

تحلیل توسعه آتش در واگن مسافری با بکارگیری عایق‌های مختلف در بدنه

محمد رضا طلایی^{۱*} حسین مودی^۲

^۱ دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

یادداشت پژوهشی، تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۹

چکیده

در این تحقیق با هدف تحلیل احتراق و توسعه آتش در واگن مسافری با نرم‌افزار پیروسیم مطالعه‌ای در بهینه‌سازی ساختار مواد عایق مورد استفاده در واگن مسافری در برابر توسعه آتش صورت گرفت با این هدف که در صورت رخداد سانحه از میزان تلفات بکاهد. یک مدل مرجع که در مقیاس واقعی مورد تست حریق قرار گرفته است در نرم‌افزار پیروسیم مدل شد. پس از صحت‌سنجی مدل موجود و دریافت نتایج مناسب، در ادامه با تغییر مواد عایق بکاررفته در جنس بدنه واگن و صندلی‌ها، از عایق‌های جدید پلی‌استایرن فشرده، پلی‌استایرن انبساطی، فوم فنولیک، پشم سنگ و پشم شیشه استفاده شد. نوآوری این تحقیق در مدلسازی و صحت‌سنجی نمونه توسعه آتش در یک واگن مسافری موجود با نرم‌افزار پیروسیم و مطالعه عملکرد هر یک از عایق‌های مختلف است. نتایج نشان داد که مدل واگن با عایق پشم شیشه و پشم سنگ عملکرد خوبی در کاهش نرخ توسعه آتش داشته و مقدار حداکثر انتشار حرارت را ۱۱ درصد و مجموع حرارت آزاد شده را به میزان ۱۵ درصد در مقایسه با مدل تجربی کاهش دادند و نرخ افزایش دمای داخلی واگن و میزان تولید دوده را نیز کاهش دادند. فوم‌ها عملکرد ضعیفی در برابر آتش نشان دادند و علاوه بر افزایش نرخ انتشار حرارت و دمای شعله، میزان تولید دود و محصولات احتراقی بیشتری داشتند. از نتایج این تحلیل، توصیه می‌شود که برای کنترل بهینه توسعه آتش بهتر است، در واگن از عایق‌های الیافی استفاده شود و در طراحی داخلی صندلی برای راحتی سرنشین، عایق فوم فنولیک بکار رود.

کلمات کلیدی: توسعه آتش؛ واگن مسافری؛ نرخ انتشار حرارت؛ نرم‌افزار پیروسیم.

Analysis of fire development in a passenger car considering various insulation

M.R. Talaei^{1,*}, H. Moodi²,

¹ Assoc. Prof., Railway Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

² MSc graduate, Railway Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

Abstract

This research was defined with the aim of analyzing combustion and development of fire in a passenger car with Pyrosim software, and it is intended to be a complete study on the optimization of the interior design material structure of the passenger car against fire, which will reduce the amount of casualties in the event of an accident. This work was done by simulating fire development by Pyrosim software and using experimental data. A reference model that has been subjected to fire testing in real scale was modeled in Pyrosim software. After validating the existing model and then changing the insulating materials used in the wagon body and seats, new insulations of compressed polystyrene, expanded polystyrene, phenolic foam, stone wool and glass wool were used. The results showed that glass wool and stone wool insulation had a good performance against fire, that is, they showed a lower heat emission rate and recorded a lower development rate, and the internal temperature of the wagon and the amount of smoke reached the critical range over a longer period of time. Foams had a very poor performance and in addition to increasing the rate of heat release and internal temperature, they had a higher amount of soot production. It was concluded that from the point of view of optimal control of fire development, it is better to use glass wool or stone wool insulation in the car body and to use phenolic foam insulation in the interior design of the seat for passenger comfort.

Keywords: Development of Fire; Passenger Wagon; Heat Release Rate; Pyrosim Software.

۱- مقدمه

امروزه ناوگان ریلی حجم عظیمی از بار و مسافر را در سراسر جهان جابجا می‌کند و برای دستیابی به این هدف از سازه‌هایی نظیر ایستگاه‌ها، تونل‌ها، فضاهای درون شهری و برون شهری عبور می‌کند. با توجه به اینکه تردد ناوگان حمل و نقل ریلی نیز نظیر سایر وسایل حمل و نقل، می‌تواند تحت تأثیر حوادثی نظیر تصادف، خروج از خط، آتش سوزی و ... قرار بگیرد، انجام اقدامات پیشگیرانه و تدوین استانداردهای بین‌المللی برای محافظت از افراد و ناوگان، در دستور کار کشورهای مختلف قرار گرفته است. طراحی واگن بر اساس ملاحظات مکانیکی و ترمودینامیکی، راحتی سفر و محافظت از سرنشینان و استفاده از مواد غیرقابل اشتعال در طراحی داخلی واگن از جمله فاکتورهای مهم در فرآیند طراحی هستند. در واقع هر واگن ممکن است تحت شرایطی معین، بسته به جنس و ساختار خود دچار آتش سوزی شود که در این مواقع می‌توان اهمیت جنس مواد بکار رفته در طراحی کلی واگن را در کاهش خسارت، به وضوح مشاهده کرد. وقوع آتش‌سوزی در قطار مسافری می‌تواند به دلیل خطاهای انسانی، مشکلات فنی و یا مرتبط با عوامل محیطی باشد که معمولاً عوامل انسانی و فنی با رعایت اقدامات ایمنی تا حد بسیار زیادی قابل پیش‌گیری است؛ بنابراین با مطالعه و تحلیل سوانح موجود، امکان شناسایی و معرفی نیازهای ایمنی صنعت ریلی در زمینه پیشگیری و مقابله با سوانح آتش‌سوزی وجود دارد. موضوع مورد بحث این است که در صورت آتش‌سوزی و درگیری واگن چه مقدار نرخ انتشار حرارتی^۱، چه میزان دود و چه پیشامدهای ناگواری ممکن است روی بدهد [۱ و ۲]. از مهم‌ترین سوانح ریلی آتش‌سوزی داخل کشور می‌توان به حادثه قطار هفت‌خوان (شکل ۱) اشاره کرد. این سانحه به علت برخورد دو قطار مسافری در آذرماه ۱۳۹۵ در حوالی ایستگاه هفت‌خوان پیشامد. در پی سانحه، چهار واگن از ریل خارج و پنج واگن به سرعت دچار آتش‌سوزی شدند. در این حادثه ۴۷ نفر کشته و ۱۰۳ نفر نیز مصدوم شدند [۳]. از جمله نکات قابل تأمل در این حادثه، افزایش تلفات به دلیل رشد و سرایت سریع آتش در مدت زمان کوتاه بوده است که می‌تواند به دلیل عدم استفاده از مواد مقاوم در برابر آتش، در ساخت واگن قطار باشد.

در راستای تحلیل و بررسی تأثیر جنس تجهیزات ناوگان ریلی بر آتش‌سوزی، تحقیقات مختلفی توسط پژوهشگران صورت گرفته که در این قسمت به نمونه‌ای از آنها اشاره شده است. پیکاک و همکاران [۴] مجموعه‌ای از آزمایش‌های آتش‌سوزی را برای ارزیابی رفتار سوزاندن مواد داخلی واگن مسافری صورت دادند که مقایسه نتایج نشان دهنده تأثیر مهم مواد داخلی واگن در توسعه آتش و پیش‌بینی شرایط بحرانی بود.



شکل ۱- قطار هفت‌خوان [۳]

وایت [۵] یک آزمایش آتش‌سوزی را در یک واگن مسافری قدیمی انجام داد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که جنس و خاصیت اشتعال‌پذیری مواد بکار رفته در آسترهای سقف و دیوار فوقانی تأثیر زیادی بر توسعه آتش و ایجاد شرایط بحرانی در طی مدت زمان کوتاه داشته و نسبت به سایر تجهیزات داخلی واگن نظیر صندلی‌ها، دیواره‌ها و کف دارای اهمیت بیشتری هستند. علاوه بر این در صورتیکه آتش به مرحله سرایت^۲ برسد، زمان بسیار کوتاهی برای خروج ایمن سرنشینان وجود خواهد داشت. اینگاسون و همکاران [۶] مجموعه‌ای از تست‌های آتش‌سوزی بر روی مدل واگن قطار با مقیاس ۱:۳ انجام دادند. هدف از انجام این تست‌ها، بررسی اثر عواملی نظیر وجود تهویه و شدت منبع احتراق بر نرخ گسترش و انتشار حرارت آتش بود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که نوع پوشش سقف و دیواره‌ها بر سرعت گسترش آتش سوزی تأثیر می‌گذارد و وجود تهویه نیز باعث افزایش نرخ انتشار حرارت می‌شود. لی و همکاران [۷] به منظور درک بهتر رشد اولیه حریق و تأثیر شکستن شیشه‌ها بر گسترش آتش، دو آزمایش آتش‌سوزی روی واگن مسافری بین‌شهری و واگن مترویی انجام دادند. نتایج نشان داد که شعله در امتداد سقف و دیواره‌ها به صورت خطی و سریع پخش می‌شود؛ همچنین

² Flashover

¹ Heat Release Rate (HRR)

گردابه‌های بزرگ^۴ یک مطالعه عددی برای بررسی خطر ناشی از تجمع دود در واگن مسافری قطار دچار آتش سوزی انجام دادند. نتایج نشان داد که در مدت زمان کمتر از سه دقیقه پس از شروع حریق، دما و غلظت گاز منواکسیدکربن از میزان بحرانی بیشتر شده و میزان دید افقی به شدت کاهش می‌یابد، بنابراین عملیات تخلیه مسافران باید قبل از این زمان صورت گیرد. چو و همکاران [۱۵] با استفاده از شبیه‌ساز دینامیک آتش، سناریوهای مختلف آتش سوزی در واگن قطار چینی را مورد مطالعه قرار دادند. مشخص شد که برای کاهش دمای محیط داخل واگن و بالا نگه داشتن لایه دود، باید از سیستم‌های مناسب اطفاء حریق و تخلیه دود استفاده شود و با توجه به فضای تنگ و باریک داخل واگن قطار، آتش سوزی بسیار مخاطره‌آمیز و تخلیه مسافران مشکل خواهد بود؛ همچنین لی و همکاران [۱۲] یک مطالعه عددی با هدف برآورد منحنی نرخ انتشار حرارت آتش سوزی یک واگن قطار بین‌شهری را انجام دادند. آنها از رویکرد پیرولیز^۵ و آزادسازی حرارت در واحد سطح^۶ برای شبیه‌سازی دینامیکی آتش استفاده کردند. نتایج نشان داد با توجه به اینکه این مدل محاسباتی فقط احتراق سطحی را در نظر می‌گیرد، زوال منحنی آتش را در مرحله کاهش به خوبی نشان نمی‌دهد. ژو و همکاران [۱۶] مدل عددی از آتش سوزی واگن قطار سریع‌السیر^۷ را بر اساس داده‌های تجربی احتراق مواد شبیه‌سازی کردند. جریان دود در واگن به عنوان یک جریان آشفته سه‌بعدی، ناپایدار و فشرده و بر اساس روش شبیه‌سازی گردابی بزرگ حل شد. در این مدل از رویکرد نرخ انتشار حرارت بر واحد سطح ماده در شبیه‌سازی دینامیکی آتش استفاده شد. طبق نتایج، آتش سوزی در واگن‌های قطار تندرو ویژگی خاص مرتبط به سازه مورد استفاده را دارد. با بهبود عملکرد پنجره‌های نسوز و جلوگیری از شکستن آنها می‌توان تا حدی مانع از وقوع آتش گسترده شد و زمان کافی را برای تخلیه مسافران فراهم کرد. عساری و همکاران [۱۷] سازه آتش سوزی واگن مسافری قطار تهران به اهواز را با استفاده از نرم‌افزار پایروسیم و بر اساس رویکرد پیرولیز شبیه‌سازی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد، ایمنی مسافران در مدت زمان بسیار کوتاهی از لحاظ دما، توزیع دود و میدان

شکستن پنجره‌ها منجر به افزایش میزان تهویه و نرخ انتشار حرارت شد. لونرمارک و همکاران [۸] آتش سوزی در یک ماکت واگن مترو در مقیاس ۱:۳ را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد، نوع منبع اولیه آتش و بار احتراقی، از جمله عوامل تعیین کننده مدت زمان سوختن کامل واگن است. شی و همکاران [۹] با هدف شناخت عوامل مهم در گسترش اولیه آتش، یک آزمایش آتش سوزی را در واگن قطار مترو انجام دادند. مشخص شد که در ابتدا رشد آتش متأثر از نوع ماده سوختنی بوده و رفتار آتش توسط ماده سوختنی - کنترل می‌شود، در حالیکه پس از شکستن شیشه‌ها، تهویه توسعه آتش را کنترل می‌کند.

با توجه به هزینه بالا و دشواری تست‌های آتش سوزی در ناوگان ریلی، مدل‌های عددی با هدف کاهش هزینه، مدیریت زمان و کاهش میزان خطرات احتمالی، در مقایسه با تست کامل و کوچک (آزمایشگاهی) مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. به عبارت دیگر با شبیه‌سازی رشد و سرایت آتش در ناوگان ریلی می‌توان به سوالات کلیدی در زمینه تخمین زمان فرار، پیش‌بینی اندازه آتش، بررسی محصولات احتراقی، ارزیابی پایداری واگن و ارزیابی عملکرد سیستم‌های تهویه پاسخ داد [۱۰]. مدل‌سازی ارتباط بین اشتعال پذیری مواد و اندازه آتش و تاثیر تهویه را مشخص می‌کند. پس می‌توان با کمک ریاضیات و حل عددی معادلات حاکم بر پدیده، بسیاری از مشکلات و هزینه‌ها و حتی خطرات را کاهش داد [۱۱]. در این جهت تلاش زیادی برای استخراج منحنی‌های آتش با شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی^۱ انجام شده است. شبیه‌ساز دینامیک آتش^۲ که توسط موسسه ملی استاندارد و فناوری^۳ در ایالات متحده توسعه یافته، محبوب‌ترین ابزار در بین مهندسان حفاظت از آتش است. [۱۲]

چون و همکاران [۱۳] یک مطالعه عددی برای بررسی عوامل موثر بر نرخ انتشار حرارت واگن‌های قطار مسافری سریع‌السیر در شرایط مختلف انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که هندسه قطار، مواد قابل اشتعال و شرایط تهویه، از عوامل موثر بر نرخ انتشار حرارت واگن‌های قطار سریع‌السیر هستند. شان و همکاران [۱۴] با استفاده از روش شبیه‌سازی

⁵ Pyrolysis Approach

⁶ Heat Release Rate Per Unit Area Approach (HRRPUA)

⁷ high speed train

¹ Computational Fluid Dynamics (CFD)

² Fire Dynamics Simulator (FDS)

³ National Institute of Standards and Technology (NIST)

⁴ Large Eddy Simulation (LES)

قرار داشت. واگن آزمون در شکل ۲ نشان داده شده است. واگن دارای ۶۸ صندلی و ۱۸ شیشه پنجره دوجداره بود که دارای دمای شکست ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد بودند. بیشتر حجم مواد بکار رفته در طراحی داخلی واگن از مشتقات پلاستیک و عایق های پلی اورتان با بخش کوچکی از چوب بودند.

در مدل سازی عددی آتش از کد شبیه‌ساز دینامیکی آتش برای برآورد نرخ انتشار حرارت استفاده می‌شود. برای ایجاد آتش در مدل عددی از رویکرد نرخ آزادسازی حرارت در واحد سطح در نرم‌افزار استفاده شد. در رویکرد آزادسازی حرارت بر واحد سطح نیاز است که خواص حرارتی مواد و منحنی‌های نرخ آزادسازی حرارت در واحد سطح هر ماده با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی حاصل شوند. از آنجا که رویکرد آزادسازی حرارت بر واحد سطح اجازه چند لایه بودن را نمی‌دهد سطوح به صورت مونتاژی در مدل استفاده شدند. روابط مورد استفاده در شبیه ساز دینامیکی آتش را می‌توان به دو دسته معادلات هیدرو دینامیکی و احتراق تقسیم بندی نمود [۱۹].

مدل هیدرو دینامیکی: یک فرم تقریبی از معادلات ناویر-استوکس مناسب برای جریان با عدد ماخ پایین در این مدل مورد استفاده قرار گرفته است. معادلات دارای خاصیت بیضوی هستند و سازگار با پروسه‌های با سرعت کم و دارای جابجایی حرارتی می‌باشند. در این مدل چهار معادله‌ی بقا (جرم، مومنتم و انرژی) برای مخلوط گاز ایده‌آل چند جزئی قابل انبساط حرارتی در FDS به شرح ذیل حل می‌شوند:

معادله بقای جرم: این معادله بیانگر تغییرات چگالی بر حسب زمان و جابجایی جرم با توجه به بردار سرعت، در راستاهای مختلف است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \quad (1)$$

در معادله (۱) چگالی با ρ ، زمان با t و سرعت با u مشخص شده‌اند.

معادله بقای مومنتوم: این معادله بیانگر تغییرات مومنتوم و نیروی اینرسی بر حسب زمان بوده و نشان دهنده تأثیر فشار، نیروهای خارجی و تنش های ناشی از لزجت است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot \rho u u + \nabla P = \rho f + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (2)$$

دید به حالت بحرانی می‌رسد که نشان از ضرورت سرعت عمل در تخلیه مسافران دارد.

مقوله مهم و قابل بررسی در آتش‌سوزی واگن (محیط تنگ و باریک) این است که هم‌افزایی مواد مختلف در آتش‌سوزی کامل چه پیامدهایی خواهد داشت و چه تاثیری بر پدیده سرایت خواهد داشت. برای بررسی رفتار اشتعال پذیری مواد و تعیین خواص حرارتی، آن‌ها را مورد تست کالری سنج مخروطی و یا دماسنج حرارتی قرار می‌دهند. در آزمون‌های آتش‌گیری مواد آن‌ها را در معرض تابش‌های حرارتی ۲۰-۵۰ کیلووات بر متر مربع قرار می‌دهند. این در حالی است که در آتش‌سوزی گسترده و واقعی در محیط داخلی واگن، اجناس بسته به خاصیت اشتعال‌پذیری دچار حریق می‌شوند و ممکن است، متحمل شارهای حرارتی بیش از مقادیر آزمون‌های آزمایشگاهی باشند که مسلماً نتایج و مشاهدات حرارتی آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی مواد منفرد متفاوت خواهد بود [۱۸].

همه ساله تعداد زیادی واگن در داخل کشور در چرخه بهسازی و یا نوسازی قرار می‌گیرند که شرکت‌های متصدی، با توجه به نیاز و درخواست کارگزار تعمیر و تغییراتی اعمال می‌کنند. نیاز امروزه صنعت ریلی این است از چه موادی در طراحی داخلی واگن استفاده شود که در صورت رخداد آتش‌سوزی، کمترین نرخ تلفات و خسارات ثبت شود. این مقاله با استفاده از یک مدل عددی قصد دارد تاثیرات تغییر مواد عایق بکار رفته در دیواره‌های سطوح داخلی واگن و همچنین صندلی‌ها را در میزان نرخ انتشار حرارت و تولید محصولات احتراق بررسی کند تا با مقایسه نتایج بتوان نکاتی مهم و ایمن برای طراحی مواد داخلی واگن از منظر پیش‌گیری از توسعه آتش ارائه نمود. نوآوری این تحقیق در مدل‌سازی و صحت‌سنجی نمونه توسعه آتش در یک واگن مسافری موجود با نرم افزار پاپروسیم و مطالعه عملکرد هر یک از عایق‌های مختلف است.

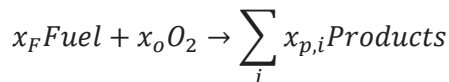
۲- مستندسازی حل

در سال ۲۰۱۳ لی و همکاران [۱۲] یک مطالعه عددی بر روی یک واگن مسافری (اتوبوسی) بین‌شهری با هدف برآورد منحنی نرخ انتشار حرارت انجام دادند. مدل واگن ابعادی به طول ۲۳ متر، عرض ۳ متر و ارتفاع ۳/۷ متر داشت که در داخل تونلی به طول ۳۷/۵ با ظرفیت خروجی فن ۱۳۲ مترمکعب بر ثانیه

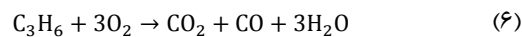
$$= \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right]$$

با توجه به اینکه ترم Φ نسبت به نرخ آزادسازی حرارت منبع آتش، بسیار کوچکتر است، معمولاً در محاسبات، از آن صرفنظر می‌شود؛ ولی به دلیل اینکه در شبیه سازی گردابه بزرگ^۳ از این ترم استفاده می‌شود، در این بخش به آن اشاره شده است. مدل احتراق:

معادله حاکم بر احتراق که نرم افزار حل می‌کند، عبارت است از فرم کلی:



که در آن اعداد x_j ضرایب استوکیومتری برای کل پروسه احتراق است که واکنش بین سوخت "F" و اکسیژن " O_2 " "برای تولید تعدادی محصول "P" را نشان می‌دهد. فرآیند احتراق منبع آتش در این نرم افزار با استفاده از واکنش استوکیومتریک پروپان و اکسیژن مدل شده است. واکنش مذکور به صورت زیر است [۲۴].



حل عددی مجموعه معادلات فوق در نرم افزار بر اساس روش عددی صریح حدس-اصلاح^۲ طبق الگوی ارائه شده در موتور حل FDS است [۲۴].

در معادله (۲) فشار با P ، بردار نیروهای خارجی (شامل گرانش) با f و تانسور تنش‌های ناشی از لزجت با τ_{ij} نمایان شده‌اند.

معادله بقای انرژی

این معادله بیانگر نرخ تراکم انرژی خالص و تأثیر پارامترهایی نظیر نرخ آزادسازی حرارت بر واحد حجم، تغییرات فشار، تبدیل انرژی جنبشی به انرژی حرارتی تحت عنوان اتلاف و انواع شار حرارتی است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h u = \frac{DP}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot q + \Phi \quad (۳)$$

ترم \dot{q}''' در معادله (۳) بیانگر نرخ آزادسازی حرارت بر واحد حجم یک واکنش شیمیایی، $\nabla \cdot q$ نشان دهنده شار حرارتی هدایت و تشعشع و ترم Φ تحت عنوان تابع اتلاف^۱ شناخته شده و توصیف گر نرخ انرژی جنبشی تبدیل شده به انرژی حرارتی متأثر از ویسکوزیته سیال است. آنتالپی محسوس نیز با h نشان داده شده است.

معادله حالت گاز کامل رابطه بین دما، فشار و چگالی یک گاز کامل را بیان می‌کند

$$P = \frac{\rho RT}{M} \quad (۴)$$

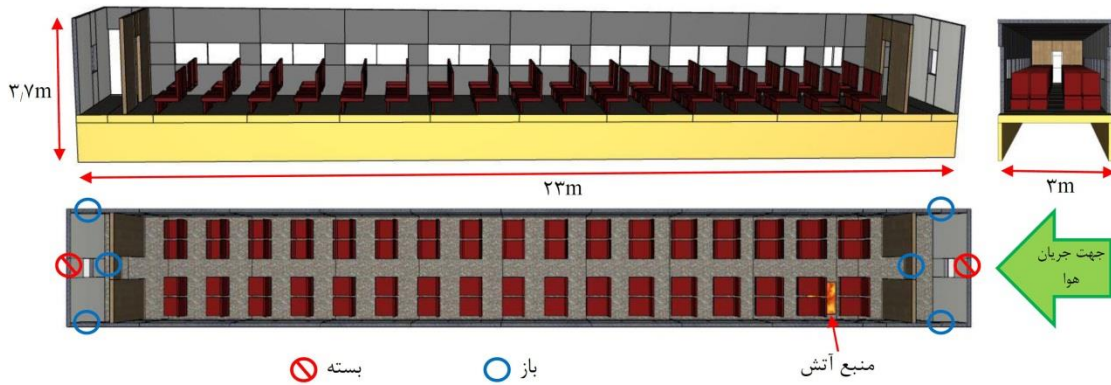
کلیه توابع در سه بعد و وابسته به زمان است و ترم Φ با استفاده از معادله (۵) قابل محاسبه است.

$$\Phi \equiv \tau_{ij} \cdot \nabla u \equiv \mu \left(2 S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u)^2 \right) \quad (۵)$$

^۳ Explicit second-order predictor/corrector scheme

^۱ Dissipation Function

^۲ Large Eddy Simulation



شکل ۲- مدل واگن در نرم افزار پایروسیم

برای مدل عددی حاضر از عایق‌های جدید و کاربردی در داخل دیواره و صندلی استفاده شد تا تاثیر تغییر جنس عایق بر میزان حرارت آزاد شده و دمای داخلی واگن مقایسه شود. نمای شماتیک از سطح دیواره جانبی طراحی شده در مدل عددی واگن در شکل ۴ نشان داده شده است. فرضیات معادل‌سازی خواص حرارتی در دیواره و صندلی به شرح زیر است:

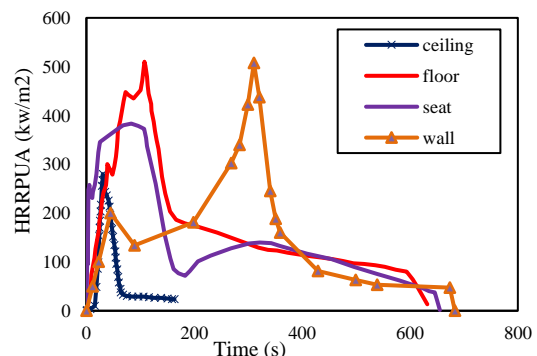
جدول ۱- خواص حرارتی معادل سطوح واگن [۱۲]

سندلی	سقف	کف	دیواره	سطوح
PStm + PU + Steel	MPAL	PVC + Pywood + PU	FRP + PEf	اجناس کاربردی
۰/۰۳۶	۰/۰۰۲	۰/۰۵۸	۰/۰۳۵	ضخامت
۴۱۲/۹	۲۷۸۷	۲۷۰	۱۸۳/۴	چگالی (kg/m ³)
۰/۹۸	۰/۹	۱/۶۷	۱/۹۰۴	ظرفیت حرارتی (kJ/kgK)
۰/۰۱۹۷	۲۰۴	۰/۰۳۰۹	۰/۰۱۹۸	رسانش حرارتی (W/mK)
۴۹۶	۴۷۵	۴۸۷	۴۵۴	دمای اشتعال (°C)

۱- ضخامت‌ها بدون تغییر در نظر گرفته شد. مقدار ضخامت عایق موجود در صندلی و دیواره ۰/۰۳ متر در نظر گرفته شد و مابقی ضخامت برای جنس رویه دیواره و در صندلی برای رویه صندلی و قاب داخلی لحاظ شد

خواص حرارتی سطوح مونتاژی حاصل معادل‌سازی براساس خواص مواد منفرد آن سطح است که در برای مدل عددی حاضر از عایق‌های جدید و کاربردی در داخل دیواره و صندلی استفاده شد تا تاثیر تغییر جنس عایق بر میزان حرارت آزاد شده و دمای داخلی واگن مقایسه شود. نمای شماتیک از سطح دیواره جانبی طراحی شده در مدل عددی واگن در شکل ۴ نشان داده شده است. فرضیات معادل‌سازی خواص حرارتی در دیواره و صندلی به شرح زیر است:

جدول ۱ ارائه شده است. منحنی معادل نرخ انتشار حرارت بر واحد سطح این سطوح مونتاژ شده نیز حاصل برهم‌نهی منحنی‌های مواد منفرد تشکیل دهنده آن سطح است که با توجه به محل قرارگیری مواد در لایه‌های سطح، ضخامت و خاصیت اشتعال‌پذیری حاصل شده و بر اساس اطلاعات مرجع [۱۲] در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

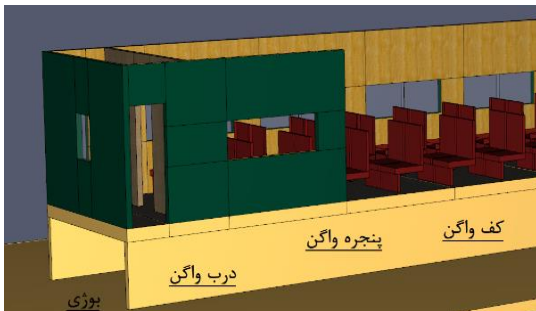


شکل ۳- منحنی‌های نرخ انتشار حرارت بر واحد سطح سطوح مونتاژی مدل واگن

۳- روش تحقیق

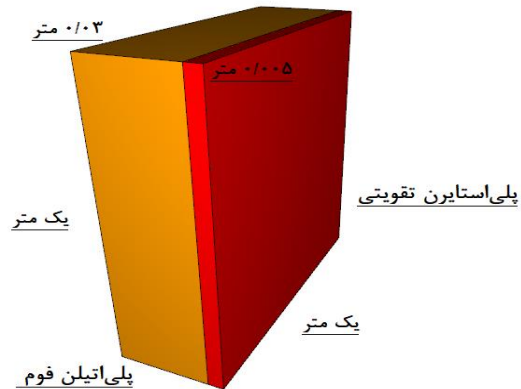
از گذشته‌های دور انسان‌ها فریفته‌ی آتش بوده و رابطه منحصر به فردی با این پدیده برقرار کرده‌اند و این جذب امروزه هم پابرجاست. در حال حاضر، مدل‌سازی فیزیکی و ریاضی، در کنار دانش عددی، اجازه‌ی تولید دوباره سناریو آتش را در یک محیط مجازی می‌دهد که به شناخت آتش و عوامل موثر بر توسعه آن در محیط‌های مختلف کمک می‌کند. با داشتن این رویکرد قصد شده است که با استفاده از نرم‌افزار پاپروسیم، چگونگی گسترش دود و آتش در واگن مسافری شبیه‌سازی شود. با انجام این فرآیند عوامل موثر بر توسعه دود و آتش در محیط واگن مشخص و به بهبود ایمن‌سازی ناوگان ریلی کمک خواهد کرد. مطالعات مقیاس عددی لازم است که از داده‌های تجربی موجود برای تایید صحت کار و پیشبرد هدف استفاده کنند.

نرم‌افزار پاپروسیم یک رابط کاربری گرافیکی برای شبیه‌سازی دینامیکی آتش است که می‌تواند آتش‌سوزی‌های پیچیده را مدل‌سازی و مدیریت کند. این شبیه‌ساز دینامیکی یک مدل عددی بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی برای جریان سیالات حامل آتش است. این مدل شکلی از معادلات ناویر-استوکس^۱ را برای سیالات با سرعت کم با تاکید بر دود و انتقال حرارت از آتش به صورت عددی حل می‌کند [۱۹].



شکل ۵- مدل سازی واگن در نرم‌افزار پاپروسیم

با توجه به نکات گفته شده و با احتساب جنس عایق اولیه در مدل مرجع و بر اساس داده‌های تجربی، روند معادل‌سازی خواص حرارتی سطوح مونتاژی در دیواره و صندلی به ترتیب در جدول ۲ و جدول ۳ ارائه شده است. همچنین معادل‌سازی منحنی‌های نرخ انتشار حرارت بر واحد مساحت سطوح



شکل ۴- نمای شماتیک از مدل‌سازی مواد دیواره واگن

۲- برای محاسبه چگالی معادل دیواره از رابطه زیر است:

$$\rho_{eq} = \frac{m_t}{V_t} = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i * X_i}{X_t} \quad (7)$$

که ρ_{eq} نشان دهنده چگالی معادل (kg/m^3)، V_t حجم کل (m^3)، X_t ضخامت کل، n تعداد لایه‌های سطح، X_i ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده و ρ_i چگالی لایه‌های مختلف (kg/m^3) است.

۳- برای محاسبه ظرفیت حرارتی معادل از رابطه زیر استفاده شد:

$$C_{peq} = \sum_{i=1}^n \frac{C_{pi} * m_i}{m_i} \quad (8)$$

که C_{peq} نشان دهنده ظرفیت حرارتی معادل (kJ/kgK)، C_{pi} ظرفیت حرارتی هر لایه (kJ/kgK) و m_i جرم هر لایه (kg) است.

۴- برای محاسبه ضریب رسانش حرارتی از رابطه زیر استفاده شد:

$$\frac{X_t}{k_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{k_i} \quad (9)$$

که k_{eq} نشان دهنده ضریب رسانش حرارتی معادل (W/mK)، k_i ضریب رسانش هر لایه است.

۵- دمای اشتعال دیواره، صندلی و مابقی قسمت‌ها بدون تغییر در مدل نهایی اعمال شد.

¹ Navier-Stokes equations

جدول ۳- خواص حرارتی صندلی مونتازی

ویژگی ماده	ضخامت (m)	چگالی (kg/m ³)	ظرفیت حرارتی (kJ/kgK)	رسانش حرارتی (W/mK)
پلی‌استر موکت [۲۳ و ۱۲]	۰/۰۰۵	۱۵۷	۱/۳	۰/۰۵۸
پلی‌اورتان فوم [۲۳ و ۱۲]	۰/۰۳۰	۱۱۶	۲/۴۵	۰/۰۱۷
فولاد	۰/۰۰۱	۷۸۵۰	۰/۴۶	۴۵/۸
مونتازی مدل مرجع [۱۲]	۰/۰۳۶	۴۱۲/۹	۰/۹۸	۰/۰۱۹۷
مونتازی مدل حاضر	۰/۰۳۶	۳۳/۵۲۷۸ ۶	۱/۰۸۶۰۵	۰/۰۱۹۴۵

خواص حرارتی فولاد از کتابخانه نرم‌افزار پایروسیم وارد مدل شد. در برنامه شبیه‌ساز دینامیک آتش یک سوخت‌گازی هیدروکربنی به عنوان جانشینی برای همه منابع سوخت بالقوه عمل می‌کند. برای بررسی توسعه آتش و دمای داخلی واگن از ترموکوپل‌هایی برای سنجش دمای سطح و دمای گاز استفاده شد. سه ترموکوپل در راستای عرضی وسط واگن (Y=1.5m) و در ارتفاع ۱/۵ متر از کف واگن تعبیه شد. محل قرارگیری ترموکوپل‌ها در شکل ۸ مشخص شده است.

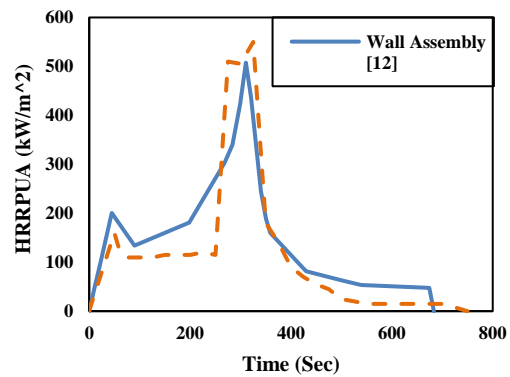
برای مقایسه تغییر مواد بر نرخ توسعه آتش تصمیم گرفته شد که از عایق‌های پرکاربرد در جانمایی داخلی دیواره و صندلی استفاده شود. عایق‌های کاربردی در واگن باید علاوه بر محدودیت صدا، مقاومت حرارتی خوبی داشته و در توسعه آتش نقشی نداشته باشد. الزاما باید سبک بوده و چگالی پایین داشته باشند؛ زیرا حجم زیادی از مواد داخلی واگن را به خود اختصاص می‌دهند؛ هم‌چنین عایق باید ساختار منعطف و نفوذناپذیری داشته باشد و استفاده از آن به راحتی و آسایش سفر مسافر کمک کند. در جدول ۴ عایق‌های جدید و خواص حرارتی آن‌ها بیان شده است.

با جایگذاری عایق‌های جدید در دیواره و صندلی و بکار بردن روش معادل‌سازی برای یافتن خواص حرارتی سطوح مونتازی و منحنی‌های نرخ انتشار حرارت بر واحد مساحت سطوح مونتازی بر اساس داده‌های تجربی، مدل‌های جدید در نرم‌افزار پایروسیم ساخته و اجرا شد.

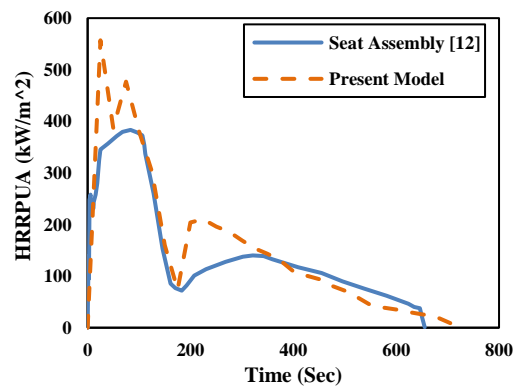
مونتازی در دیواره و صندلی به ترتیب در شکل ۶ و شکل ۷ نشان داده شده است که مطابقت خوبی با داده‌های آزمون عددی [۱۴] داشت.

جدول ۲- خواص حرارتی دیواره مونتازی

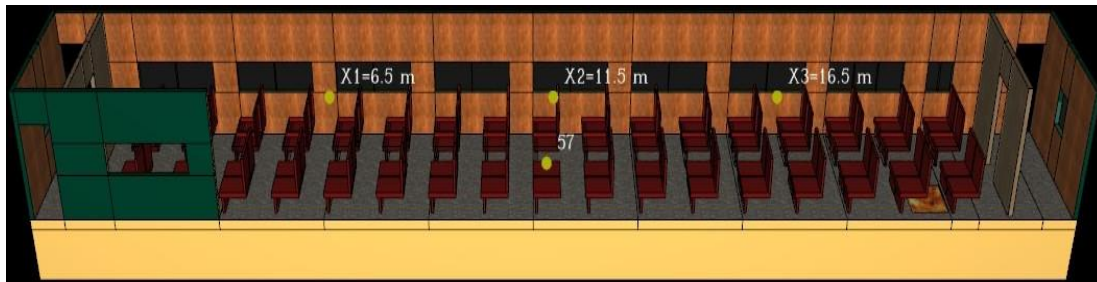
ویژگی ماده	ضخامت (m)	چگالی (kg/m ³)	ظرفیت حرارتی (kJ/kgK)	رسانش حرارتی (W/mK)
پلی‌استایرن تقویتی [۲۰]	۰/۰۰۵	۱۱۶۴	۱/۸۴	۰/۴۰۶
پلی‌اتیلن فوم [۲۲ و ۲۱]	۰/۰۳۰	۳۹	۲/۳۷۵	۰/۰۴۲
مونتازی مدل مرجع [۱۲]	۰/۰۳۵	۱۸۳/۴	۱/۹۰۴	۰/۰۱۹۸
مدل حاضر	۰/۰۳۵	۱۹۹/۷	۱/۹۳۰	۰/۰۴۸



شکل ۶- منحنی نرخ انتشار حرارت دیواره مونتازی

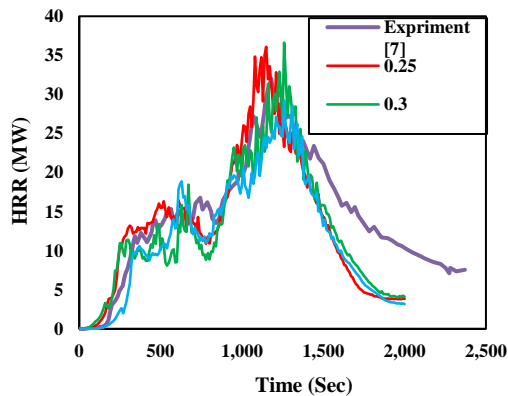


شکل ۷- منحنی نرخ انتشار حرارت صندلی مونتازی

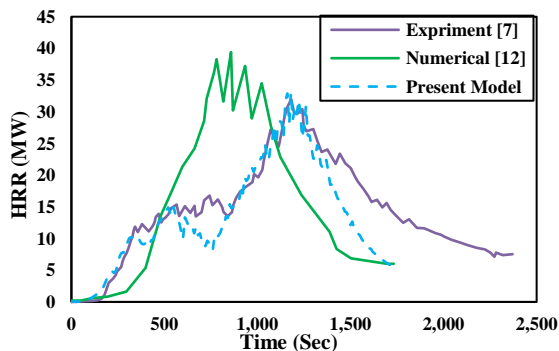


شکل ۸- تعبیه ترموکوپل در مدل عددی واگن

از نمودار نرخ انتشار حرارت واگن در شکل ۹ اندازه مش با طول ۰/۲۵ متر نسبت به دو اندازه دیگر یعنی ۰/۳ و ۰/۳۵ متر، همگرایی بیشتری به مدل تجربی [۷] دارد. در مجموع ۱۳۸۰۰۰ مش مورد تحلیل قرار گرفت.



شکل ۹- منحنی‌های نرخ انتشار حرارت - استقلال نتایج از شبکه



شکل ۱۰- منحنی‌های نرخ انتشار حرارت - مقایسه مدل‌ها

جدول ۴- خواص حرارتی عایق‌های جدید

ویژگی ماده	ضخامت (m)	چگالی (kg/m ³)	ظرفیت حرارتی (kJ/kgK)	رسانش حرارتی (W/mK)
فوم فشرده [۲۵ و ۲۲]	۰/۰۳۰	۴۳	۱/۲۱	۰/۰۲۹
یونولیت [۲۵ و ۲۲]	۰/۰۳۰	۳۴	۱/۲۱	۰/۰۴
فوم فنولیک [۲۷ و ۲۶]	۰/۰۳۰	۴۱/۸	۱/۸۸	۰/۰۲
پشم سنگ [۲۷ و ۲۶]	۰/۰۳۰	۳۷	۱/۰	۰/۰۳۴
پشم شیشه [۲۷ و ۲۰]	۰/۰۳۰	۳۶	۰/۶۸	۰/۰۳۸

۴- بررسی استقلال حل از شبکه و اعتبارسنجی نتایج

استفاده از شبکه‌بندی مناسب برای حصول نتایج مطلوب و قابل اعتماد امری بسیار مهم است. با افزایش چگالی مش (کاهش ابعاد المان‌ها و در نتیجه کاهش حجم المان) حل عددی مسئله به یک جواب واحد همگرا می‌شود. البته ریزتر شدن مش سبب افزایش توان سخت‌افزاری مورد استفاده برای حل مدل المان محدود شده و فرآیند پردازش زمان بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد. در صورتی که با کاهش پیاپی اندازه المان‌ها، تغییرات قابل نظر کردن در نتایج حل حاصل گردد، اصطلاحاً مش همگرا شده است که به این فرآیند، استقلال نتایج از شبکه گفته می‌شود [۲۷].

برای ابعاد کلی واگن از مش‌های مکعبی به طول‌های ۰/۲۵ متر، ۰/۳۰ متر و ۰/۳۵ متر استفاده شد. با توجه به نتایج حاصل

انتشار حرارت آتش کم شده و دمای داخل واگن به ۶۰۰ درجه کاهش یافت. در شکل ۱۴ نمودار غلظت دود در محل سنسورهای دمای نصب شده در شکل ۸ ارائه شده است که زمان رسیدن غلظت دود به مقادیر بحرانی از آنها قابل برداشت است. همانطور که ملاحظه می‌شود، دود تا ۴۰ ثانیه زمان نیاز دارد تا به انتهای واگن برسد، ولی تا ۱۲۰ ثانیه غلظت آن به بیش از ۵۰٪ می‌رسد.

سپس در ادامه مدل‌های جدیدی از واگن با عایق‌های مختلف طراحی شدند و شبیه‌سازی دینامیکی آتش در آنها اجرا شد. نتایج منحنی‌های نرخ انتشار حرارت مدل‌های مختلف برای مقایسه تاثیر نوع عایق در توسعه آتش در شکل و ۱۶ آورده شده است.

آنچه که از منحنی‌های نرخ انتشار حرارت مشخص است، هرچه مواد با خاصیت اشتعال‌پذیری بیش‌تری در مدل وجود داشته باشد، میزان انتشار حرارت و درگیری مواد داخلی واگن نیز با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد. نرخ انتشار حرارت مدل واگن با عایق پلی‌استایرن فشرده نسبت به تمامی عایق‌ها مقدار بیشتری دارد و به همین ترتیب مدل عایق یونولیت، مدل عایق‌های پایه، مدل عایق فوم فنولیک، مدل عایق پشم سنگ و مدل عایق پشم شیشه قرار می‌گیرند. پس عایق‌های الیافی پشم شیشه و پشم سنگ به دلیل نرخ توسعه آتش محدود، برای طراحی داخلی واگن مناسب تر به نظر می‌رسند. مشاهدات آتش و دود برای سه مدل با عایق‌های پلی‌استایرن فشرده، پشم سنگ و پشم شیشه بشرح زیر است:

در لحظه اوج میزان انتشار حرارت آتش‌سوزی در واگن، مدل عایق پلی‌استایرن فشرده میزان نرخ انتشار حرارت بالاتر و تولید دود بیش‌تری نسبت به سایر عایق‌ها دارد. مدل عایق پشم سنگ و پشم شیشه از نظر تولید دود و میزان نرخ انتشار حرارت تفاوت چندانی ندارند. در این لحظات، دمای داخلی واگن برای همه مدل‌ها به بیش از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و در مناطق درگیر شده با آتش به میزان ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است.

با دقت در نمودارهای نتایج ترموکوپل‌های دمایی در شکل ملاحظه می‌گردد که هرچه مواد و اجناس داخلی واگن خاصیت اشتعال‌پذیری بیش‌تری داشته باشند، سرعت رشد دمای داخلی واگن نیز افزون‌تر هست. در این بین مدل عایق پلی‌استایرن فشرده سریع‌ترین نرخ رشد (۱۵۰ ثانیه) و مدل

پس از علم به درستی فرآیند شبیه‌سازی و تایید استقلال حل از شبکه، مدل واگن با عایق‌های اولیه در نرم‌افزار پاپروسیم اجرا شد. برای مقایسه نتایج مدل حاضر با مدل‌های مرجع، منحنی‌های نرخ انتشار حرارت کلی واگن در شکل ۱۰ آورده شده است که مطابقت خوبی بین نتایج مدل عددی حاضر با آزمون عددی [۱۲] و مدل تجربی [۷] وجود دارد.

۵- بحث و مشاهدات

پس از اعتبارسنجی مدل عددی، مدل‌های جدید از واگن مسافری با تغییر جنس عایق در نرم‌افزار پاپروسیم اجرا شد. مدل پایه با همان جنس عایق اولیه بر اساس داده‌های تجربی مورد آزمون آتش‌سوزی قرار گرفت و نتایج شبیه‌سازی دینامیکی آتش به شرح زیر است:

- آتش پس از اشتعال به سرعت با درگیر کردن صندلی و دیواره کناری رو به بالا حرکت کرد.

- آتش در ۹۰ ثانیه به سقف واگن رسید

- آتش سپس در ۱۶۰ ثانیه بسوی انتهای واگن حرکت کرد

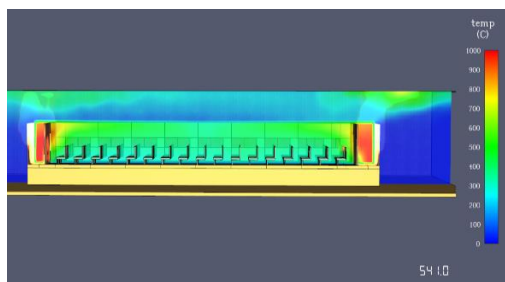
- اولین قطعه شیشه در ۵۴۰ ثانیه شکست. با ورود هوای تازه میزان نرخ انتشار حرارت سریع به ۱۵ مگاوات رشد کرد.

- با شکست شیشه بیشتر مقدار نرخ انتشار حرارت افزایش یافت تا در ۱۱۸۰ ثانیه به مقدار حداکثر ۳۶/۱ مگاوات رسید.

- با اتمام مواد سوختنی آتش رو به زوال رفت و در ۱۸۰۰ ثانیه به کمتر از ۵ مگاوات رسید و نهایتاً خاموش شد.

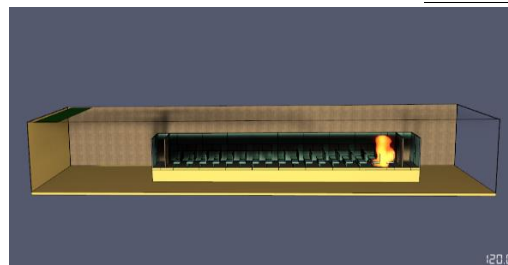
نتایج دمایی و جریان دود در فرآیند آتش‌سوزی به شرح زیر است:

همانطور که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود، در لحظه اوج آزادسازی حرارت از منبع آتش اولیه، دمای داخل واگن به بیش از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و دود تمام واگن را پر کرد. شکل شماره ۱۲ لحظه شکست اولین شیشه، را در واگن نشان می‌دهد که دود بسیار زیادی از واگن خارج و آتش از دو طرف واگن زبانه می‌کشد و دمای داخلی واگن به بیش از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است. در شکل ۱۳ در لحظه اوج نرخ انتشار حرارت آتش‌سوزی در واگن، میزان تولید دود و توسعه آتش افزایش یافته که متاثر از تراکم جریان هوا می‌باشد و دمای داخلی واگن در قسمت‌هایی درگیر به بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در لحظات واپسین از فرآیند آتش‌سوزی با اتمام مواد سوختنی، میزان تولید دود و نرخ



ب- یکه دمایی در وسط عرض واگن
 شکل ۱۲- نمای دود و آتش مدل واگن پایه در لحظه شکست اولین پنجره

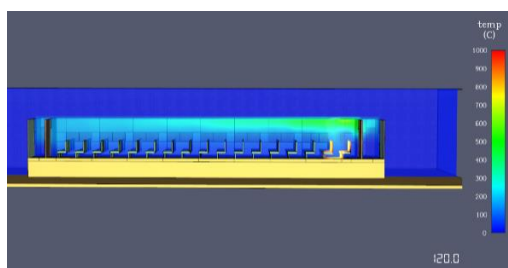
عایق پشم شیشه کمترین نرخ (۳۰۰ ثانیه) را در توسعه دمایی در واگن داشتند؛ لذا استفاده از عایق پشم شیشه در واگن می تواند زمان بیشتری را برای سناریوی فرار مسافران از واگن تامین نماید.



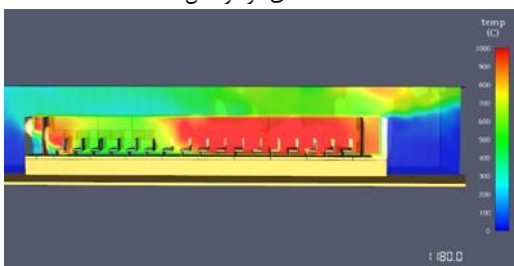
الف- نمای دود و آتش



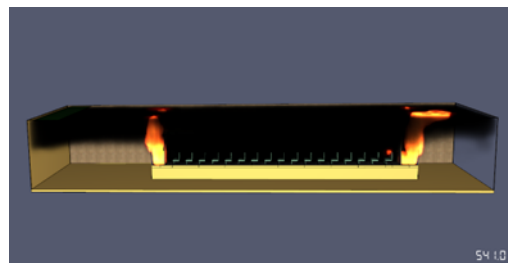
الف- نمای دود و آتش



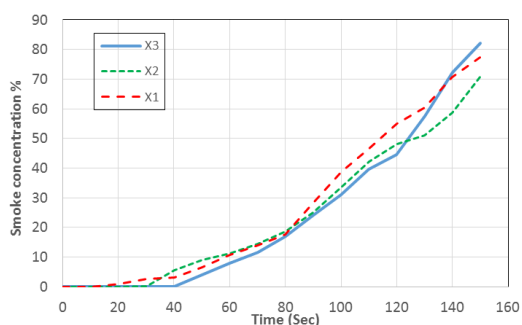
ب- یکه دمایی در وسط عرض واگن
 شکل ۱۱- نمای دود و آتش مدل واگن پایه در لحظه اوج آزادسازی حرارت از منبع



ب- یکه دمایی در وسط عرض واگن
 شکل ۱۳- نمای دود و آتش مدل واگن پایه در لحظه اوج آزادسازی حرارت واگن



الف- نمای دود و آتش

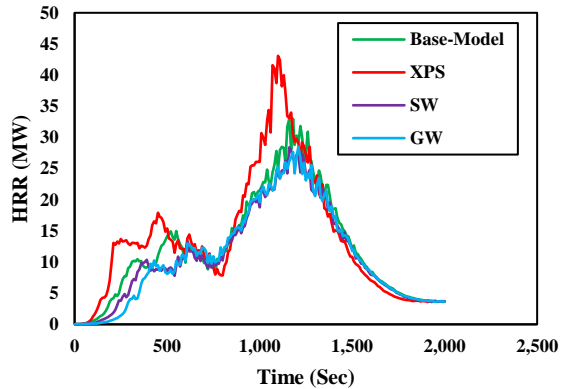


شکل ۱۴- نمودار توزیع دود بر حسب زمان در سنسورهای دود

عایق‌ها در صندلی ممکن است باعث رنجش خاطر مسافرین شود؛ لذا عایق فوم فنولیک در صندلی‌ها پیشنهاد می‌شود.

۵- علائم، نشانه‌ها و ارقام

Fiber Reinforced Polymern	پلیمر تقویتی،	FRP
Polyethylene Foam	پلی اتیلن فوم،	PEf
Polyvinyl Chloride	پلی وینیل کلراید،	PVC
تخته چوب چندلایه		PlyWood
Polyurethane	پلی اورتان،	PU
Multi-panel aluminum	آلومینیوم چندلایه،	MPAL
Polyster moquette	پلی استر موکت،	PEm
Glass Wool		GW
Ston Wool		SW

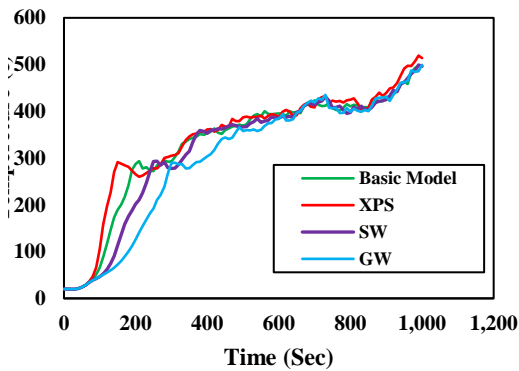


شکل ۱۵- منحنی نرخ انتشار حرارت- عایق‌های جدید

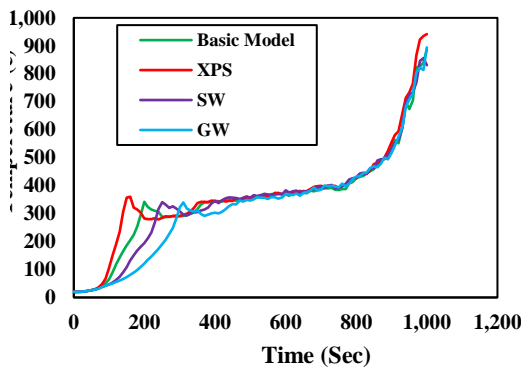
۶- نتایج

در این مدل‌سازی توانایی نرم‌افزار پائروسیم در شبیه‌سازی آتش و دود در حالت استفاده از رویکرد نرخ انتشار حرارت بر واحد سطح مشخص شد.

پس از جانمایی عایق‌های جدید در مدل واگن و اجرایی کردن مدل‌ها نتیجه شد، عایق پلی‌استایرن فشرده با وجود چگالی خوب و ضریب هدایت حرارتی پایین (عایق خوب) به دلیل خاصیت اشتعال‌پذیری خیلی زیاد، دارای بیش‌ترین نرخ انتشار حرارت هست. این عوامل باعث شد که نرخ توسعه آتش بیشتری داشته باشد و دمای داخلی واگن و تولید محصولات احتراقی نیز بیشتر بوده و همچنین سریع‌تر به محدوده بحرانی برسد. در مقابل عایق پشم شیشه با ظرفیت حرارتی پایین و چگالی خوب به دلیل عدم اشتعال‌پذیری، دارای کم‌ترین نرخ انتشار حرارت هست. این عوامل باعث می‌شود که نرخ توسعه آتش پایین باشد و دمای داخلی واگن و تولید محصولات احتراقی طی زمان بیشتری به محدوده بحرانی برسند و مسافران از این وقفه برای فرار از واگن استفاده کنند. مابقی عایق‌ها نیز عملکرد خوبی در مقابل آتش نشان دادند که در این بین عایق فوم فنولیک به دلیل رسانش حرارتی بسیار پایین و ظرفیت حرارتی بالا و نرخ اشتعال‌پذیری پایین نقش کمتری در گسترش آتش‌سوزی داشته و برای بکارگیری در فوم صندلی‌های قطار پیشنهاد می‌گردد. با توجه به عملکرد اشتعالی عایق‌ها و تاثیر آن‌ها بر توسعه حریق و تولید دود، توصیه می‌شود که از عایق‌های پشم سنگ و پشم شیشه در واگن استفاده شود. لازم بذکر است با توجه به این نکته که استفاده از این نوع



نتایج دمایی در ترموکوپل X1



نتایج دمایی در ترموکوپل X2

[11] Dowling, V. P., & White, N. (2004, March). Fire sizes in railway passenger saloons. In 6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science & Technology, Daegu, Korea (pp. 602-611).

[12] Lee, D., et al., (2013) Estimations of heat release rate curve of railcar fire. *J. Mech. Sci & Tech*, 27(6): p. 1665-1670.

[13] Chen, J. M., Yao, X. L., Yan, G., & Guo, X. H. (2014). Comparative study on heat release rate of high-speed passenger train compartments. *Procedia eng*, 71, 107-113.

[14] MO, S. J., Li, Z. R., Liang, D., Li, J. X., & Zhou, N. J. (2013). Analysis of smoke hazard in train compartment fire accidents base on FDS. *Procedia Eng.*, 52, 284-289.

[15] Chow, W. K., Lam, K. C., Fong, N. K., Li, S. S., & Gao, Y. (2011). Numerical simulations for a typical train fire in china. *Mod. & Sim. in Eng.*

[16] Bi, H., Zhou, Y., Wang, H., Gou, Q., & Liu, X. (2020). Characteristics of fire in high-speed train carriages. *J. fire sci.*, 38(1), 75-95.

[۱۷] عساری، محمدرضا، زاده مبارک، گلشن، پرور، محسن. (۱۴۰۰). تحلیل آتش سوزی قطار با روش شبیه سازی دینامیکی آتش. *مهندسی مکانیک* ۲۴-۱۵، ۴(۳۰)

[18] Peacock, R. D., & Braun, E. (1999). Fire safety of passenger trains: phase I: material evaluation (cone calorimeter) (No. DOT-VNTSC-FRA-98-26). United States. Federal Railroad Administration.

[۱۹] شمسی زاده، فریبا و ابوعلی، امید، ۱۳۸۶، مدل سازی آتش سوزی در تونل ها، دومین کنفرانس احتراق ایران، مشهد

[20] Chiam, B. H. (2005). Numerical simulation of a metro train fire.

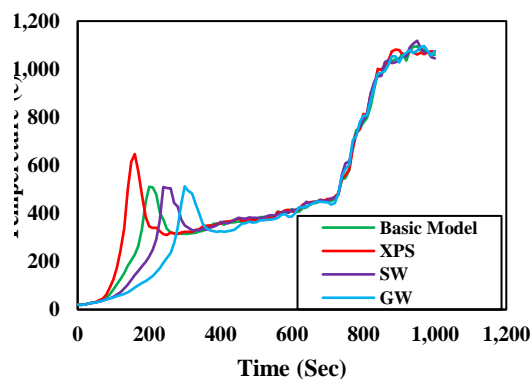
[21] Jannot, Y., Felix, V., & Degiovanni, A. (2010). A centered hot plate method for measurement of thermal properties of thin insulating materials. *Measurement Sci. & tech.*, 21(3), 035106.

[22] Doley, P. M., Yuen, A. C. Y., Kabir, I., Liu, L., Wang, C., Chen, T. B. Y., & Yeoh, G. H. (2022). Thermal Hazard and Smoke Toxicity Assessment of Building Polymers Incorporating TGA and FTIR—Integrated Cone Calorimeter Arrangement. *Fire*, 5(5), 139.

[23] Lee, D. H., Park, W. H., Jung, W. S., & Hwang, J. H. (2010). Fire test of old type interiors of subway vehicle in ISO 9705 room. *J of the Korean Soc. for Railway*, 13(5), 481-487.

[24] McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., & Overholt, K. (2013). Fire dynamics simulator technical reference guide volume 1: mathematical model. NIST special publication, 1018(1), 175.

[25] An, W., Jiang, L., Sun, J., & Liew, K. M. (2015). Correlation analysis of sample thickness, heat flux, and cone calorimetry test data of polystyrene foam. *J Thermal Analysis and Calorimetry*, 119(1), 229-238.



نتایج دمایی در ترموکوپل X3

شکل ۱۶- نتایج ترموکوپل های دمایی در داخل واگن برای مدل های مختلف از عایق ها

مراجع

[۱] بلبل امیری، نجمه و نصیرزاده، فرناد، ۱۳۸۸، کاربرد رویکرد FMEA فازی برای ارزیابی ریسک خرابی های مربوط به سیستم سیگنالیگ، علائم، کنترل و مخابرات مترو، دومین کنفرانس بین المللی پیشرفت های اخیر در مهندسی راه آهن

[۲] فکور، ارغوان، ۱۳۹۵، آنالیز ریسک حریق ناشی از سوخت گیری قطار مسافری حین جابجایی مسافر مطالعه موردی: ایستگاه راه آهن سیرجان، کنفرانس ملی محافظت ساختمان ها و سیستم های حمل و نقل در برابر آتش، تهران

[۳] اقتصاد آنلاین (۱۳۹۵). حادثه قطار هفت خوان. <https://www.eghtesadonline.com>

[4] Peacock, R. D., & Braun, E. (1984). Fire tests of Amtrak passenger rail vehicle interiors (No. NBS/TN-1193).

[5] White, N., V. Dowling, and J. Barnett, (2005) Full-scale fire experiment on a typical passenger train. *Fire Safety Sci.*

[6] Ingason, H., Kumm, M., Nilsson, D., Lönnemark, A., Claesson, A., Li, Y. Z., ... & Palm, A. (2012). The METRO project (Vol. 2012, No. 8). Mälardalen University Press

[7] Lee, D.H., Park, W.H., Hwang, J., & Hadjisophocleous, G. (2016). Full-scale fire test of an intercity train car. *Fire tech.*, 52(5), 1559-1574.

[8] Lönnemark, A., et al. (2017), Fire development in a 1/3 train carriage mock-up. *Fire Safety J.*, 91: p. 432-440.

[9] Shi, C., Zhong, M., Chen, C., Jiao, W., Li, J., Zhang, Y., ... & He, L. (2020). Metro train carriage combustion behaviors—Full-scale experiment study. *Tunnelling and Underground Space Tech.*, 104, 103544.

[10] Dowling, V. P., White, N., Webb, A. K., & Barnett, J. R. (2007). When a passenger train burns, how big is the fire. *Fire Sci. & Tech. Lab.*, 17-26.

- [27] McKenna, S. T., Jones, N., Peck, G., Dickens, K., Pawelec, W., Oradei, S., ... & Hull, T. R. (2019). Fire behaviour of modern façade materials– Understanding the Grenfell Tower fire. *J. hazardous materials*, 368, 115-123.
- [26] Cernosa, T. (2020). INTERMEDIATE-SCALE TESTS AND CONE CALORIMETER TESTS- FIRE BEHAVIOUR OF SELECTED FACADE MATERIALS. LUTVDG/TVBB