار دیواره و ناتوانی در تعیین دقیق نرخ رهایش آتش که به مهارت کاربر وابسته است از جمله این محدودیت‌ها هستند.

3-1- تشریح تونل مدل و شرایط مرزی

جهت بررسی اثر انتقال آتش، تونلی با مقطع مستطیلی به طول 40 متر و عرض 7 متر درنظر گرفته شد که ارتفاع آن در شبیه‌سازی‌های مختلف 3، 5 و یا 7 متر است. دیواره تونل به ضخامت 0/5 متر از جنس بتن با ضریب هدایت حرارتی 0/7 وات بر متر بر درجه کلوین، ضریب گرمای ویژه 0/7 کیلوژول بر کیلوگرم بر درجه کلوین و چگالی 2300 کیلوگرم بر متر مکعب، و پس از آن عایق در نظر گرفته شده است (در مدت زمان شبیه‌سازی‌ها و همچنین آتش‌های واقعی، حرارت به عمق بیش از 20 سانتی‌متری دیواره بتنی نفوذ نمی‌کند و بنابراین نوع مرز انتهایی دیواره تأثیری در نتایج ندارد). در ورودی تونل، برای پروفیل سرعت ورودی از نتایج کار کستانتینو و همکاران [18] با فرض این‌که فاصله اجسام مدل از جت‌فن بالادست به اندازه کافی باشد استفاده شد. شکل بی‌بعد پروفیل مانند نمودار شکل 1 است.

برای خروجی تونل، از شرط مرزی فشار یا مرز آزاد (باز[2]) استفاده شده که به معنی تخلیه به فضای آزاد (یا مکش هوای اتمسفریک) است. دمای نخستین اجسام جامد (دیواره‌های تونل و قطعه چوب هدف) و دمای محیط، 20 درجه سانتی‌گراد درنظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها در فشار اتمسفریک سطح دریا انجام شده است.



شکل 1 پروفیل سرعت ورودی

دو مکعب مستطیل به ابعاد 1 × 2 × 4 متر با فاصله طولی مشخصی از یکدیگر (که در هر شبیه‌سازی متغیر است) در تونل قرار داده شدند. فاصله مکعب نخست از ورودی تونل 17 متر (حدود 3-4 برابر قطر هیدرولیک مقطع تونل) است. کف مکعب‌ها 0/5 متر بالاتر از کف تونل درنظر گرفته شده است. نمونه‌ای از هندسه تونل و قطعات چوبی در شکل 2 نشان داده شده است.

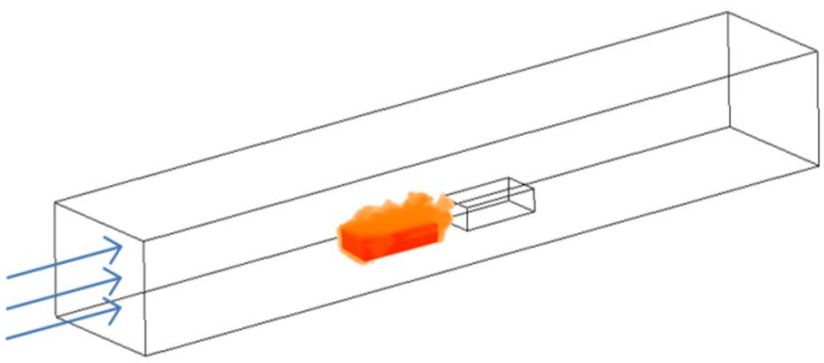
در مرزهای جامد، معادله انتقال حرارت هدایتی به‌صورت گذرا حل می‌شود و دیواره‌های تونل و قطعه چوب هدف در اثر حرارت گرم می‌شوند. برای شبیه‌سازی دقیق تغییرات زمانی دمای جسم جامد ناشی از تمام مکانیزم‌های انتقال حرارت، معادله انتقال حرارت هدایت به‌طور موازی با معادلات جریان سیال در هر گام زمانی حل می‌شود. شبکه محاسباتی مستقلی برای مرز جامد درنظر گرفته می‌شود و معادله هدایت به‌صورت یک‌بعدی برای هر سلول جامد (متناظر با سلول محاسباتی فاز سیال) حل می‌شود.

قدرت آتش وسایل نقلیه مطابق استاندارد پیارک[3] [19] به شرح زیر است:

- یک خودروی مسافربری کوچک 2/5 مگاوات
- یک خودروی مسافربری بزرگ 5 مگاوات
- 2-3 خودروی مسافربری 8 مگاوات
- یک ون 15 مگاوات
- یک اتوبوس 20 مگاوات
- یک کامیون با مواد سوختنی 20-30 مگاوات

در این مطالعه با فرض بررسی آتش ناشی از وسایل نقلیه سبک، نرخ رهایش حرارت بین 4-8 مگاوات به‌عنوان آتش خودروی مسافربری بزرگ انتخاب شد. در مطالعه حاضر، زمان بین آغاز آتش در منبع تا آتش گرفتن جسم دوم به‌عنوان پارامتر کلیدی جهت تحلیل درنظر گرفته شد، یعنی علاوه‌بر این‌که به پرسش درباره آتش گرفتن یا نگرفتن جسم هدف پاسخ داده می‌شود، سرعت انتقال آتش نیز بررسی می‌شود.

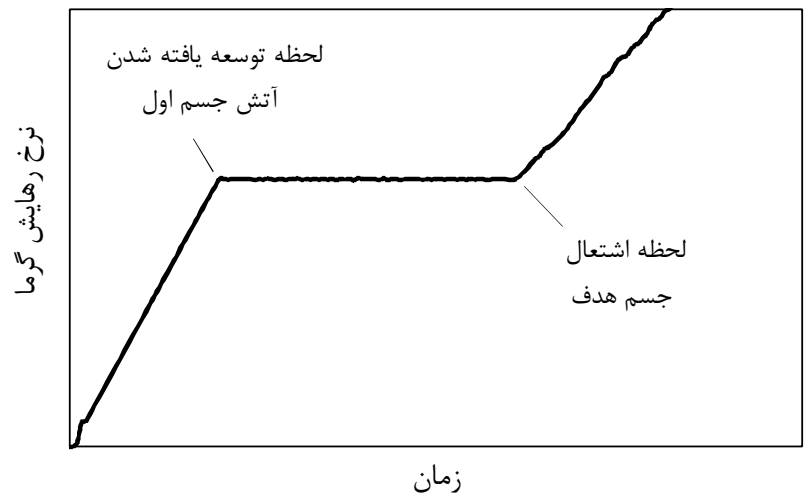
برای تعیین این زمان، نمودار نرخ کل رهایش گرما در هر سناریو بررسی می‌شود. آتش گرفتن جسم هدف، معادل افزایش قابل توجه در مقدار این پارامتر است؛ بنابراین تغییرات زمانی نرخ رهایش گرما که منحنی آتش[4] نامیده می‌شود، به‌عنوان معیار انتقال آتش مورد استفاده قرار می‌گیرد. شماتیکی از منحنی آتش مربوط به دو قطعه به همراه زمان انتقال آتش از قطعه نخست به قطعه دوم در شکل 3 ارائه شده است.



شکل 2 تونل مدل به همراه جهت تهویه و منبع آتش در چپ و جسم هدف در راست

1- Yield
2- Open boundary
3- PIARC
4- Fire curve

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.17.1]



شکل 3 نحوه تعیین زمان اشتعال از روی نمودار نرخ رهایش گرما

در شبیه‌سازی‌ها، مکعب نخست که به‌عنوان منبع آتش عمل می‌کند، ابتدا مشتعل شده و پس از رسیدن به بیشینه نرخ انتشار گرما در مدت 60 ثانیه، با نرخ ثابت می‌سوزد. یادآوری می‌شود که مرحله رشد آتش[1] به دلیل کم‌اهمیت بودن در مسئله کنونی درنظر قرار نگرفته و رشد سریع آتش در مرحله فراشعله‌وری[2] درنظر گرفته شده است. همان‌طور که پیشتر یاد شد، خواص قطعه دوم به‌عنوان جسم هدف مطابق با خواص چوب تعریف شد که در جدول 1 ارائه شده است.

4- نتایج

4-1- اعتبارسنجی

کار آزمایشگاهی مقیاس کوچک هوروات و همکاران [7] در مورد بررسی سوختن قطعات کوچک چوب در فواصل مختلف از یک مشعل جهت اعتبارسنجی ابزار عددی و روند شبیه‌سازی به‌کارگرفته شده در تحقیق کنونی استفاده شده است. آزمایش ایشان شامل یک مشعل گازی مربعی 25 سانتی‌متری با قدرت 55 کیلووات به‌عنوان منبع آتش بود. سه قطعه چوب از نوع چوب راش[3] با طول و عرض 3 سانتی‌متر و ارتفاع 5 میلی‌متر در فواصل متفاوت نسبت به مشعل قرار داده شدند و چگونگی اشتعال آن‌ها ناشی از گرمای منبع آتش مورد بررسی قرار گرفت. تمام مجموعه در زیر دو هود که در داخل یکدیگر بودند قرار داشت. هود نخست (هود کوچک‌تر، به شکل یک پوسته توخالی مکعبی فلزی بدون صفحه پایینی) هوا را مکش نمی‌کرد و تنها برای این تعبیه شده بود که هوای کمتری نسبت به سوخت تزریق‌شده به مشعل برسد و بنابراین احتراق غنی[4] باشد. سپس هود خارجی (هود بزرگ‌تر) دود و محصولات احتراق را که از اطراف هود نخست خارج می‌شد جمع‌آوری و به خارج از محیط آزمایشگاه منتقل می‌کرد. پلوم آتش مشعل، تمام منطقه داخل هود نخست را پر می‌کرد و سه قطعه چوب را مشتعل می‌کرد.

جدول 1 خواص جسم هدف

خاصیت	مقدار	واحد
ضریب انتشار[5] (ε)	0/9	-
ضریب هدایت حرارتی	0/2	W/(m K)
ظرفیت گرمایی ویژه	1/3	kJ/(kg K)
چگالی	570	kg/m³
دمای نقطه اشتعال	377	°C

1- Fire growth stage
2- Flashover
3- Beech
4- Fuel rich
5- Emissivity

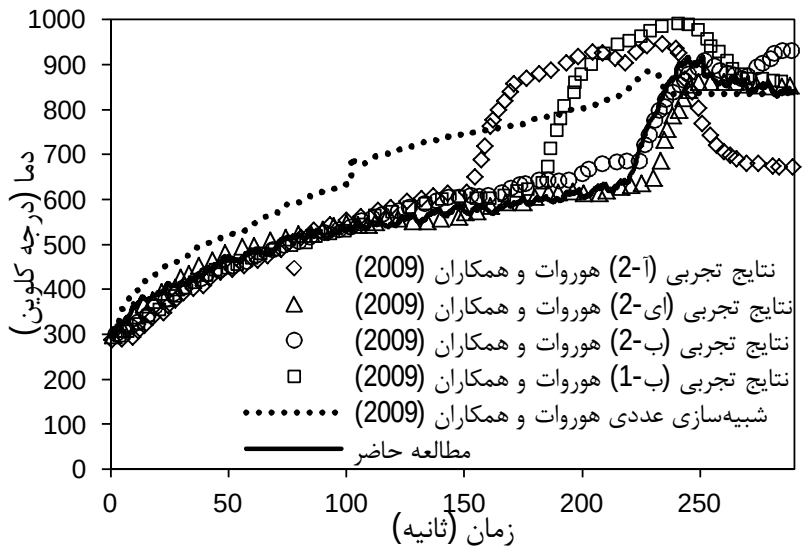
شبیه‌سازی این مطالعه شامل ناحیه‌ای به اندازه طول و عرض 1/52 متر و ارتفاع 0/9 متر بود براساس شبیه‌سازی تشریح‌شده در مقاله هوروات و همکاران، فقط هود داخلی با سطح مقطع مربع به ضلع 76 و ارتفاع 27 سانتی‌متر و هدایت حرارتی 7/7 وات بر متر مربع بر درجه کلوین مدل شد، همچنین به‌جای هود دوم، روی تمام سطوح مرزی دامنه محاسباتی شرط مرزی فشار یا مرز آزاد (باز) اعمال شد. شبکه تولیدشده شامل حدود 800 هزار سلول بود که در نواحی نزدیک به مشعل و قطعات چوب، ریزتر می‌شد. برای شبیه‌سازی سوختن چوب، از مدل دمای اشتعال استفاده شد. بدین‌ترتیب که هر زمان که دمای سلول به دمای اشتعال چوب رسد آغاز به سوختن کرده و از خود حرارت آزاد کند. مطابق نتایج مقاله، این دما حدود 377 درجه سانتی‌گراد بود.

مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج تجربی و عددی هوروات و همکاران با نرم‌افزار سی اف ایکس[6]، در شکل 4 به‌عنوان نمونه برای قطعه چوب دوم آمده است. هوروات و همکاران این آزمایش را 5 مرتبه انجام داده و نتایج در نمودارها با حروف «ا» تا «ای» مشخص شده‌اند. شماره‌های 1 یا 2 مربوط به سری نمونه چوب‌های قرار گرفته در چپ یا راست آتش است. مشاهده می‌شود که نتایج شبیه‌سازی حاضر با دقت قابل پذیرشی با واقعیت مطابقت دارد، با این توضیح که باید توجه داشت که اساساً نادقیق بودن پدیده انتقال آتش، پیش‌بینی دقیق را دشوار می‌کند.

4-2- مطالعه شبکه

تعیین اندازه مناسب شبکه در حل عددی بستگی به ابعاد کوچک‌ترین پدیده‌های دخیل در نتایج مورد مطالعه دارد. هندسه‌های مورد مطالعه تقریباً شبیه به یکدیگر هستند و تنها اختلاف موجود بین برخی از آن‌ها تغییر در فاصله جسم هدف از منبع آتش و یا ارتفاع سقف تونل است. برای نمونه، تونل با ارتفاع 7 متر و فاصله جسم هدف تا منبع آتش (فاصله انتهای جسم نخست تا ابتدای جسم دوم) به اندازه 1 متر برای بررسی استقلال شبکه انتخاب شد. برای صرفه‌جویی در هزینه محاسباتی، در مناطق نزدیک به آتش و خودرو هدف شبکه ریزتر و در نواحی دورتر شبکه با ابعاد بزرگ‌تری تولید شد.

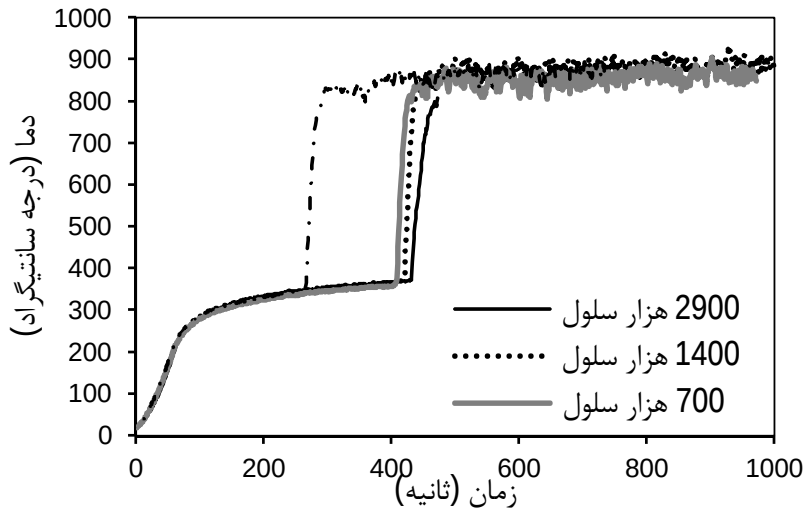
در مجموع چهار شبکه با اندازه‌های 360 هزار، 700 هزار، 1/4 میلیون و 2/9 میلیون سلول تولید شد. نمودار افزایش دما برحسب زمان بر یک نقطه از جسم هدف که رو به منبع آتش قرار دارد برای هر سه شبکه در شکل 5 با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج با افزایش تعداد شبکه به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شود. برای سه شبکه ریزتر نتایج و زمان



شکل 4 مقایسه نتایج تجربی و عددی دمای سطح بالایی نمونه چوب دوم

6- CFX

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.17.1]



شکل 5 نمودار گرم شدن یک نقطه از سطح جسم هدف رو به منبع آتش

اشتعال بسیار نزدیک به هم است؛ بنابراین شبکه متوسط با تعداد حدود 700 هزار سلول برای این مطالعه انتخاب شد. در این شبکه سلول‌های نزدیک به آتش و دو جسم 10 سانتی‌متری و سلول‌های دورتر 20 سانتی‌متری هستند.

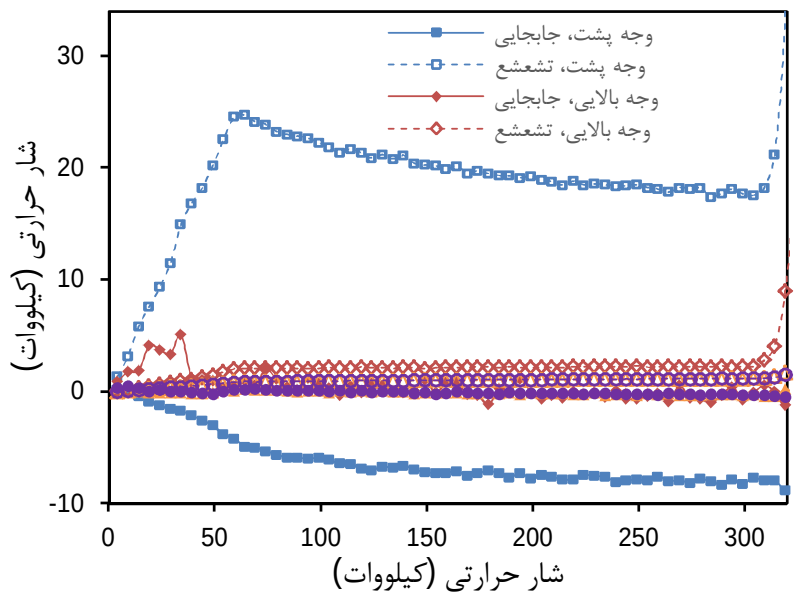
برای شبیه‌سازی آتش با استفاده از مدل گردابه‌های بزرگ، رابطه (3) برای تعیین اندازه شبکه بهینه ارائه شده است.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty T_\infty c_p \sqrt{g}}\right)^{0.4} \quad (3)$$

توصیه شده است که پارامتر بالا با 4-16 سلول محاسباتی جاروب شود [20]. با فرض آتش 5 مگاواتی، ریزترین سلول محاسباتی با اندازه 12 سانتی‌متر به‌دست می‌آید. با توجه به این‌که موضوع مسئله این تحقیق به مدل‌سازی پدیده‌ها در نزدیک آتش ارتباط دارد، شبکه محاسباتی کمی ریزتر درنظر گرفته شده است.

4-3- تحلیل شار حرارتی

جهت درک بهتر فیزیک مسئله و جریان انتقال حرارت، شار حرارتی جذب‌شده توسط جسم هدف مورد تحلیل قرار گرفت. در شکل 6، نمودارهای شار حرارتی تشعشعی و جابه‌جایی سطوح مختلف جسم هدف برای واحد سطح، در سرعت تهویه 3 متر بر ثانیه آورده شده است. انتقال حرارت مثبت به معنی گرم شدن یک سطح، و علامت منفی به معنی دفع گرما از آن است. همان‌گونه که در شکل نیز دیده می‌شود، وجه پشتی جسم هدف بیشترین تأثیر را در انتقال حرارت دارد و میزان انتقال حرارت سایر سطوح در مقایسه با این سطح قابل نادیده‌گرفتن است. در مورد وجه پشتی، در ثانیه‌های ابتدایی مقدار انتقال حرارت جابه‌جایی هنوز نزدیک به صفر است، حال آن‌که تشعشع



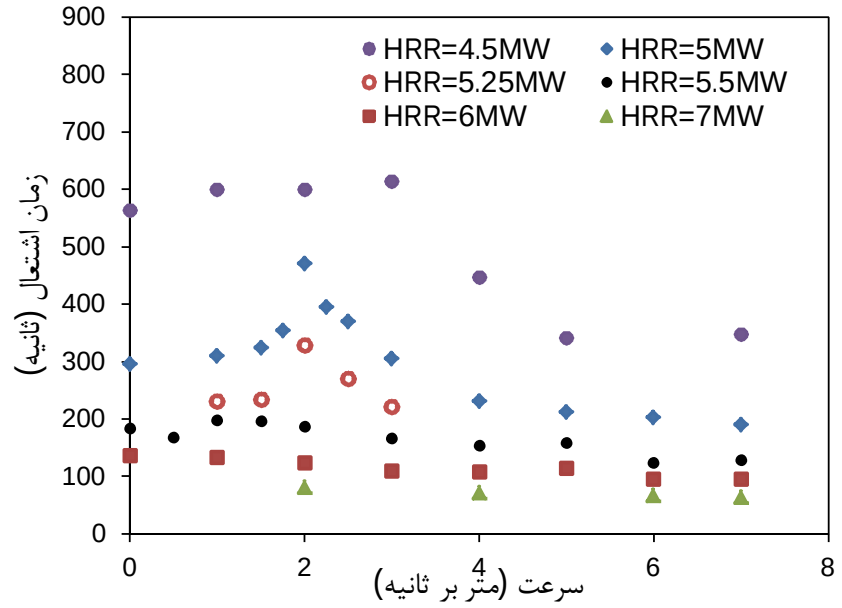
شکل 6 شارهای حرارتی وارده به سطوح مختلف جسم هدف

گرم کردن جسم را آغاز کرده است. در زمان‌های پسین تا زمان اشتعال که در پس از ثانیه 300 اتفاق می‌افتد، هر دو مکانیزم گرم شدن با تشعشع و خنک‌کاری با جابه‌جایی هم‌زمان اتفاق می‌افتند، ولی میزان جذب گرما با تشعشع بیشتر از دفع آن با جابه‌جایی است؛ بنابراین در مجموع دمای جسم به مرور زمان بالا می‌رود. جابه‌جایی سبب خنک‌کاری می‌شود زیرا ضریب هدایت حرارتی جسم پایین است و حرارت سطح آن به خوبی به داخل جسم نفوذ نمی‌کند، پس سطح جسم که دمای آن با تشعشع از دمای گازهای اطراف فراتر رفته، با جابه‌جایی خنک می‌شود.

4-4- اثر سرعت تهویه

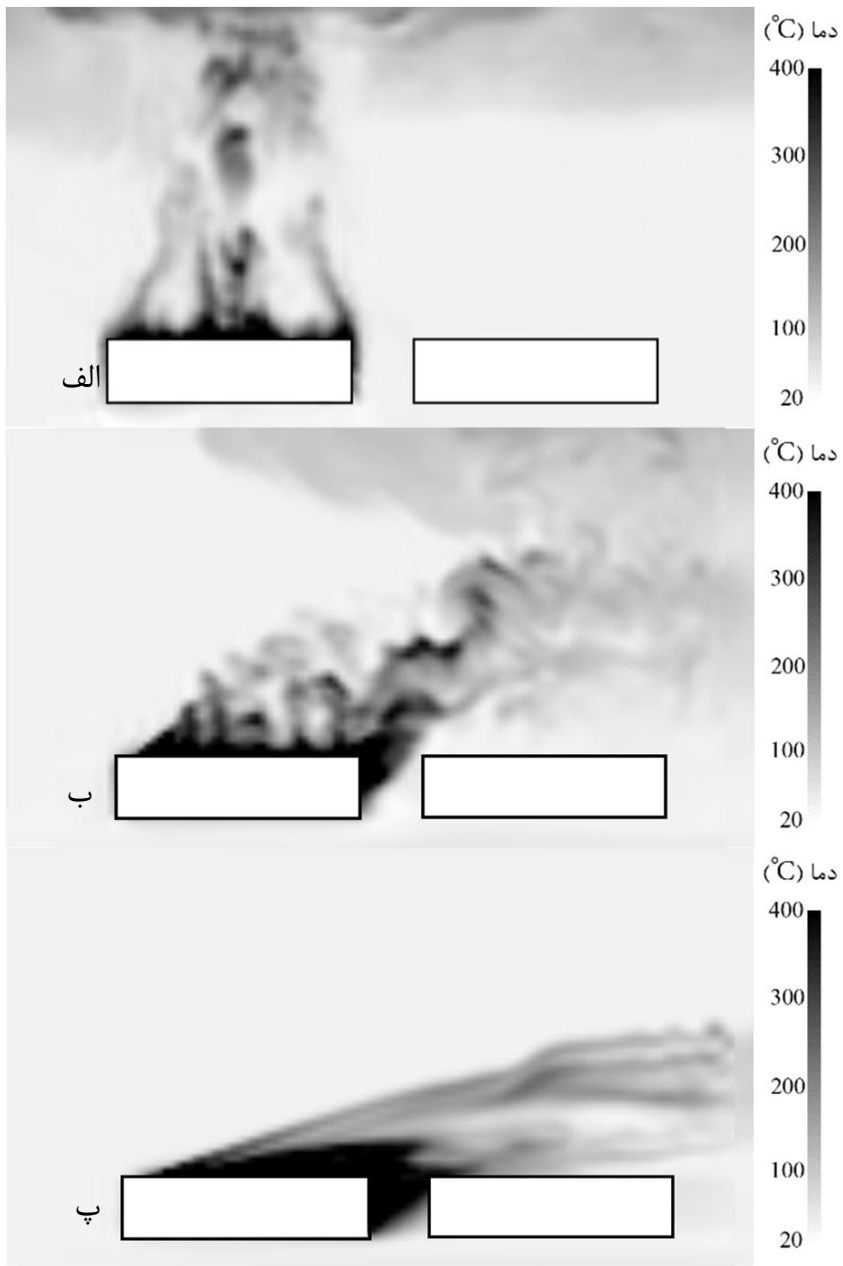
نخستین پارامتر مورد بررسی، سرعت تهویه طولی است. نتایج تأثیر سرعت تهویه بر زمان اشتعال در تونل با ارتفاع سقف 5 متر و شیب صفر، فاصله دو جسم 1 متر و نرخ‌های رهایش گرمای متفاوت در شکل 7 نشان داده شده است. در این‌جا نمودار نرخ رهایش 5 مگاوات به‌عنوان نمونه بررسی خواهد شد. در این نمودار، در حالت تهویه طبیعی (سرعت صفر روی نمودار)، جسم دوم پس از حدود 300 ثانیه از آغاز اشتعال منبع آتش آغاز به سوختن می‌کند. با افزایش سرعت تهویه، زمان اشتعال افزایش می‌یابد و این افزایش تا سرعت 2 متر بر ثانیه ادامه دارد، سپس نمودار میل به نزول می‌کند و تا سرعت 7 متر بر ثانیه به کمتر از 200 ثانیه می‌رسد. دلیل این پدیده را می‌توان عملکرد هم زمان دو اثر مختلف خنک‌کنندگی و برخورد شعله دانست.

برای درک بهتر موضوع، کانتورهای دما برای حالت تهویه طبیعی و حالت تهویه مکانیکی با سرعت‌های 2 و 7 متر بر ثانیه در شکل 8 ارائه شده‌اند. به دلیل ماهیت کانتورها متوسط زمانی بین ثانیه 60-120 است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در سرعت تهویه 2 متر بر ثانیه (شکل 8ب) نسبت به حالت بدون تهویه (شکل 8الف)، شعله به سمت پایین‌دست منحرف می‌شود. ولی این انحراف به اندازه ای نیست که ایجاد ناحیه دما بالا در اطراف لبه عقبی جسم هدف و آن را زودتر گرم کند. از سوی دیگر، افزایش سرعت تهویه اثر خنک‌کنندگی بر جسم هدف دارد، زیرا دمای متوسط دود در خروجی کاهش می‌یابد. در سیستم تهویه طولی اختلاط در پایین‌دست تونل افزایش پیدا می‌کند و گرادیان دمایی در مقطع تونل تضعیف می‌شود؛ بنابراین زمان داغ‌شدن جسم و رسیدن آن به نقطه اشتعال در این حالت نسبت به حالت بدون سرعت تهویه افزایش می‌یابد، ولی در سرعت تهویه 7 متر بر ثانیه



شکل 7 نمودار زمان اشتعال جسم هدف بر حسب سرعت‌های تهویه مختلف به ازای نرخ‌های مختلف رهایش گرما

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.17.1]



شکل 8 کانتور دما در تونل (الف) بدون تهویه (ب) با سرعت تهویه 2 متر بر ثانیه (پ) با سرعت تهویه 7 متر بر ثانیه

نزدیک شده و سبب زودتر گرم شدن آن می‌شود. در این حالت، اثر گرم شدن ناشی از انحراف شعله سبب کمتر شدن زمان اشتعال می‌شود. در واقع ناحیه‌ای از گازهای با دمای داغ اطراف جسم هدف را احاطه کرده، هردو مکانیزم جابه‌جایی و تشعشع جسم را گرم می‌کنند. در حالت تهویه طبیعی، پلوم دود پس از برخورد به سقف، زیر سقف جمع شده و در اثر مکانیزم تشعشع ناشی از لایه دود و شعله، حرارت مورد نیاز جهت اشتعال قطعه هدف را فراهم می‌کند.

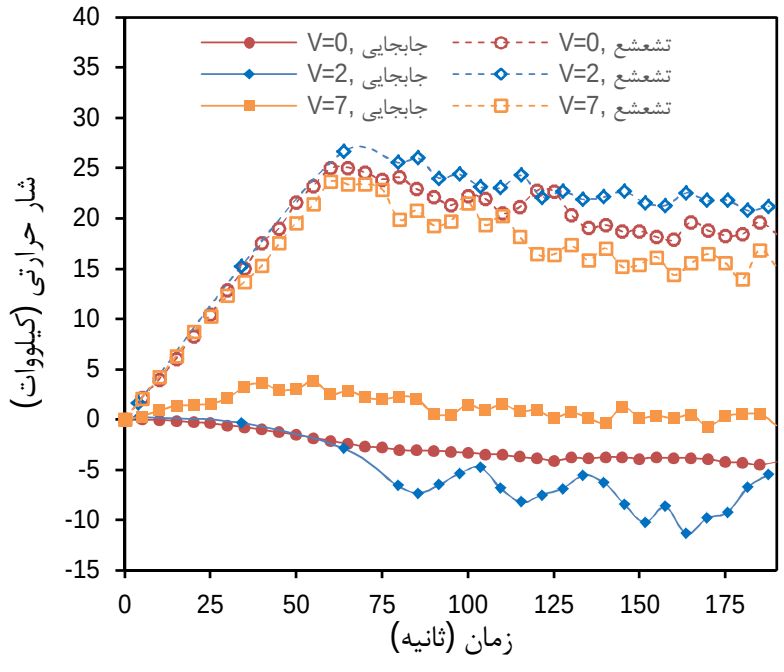
بررسی میزان شارهای تشعشعی و جابه‌جایی وارده به سطح جسم هدف، درک مشخص‌تری از گرمای جذب و یا دفع‌شده ناشی از پدیده‌های برخورد شعله و جریان تهویه را ارائه خواهد کرد؛ بنابراین در شکل 9 نمودارهای شار حرارتی برای سطح پشتی جسم هدف در سرعت‌های تهویه صفر، 2 و 7 متر بر ثانیه، در 190 ثانیه ابتدایی که پیش از زمان اشتعال هر سه حالت است با هم مقایسه شده است. در حالت بدون تهویه، جابه‌جایی به‌طور کامل کار خنک‌کاری را انجام می‌دهد. در سرعت 2 متر بر ثانیه نسبت به حالت بدون تهویه، هم جذب گرما با تشعشع و هم دفع آن با جابه‌جایی افزایش یافته است.

در این حالت جابه‌جایی ابتدا جسم را گرم کرده ولی تقریباً از حدود 30 ثانیه پس از شروع، شار جابه‌جایی منفی شده و کار خنک‌کاری را آغاز می‌کن، ولی در سرعت تهویه 7 متر بر ثانیه، تقریباً در 140 ثانیه ابتدایی جابه‌جایی به کمک تشعشع جسم را گرم می‌کند. همان‌گونه که در کانتورهای اشکال 8 نیز یاد شد دلیل این تفاوت در نزدیک‌تر شدن ناحیه گازهای داغ (شعله) به جسم هدف در سرعت 7 متر بر ثانیه است. جهت مقایسه بهتر، انتگرال این نمودارها در این سه حالت در شکل 10 با هم مقایسه شد. مقادیر به‌دست‌آمده 2980، 2880 و 3280 کیلوژول به‌ترتیب برای سه سرعت صفر، 2 و 7 متر بر ثانیه که متناسب با ترتیب زمان اشتعال ارائه‌شده در شکل 7 است.

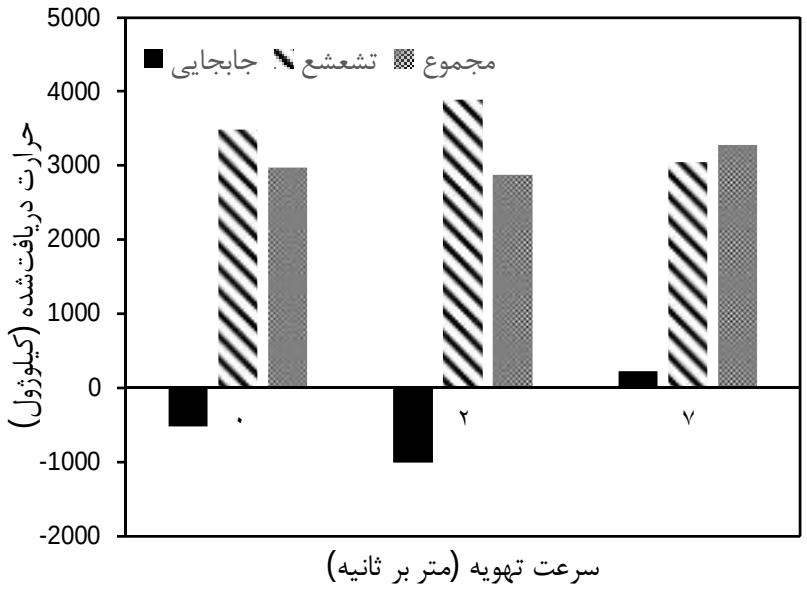
4-5- اثر نرخ رهایش گرما

پارامتر مهم دیگر، نرخ رهایش گرما بوده که تأثیر آن بر انتقال آتش در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل 7 با افزایش قدرت آتش، نمودار به سمت پایین حرکت کرده، بدین‌معنی که انتقال آتش در تمام سرعت‌های تهویه، سریع‌تر روی می‌دهد. این موضوع به دلیل افزایش گرمای آتش بوده که تأثیر خود را به ویژه از طریق انتقال حرارت تابشی اعمال می‌کند.

با بررسی دقیق‌تر روند تغییرات زمان اشتعال در شکل 7، یک نکته قابل توجه را در ارتباط با بیشینه زمان اشتعال می‌توان بیان کرد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشینه هر نمودار با کاهش نرخ رهایش گرمای منبع نخست، در سرعت‌های تهویه بیشتری اتفاق می‌افتد و با افزایش تدریجی نرخ رهایش، به سمت ابتدای محور افقی حرکت کرده و در نرخ رهایش حدود 6 مگاوات، بیشینه زمان اشتعال در سرعت صفر یا تهویه طبیعی رخ می‌دهد. دلیل این موضوع را می‌توان به بزرگی ناحیه شعله نسبت داد. در واقع هرچه قدرت منبع آتش بیشتر می‌شود، آتش با سرعت تهویه کمتری می‌تواند جسم هدف را دربرگیرد؛ بنابراین شرایطی که در آن اثر خنک‌کنندگی تهویه غالب



شکل 9 نمودار شار حرارتی روی صفحه پشتی جسم هدف در سرعت‌های تهویه مختلف



شکل 10 گرمای وارده به سطح جسم هدف در 190 ثانیه اول در سرعت‌های تهویه مختلف

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.17.1]

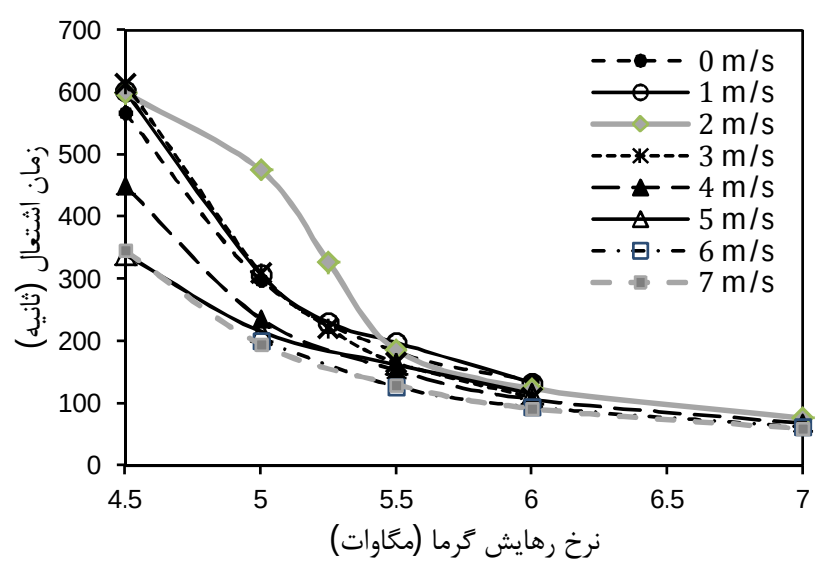
هدف را دربرگیرد؛ بنابراین شرایطی که در آن اثر خنک‌کنندگی تهویه غالب بوده و ناحیه دما بالا به میزان محسوسی جسم هدف را احاطه نکرده باشد، در سرعت تهویه کمتری اتفاق می‌افتد. دلیل دیگر این است که در آتش‌های بزرگ‌تر، پلوم آتش فضای زیادی از سطح مقطع تونل را اشغال می‌کند و جریان گازهای داغ با قدرت بیشتری به سمت سقف حرکت می‌کند، به‌گونه‌ای که جریان تهویه نمی‌تواند بر این جریان غلبه کرده و اثر خنک‌کنندگی مؤثری ایجاد کند. در نتیجه، روند نزولی از همان ابتدای نمودار اتفاق می‌افتد.

برای بررسی دقیق‌تر، تغییرات زمان اشتعال با تغییر نرخ رهایش گرما به‌ازای سرعت‌های مختلف تهویه در شکل 11 ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سرعت انتقال آتش رابطه اکیداً نزولی با نرخ رهایش حرارت دارد و مستقل از سرعت تهویه، زمان اشتعال با شدت یافتن آتش کاهش می‌یابد.

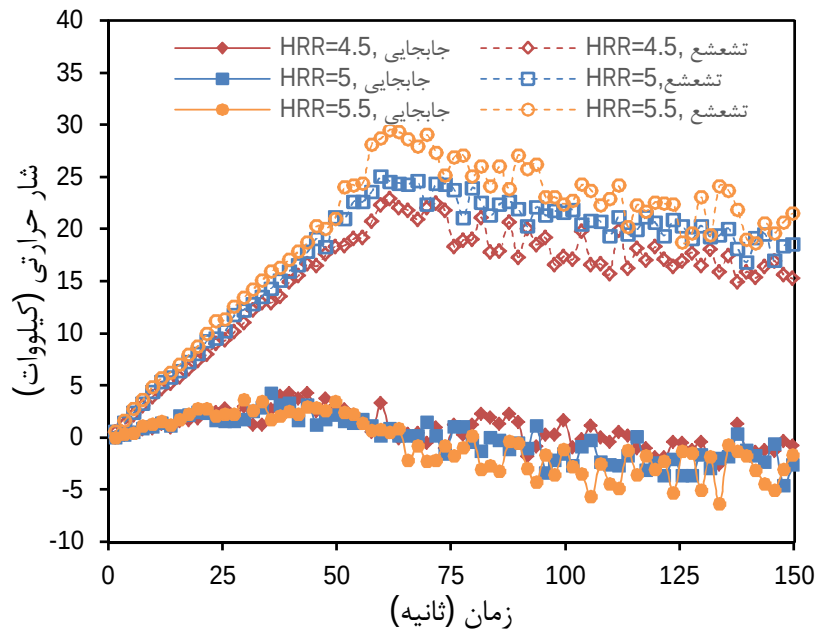
در شکل 12 نمودارهای شار تشعشعی و جابه‌جایی سطح پشتی جسم هدف در 150 ثانیه ابتدایی در نرخ‌های رهایش 4/5، 5 و 5/5 مگاوات با یکدیگر مقایسه شده است. در هر سه حالت، جابه‌جایی ابتدا جسم را گرم کرده و سپس با داغ‌ترشدن سطح، آن را خنک می‌کند. رفتار هر سه نمودار تقریباً به یکدیگر نزدیک است. درواقع مشاهده می‌شود که رفتار نمودار جابه‌جایی، برخلاف پارامتر سرعت تهویه با پارامتر نرخ رهایش گرما تغییرات اساسی از خود بروز نمی‌دهد، همچنین دیده می‌شود که با افزایش نرخ رهایش، تشعشع به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. انتگرال نمودارها در شکل 13 آورده شده است. دیده می‌شود که مکانیزم غالب در این بررسی، تشعشع است که با افزایش نرخ رهایش گرما، به زودتر گرم شدن جسم کمک می‌کند. در واقع منفی‌شدن شار جابه‌جایی در نرخ رهایش 5/5 مگاوات در این شکل، به دلیل دمای بیشتر سطح جسم ناشی از تشعشع بیشتر در این حالت است.

4-6- اثر فاصله بین دو جسم

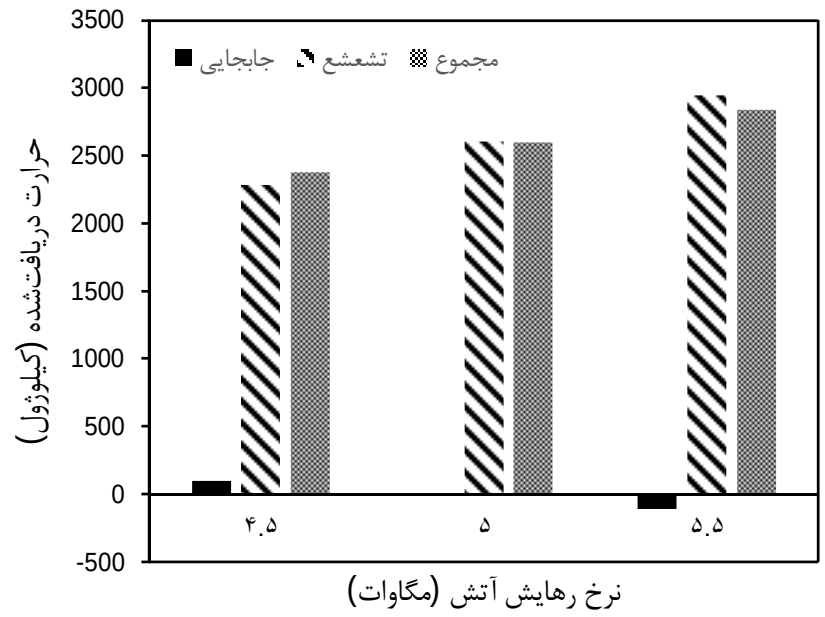
پارامتر مهم دیگر که در این بخش بررسی می‌شود، تأثیر فاصله بین منبع آتش و جسم هدف بر پدیده انتقال آتش است. اثر تغییر فاصله بین دو جسم بر زمان انتقال آتش در چهار نرخ رهایش گرمای مختلف، در تونل با ارتفاع سقف 5 متر، سرعت تهویه 7 متر بر ثانیه و شیب صفر در شکل 14 ارائه شده است. منظور از عبارت «فاصله دو جسم»، فاصله لبه انتهایی منبع آتش تا لبه ابتدایی جسم هدف است. جهت مقایسه بهتر، نتایج نمودار یادشده محدود به حالت‌هایی است که انتقال آتش در آن‌ها پس از توسعه‌یافتگی کامل منبع آتش اتفاق می‌افتد.



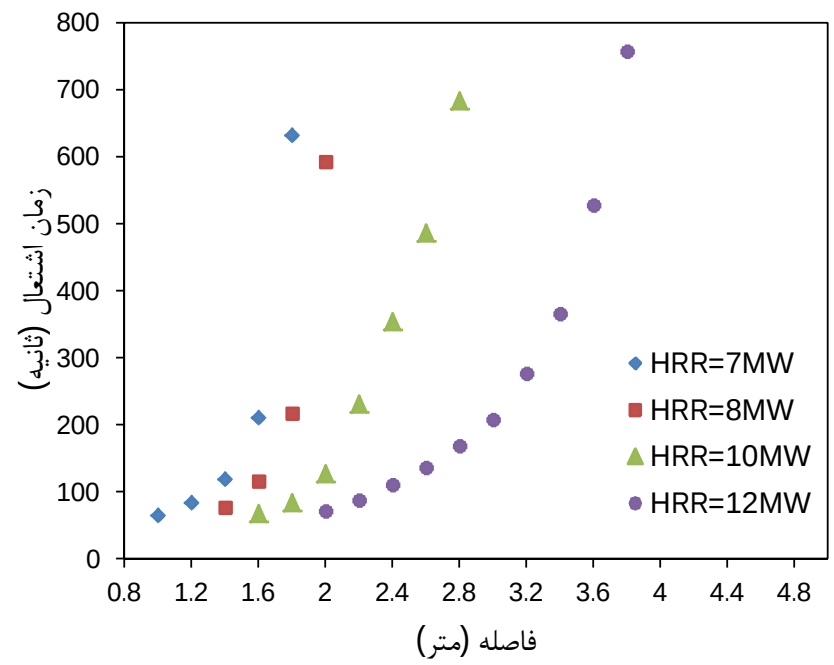
شکل 11 نمودار زمان اشتعال جسم هدف برحسب نرخ‌های مختلف رهایش گرما به ازای سرعت‌های تهویه مختلف



شکل 12 نمودار شار حرارتی بر صفحه پشتی جسم هدف در نرخ‌های رهایش آتش مختلف



شکل 13 گرمای وارده به سطح جسم هدف در 150 ثانیه نخست در نرخ‌های رهایش آتش مختلف



شکل 14 نمودار زمان اشتعال جسم هدف برحسب فاصله آن تا منبع آتش در نرخ‌های رهایش گرمای مختلف

همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله بین دو جسم، زمان اشتعال جسم هدف در تمام شدت‌های آتش افزایش می‌یابد. روند یادشده که به‌طور کیفی نیز قابل پیش‌بینی بوده، به دلیل کاهش نرخ انتقال حرارت به قطعه هدف با دور شدن آن از آتش است. در شکل‌های 15 و 16 میزان شار حرارتی

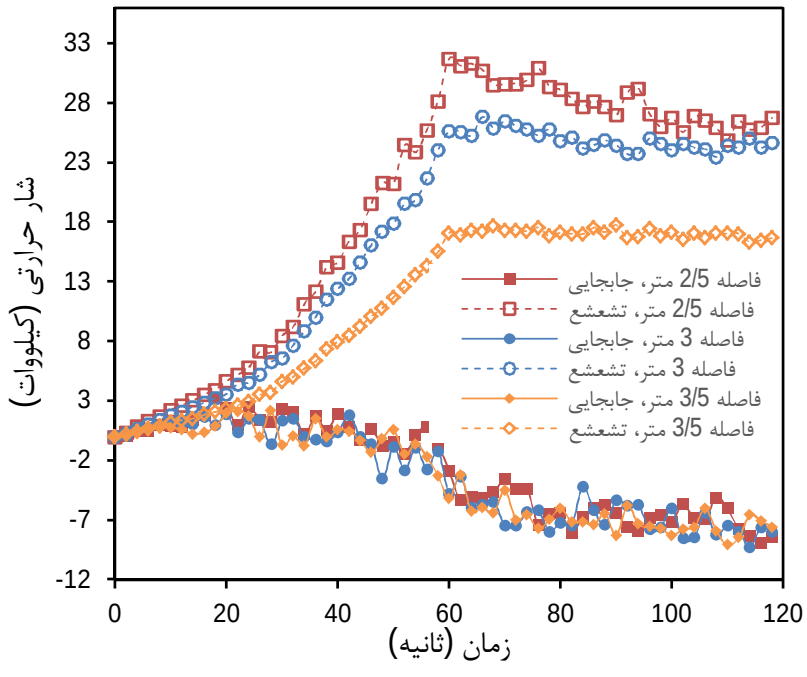
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.17.1]

تشعشعی و جابه‌جایی و انتگرال زمانی آن‌ها در 120 ثانیه نخست در نرخ رهایش گرمای 12 مگاوات رسم شده است. با دور شدن از محل آتش، نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی با تقریب خوبی ثابت می‌ماند، زیرا تأثیرات گذرای دیواره در فاصله‌های کم قابل صرف‌نظر است، اما جذب گرما با تشعشع به شدت کاهش می‌یابد، هچنین این کاهش در فواصل بیشتر با نرخ شدیدتری روی می‌دهد؛ بنابراین افزایش زمان اشتعال را می‌توان به کاهش تشعشع جذب‌شده نسبت داد.

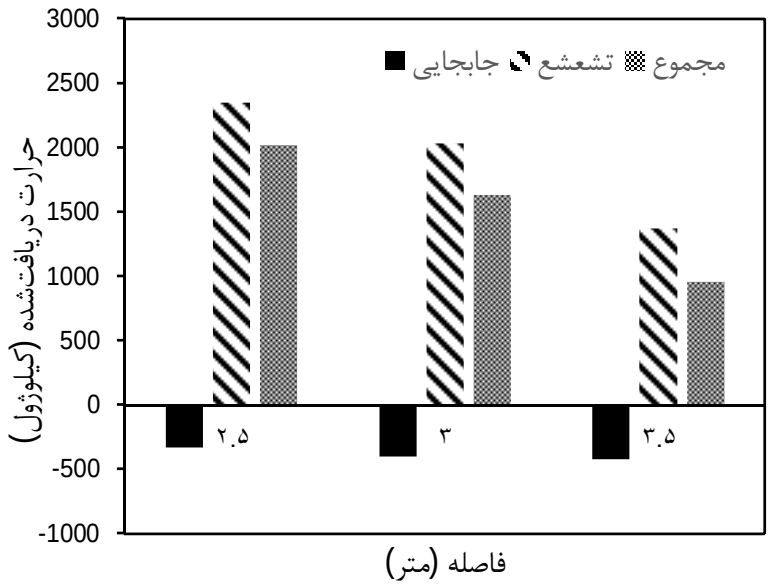
روند افزایش زمان اشتعال با افزایش فاصله به‌صورت خطی نیست، بلکه افزایش زمان انتقال آتش به‌صورت نمایی است. همان‌گونه که در نمودارهای شارهای حرارتی آمده است، کاهش انتقال حرارت تشعشعی در فواصل بیشتر با نرخ شدیدتری کاهش می‌یابد. روند بالا تقریباً در تمام نرخ‌های رهایش دیده می‌شود، مانند نرخ رهایش 7 مگاوات از حدود 1/4 متر به بعد و نرخ رهایش 12 مگاوات از حدود 3 متر به بعد روند افزایش زمان اشتعال با نرخ شدیدتری صعود می‌کند.

4-7- اثر ارتفاع تونل

با توجه به وجود پروفیل لایه‌ای[1] در ارتفاع تونل و تغییرات دما از کف تا سقف



شکل 15 نمودار شار حرارتی بر صفحه پشتی جسم هدف در فواصل مختلف از منبع آتش



شکل 16 گرمای وارده به سطح جسم هدف در 120 ثانیه نخست در فواصل مختلف جسم هدف از منبع آتش

1- Stratification

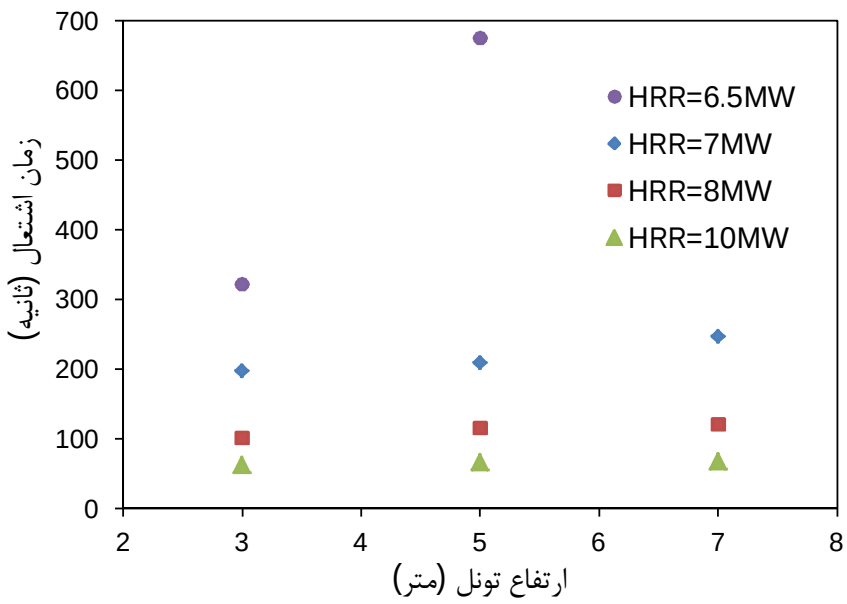
تونل، تغییر ارتفاع تونل می‌تواند در گسترش آتش و انتقال آن اثرگذار باشد. برای بررسی میزان اثر این پارامتر، 3 تونل با ارتفاع‌های 3، 5 و 7 متر در نظر گرفته شده و سرعت انتقال آتش در آن‌ها بررسی شده است. نتایج در شکل 17 نشان داده شده‌اند. در همه حالات، شیب تونل صفر و سرعت تهویه 7 متر بر ثانیه بوده و دو قطعه 1/6 متر فاصله داشته‌اند.

در برخی تحقیقات، به‌جای استفاده از پارامتر ارتفاع تونل، فاصله منبع آتش تا سقف را مورد توجه قرار داده‌اند. در تمام سناریوهای مورد بررسی در این مطالعه، لبه بالایی هر دو جسم تا کف تونل 1/5 متر فاصله دارد و بنابراین ارتفاع منبع آتش و جسم هدف تا سقف، 1/5، 3/5 و 5/5 متر است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع تونل، به دلیل بزرگ‌تر شدن فضای تونل و کاهش نرخ انتقال حرارت، سرعت انتقال آتش کاهش می‌یابد. کاهش انتقال حرارت در هر دو مکانیزم تابش و جابه‌جایی رخ می‌دهد. کاهش سرعت اشتعال در نرخ‌های رهایش گرمای پایین به مراتب شدیدتر بوده و بنابراین تأثیر ارتفاع تونل بیشتر است. روند افزایش زمان یا شیب نمودار در نرخ‌های رهایش پایین به طور ناگهانی است، به گونه‌ای که در نرخ رهایش 6/5 مگاوات، زمان انتقال آتش در تونل با ارتفاع 5 متر حدود 2 برابر این زمان در تونل با ارتفاع 3 متر است. در آتش‌های بزرگ‌تر، ارتفاع لایه دود افزوده می‌شود و دود بخش بزرگ‌تری از تونل را اشغال می‌کند؛ بنابراین تأثیر افزایش ارتفاع کمرنگ‌تر می‌شود.

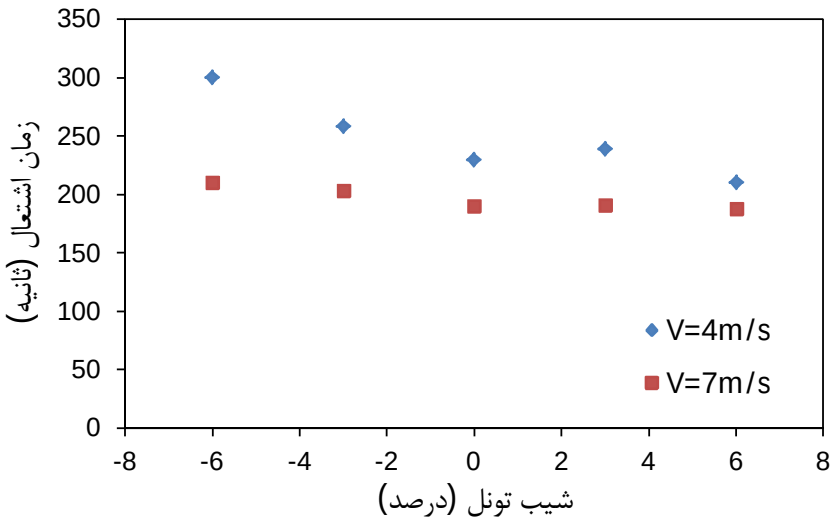
4-8- اثر شیب

آخرین پارامتر مورد مطالعه، شیب تونل است. جهت بررسی تأثیر این پارامتر، شیب تونل از 6- تا 6+ درصد تغییر کرده و زمان انتقال آتش اندازه‌گیری شده است. نتایج در شکل 18 مشاهده می‌شود. بررسی‌ها در نرخ رهایش گرمای 5 مگاوات، فاصله جسم هدف تا منبع آتش 1 متر و ارتفاع تونل 5 متر، برای دو سرعت تهویه 4 و 7 متر بر ثانیه انجام شده است. در هر دو سرعت تهویه، با افزایش شیب، زمان اشتعال کاهش می‌یابد. افزایش شیب سبب می‌شود که جسم هدف بهتر در راستای شعله قرار گیرد و بنابراین حرارت بیشتری را جذب می‌کند. البته در سرعت پایین، تأثیر شیب بیشتر بوده و در سرعت تهویه بالاتر (7 متر بر ثانیه)، تغییر قابل‌توجهی در زمان اشتعال مشاهده نمی‌شود. دلیل این امر تقابل نیروهای شناوری و اینرسی است. در سرعت تهویه بالا، قدرت نیروی اینرسی نسبت به نیروی شناوری بسیار بالاتر است (به عبارت دیگر عدد فرود بیشتر است) در نتیجه، لبه شعله بیشتر تحت تأثیر نیروی اینرسی تهویه اجباری است تا شناوری و در نتیجه تغییر شیب تأثیر محسوسی برجای نمی‌گذارد.



شکل 17 تأثیر ارتفاع تونل بر زمان اشتعال در نرخ‌های رهایش مختلف

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.17.1]



شکل 18 نمودار زمان اشتعال بر حسب شیب تونل در دو سرعت تهویه

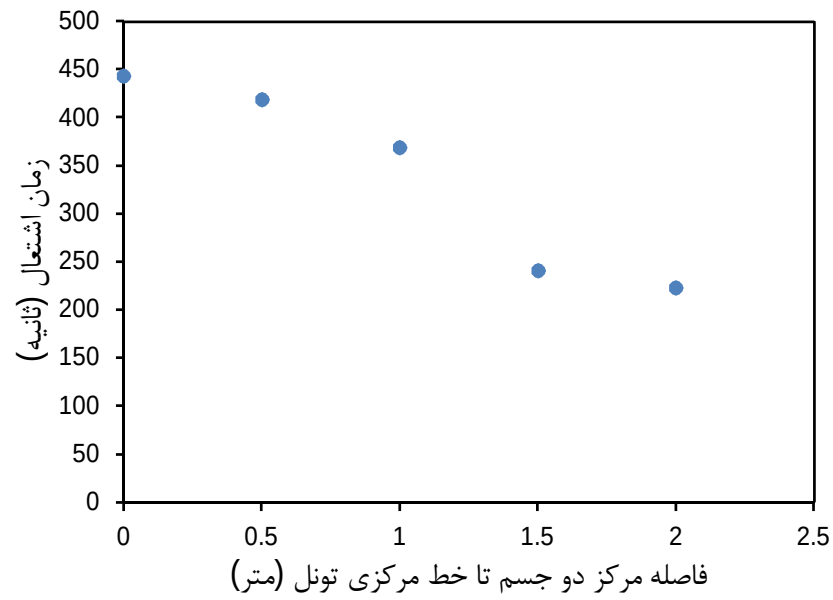
4-9- اثر فاصله از دیواره تونل

در شکل 19 تأثیر فاصله دو جسم از دیواره کناری تونل بر زمان انتقال آتش بررسی شده است. در نقطه صفر روی محور افقی، دو جسم منبع آتش و هدف روی خط مرکزی تونل قرار دارند. مشاهده می‌شود که با نزدیک‌شدن جسم به دیوار زمان انتقال کاهش می‌یابد، چراکه انتقال حرارت از دیواره‌ها به جسم هدف بیشتر می‌شود. به‌ویژه با کم شدن این فاصله، جریان هوای بین جسم و دیواره محدود شده، خنک‌کاری با انتقال حرارت جابه‌جایی کاهش می‌یابد.

5-نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مطالعه، به بررسی انتقال آتش از یک منبع آتش به یک جسم مجاور در تونل، به روش دینامیک سیالات محاسباتی و با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز دینامیک آتش پرداخته شد. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت تهویه، زمان انتقال آتش ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد که تقابل دو اثر مختلف به‌عنوان دلیل این پدیده شناخته شد. مشاهده شد که با افزایش نرخ رهایش نمودار زمان اشتعال به سمت پایین حرکت کرده و زمان اشتعال کاهش می‌یابد.

نتایج نشان داد که با افزایش فاصله، زمان انتقال آتش افزایش می‌یابد، همچنین بررسی تأثیر ارتفاع تونل نشان داد که با افزایش ارتفاع، زمان انتقال آتش افزایش می‌یابد که این اثر در آتش‌های ضعیف، به مراتب شدیدتر است. افزایش ارتفاع سبب فاصله گرفتن لایه دود از جسم هدف شده و از نرخ انتقال حرارت کاسته می‌شود، همچنین مشاهده شد که با افزایش شیب تونل، زمان انتقال آتش به دلیل نزدیک شدن جسم هدف به راستای مستقیم شعله



شکل 19 تأثیر فاصله از دیواره تونل بر زمان اشتعال در نرخ رهایش 5 مگاوات

کاهش می‌یابد. بررسی‌ها نشان داد که در سرعت تهویه مکانیکی بالا به دلیل غالب‌شدن نیروی اینرسی و افزایش عدد فرود، شیب تونل چندان اثرگذار نیست، به‌علاوه نشان داده شد که با نزدیک شدن اجسام به دیوار، زمان اشتعال کاهش یافته و بنابراین وضعیت بحرانی‌تر می‌شود.

در نهایت مطالعه بالا نشان می‌دهد که در شرایطی که پارامترهای مختلف می‌توانند در هر سناریو به گونه‌ای باشند که انتقال آتش در زمانی کوتاه انجام گرفته، جسم هدف نیز دچار حریق شود. برای نمونه اعمال سرعت تهویه بالا در حالت اضطراری در حالتی که جسم نخست آتشی با حرارت زیاد ایجاد کرده باشد، اگر بدون بررسی پارامترهای مربوطه و تنها با هدف جلوگیری از برگشت دود انجام گرفته باشد، ممکن است منجربه توسعه غیرقابل کنترل آتش شده، اتفاقات جبران‌ناپذیری را ایجاد کند؛ بنابراین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شرایط در فواصل کم خودروها یعنی ترافیک بالا، در شیب‌های زیاد، تونل‌های با ارتفاع کم و در شرایطی که خودروها در لاین‌های کناری قرار داشته، نزدیک به دیواره تونل هستند بحرانی‌تر بوده و بحث انتقال آتش باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

6-فهرست علائم

c_p	ظرفیت گرمایی ویژه (kJ/(kg K))
D^*	قطر مشخصه آتش (m)
g	شتاب گرانش (m/s^2)
k	ضریب هدایت حرارتی گاز (W/(m K))
L	طول مشخصه جسم (m)
$\dot{Q}$	نرخ رهایش حرارت منبع آتش (kW)
T	دما (K)

علایم یونانی

ρ	چگالی (kg/m^3)

زیرنویس‌ها

∞	شرایط جوی

7-مراجع

[1] A. Lönnermark, H. Ingason, Fire Spread and Flame Length in Large-Scale Tunnel Fires, *Fire Technology,* Vol. 42, No. 4, pp. 283-302, 2006.
[2] A. Haack, Fire protection in traffic tunnels: general aspects and results of the EUREKA project, *Tunnelling and Underground Space Technology,* Vol. 13, No. 4, pp. 377-381, 1998.
[3] K. A. Giblin, The memorial tunnel fire ventilation test program, *ASHRAE journal,* Vol. 39, No. 2, pp. 26-31, 1997.
[4] H. Ingason, A. Lönnermark, Project description and planning of large-scale tests in Runehamar tunnel, *SP Swedish National Testing and Research Institute,* 2003.
[5] R. Hansen, H. Ingason, An engineering tool to calculate heat release rates of multiple objects in underground structures, *Fire Safety Journal,* Vol. 46, No. 4, pp. 194-203, 2011.
[6] R. Hansen, H. Ingason, Heat release rates of multiple objects at varying distances, *Fire Safety Journal,* Vol. 52, pp. 1-10, 2012.
[7] A. Horvat, Y. Sinai, A. Pearson, J.-M. Most, Contribution to flashover modelling: Development of a validated numerical model for ignition of non-contiguous wood samples, *Fire Safety Journal,* Vol. 44, No. 5, pp. 779-788, 2009.
[8] H. Ingason, Model scale tunnel tests with water spray, *Fire Safety Journal,* Vol. 43, No. 7, pp. 512-528, 2008.
[9] Y. Z. Li, H. Ingason, Model scale tunnel fire tests with automatic sprinkler, *Fire Safety Journal,* Vol. 61, pp. 298-313, 2013.
[10] R. O. Carvel, A. N. Beard, P. W. Jowitt, Fire Spread Between Vehicles in Tunnels: Effects of Tunnel Size, Longitudinal Ventilation and Vehicle Spacing, *Fire Technology,* Vol. 41, No. 4, pp. 271-304, 2005.
[11] X. G. Zhang, Y. C. Guo, C. K. Chan, W. Y. Lin, Numerical simulations on fire spread and smoke movement in an underground car park, *Building and Environment,* Vol. 42, No. 10, pp. 3466-3475, 2007.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.17.1]

[12] L. Hu, R. Huo, W. Chow, Studies on buoyancy-driven back-layering flow in tunnel fires, *Experimental Thermal and Fluid Science,* Vol. 32, No. 8, pp. 1468-1483, 2008.
[13] N. Chalasani, M. Greiner, A. Suo-Anttila, Benchmarking of Container Analysis Fire Environment simulation using the memorial tunnel fire ventilation tests, *Journal of Fire Protection Engineering,* Vol. 22, No. 1, pp. 45-70, 2012.
[14] 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.
[15] P. A. Friday and F. W. Mowrer, Comparison of FDS model predictions with FM/SNL fire test data, *NISTGCR01-810,* National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (2001).
[16] A. Kazemipour, M. Pourghasemi, H. Afshin, B. Farhanieh, Parametric study on critical ventilation velocity in case of fire inside longitudinally ventilated tunnels, *Journal of Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 5, pp. 1-10, 2014.
[17] K. McGrattan, S. Hostikka, J. E. Floyd, H. R. Baum, R. G. Rehm, W. Mell, R. McDermott. *Fire Dynamics Simulator (version 5), Technical Reference Guide.* NIST special publication 1019, 2010.
[18] A. Costantino, M. Musto, G. Rotondo, A. Zullo. Numerical analysis for reduced-scale road tunnel model equipped with axial jet fan ventilation system, *Energy Procedia,* Vol. 45, pp. 1146-1154, 2014.
[19] PIARC, *Fire and Smoke Control in Road Tunnel*, 1999.
[20] K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, a. et, *Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide,* National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2010.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.17.1]