

## مدل‌سازی عددی اثر فیبر پلی‌پروپیلن بر رفتار قطعات بتنی تونل‌ها در برابر حریق

وحیدرضا افخمی، دانشجوی دکتری سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

احسان دهقانی\*، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

Email: dehghani@qom.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۴ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۱۲

### چکیده

سامانه‌ی قطار شهری یکی از مهمترین خطوط حمل و نقل در کلان‌شهرها بوده که سرویس‌دهی بدون وقفه‌ی آن امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. یکی از اصلی‌ترین اجزای سازه‌ای خطوط قطار شهری، قطعات بتنی تونل‌ها است که معمولاً در طراحی آن‌ها بیشتر به عوامل لرزه‌ای توجه می‌شود و عوامل مهم دیگر، مثل حریق، که می‌تواند ایمنی این قطعات را مورد تهدید قرار داده و سرویس‌دهی این سامانه را دچار اختلال کند، کمتر مورد توجه طراحان بوده است. در ساخت قطعات بتنی تونل‌ها عموماً از بتن‌های پُر مقاوم استفاده می‌شود که علی‌رغم رفتار لرزه‌ای مناسب، در برابر افزایش دما و حریق، عملکرد مناسبی ندارند. آتش‌سوزی، طی یک‌سری فعل و انفعالات شیمیایی، می‌تواند منجر به کاهش ضخامت قطعات بتنی تونل‌ها شده و ایمنی این قطعات را تحت تأثیر خود قرار دهد. در تحقیق پیش‌رو، با معرفی یک مدل جدید مبتنی بر نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، رفتار قطعات بتنی تونل‌ها در برابر حریق مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه، در جهت اطمینان از نتایج تحقیق، با معرفی و اعمال انواع منحنی‌های حریق بر قطعه‌ی بتنی، اثر اضافه کردن فیبر پلی‌پروپیلن بر مخلوط بتنی، بررسی شده است. نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر این موضوع است که اضافه کردن حداقل ۰/۹ کیلوگرم فیبر پلی‌پروپیلن، به صورت یکنواخت، در هر متر مکعب مخلوط بتنی در قطعات بتنی تونل‌ها، تا حد زیادی منجر به بهبود رفتار این قطعات در برابر انواع حریق‌های مورد انتظار شده و از تورق و کاهش ضخامت این قطعات جلوگیری می‌کند.

واژه‌های کلیدی: قطعات بتنی، حریق، فیبر پلی‌پروپیلن، نرم‌افزار آباکوس، تورق

### ۱. مقدمه

شواهد تاریخی در حوزه بین‌المللی نمایانگر این واقعیت است که رعایت این اصول نه تنها در زمان جنگ، بلکه در زمان صلح نیز می‌تواند در کاهش آسیب‌های ناشی از بحران‌های انسان‌ساخت (غیرعمدی) و غیرانسان‌ساخت (طبیعی) نقش اساسی ایفا نماید. بنابراین، ضروری است

سامانه‌ی قطار شهری یکی از مهمترین مراکز حمل و نقل در یک کشور محسوب می‌شود که به دلیل مردم‌محور بودن و لزوم سرویس‌دهی مداوم آن، باید براساس اصول و روش‌هایی محافظت و نگهداری شود. تجارب و

در سال‌های اخیر، با توجه به گستره‌ی آتش‌سوزی در سازه‌ها، مطالعات قابل ملاحظه‌ای روی این موضوع صورت گرفته است و به‌طور خاص در مورد ایمنی در برابر حریق در تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی، راهنمایی‌ها و توصیه‌هایی ارائه شده است که برخی از آن‌ها در آئین‌نامه‌ها گنجانده شده است (کاندینیا، ۲۰۰۷؛ ماراویس و وراکاس، ۲۰۱۴؛ EFNARC، ۲۰۰۶). برخی از محققین، اثر حریق بر قطعات بتنی تونل‌ها در اندازه‌ی واقعی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این آزمایش‌ها، حداکثر دمای قطعات بتنی ۳۰۰ تا ۳۵۰ درجه‌ی سلسیوس بوده و شرایط آزمایشگاهی قطعات بدون بارگذاری خارجی بوده است (یان و همکاران، ۲۰۱۳؛ یاسودا و همکاران، ۲۰۰۴؛ کانر و بونکو، ۲۰۰۹). یان و همکاران (۲۰۱۳) اثر حریق هیدروکربنی، به مدت ۶۰ دقیقه، بر قطعات بتنی تونل‌ها را مورد بررسی قرار دادند. استاندارد اروپا (EFNARC، ۲۰۰۶) توصیه‌هایی جهت محافظت در برابر حریق قطعات بتنی ارائه کرده‌اند که براساس منحنی‌های مختلف حریق بوده است. آزمایش‌های مبنای این استاندارد روی دو قطعه‌ی بتنی بوده که یکی از این قطعات مسلح به میلگرد و دیگری غیرمسلح بوده است. نتایج این آزمایش‌ها، در جهت بهبود عملکرد قطعات بتنی سازه‌ای تونل‌ها در برابر حریق، در این استاندارد گنجانده شده است.

به دلیل عدم ارائه‌ی روش‌های تئوری در پیش‌بینی تورق و یا کاهش ضخامت قطعات بتنی تونل‌ها حین حریق، در بیشتر موارد، به روش‌های آزمایشگاهی روی آورده شده است. معمولاً آزمایش‌ها (در محیط آزمایشگاهی) روی اجزایی صورت گرفته است که از دیگر اجزای تونل مجزا شده‌اند. در بسیاری از آزمایش‌ها، مدل کوچک شده‌ای از قطعات لاینینگ شده‌ی تونل‌ها تحت حریق ناشی از یک کوره‌ی آتش‌زای الکتریکی قرار گرفته‌اند و اثر پوشش‌های ضد حریق در این قطعات مورد بررسی قرار گرفته است (کیم و همکاران، ۲۰۱۰؛ کاندینیا،

تا با شناخت ویژگی‌های مختلف سامانه قطار شهری و تهدیداتی که ممکن است در طول حیات آن ایجاد شود، راهکارهای مقابله با این تهدیدات معرفی شوند و شرایط لازم برای ایجاد ایمنی و حفاظت آن تأمین گردد.

ایمنی سازه‌ها یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که جامعه‌ی مهندسی را تحت تأثیر خود قرار داده است. هنگامی که یک طرح مهندسی برای ساخت یک سازه مد نظر باشد باید این طرح از جنبه‌های مختلف، جهت تأمین ایمنی لازم، مورد ارزیابی قرار گیرد، خصوصاً طرح‌هایی شبیه متروی شهری که به عنوان طرح‌های ملی شناخته می‌شوند و افراد زیادی از جامعه تحت تأثیر عملکرد این طرح‌ها قرار می‌گیرند. حریق در تونل‌های متروی شهری به علت وقایعی نظیر آتش‌سوزی در قطار، پالت‌های چوبی، عوامل انسانی و یا هر وسیله‌ی قابل اشتعال دیگر، امکان‌پذیر است، زیرا که امکان فراهم بودن مثلث آتش (ماده‌ی سوختنی، اکسیژن و حرارت) در هر لحظه در تونل وجود دارد (راضی و همکاران، ۲۰۱۶). علاوه بر این، وقوع جنگ و حملات تروریستی نیز می‌تواند از عوامل بروز آتش‌سوزی در تونل‌ها باشد. بنابراین، پدیده‌ی حریق، یک پدیده‌ی نامأنوس در تونل نبوده (اینگاسون و همکاران، ۲۰۱۵) و در کنار خطراتی مثل زلزله، حریق نیز می‌تواند در طول دوره‌ی بهره‌برداری از مترو خطرآفرین باشد و ایمنی آن را تحت تأثیر قرار دهد. هنگامی که در تونل‌های مترو، تحت تأثیر عوامل انسانی یا دیگر عوامل، آتش‌سوزی رخ دهد، مقاومت قطعات بتنی سازه‌ای آن در برابر حریق، کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته و عمر مفید آنها کاهش می‌یابد (ماراویس و وراکاس، ۲۰۱۴). در واقع، در حین حریق، در مدت کوتاهی از زمان، دما در تونل به حدود ۱۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس می‌رسد (هاک، ۱۹۹۸) که خود منجر به فعل و انفعالات شیمیایی زیادی در اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای تونل‌ها شده و عملکرد آن‌ها را دچار تغییر می‌کند.

میلگردها (با افزایش تنش‌های درونی ناشی از حرارت و تغییر شکل‌های حین حریق و پس از آن)، بر قطعات بتنی دارد (هارماتی، ۱۹۹۳). پدیده‌ی تورق یا پوسته پوسته شدن در اثر آسیب‌های سازه‌ای و آسیب‌های ناشی از به کشش افتادن بتن حین افزایش دما، صورت گرفته است و می‌تواند منجر به فروریختگی قسمتی از قطعات لاینینگ در تونل شود (چانگ و کونسولازو، ۲۰۰۵). زیمل و همکاران (۲۰۰۶) در بررسی آزمایشگاهی خود، اثر اضافه کردن فیبر پلی‌پروپیلن بر نفوذپذیری بتن را مورد بررسی قرار داده و اشاره کرده‌اند که اضافه کردن حداقل ۱/۵ کیلوگرم از این فیبر در مخلوط بتنی منجر به افزایش بیش از سه برابری نفوذپذیری و کاهش تورق در بتن می‌شود. در تونل‌های بدون پوشش حرارتی، تغییرات ناشی از پوسته پوسته شدن به علت استفاده از بتن پرمقاومت که در آن نفوذپذیری کم بوده (کالیفا و همکاران، ۲۰۰۰) و سازه تحت فشار دائمی خاک می‌باشد، بیشتر است. در حالت بهره‌برداری تونل، میلگردها نقش کمتری در باربری داشته و یک کاهش در مقاومت میلگردهای فولادی، به صورت اتفاقی، منجر به فروریختگی نمی‌شود. با این حال، یک تونل آسیب دیده با پوسته پوسته شدن را شاید به راحتی نتوان تعمیر کرد و این امر اختلال بزرگی در خطوط حمل و نقل شهری ایجاد نماید. بنابراین، نیاز است رفتار تونل‌های خطوط حمل و نقل شهری (مترو) و به طور خاص قطعات بتنی آن، در برابر پدیده‌هایی شبیه حریق، مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

فیبر پلی‌پروپیلن یکی از افزودنی‌های بتن می‌باشد که علی‌رغم وزن سبک، از مقاومت بالایی برخوردار می‌باشد (تاکره و همکاران، ۲۰۱۴). اضافه کردن فیبر پلی‌پروپیلن در مخلوط بتنی منجر به بهبود عملکرد بتن شده و مقاومت کششی و فشاری بتن را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، وجود این فیبر به بهبود رفتار در برابر حریق

۲۰۰۷؛ یاسودا و همکاران، ۲۰۰۴؛ کانر و بونکو، ۲۰۰۹). با این حال، ورمیر و همکاران (۲۰۱۴) و همچنین پیمینتا و همکاران (۲۰۱۴)، اثر حریق بر قطعات لاینینگ بتنی بدون وجود پوشش‌های ضد حریق را مورد بررسی قرار داده‌اند.

با اینکه مطالعات آزمایشگاهی زیادی روی موضوع حریق در تونل‌ها صورت گرفته است، با این حال تحقیقات کمی روی رفتار قطعات بتنی ساخته شده از مصالح جدید در برابر حریق صورت گرفته است. در برخی از مطالعات به اهمیت انتخاب سنگدانه‌ها و ابعاد و اندازه‌های آن‌ها اشاره شده است و اضافه کردن فیبر پلی‌پروپیلن<sup>۱</sup> را به عنوان پیشنهادی جهت بهبود رفتاری این قطعات پیشنهاد کرده‌اند. فیبر پلی‌پروپیلن در صورتی که به صورت یکنواخت در مخلوط بتنی قرار گیرد، نقش فعالی در افزایش مقاومت قطعات بتنی سازه‌ای تونل‌ها، تحت افزایش دما، به وسیله‌ی کاهش انقباض پلاستیک بتن و افزایش نفوذپذیری (۲۰۱۶). در دهه‌ی اخیر، تحقیقات مختلفی روی پوشش‌های ضد حریق در بتن صورت گرفته است که مطالعه‌ی ابراهیم و همکاران (۲۰۱۲) که در آن اثر حریق بر بتن پرمقاومت ساخته شده از خاکستر و نانوسیلیکاها را مورد بررسی قرار داده و بهبود عملکرد در برابر حریق این قطعات لاینینگ بتنی را اثبات کرده‌اند، از این دسته‌اند. از تحقیقات دیگر می‌توان به مطالعه‌ی ماراویس و راکاس (۲۰۱۴) اشاره کرد که در آن با توجه به منحنی‌های متعدد حریق، رفتار قطعات بتنی لاینینگ تونل‌ها با انواع پوشش‌های ضد حریق بررسی شده است.

همانطور که پیشتر اشاره گردید، آتش‌سوزی در تونل می‌تواند اثر قابل ملاحظه‌ای بر ایمنی آن داشته باشد. در حین حریق، تونل در معرض دماهای زیاد قرار می‌گیرد. حرارت ایجاد شده ناشی از حریق، اثرهای مستقیم و غیر مستقیم، مثل افت مقاومت و سختی بتن و

<sup>1</sup> - Polypropylene Fibre

آزمایشگاهی متعددی که روی رفتار در برابر حریق سازه‌های بتنی صورت گرفته است، کمتر مدل‌سازی عددی یا تحلیلی مناسبی برای اینگونه رفتار سازه‌ها ارائه شده است. مدل‌سازی عددی قطعه بتنی با استفاده از نرم‌افزارهای مرسوم که بیانگر ویژگی‌های فیزیکی و رفتاری بتن در برابر حریق باشد، می‌تواند در شناخت بهتر اینگونه سازه‌ها کمک شایانی کند. با مدل‌سازی مذکور می‌توان درک مناسب‌تری از طراحی در برابر حریق قطعات بتنی را دریافت کرد. به‌علاوه، با توجه به ورود مشخصه‌های بتن در مدل ارائه شده می‌توان تحلیل مناسب‌تری از نحوه تغییر مقاومت بتن در برابر حریق ارائه کرد. در این تحقیق در ابتدا یک مدل تحلیلی جدید مبتنی بر نرم‌افزار آباکوس ارائه شده است که قادر است رفتار در برابر حریق قطعات بتنی تونل‌ها را بررسی کرده و تورق ناشی از حریق را پیش‌بینی کند. در ادامه، با استفاده از این مدل تحلیلی، اثر اضافه کردن فیبر پلی‌پروپیلن در این قطعات مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، در تحقیق پیش‌رو، با بررسی اثر منحنی‌های مختلف حریق، مقاومت در برابر تورق قطعات بتنی ساخته شده از بتن پرمقاومت در تونل‌ها، در برابر انواع آتش‌سوزی، تحت بررسی قرار گرفته است.

## ۲. اثر حریق بر قطعات بتنی تونل‌ها

بتن یکی از شاخص‌ترین مواد کامپوزیت است که به علت وفور مصالح تشکیل دهنده‌ی آن در طبیعت، نقش مهمی در صنایع مختلف و از جمله صنایع عمرانی دارد. در حالت کلی، در بتن، دو فاز از مواد مشهود است که فاز جامد آن شامل ترکیبی از سیمان و دیگر مصالح سنگی و افزودنی‌هاست و فاز مایع آن شامل آبی است که در حفرات بتن وجود دارد (هارماتی، ۱۹۹۳). با اعمال حریق بر قطعات بتنی، علاوه بر واکنش‌هایی که در فاز جامد بتن رخ می‌دهد، در فاز مایع بتن نیز تغییراتی رخ داده و

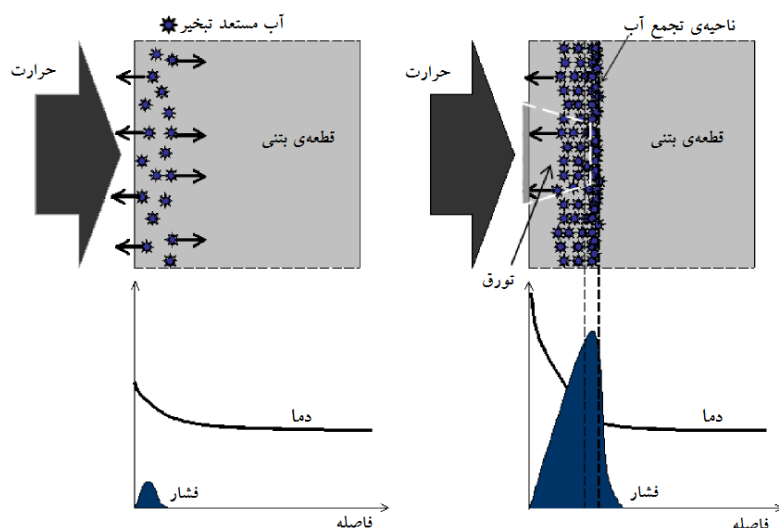
بتن کمک قابل توجهی خواهد کرد. این ماده نسبت به دیگر افزودنی‌های بتن مثل خاکستر، آب‌گریز بوده و آب درون بتن را جذب نمی‌کند، با این حال، برای جلوگیری از خرد شدن یا باریک شدن این ماده، فرایند اختلاط بتن باید در زمان کوتاه‌تری صورت گیرد که این مسئله فرایند یکنواخت شدن چیدمان این فیبر در ساختار بتنی را مشکل‌تر خواهد کرد (موهود، ۲۰۱۵). با توجه به گستره‌ی استفاده از فیبر پلی‌پروپیلن در مخلوط بتنی، در کشور ما نیز در این زمینه تحقیقاتی صورت گرفته است. احمدی پوری نعیم و صابری (۲۰۱۴) با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی خود، اثر اضافه کردن فیبرهای پلی‌پروپیلن بر مقاومت فشاری و عملکرد حرارتی بتن پرمقاومت، با توجه به اندازه‌ی فیبرها و مقدار آن‌ها در مخلوط بتنی، را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، به بهبود عملکرد مقاومتی و رفتار در برابر حرارت این نوع بتن با افزودنی فیبر پلی‌پروپیلن اشاره شده است. اصلانی و ثمالی (۲۰۱۴) نیز از طریق آزمایش‌های که روی اجزای بتنی همراه با فیبر پلی‌پروپیلن انجام داده‌اند به بهبود عملکرد این نوع بتن در برابر افزایش دما اشاره کرده و نیز روابطی از مقاومت فشاری و کششی بتن با توجه به حجم فیبر مصرفی ارائه کرده‌اند. عبائیان و همکاران (۲۰۱۸) اثر افزایش دما بر بتن‌های پرمقاومت به همراه فیبر پلی‌پروپیلن را مورد بررسی قرار داده و با رساندن دما تا حد ۳۰۰ درجه‌ی سلسیوس به این نتیجه رسیده‌اند که در بتن با افزودنی فیبر پلی‌پروپیلن، کاهش مقاومت فشاری کمتری نسبت به بتن بدون این افزودنی، رخ خواهد داد.

در ساخت قطعات بتنی تونل‌ها عمدتاً از بتن با مقاومت فشاری زیاد استفاده می‌گردد که افزایش مقاومت فشاری بتن هم‌راستا با کاهش نفوذپذیری و تخلخل بتن می‌باشد. با کاهش نفوذپذیری بتن، فضای عبوری برای سیال آب و بخار آب در بتن کاهش یافته و بتن تحت تأثیر بیشتری از حریق قرار می‌گیرد. علی‌رغم تحقیقات

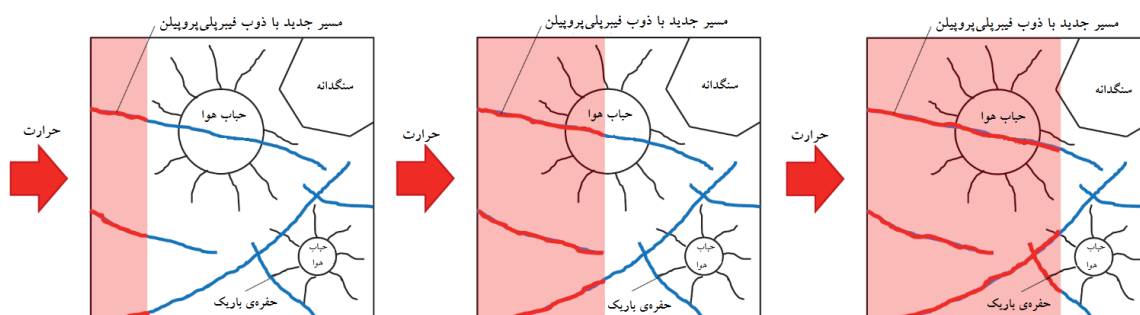
نحوه‌ی توسعه فشار حفره‌ای، تنش‌های کششی ناشی از افزایش دمای حریق و پدیده تورق یا جداشدگی بتن را به نمایش می‌گذارد. در ساخت قطعات بتنی تونل‌ها، معمولاً از بتن‌های پرمقاومت بهره گرفته می‌شود، که این مواد نسبت به بتن معمولی، از نسبت تخلخل کمتری برخوردار بوده و دریچه‌های نفوذپذیری کمتری دارند که این امر منجر به شکل‌گیری سریع‌تر سدهای عبوری بخار آب شده و سرعت و امکان تورق ناشی از حریق در این قطعات را افزایش می‌دهد. بنابراین، نیازمند تمهیدات بیشتر در تأمین ایمنی قطعات ساخته شده از این نوع بتن‌ها می‌باشد. یکی از راهکارهایی که در بهبود رفتار در برابر حریق این قطعات می‌توان پیشنهاد کرد، اضافه کردن میزان مشخصی از فیبر پلی‌پروپیلن در مخلوط بتنی می‌باشد. فیبر پلی‌پروپیلن در بتن، علاوه بر بهبود رفتار مقاومتی بتن، منجر به بهبود رفتار در برابر حریق آن می‌گردد. با اعمال حرارت به بتن و رسیدن دمای بتن به حدود ۱۷۰ درجه‌ی سلسیوس، فیبر پلی‌پروپیلن ذوب می‌شود و در نتیجه نفوذپذیری و دریچه‌های عبوری بخار آب در بتن افزایش می‌یابد که این امر منجر به پیش‌گیری و یا کاهش سرعت تورق در بتن می‌گردد (زیمل و همکاران، ۲۰۰۶). شکل ۲، روند ذوب شدن فیبر پلی‌پروپیلن و در مدار قرار گرفتن دریچه‌های ایجاد شده‌ی ناشی از ذوب این فیبرها در بتن، حین افزایش حرارت را به نمایش می‌گذارد.

به تدریج فاز گاز در بتن، که شامل بخار آب موجود در حفرات می‌باشد، شکل می‌گیرد. معمولاً شروع تبدیل آب موجود در حفرات بتن به بخار آب، از دمای ۱۰۰ درجه‌ی سلسیوس شروع شده و به تدریج و با گذر از دمای ۱۵۰ درجه‌ی سلسیوس، تمام آب موجود در حفرات آن قسمت از بتن، تبدیل به بخار آب شده و شروع به جریان در قسمت‌های داخلی سردتر بتن کرده و در آنجا تجمع می‌کند. با ادامه یافتن حریق یا افزایش دما در بتن، نرخ شکل‌گیری و تبدیل آب به بخار آب و در ادامه، مهاجرت بخار آب به لایه‌های داخلی افزایش می‌یابد، تا جایی که ذرات بخار آب قسمتی از دریچه‌های نفوذ بتن را به تسخیر خود درآورده و با اشباع کردن حفرات در آن قسمت از بتن سدهایی ایجاد می‌کنند که مانع از عبور بیشتر بخار آب گردد (خوری، ۲۰۰۰). با شکل‌گیری لایه‌های اشباع از بخار آب یا مخلوطی از بخار آب و آب، به تدریج با هجوم بخار آب از قسمت‌های گرم‌تر بتن، فشار حفره‌ای در این ناحیه از بتن شروع به شکل‌گیری و توسعه می‌کند و به تبع آن تنش‌های کششی در آن قسمت از بتن شکل می‌گیرد، تا جایی که با افزایش میزان حرارت و نفوذ بخار آب در بتن، فشار حفره‌ای و تنش‌های کششی در ناحیه تجمع آب و بخار آب بتن، از حد مقاومت کششی بتن فراتر رفته و منجر به جدا شدن آن قسمت از بتن از قطعه‌ی بتنی می‌گردد که به این پدیده تورق یا پوسته پوسته شدن<sup>۱</sup> اطلاق می‌گردد. شکل ۱،

<sup>۱</sup>- Spalling



شکل ۱. تورق در بتن تحت حریق (هگر، ۲۰۱۳)



شکل ۲. روند ذوب شدن فیبر پلی پروپیلن و افزایش نفوذپذیری بتن (لی و همکاران، ۲۰۱۲)

در رابطه ی (۱)،  $T$  دما برحسب درجه ی سلسیوس و  $t$  زمان بر حسب دقیقه می باشد. با اینکه در بسیاری از تحقیقات از منحنی حریق استاندارد بهره گرفته می شود، اما به وضوح مشخص شده است که در آتش سوزی هایی که عمده ی مواد موجود در سازه ها از فرآورده های نفتی و هیدروکربنی می باشد، شدت افزایش دما در حریق از سرعت بیشتری برخوردار بوده و از منحنی استاندارد حریق تبعیت نمی کند. بنابراین، منحنی حریق مبتنی بر فرآورده های نفتی (در حالت شدت کم حریق، ناشی از وجود فرآورده های اندک نفتی در محیط) ارائه شده است که با نام منحنی حریق هیدروکربنی<sup>۲</sup> شناخته می شود، طبق رابطه ی (۲) محاسبه می شود.

$$T = 20 + 1080 * (1 - 0.325 * e^{-0.167*t} - 0.675 * e^{-2.5*t}) \quad (2)$$

### ۳. منحنی های حریق

یکی از مهم ترین مسائلی که در پدیده ی حریق در سازه ها با آن روبرو هستیم، بحث الگوی افزایش دما و به صورت خاص، منحنی حریق در سازه ها است. این امر منجر به ارائه ی منحنی های متعددی گردیده است که برخی از آنها در آئین نامه ها گنجانده شده است. یکی از معروفترین منحنی های حریق در سازه ها، منحنی حریق استاندارد<sup>۱</sup> می باشد. این منحنی حریق بر مبنای حریق سلولزی بوده و ارتباط بین افزایش دما و زمان در آن، طبق رابطه ی ۱ می باشد (ماراویس و راکاس، ۲۰۱۴؛ سایت آنالین: پرومات- تونل).

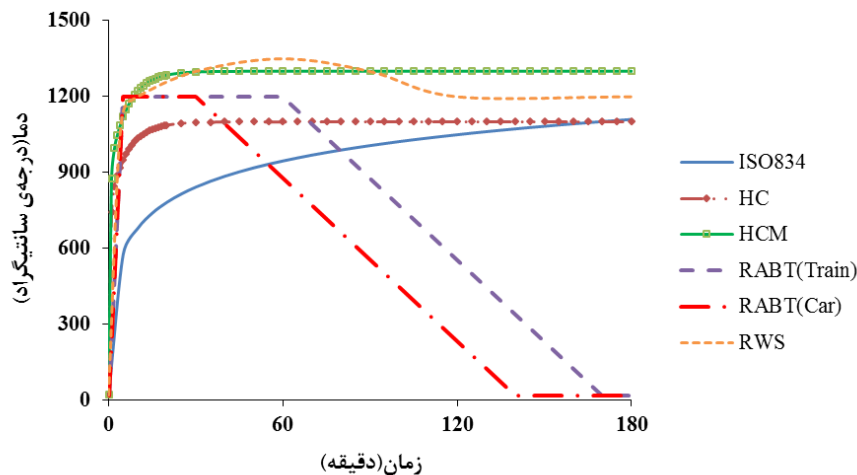
$$T = 20 + 345 * \text{Log}(8 * t + 1) \quad (1)$$

<sup>1</sup>- ISO834 Fire Curve

<sup>2</sup>- (HC): Hydrocarbon Fire Curve (Euro Code 1)

دقیقه، دمای حریق ثابت می‌ماند. در حالی که در نوع دیگر آن، که به نام منحنی حریق رابت (قطار)<sup>۳</sup> می‌باشد، حریق تا ۶۰ دقیقه از شروع آن در دمای حداکثر ۱۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس باقی مانده و به تدریج پس از ۱۱۰ دقیقه به دمای اولیه می‌رسد.

سازمان حمل و نقل هلند به ارائه‌ی یک منحنی حریق هیدروکربنی پرداخته است که در آن بدترین حالت از حریق با حداکثر مواد نفتی، به همراه قرارگیری در دماهای بسیار زیاد (دمایی فراتر از ۱۱۰۰ درجه‌ی سلسیوس) به مدت ۱۲۰ دقیقه ارائه شده است که به نام منحنی حریق آر-دبلیو-اس<sup>۴</sup> شناخته می‌شود. شکل ۳، انواع مختلف منحنی‌های حریق ارائه شده در این قسمت که در واقع اصلی‌ترین و شناخته شده‌ترین این منحنی‌ها می‌باشند، به نمایش می‌گذارد (زلتانیچ، ۲۰۱۴).



شکل ۳. انواع منحنی‌های حریق

افزایش ایمنی قطعات بتنی، اضافه کردن فیبر پلی‌پروپیلن به مخلوط بتنی حین اختلاط می‌باشد که در صورت توزیع یکنواخت و مناسب این فیبرها، می‌توان انتظار عملکرد بهتر قطعات بتنی در برابر حریق را داشت. در حین حریق و با رسیدن دما به حدود ۱۷۰ درجه‌ی سلسیوس در بتن، فیبر پلی‌پروپیلن شروع به ذوب شدن

با توجه به گستره‌ی حریق ناشی از فرآورده‌های نفتی در سازه‌ها و امکان وجود مقدار زیاد این مواد در سازه‌ها، برخی آئین‌نامه‌ها و سازمان‌ها، از جمله سازمان استاندارد فرانسه، از الگوی منحنی حریق هیدروکربنی اصلاح شده<sup>۱</sup> بهره می‌گیرند که از رابطه‌ی (۳) به دست می‌آید.

$$T = 20 + 1280 * (1 - 0.325 * e^{-0.167*t} - 0.675 * e^{-2.5*t}) \quad (3)$$

سازمان استاندارد آلمان با معرفی دو منحنی مختلف حریق، الگوی دیگری از حریق در تونل‌ها ارائه کرده است. در این منحنی‌ها، در طول پنج دقیقه، دما به حد ۱۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس می‌رسد. در نوع اول این منحنی، که به نام منحنی حریق رابت (اتومبیل)<sup>۲</sup> شناخته می‌شود، پس از رسیدن دما به ۱۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس، تا ۳۰

#### ۴. اثر حضور فیبر پلی‌پروپیلن بر رفتار بتن تحت حریق

پیشتر اشاره شد که بتن پرمقاومت نسبت به بتن معمولی از نفوذپذیری کمتری برخوردار است که این امر موجب افزایش احتمال تورق، حین حریق، در بتن می‌گردد. یکی از راهکارهای کاهش احتمال تورق و

<sup>۳</sup>- RABT (Train)

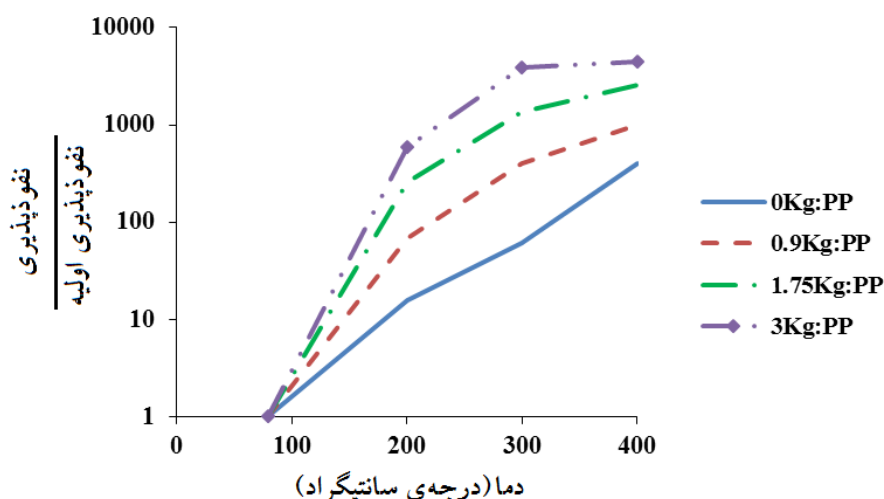
<sup>۴</sup>- RWS: Rijkswaterstaat curve

<sup>۱</sup>- (HCM): Modified Hydrocarbon Fire Curve (Fr)

<sup>۲</sup>- RABT (Car)

گرفته است. مخلوط بتنی این آزمایش ها، در هر متر مکعب خود دارای صفر،  $\frac{0}{9}$ ،  $\frac{1}{75}$  و  $\frac{3}{100}$  کیلوگرم فیبر پلی پروپیلن بوده و متوسط نتایج نسبت نفوذپذیری آن ها در هر زمان، نسبت به نفوذپذیری در دمای  $80^\circ\text{C}$  درجه ی سلسیوس این قطعات، در شکل ۴ ارائه شده است (کلیفا و همکاران، ۲۰۰۱)، که مبنای محاسباتی این تحقیق بوده است.

می کند و به تدریج نفوذپذیری بتن افزایش می یابد. بنابراین، یکی از مسائلی که باید در تحلیل آتش سوزی در قطعات بتنی به آن توجه شود، تغییرات نفوذپذیری حین افزایش دما در این قطعات می باشد. مجموعه ای از آزمایش ها روی قطعات بتنی پرمقاومت توسط هاسلر (دایان و گاله، ۲۰۰۰) و همچنین سمبیوره (کولک، ۱۹۸۹) صورت گرفته است که در آن ها اثر افزایش دما بر نفوذپذیری قطعات بتنی پرمقاومت مورد بررسی قرار



شکل ۴. نسبت نفوذپذیری به نفوذپذیری اولیه (در دمای  $80^\circ\text{C}$  درجه ی سلسیوس) در قطعات پرمقاومت بتنی

تحلیل حرارتی فاز جامد بتن صورت می گیرد و در ادامه با توجه به نتایج مدل سازی و تحلیل اولیه با استفاده از مدل سازی "سویلز"<sup>۲</sup> در نرم افزار مذکور، به تحلیل انتقال بخار آب در بین حفرات و نحوه ی تشکیل و توسعه ی فشارحفره ای پرداخته می شود. همزمان با تحلیل "سویلز" به وسیله ی سابروتین هایی کنترل فشار حفره ای و تنش های کششی در بتن صورت گرفته و در صورت رخ دادن تورق در بتن، زمان و عمق تورق در آن مشخص می گردد.

فرض شده است که بتن به عنوان یک ماده ی همگن بوده و بخار آب نیز شبیه یک گاز ایده آل عمل می کند. مدل انتقال حرارت برای یک قطعه ی بتنی با ضخامت

## ۵. مدل سازی رفتار قطعات بتنی تونل ها در برابر حریق

یکی از نرم افزارهایی که توانایی مناسبی در تحلیل رفتار اجسام تحت حرارت دارد، نرم افزار آباکوس<sup>۱</sup> (آباکوس، ۲۰۱۴) می باشد. این نرم افزار مبتنی بر اجزای محدود، قادر است همزمان با در نظر گرفتن فاز جامد از یک ماده، خصوصیات فاز سیال ماده را نیز بپذیرد، که این مسئله مدل سازی ماده ای مثل بتن تحت حریق، که شامل چندین فاز می باشد، را تسهیل می کند. مدل سازی و تحلیل رفتار قطعات بتنی حین حریق با استفاده از نرم افزار آباکوس شامل چندین مرحله می باشد. در قسمت اول مدل سازی،

<sup>2</sup>- Soils

<sup>1</sup>- Abaqus



که  $V$  حجم بخار آب در دمای  $\theta$  (درجه کلونین)،  $n$  مولاریته آب،  $R$  ثابت گازها و  $P$  فشار محیط می‌باشد. حجم اولیهی آب برابر ۱ واحد فرض شده و حفرات نیز به صورت کروی در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین:

$$r_{\theta} = \sqrt[3]{\frac{3V_{\theta}}{4\pi}} \quad (5)$$

که  $r_{\theta}$  و  $r_0$  به ترتیب شعاع اولیهی حفره‌ی کروی و شعاع در دمای  $\theta$ ، در نظر گرفته شده است. بنابراین، کرنش در حفره از رابطه‌ی (۶) به دست می‌آید.

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{r_{\theta}}{r_0} \quad (6)$$

در نهایت، با توجه به کرنش ( $\varepsilon_{\theta}$ )، میزان ضریب انبساط حرارتی بخار آب در دمای مشخص  $\theta$ ،  $\alpha_{\theta}$  به دست می‌آید:

$$\alpha_{\theta} = \frac{\varepsilon_{\theta}}{\Delta\theta} \quad (7)$$

که  $\Delta\theta$  تغییرات دما نسبت به دمای ۲۰ درجه‌ی سلسیوس (دمای اولیه‌ی محیط) می‌باشد. در محاسبه‌ی مدول بالک سیال نیز از رابطه‌ی (۸) استفاده شده است.

$$K_{\theta,fluid} = \frac{P_{\theta}}{\varepsilon_{\theta}} \quad (8)$$

در رابطه‌ی (۸)،  $K_{\theta,fluid}$  مدول بالک سیال در دمای مشخص  $\theta$  و  $P_{\theta}$  فشار در سیال می‌باشد که از رابطه‌ی (۹) به دست می‌آید.

$$P_{\theta} = \frac{nR\theta}{(1+\alpha_c\Delta\theta)} \quad (9)$$

در رابطه‌ی (۹)،  $\alpha_c$  ضریب انبساط حرارتی بتن و برابر  $10^{-5} / ^{\circ}C$  در نظر گرفته شده است. برخی از مشخصه‌های اولیه‌ی بتن حین افزایش دما دچار تغییرات خواهند شد که بارزترین آن‌ها مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و نفوذپذیری می‌باشد. مدول الاستیسیته‌ی اولیه‌ی بتن طبق رابطه‌ی (۱۰) محاسبه شده است (ACI، ۲۰۱۲):

$$E_{init} = 4700\sqrt{f_c} \quad (10)$$

که  $E_{init}$  مدول الاستیسیته‌ی اولیه‌ی بتن و  $f_c$  مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال) می‌باشند. روابط (۱۱) و (۱۲)

مشخص بوده که با توجه به رسانایی دمایی و گرمای مشخصه‌ی بتن، توزیع دما و انتقال انرژی حرارتی صورت می‌گیرد. در مدل انتقال حرارت منحنی‌های حریق ارائه شده در شکل ۳، به عنوان یک بارگذاری حرارتی دینامیک با ضریب فیلم بالا، در نرم‌افزار آباکوس به سطح پایینی قطعه اعمال می‌شود. نتایج مدل انتقال حرارت به عنوان ورودی مدل ثانویه خواهد بود که در این قسمت از امکانات مدل‌سازی "سویلز" در نرم‌افزار مذکور بهره گرفته شده است. در این قسمت از مدل‌سازی از برخی مشخصه‌ها مثل ضریب انبساط حرارتی قطعه‌ی بتنی و سیال (آب، بخار آب یا مخلوطی از هر دو)، نفوذپذیری، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، مدول بالک، میزان اشباع شدگی و تخلخل اولیه استفاده می‌شود. با توجه به اینکه نرم‌افزار آباکوس فقط قادر به مدل‌سازی یک فاز از سیال (آب یا بخار آب) می‌باشد، داده‌های مربوط به ضریب انبساط حرارتی و مدول بالک سیال به گونه‌ای اعمال شده است که تا دمای ۱۰۰ درجه‌ی سلسیوس، حالت مایع سیال (آب) در نظر گرفته شده و در دمای بیشتر از ۱۵۰ درجه‌ی سلسیوس، فرض شده که سیال حالت گاز (بخار آب) را داشته و در بین دماهای ۱۰۰ و ۱۵۰ درجه سلسیوس، سیال حالتی مخلوط از آب و بخار آب دارد و در این بازه‌ی دمایی، ویژگی‌های مذکور از سیال، به وسیله‌ی درونیابی خطی اطلاعات مربوط به دماهای ۱۰۰ و ۱۵۰ درجه سلسیوس، وارد شده است. ضریب انبساط حرارتی آب در حالت مایع در دماهای ۲۰ و ۱۰۰ درجه‌ی سلسیوس به ترتیب برابر  $(^{\circ}C)/0.000207$  و  $(^{\circ}C)/0.000752$  می‌باشند و در صورتی که در دمای ۱۵۰ درجه‌ی سلسیوس کل حجم آب موجود در حفرات تبدیل به بخار آب شود، برای دماهای ۱۵۰ درجه‌ی سلسیوس و بیشتر طبق قانون ایده‌آل گازها برای بخار آب خواهیم داشت:

$$V_{\theta} = \frac{nR\theta}{P} \quad (11)$$

(میندگیا و همکاران، ۲۰۱۳؛ خان و لینزدیل، ۲۰۰۲؛ خان و همکاران، ۲۰۰۰؛ زیمیل و همکاران، ۲۰۰۶؛ فلیسیتی و همکاران، ۲۰۱۷).

$$VR = 84.5f_c^{-0.23} \quad (14)$$

در رابطه‌ی (۱۴)،  $VR$  نسبت تخلخل در بتن می‌باشد. مدول بالک قسمت جامد بتن نیز از دیگر مواردی است که در مدل تحت تحلیل وارد شده و طبق رابطه‌ی (۱۵) به دست می‌آید:

$$K_{\theta, \text{solid}} = \frac{E_{C,T}}{3(1-2\vartheta_{C,T})} \quad (15)$$

در رابطه‌ی (۱۵)،  $K_{\theta, \text{solid}}$  مدول بالک قسمت جامد بتن می‌باشد. میزان اشباع‌شدگی حفرات نیز برابر ۷۰٪ در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، سه نوع بتن پرمقاومت به عنوان عناصر اصلی سازنده‌ی اجزای بتنی تونل‌ها در نظر گرفته شده است که شامل رده‌های ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ مگاپاسکال بوده و مقادیر نفوذپذیری و ضریب پواسون آن‌ها طبق تحقیقات خان و لینزدیل (۲۰۰۲) در نظر گرفته شده است. جدول ۱، مقادیر اولیه‌ی مشخصه‌های بتن که در مدل تحلیل اعمال شده است را به نمایش می‌گذارد.

تغییرات مدول الاستیسیته (شیائو و کونینگ، ۲۰۰۴) و ضریب پواسون نسبت به دما (بهر و همکاران، ۲۰۱۳) در قطعه‌ی بتنی پرمقاومت را به نمایش می‌گذارند:

$$E_{C,T} = \begin{cases} E_{init} & \text{for } T = 20 \sim 60 \text{ } ^\circ\text{C} \\ (0.83 - 0.0011T)E_{init} & \text{for } T > 60 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases}$$

(۱۱)

$$\vartheta_{C,T} = -0.002T + 0.2 \quad (12)$$

در روابط (۱۱) و (۱۲)،  $E_{C,T}$  و  $\vartheta_{C,T}$  به ترتیب مدول الاستیسیته و ضریب پواسون وابسته به دمای بتن ( $T$ ) می‌باشند. یکی از ویژگی‌های مؤثر بر رفتار بتن در برابر حریق، مقاومت کششی آن می‌باشد. در رابطه‌ی (۱۳)، ارتباط بین مقاومت کششی و فشاری انواع بتن پرمقاومت به نمایش گذاشته شده است (خان، ۲۰۰۲):

$$f_t = 0.14f_c^{0.85} \quad (13)$$

که  $f_t$  مقاومت کششی بتن می‌باشد. از دیگر مشخصه‌هایی است که در تحلیل رفتاری بتن در برابر حریق مؤثر است، نسبت تخلخل در بتن بوده که با توجه به رابطه‌ی (۱۴)، میزان تخلخل انواع بتن در مدل تحلیلی اعمال شده است

جدول ۱. مشخصه‌های اولیه‌ی بتن

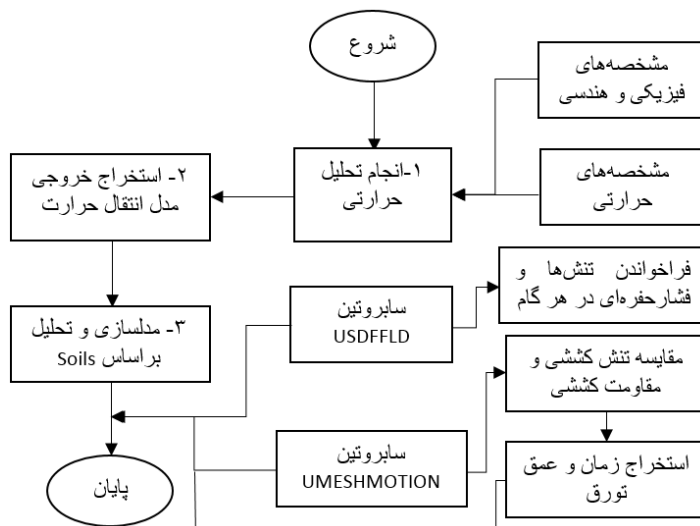
نوع / مشخصه	مدول الاستیسیته‌ی اولیه (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	نسبت پواسون	نسبت تخلخل (%)	مدول بالک جامد بتن (مگاپاسکال)	رسانایی دمایی ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
C80 -۱	42038	5.80	0.2	30.84	23354.44	4
C90 -۲	44588	6.41	0.2	30.18	24771.1	4
C100 -۳	47000	7.01	0.2	29.30	26111.1	4

شکل ۵ منجر به محاسبه‌ی زمان و عمق تورق در قطعه‌ی بتنی می‌گردد. با توجه به شکل ۵، ابتدا در مدل یک تحلیل حرارتی صورت گرفته و نتایج آن به عنوان ورودی مدل "سویلز" در نظر گرفته می‌شود. در این مدل (مدل "سویلز") هنگام تحلیل و محاسبه از طریق سابروتین

یکی از موضوعات مورد بررسی در این تحقیق، بحث تورق حین حریق در قطعه‌ی بتنی می‌باشد، که این مسئله از طریق اضافه کردن سابروتین‌هایی به نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته است. دو نوع سابروتین در مدل تحلیلی اعمال شده است که طی الگوریتم ارائه شده در

می‌شود و در صورت تجاوز تنش کششی از حد مقاومت کششی بتن، تورق در بتن رخ داده و عمق و زمان تورق در قطعه‌ی بتنی محاسبه و در یک پوشه‌ی متنی ذخیره می‌شود.

USDFFLD نتایج مرتبط با تنش‌ها و فشارحفره‌ای در هر مرحله "سویلز" فراخوانده می‌شود و یک پوشه‌ی متنی در هر مرحله از آن ذخیره و به‌روز می‌شود. در ادامه، از طریق سابروتین یومش‌موشن<sup>۱</sup> در هر مرحله، به مقایسه‌ی تنش کششی و مقاومت کششی هر جزء بتن پرداخته



شکل ۵. الگوریتم مدل‌سازی

نمونه‌ی B40 در مدل‌های آزمایشگاهی و پیشنهادی، را به نمایش می‌گذارد.

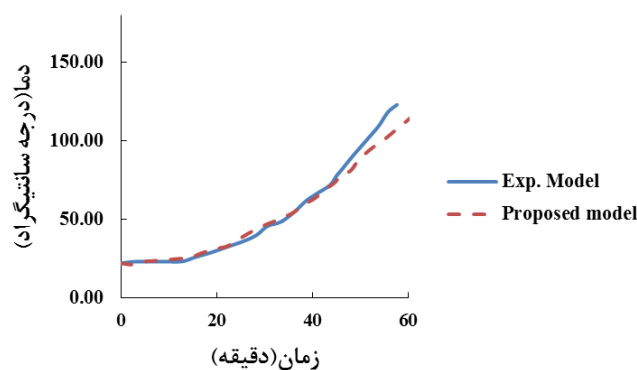
شکل ۷، نحوه‌ی توسعه‌ی فشارحفره‌ای در عمق ۶ سانتی‌متری از قطعه‌ی بتنی B40، در دو حالت بدون فیبر پلی‌پروپیلن و با ۲ کیلوگرم فیبر پلی‌پروپیلن در هر متر مکعب مخلوط بتنی، تحت افزایش دمای  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  را به نمایش می‌گذارد. با در نظر گرفتن نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۶ و ۷، مدل پیشنهادی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی (فلیسیتی و همکاران، ۲۰۱۷)، (با توجه به شرایط نمونه‌ی آزمایشگاهی در مقابل شرایط مدل‌سازی عددی و تحلیلی و عوامل گوناگونی که بر شیوه‌ی اعمال حرارت، شرایط مختلف سیال در حفرات، کیفیت، همگنی یا عدم همگنی و نحوه‌ی مراقبت از بتن و نحوه‌ی توزیع فیبر پلی‌پروپیلن بر نتایج آزمایشگاهی مؤثر می‌باشند)، از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد.

## ۶. بررسی مدل پیشنهادی

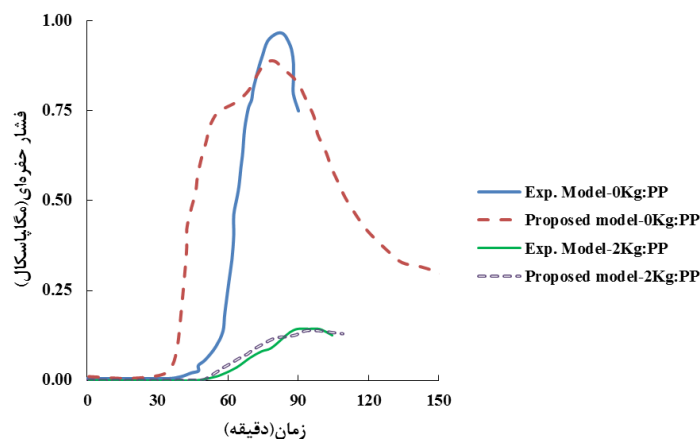
در این قسمت از تحقیق، جهت صحت‌سنجی مدل پیشنهادی، به مقایسه نتایج این مدل با مدل آزمایشگاهی پرداخته می‌شود. نمونه‌ی آزمایشگاهی، یک دال با ضخامت ۱۲ سانتی‌متر بوده که با نام B40 معرفی می‌شود (میندگیا و همکاران، ۲۰۱۳). نمونه‌ی B40 دارای نفوذپذیری اولیه‌ی  $5.5 \times 10^{-16} \text{m}^2$  و رطوبت اولیه‌ی  $2/8$  درصد می‌باشد. مدول الاستیسیته نمونه‌ی مذکور برابر 34 GPa، ضریب پواسون برابر  $0/2$  و رسانایی دمایی برابر  $1 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  می‌باشد. نمونه‌ی مذکور از سطح زیرین خود در دو حالت بدون فیبر پلی‌پروپیلن و با وجود این فیبر، تحت افزایش حرارت  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  قرار گرفته است. شکل ۶ نحوه‌ی توزیع دمای ناشی از حرارت وارده در عمق ۶ سانتی‌متری از سطح زیرین (سطح تحت حرارت)

<sup>۱</sup>- UMESHMOTION

مدل سازی عددی اثر فیبر پلی پروپیلن بر رفتار قطعات بتنی تونل ها در برابر حریق

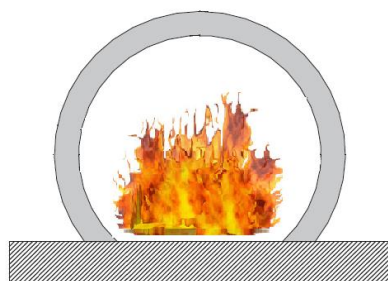


شکل ۶. نحوه توزیع دما در عمق ۶ سانتی متری نمونه ی B40 در مدل های تحلیلی و پیشنهادی



شکل ۷. نحوه توسعه ی فشار حفره ای در مدل های تحلیلی و پیشنهادی

۹۰ و ۱۰۰ مگاپاسکال (حد بالای بتن پرمقاومت) بوده و به علت نفوذپذیری کمتر نسبت به رده های پایین تر بتن پرمقاومت، از ضعف بیشتری در برابر حریق برخوردار می باشند.



شکل ۸. قطعه ی بتنی تونل تحت حریق

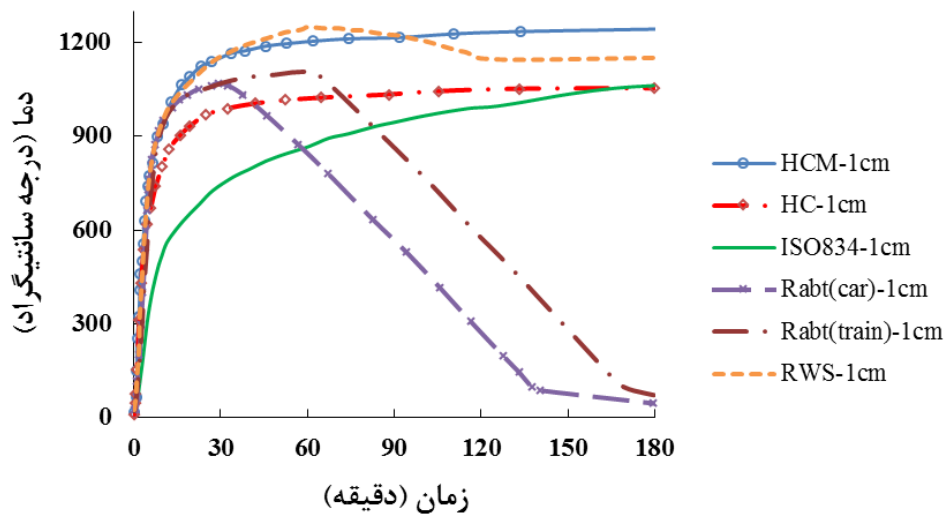
همانطور که پیشتر اشاره شد، یکی از مشخصه های مهم بتن که تغییرات دما بر آن اثرگذار است، نفوذپذیری می باشد. در این تحقیق، از چند نمونه ی بتنی پرمقاومت

## ۷. نتایج

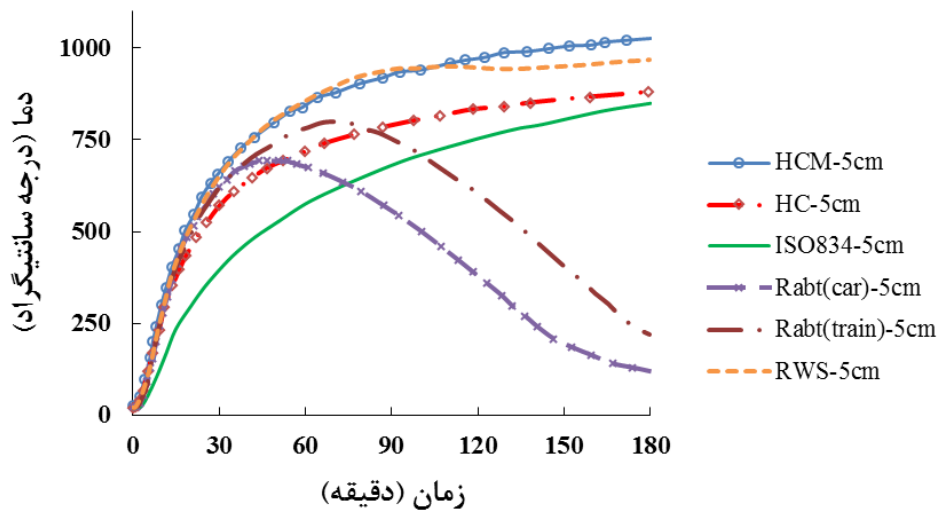
در این تحقیق، بناست به رفتار قطعات بتنی تونل ها در برابر حریق پرداخته شود و راهکار مناسبی جهت ایمنی بهتر این قطعات ارائه گردد. فرض شده که قطعه ی بتنی ضخامت ۳۰ سانتی متر داشته و مطابق شکل ۸، تحت حرارت ناشی از انواع حریق (منحنی های حریق ارائه شده در شکل ۳) قرار گرفته است. با توجه به اینکه بتن ماده ای با حداکثر رسانایی دمایی  $4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  می باشد، برای اطمینان بیشتر از نتایج تحقیق، رسانایی بتن برابر این مقدار در نظر گرفته شده است (خان، ۲۰۰۲). علاوه بر این، در بررسی رفتار قطعات بتنی تونل ها در برابر حریق، برای کاربردی بودن نتایج تحقیق، از چندین رده بتن پرمقاومت استفاده شده است که شامل رده های ۸۰

یکی از عوامل مهم در رفتار در برابر حریق اجزای بتنی تونل‌ها، الگوی حرارت و افزایش دمای اعمالی به این اجزا می‌باشد. بنابراین، در جهت بررسی دقیق و ایمن‌تر این موضوع، همهی الگوهای منحنی حریق ارائه شده در شکل ۳ مبنای این تحقیق قرار می‌گیرد. شکل‌های ۹ و ۱۰ نحوه توزیع دما در قطعه‌ی بتنی پرمقاومت مد نظر، تحت انواع منحنی‌های حریق ارائه شده در شکل ۳، در اعماق ۱ و ۵ سانتی‌متری از سطح تحت حرارت، را به نمایش می‌گذارند.

بهره گرفته شده، که در چندین حالت مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت اول فرض شده که مخلوط بتنی بدون فیبر پلی‌پروپیلن بوده است. به‌جز حالت مذکور، در حالات دیگر فرض شده که مقدار ۰/۹، ۱/۷۵ و ۳ کیلوگرم فیبر پلی‌پروپیلن در هر متر مکعب، به‌صورت یکنواخت، به مخلوط بتنی اضافه شده است. ضمن اینکه اثر وجود این فیبرها در نفوذپذیری بتن، مطابق شکل ۴ اعمال شده است.



شکل ۹. تغییرات دما نسبت به زمان در عمق ۱ سانتی‌متری از سطح تحت حرارت بتن

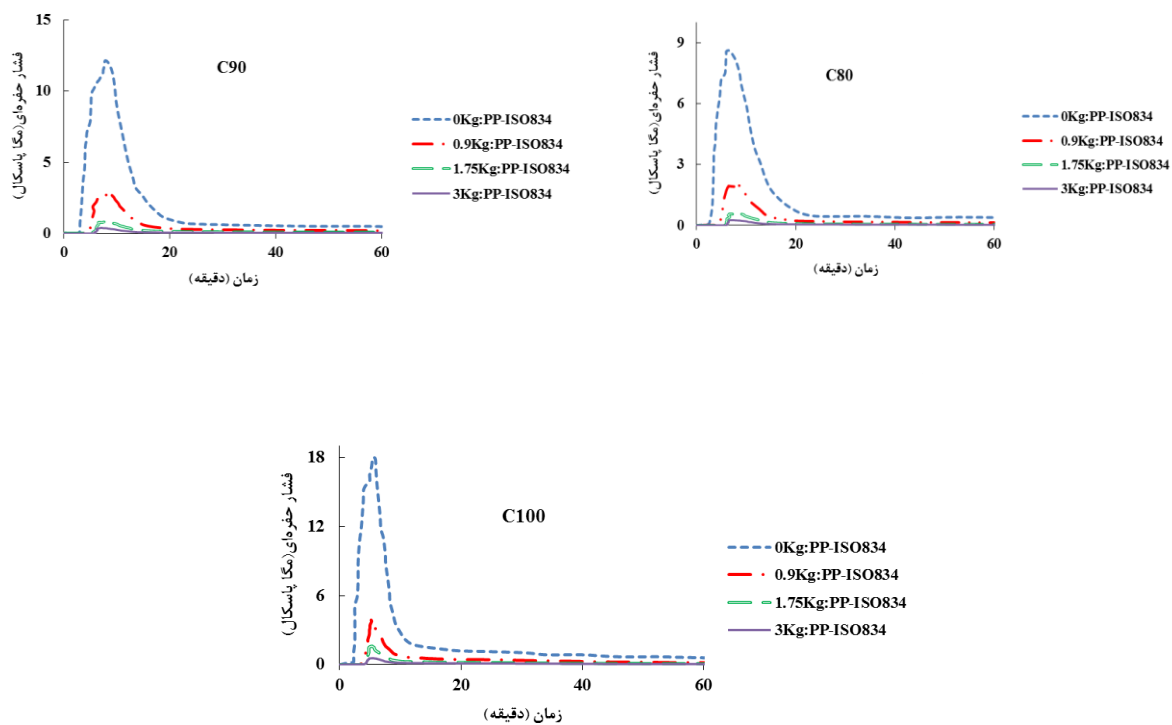


شکل ۱۰. تغییرات دما نسبت به زمان در عمق ۵ سانتی‌متری از سطح تحت حرارت بتن

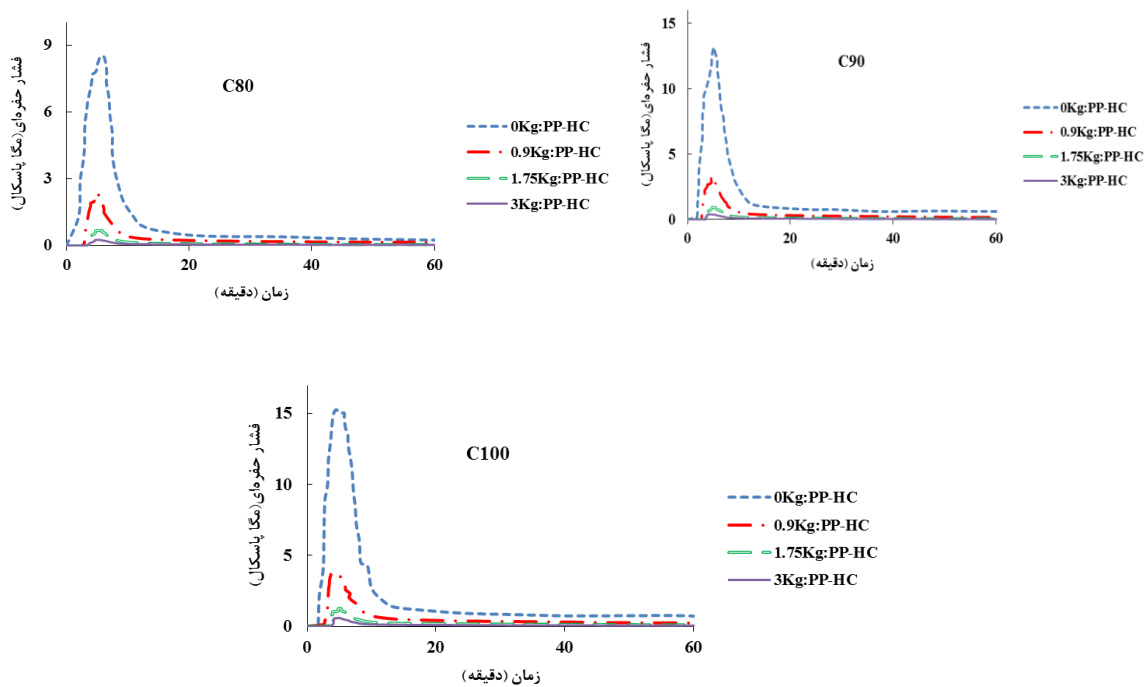
بیشتر در حریق در ساختمان ها مد نظر می باشد) نرخ افزایش حرارت کمتری در مقطع بتنی ایجاد می کند. در تمامی منحنی های حریق مد نظر، در چند دقیقه اولیهی حریق، دما در اعماق ۱ و ۵ سانتی متری، به فراتر از ۱۰۰ درجهی سلسیوس رسیده است. بدین معنی که در این زمان، آب موجود در حفرات در این اعماق، مستعد تبدیل شدن به بخار آب بوده و به تدریج جریان بخار آب در لایه های درونی بتن را شکل خواهند داد. همانگونه که پیشتر اشاره شد، فشارحفره ای ایجاد شده ناشی از اعمال حرارت در قطعات بتنی تونل ها، عامل مهمی در کاهش مقاومت این قطعات بوده و به طور کلی افزایش فشار حفره ای در قطعات بتنی منجر به افزایش تنش های کششی و گسترش ترک هایی خواهد شد که این مسئله در نهایت می تواند منجر به پوسته پوسته شدن بتن و کاهش ضخامت مؤثر قطعهی بتنی گردد. شکل های ۱۱ تا ۱۶ نحوه ی توزیع فشارحفره ای در یک ساعت اولیه از حریق، در عمق ۵ سانتی متری از قطعات بتنی تونل ها که در آن از بتن های پرمقاومت رده ی ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ مگاپاسکال استفاده شده است، تحت انواع حریق های ارائه شده در شکل ۳ و با در نظر گرفتن مقادیر صفر، ۰/۹، ۱/۷۵ و ۳ کیلوگرم فیبر پلی پروپیلن در هر متر مکعب مخلوط بتنی، به نمایش می گذارند.

شکل ۹ گویای این مطلب است که با نفوذ حرارت ناشی از حریق های هیدروکربنی اصلاح شده و RWS، پس از سپری شدن حداقل یک ساعت از حریق، دمای بتن در عمق یک سانتی متری به فراتر از ۱۲۰۰ درجهی سلسیوس می رسد. این دما، دمایی است که آن قسمت از بتن را می تواند در معرض ذوب شدن قرار دهد، در صورتی که در دیگر انواع حریق، دمای بتن در این عمق به حد دمای ذوب بتن نرسیده است.

شکل ۱۰ بیانگر این مسئله است که با نفوذ حریق از عمق ۱ سانتی متری به عمق ۵ سانتی متری، در حداکثر دمای ایجاد شده در این عمق، کاهش بیش از ۲۰۰ درجهی سلسیوس رخ داده است. با این حال، قطعهی بتنی در این عمق، تحت انواع حریق، دمایی فراتر از ۶۰۰ درجهی سلسیوس را تجربه خواهد کرد و نیز شکل ۱۰ گویای این مطلب است که در منحنی های حریق رابت (اتومبیل یا قطار) در بتن، در رخدادن حداکثر دمای حریق، تأخیر حدود ۱۵ دقیقه ای صورت گرفته است و در این منحنی های حریق (رابت)، پس از رسیدن به دمای حداکثر در مقطع بتنی، روند کاهشی در دما رخ داده است. با توجه به شکل های ۹ و ۱۰، سرعت و میزان نفوذ دمایی در حریق های هیدروکربنی اصلاح شده و RWS، در قطعات بتنی تونل ها، بیشتر از دیگر انواع حریق بوده و این در حالی است که اعمال منحنی حریق استاندارد (که

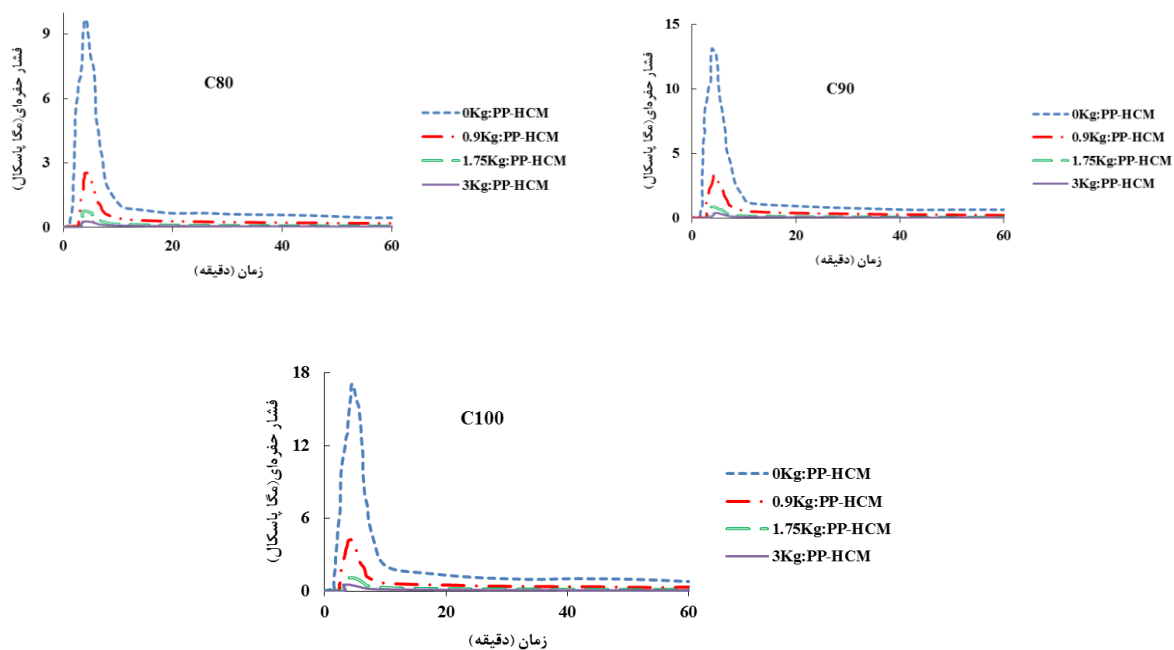


شکل ۱۱. توزیع فشارحفره‌ای در عمق ۵ سانتی‌متری از سطح تحت حریق استاندارد در انواع قطعات بتنی پرمقاومت

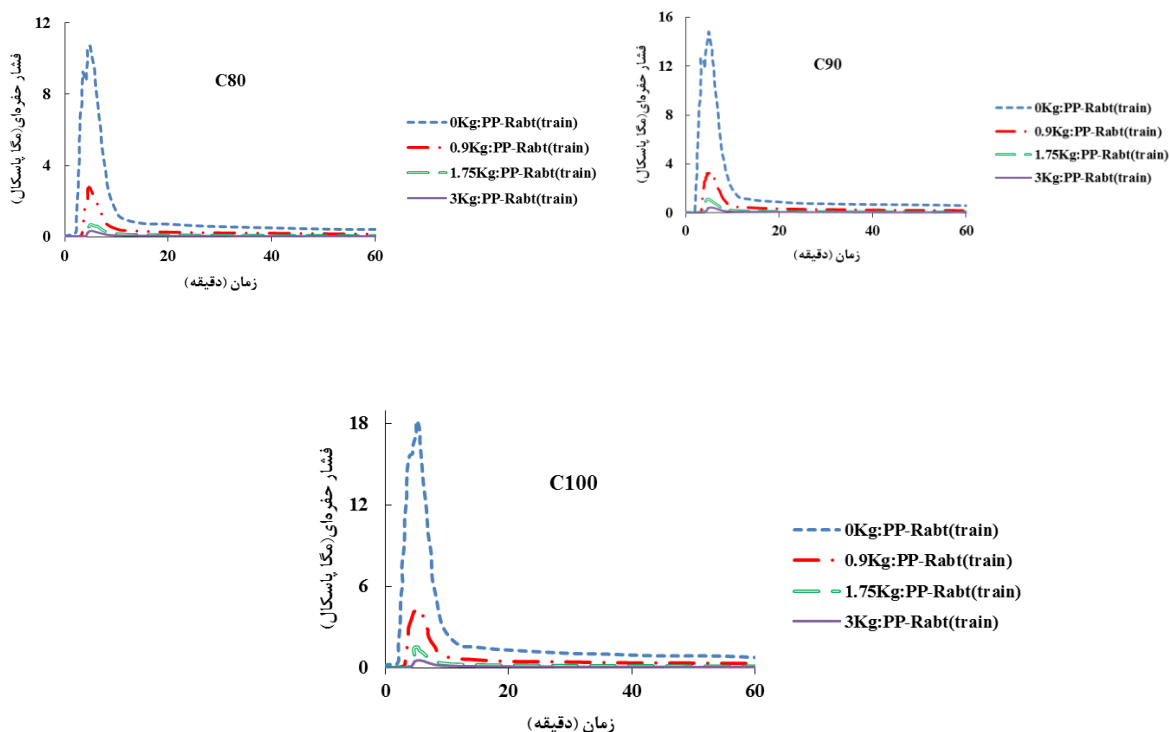


شکل ۱۲. توزیع فشارحفره‌ای در عمق ۵ سانتی‌متری از سطح تحت حریق هیدروکربنی در انواع قطعات بتنی پرمقاومت

مدل سازی عددی اثر فیبر پلی پروپیلن بر رفتار قطعات بتنی تونل ها در برابر حریق

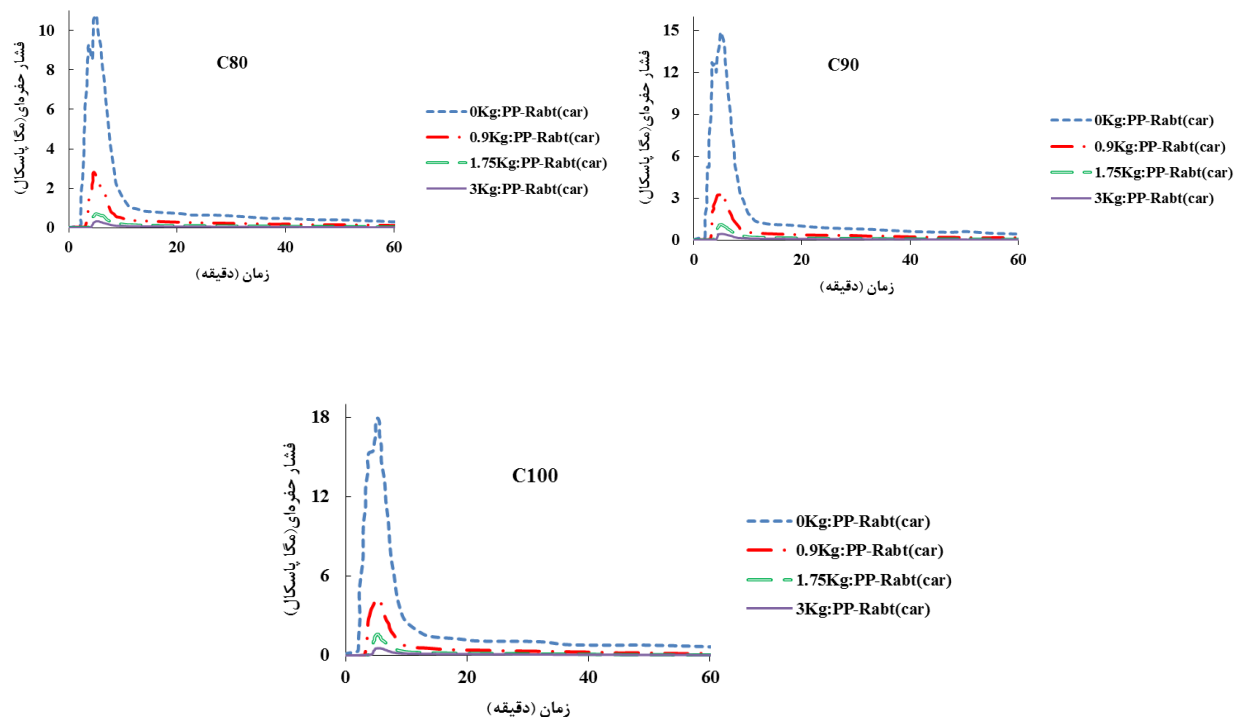


شکل ۱۳. توزیع فشارحفره‌ای در عمق ۵ سانتی متری از سطح تحت حریق هیدروکربنی اصلاح شده در انواع قطعات بتنی پرمقاومت

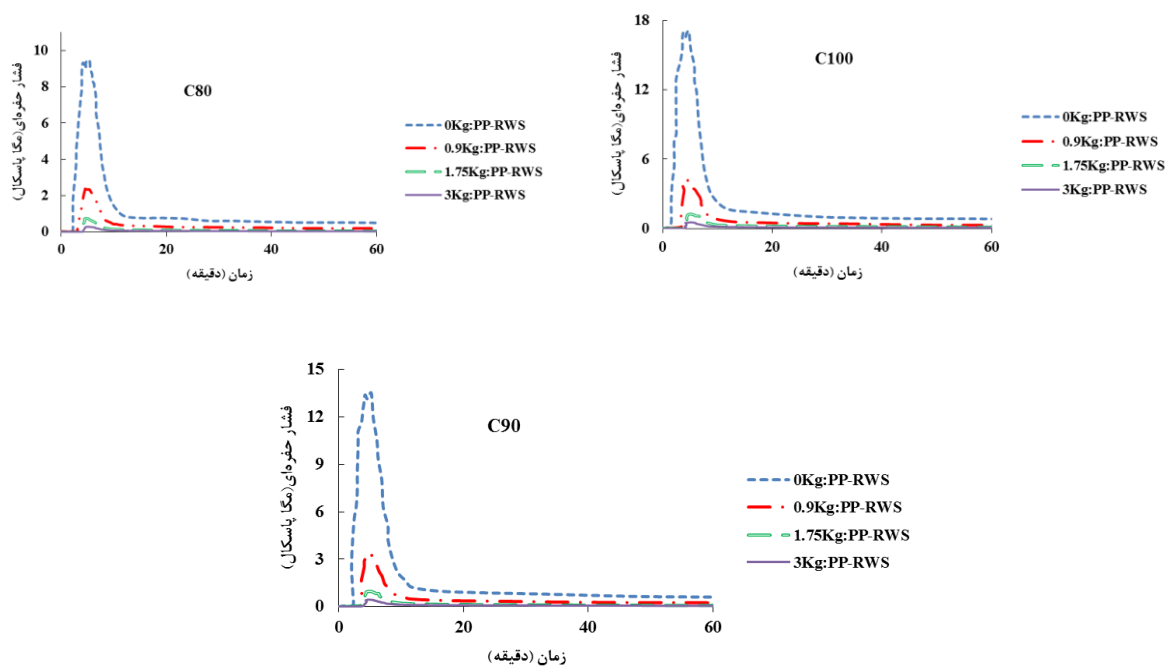


شکل ۱۴. توزیع فشارحفره‌ای در عمق ۵ سانتی متری از سطح تحت حریق رابت (قطار) در انواع قطعات بتنی پرمقاومت





شکل ۱۵. توزیع فشار حفره‌ای در عمق ۵ سانتی متری از سطح تحت حریق رابت (اتومبیل) در انواع قطعات بتنی پرمقاومت



شکل ۱۶. توزیع فشار حفره‌ای در عمق ۵ سانتی متری از سطح تحت حریق RWS در انواع قطعات بتنی پرمقاومت

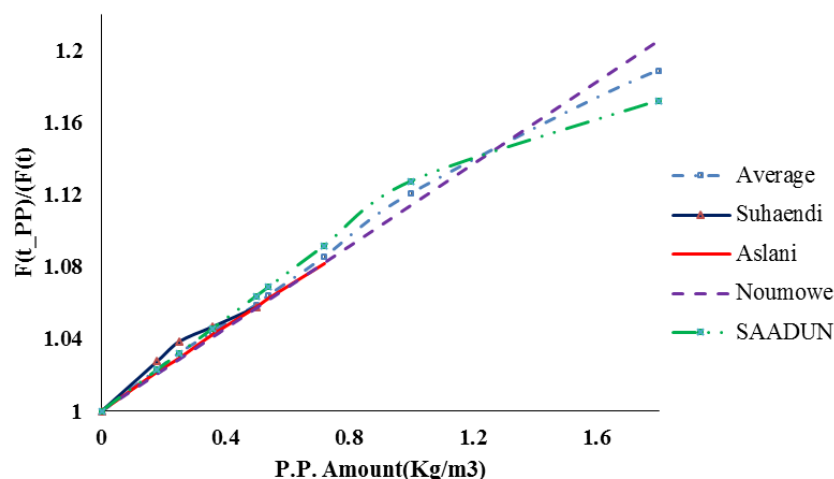
با توجه به شکل های ۱۱ تا ۱۶، در قطعات بتنی تحت انواع حریق مورد نظر، حداکثر فشار حفره ای در ۱۰ دقیقه ی ابتدایی حریق رخ داده است. با این حال، فاصله ی زمانی رسیدن به حداکثر فشار حفره ای، در عمق ۵ سانتی متری از سطح تحت حرارت قطعه ی بتنی، در حریق استاندارد بیشتر بوده و در این نوع حریق، شکل گیری لایه های اشباع، با تأخیر بیشتری نسبت به دیگر انواع حریق صورت گرفته است. روند رشد حداکثر فشار حفره ای در قطعات بتنی، با افزایش مقاومت فشاری، در تمامی منحنی های حریق اعمالی، صعودی بوده است. با این حال، با افزایش ۲۰ مگاپاسکالی در مقاومت فشاری بتن و تغییر بتن در قطعات تونل ها از رده ی C80 به C100، بیشترین تغییر در حداکثر فشار حفره ای ناشی از حریق استاندارد رخ داده و باعث بیش از دو برابر شدن حداکثر فشار حفره ای گردیده است. با این حال، سرعت رشد فشار حفره ای در قطعات بتنی بدون فیبر پلی پروپیلن، تحت این نوع از حریق، کمتر از دیگر انواع حریق بوده است. این مسئله گویای این مطلب است که سرعت تبدیل آب به بخار آب و جریان بخار آب در لایه های داخلی بتن، در این نوع حریق کمتر می باشد. با توجه به شکل های ۱۱ تا ۱۶ مشخص می شود که اضافه شدن فیبر پلی پروپیلن به مخلوط بتنی، منجر به کاهش شیب رشد فشار حفره ای در مقطع شده و با افزایش میزان این افزودنی در قطعه ی بتنی، این شیب بیشتر کاهش پیدا می کند. این رخداد بدین جهت است که در مدل تحلیلی، اثر ذوب شدن فیبر پلی پروپیلن حین حریق و افزایش درجه های نفوذ پذیری به گونه ای اعمال شده که منجر به کاهش روند ایجاد دیواره های آبی در لایه های داخلی قطعه ی بتنی، مسدود کردن مسیر جریان بخار آب و تشکیل فشار اشباع بخار آب شده است. در چندین منحنی فشار حفره ای مذکور و از جمله منحنی های شکل ۱۶، چندین نقطه ی حداکثر فشار متوالی دیده می شود. علت این پدیده این است که پس از شکل گیری اولین

لایه ی اشباع در عمق ۵ سانتی متری از مقطع بتنی و تشکیل اولین فشار حفره ای حداکثر در این نقطه، در یک بازه ی زمانی کوتاه، قسمتی از بخار آب از این لایه ی اشباع به سمت لایه های داخلی بتن نفوذ کرده و این لایه حالت نیمه اشباع به خود می گیرد و بالتبع آن از فشار حفره ای در این عمق از مقطع کاسته می شود. اما در ادامه سرعت نفوذ بخار آب به این عمق مشخص، از سرعت خروج بخار آب از آن، بیشتر شده و به تدریج و برای بار دیگر، در این عمق از مقطع، لایه ی اشباع شکل گرفته و فشار حفره ای به حداکثر میزان اشباع خود می رسد. شکل های ۱۱ تا ۱۶ گویای این مهم است که اضافه کردن حداقل ۰/۹ کیلوگرم فیبر پلی پروپیلن در هر متر مکعب مخلوط بتنی، اثر قابل ملاحظه ای در کاهش حداکثر فشار حفره ای ایجاد شده در قطعه ی بتنی داشته، به طوری که حداقل کاهش ۷۰ درصدی در حداکثر فشار حفره ای در انواع حریق های مبنای این تحقیق رخ داده و میزان حداکثر فشار حفره ای را به کمتر از ۴/۵ مگاپاسکال در عمق ۵ سانتی متری از سطح تحت حریق، رسانده است. علاوه بر این، با اضافه کردن بیش از ۰/۹ کیلوگرم فیبر پلی پروپیلن در هر متر مکعب بتن، می توان انتظار کاهش بیش از ۹۰ درصدی در حداکثر فشار حفره ای داشت. به طوری که در قطعه ی بتنی دارای ۱/۷۵ و ۳ کیلوگرم فیبر پلی پروپیلن، حداکثر فشار حفره ای به ترتیب به کمتر از ۱ و ۲ مگاپاسکال تقلیل می یابد.

به طور کلی، اضافه کردن فیبر پلی پروپیلن منجر به افزایش مقاومت کششی بتن می گردد و این عامل در کنار اثراتی مثل افزایش نفوذ پذیری حین افزایش حرارت، منجر به بهبود عملکرد قطعات بتنی پرمقاومت در برابر حریق می گردد. شکل ۱۷ اثر اضافه کردن فیبر پلی پروپیلن بر افزایش مقاومت کششی در چندین مدل آزمایشگاهی از جمله مدل سوهانندی (سوهانندی و هوریگوچی، ۲۰۰۶)، اصلانی (اصلانی و ثمالی، ۲۰۱۴)، نومو (نومو، ۲۰۰۵) و سعدون (سعدون و همکاران، ۲۰۱۶) به نمایش

نتایج مدل‌های مذکور به عنوان اثر فیبر پلی‌پروپیلن بر مقاومت کششی قطعات بتنی بهره گرفته شده است.

می‌گذارد. در بررسی اثر حریق بر تورق بتن، علاوه بر تأثیر دادن تغییرات نفوذپذیری حین حریق، از میانگین



شکل ۱۷. نسبت مقاومت کششی قطعات بتنی دارای فیبر پلی‌پروپیلن به مقاومت کششی قطعات بدون فیبر پلی‌پروپیلن با توجه به میزان این فیبر

این قطعات خواهد شد. جدول ۲، زمان و عمق تورق اولیه‌ی قطعه‌ی بتنی پرمقاومت مورد نظر در این تحقیق را با اثر افزودنی فیبر پلی‌پروپیلن و بدون این افزودنی، تحت انواع حریق مبنای این تحقیق، به نمایش می‌گذارد.

یکی از مسائلی که در هنگام آتش‌سوزی در تونل‌ها ممکن است قطعات بتنی را تحت تأثیر خود قرار دهد، کاهش ضخامت این قطعات، در اثر رخداد تورق (پوسته پوسته شدن) در رویه‌ی تحت حرارت، می‌باشد که این رخداد در نهایت منجر به کاهش ظرفیت باربری

جدول ۲. زمان و عمق تورق اولیه‌ی قطعه‌ی بتنی تحت انواع حریق

نوع بتن	منحنی حریق اعمالی	بتن بدون فیبر پلی‌پروپیلن		بتن با حداقل ۰/۹ کیلوگرم فیبر پلی‌پروپیلن در هر متر مکعب	
		عمق تورق (میلی-متر)	زمان تورق (ثانیه)	عمق تورق (میلی-متر)	زمان تورق (ثانیه)
C80	HC	5.08	22.5	5.08	22.5
	HCM	3.96	15	3.96	15
	ISO834	11.25	111.09	11.25	111.09
	RABT-Car or Train	6.24	51.87	6.24	51.87
	RWS	5.1	37.93	5.1	37.93
C90	HC	6.24	22.5	6.24	22.5
	HCM	6.25	30	6.25	30
	ISO834	18.45	170	18.45	170
	RABT-Car or Train	8.7	51.9	8.7	51.9
	RWS	8.67	33.75	8.67	33.75
C100	HC	1.81	13.75	1.81	13.75
	HCM	3.96	12.5	3.96	12.5
	ISO834	16.9	135	16.9	135
	RABT-Car or Train	13.998	80	13.998	80
	RWS	6.24	39.375	6.24	39.375

با توجه به جدول ۲، اضافه کردن حداقل ۰/۹ کیلوگرم فیبر پلی پروپیلن در هر متر مکعب مخلوط بتنی، به صورت یکنواخت، می تواند از رخداد تورق در قطعات بتنی جلوگیری کرده و ایمنی این قطعات در برابر حریق را افزایش دهد. علاوه بر این، در هر دو نوع حریق رابت (اتومبیل یا قطار)، به علت اینکه در ۳۰ دقیقه ابتدای حریق، روند افزایش دما در هر دو منحنی یکسان می باشد نتایج مربوط به تورق اولیه به صورت مشابه بوده است. ذکر این نکته ضروری است که با توجه به این مسئله که در منحنی حریق استاندارد، نرخ افزایش دما از سرعت کمتری برخوردار بوده است به تبع آن اشباع شدگی لایه ها از بخار آب و افزایش فشارحفره ای در عمق بیشتری از قطعه بتنی رخ داده و این عامل منجر به افزایش زمان و عمق تورق اولیه در قطعات بتنی متأثر از این نوع حریق، شده است.

## ۸. جمع بندی و نتیجه گیری

یکی از سامانه های با اهمیت حمل و نقل، سامانه ی قطار شهری است که نیازمند این است تا در برابر عوامل و تهدیدات احتمالی مورد ارزیابی قرار گیرد. یکی از عواملی که می تواند این سامانه ی حمل و نقلی را تحت تأثیر خود قرار داده و موجب ضعف در بهره برداری از آن گردد، آتش سوزی است. هنگام آتش سوزی در فضای قطار شهری، عناصر سازه ای و غیرسازه ای به تدریج عملکرد مناسب خود را از دست می دهند که این امر در نهایت منجر به عدم سرویس دهی مناسب در این سامانه خواهد شد. یکی از عناصر سازه ای که در سامانه ی قطار شهری می تواند تحت تأثیر حریق و حرارت ناشی از آن قرار گیرد، قطعات بتنی تونل هاست. این قطعات معمولاً از مخلوط های بتنی با رده ی مقاومتی بالا و نفوذپذیری کمتر ساخته می شوند که همین امر موجب رفتار نامناسب تر این قطعات در برابر حریق خواهد شد. در این

تحقیق، با ارائه ی یک مدل تحلیلی مبتنی بر نرم افزار آباکوس، رفتار قطعات بتنی تونل ها در برابر انواع آتش سوزی ها مورد بررسی قرار گرفته است. مدل ارائه شده قادر به بررسی دینامیک اثر حریق بر ایجاد و توسعه ی فشارحفره ای و تنش های کششی داخلی قطعات بتنی بوده و با استفاده از سابروتین هایی که به نرم افزار آباکوس الحاق می گردد، توانایی محاسبه ی میزان و زمان تورق در قطعات بتنی را دارد. در این تحقیق، جهت بررسی جامع رفتار در برابر حریق قطعات بتنی تونل ها از ۶ نوع منحنی حریق استفاده شده است که شامل حریق های استاندارد، هیدروکربنی، هیدروکربنی اصلاح شده، رابت (اتومبیل و یا قطار) و RWS می باشند. نتایج این تحقیق بیانگر این موضوع است که در ۱۰ دقیقه ابتدایی هر یک از آتش سوزی های مد نظر، تشکیل لایه های اشباع شدگی تا عمق ۵ سانتی متری مقطع رخ داده است و به تبع آن حداکثر فشار حفره ای در این بازه ی زمانی صورت گرفته است. در این تحقیق، از رده های مقاومتی ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ مگاپاسکالی بتن در ساخت قطعات بتنی تونل ها بهره گرفته شده است که به علت نفوذپذیری اندکی که نسبت به رده های پایین تر بتن داشته اند، عملکرد نامناسب تری در برابر حریق دارند. نتایج این تحقیق گویای این مسئله هستند که با افزایش ۲۰ مگاپاسکالی رده ی بتن مصرفی، میزان فشار حفره ای ناشی از حریق در مقطع بتنی، به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. به طوری که در حریق استاندارد، با اینکه سرعت افزایش فشار حفره ای در آن نسبت به دیگر انواع حریق کمتر می باشد، می توان رشد بیش از ۱۰۰ درصدی در حداکثر فشار حفره ای، با تغییر نوع بتن مصرفی، از رده ی مقاومتی ۸۰ به ۱۰۰ مگاپاسکالی، مشاهده کرد. با توجه به اینکه میزان تنش کششی در بتن ارتباط نزدیکی با میزان فشار حفره ای دارد، بنابراین، نیاز است تمهیدات لازم جهت جلوگیری از افزایش تنش کششی در بتن

پلی پروپیلن در هر متر مکعب از مخلوط بتنی، منجر به کاهش بیش از ۹۰ درصدی حداکثر فشار حفره‌ای و به تبع آن تنش کششی در مقطع بتنی می‌گردد. همچنین، مشخص گردید که اضافه شدن حداقل ۰/۹ کیلوگرم فیبر پلی پروپیلن، به صورت یکنواخت، در هر متر مکعب مخلوط بتنی، با ضریب اطمینان مناسبی، مانع بروز تورق در این قطعات بتنی خواهد شد و ایمنی این قطعات را تضمین می‌کند. بنابراین، با اضافه کردن کمتر از ۰/۵۰٪ فیبر پلی پروپیلن از میزان پیشنهادی آئین‌نامه‌ها، در مخلوط بتنی از قطعات تونل‌ها (در صورت اختلاط یکنواخت و مناسب)، می‌توان باعث افزایش ایمنی این قطعات در برابر حریق شده و علاوه بر این باعث کاهش هزینه‌ها شد.

صورت گیرد. یکی از راهکارهای بهبود رفتار قطعات بتنی در برابر حریق، اضافه کردن فیبر پلی پروپیلن در مخلوط بتنی است که بسیاری از آئین‌نامه‌ها اضافه کردن حداقل ۲ کیلوگرم فیبر پلی پروپیلن در هر متر مکعب را پیشنهاد کرده‌اند که با توجه به قیمت هر کیلوگرم فیبر پلی پروپیلن، منجر به افزایش قیمت تمام‌شده‌ی بتن خواهد شد و همین امر در بسیاری مواقع مانع از استفاده از این فیبرها در مخلوط بتنی شده است. در این تحقیق، با بررسی قطعات بتنی پرمقاومت و استفاده از ترکیب‌های بتنی دارای ۰/۹، ۱/۷۵ و ۳ کیلوگرم فیبر پلی پروپیلن در هر متر مکعب، به کاهش قابل ملاحظه‌ی حداکثر فشار حفره‌ای در بتن‌های دارای این نوع افزودنی‌ها اشاره شده است. به طوری که اضافه کردن ۳ کیلوگرم فیبر

## ۱-۸. مراجع

-۲

- Abaeian, R., Pesaran Behbahani, H. and Jalali Moslem, S. 2018. "Effects of high temperatures on mechanical behavior of high strength concrete reinforced with high performance synthetic macro polypropylene (HPP) fibres". *Constr. Build. Mater.*, 165: 631-638.
- Abaqus. 2014. "Abaqus analysis theory manual version 6.14". United Kingdom.
- ACI 318. 2012. "Building code requirements for reinforced concrete. American Concrete Institute.
- Ahmadipourinaeim, S. H. and Saberi, Y. 2014. "Study on the effect of polypropylene fibers on strength and heat resistance of concrete". *World Appl. Sci. J.*, 31(5): 767-770.
- Aslani, F. and Samali, B. 2014. "High strength polypropylene fibre reinforcement concrete at high temperature". *Fire Technol.*, 50(5): 1229-1247.
- Bahr, O., Schaumann, P., Bollen, B. and Bracke, J. 2013. "Young's modulus and Poisson's ratio of concrete at high temperatures: Experimental investigations". *Mater. Design*, 45: 421-429.
- Caner, A. and Boncu, A. . 2009. "Structural fire safety of circular concrete railroad tunnel linings". *J. Struct. Eng.*, 135: 1081-1092.
- Chung, J. H. and Consolazio, G. R. 2005. "Numerical modeling of transport phenomena in reinforced concrete exposed to elevated temperatures". *Cement Concrete Res.*, 35: 597-608.
- Daian, J. F. and Gallé, C. 2000. "Gas permeability of unsaturated cement-based materials: Application of a multi-scale network model". *Magaz. Concrete Res.*, 52, 251-263.
- EFNARC. 2006. "Specification and guidelines for testing of passive fire protection for concrete tunnels linings". European Federation of National Associations Representing Concrete, pp. 1-27.
- Felicetti, R., Lo Monte, F. and Pimienta, P. 2017. "A new test method to study the influence of pore pressure on fracture behaviour of concrete during heating". *Cement Concrete Res.*, 94: 13-23.
- Haack, A. 1998. "Fire protection in traffic tunnels: General aspects and results of the EUREKA project". *Tunn. Underg. Sp. Tech.*, 13(4): 377-381.
- Hager, I. 2013. "Behaviour of cement concrete at high temperature". *Bull. Pol. Acad. Sci. (Tech. Sci.)*, 61(1): 1-10.
- Harmathy, T. Z. 1993. "Fire safety design and concrete". Concrete Design and Construction Series, Longman Scientific and Technical.
- Ibrahim, R. Kh., Hamid, R. and Taha, R. A. 2012. "Fire resistance of high-volume fly ash mortars with nanosilica addition". *Constr. Build. Mater.*, 36: 779-786.
- Ingason, H., Li, Y. Z. and Lönnemark, A. 2015. "Tunnel fire dynamics". Springer, N. Y.
- Kalifa, P., Menneteau, F. and Quenard, D. 2000. "Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures".

- Cement Concrete Res., 30: 1915-1927.
- Kalifa, P., Che'ne', G. and Galle', C. 2001. "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure". Cement Concrete Res., 31: 1487-1499.
- Kaundinya, I. 2007. "Protection of road tunnel linings in cases of fire". Proceedings of the FEHRL/FERSI/ECTRI Young Researchers Seminar, Brno, Czech Republic, pp. 1-9.
- Khan, M. I. 2002. "Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models". Build. Environ., 37: 607-614.
- Khan, M. I. and Lynsdale, C. J. 2002. "Strength, permeability, and carbonation of high-performance concrete". Cement Concrete Res., 32: 123-131.
- Khan, M. I., Lynsdale, C. J. and Waldron, P. 2000. "Porosity and strength of PFA/SF/OPC ternary blended paste". Cement Concrete Res., 30(8): 1225-1229.
- Khoury, G. A. 2000. "Effect of fire on concrete and concrete structures". Prog. Struct. Eng. Mater., 2(4): 429-447.
- Kim, J. H. J., Lim, Y. M., Won, J. P. and Park, H. G. 2010. "Fire resistant behavior of newly developed bottom-ash-based cementitious coating applied concrete tunnel lining under RABT fire loading". Constr. Build. Mater., 24: 1984-1994.
- Kollek, J. 1989. "The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method, a recommendation". Mater. Struct., 22: 225-230.
- Lee, G., Han, D., Han, M., Han, C. and Son, H. 2012. "Combining polypropylene and nylon fibers to optimize fiber addition for spalling protection of high-strength concrete". Constr. Build. Mater., 34: 313-320.
- Maraveas, C. and Vrakas, A. A. 2014. "Design of concrete tunnel linings for fire safety". Struct. Eng. Int., 24: 319-329.
- Mindeguia, J., Pimienta, P., Carré, H. and La Borderie, C. 2013. "Experimental analysis of concrete spalling due to fire exposure". Eur. J. Environ. Civ. Eng., 17(6):453-466.
- Mohod, M. 2015. "Performance of polypropylene fibre reinforced concrete". IOSR J. Mech. Civ. Eng., 12(1): 28-36.
- Noumowe, A. 2005. "Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200 °C". Cement Concrete Res., 35(11): 2192-2198. Online Site: [www.promat-tunnel.com/en/advices/fire-protection/fire-curves](http://www.promat-tunnel.com/en/advices/fire-protection/fire-curves).
- Pimienta, P., Moreau, B. and Larive, C. 2014. "On site risk assessment of concrete spalling in tunnel by means of a mobile oil-fired furnace". Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Tunnel Safety and Security, March 12-14, Marseille, France, pp. 523-532.
- Radzi, N. A. M., Roszilah, H. and Mutalib, A. A. 2016. "A review of methods, issues and challenges of small-scale fire testing of tunnel lining concrete". J. Appl. Sci., 16: 293-301.
- Saadun, A., Mutalib, A. H. R. and Mussa, M. H. 2016. "Behaviour of polypropylene fiber reinforced concrete under dynamic impact load". J. Eng. Sci. Technol., 11(5): 684-693.
- Suhaendi, S. L. and Horiguchi, T. 2006. "Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete after heat exposition". Cement Concrete Res., 36(9): 1672-1678.
- Thakre, N., Rajput, H., Saxena, J. and Mitangale, H. 2014. "Comparative study on strength and permeability of pervious concrete by using nylon and polypropylene fiber". Int. J. Comput. Tech., 1(4): 141-148.
- Vermeer, M., Noordijk, L. M. and Blom, C. B. M. 2014. "Mobile furnace for determining fire resistance of existing concrete structures". Proceedings of the World Tunnel Congress, May 9-14, Sao Paulo, Brazil.
- Xiao, J. and Konig, G. 2004. "Study on concrete at high temperature in China- An overview". Fire Safety J., 39: 89-103.
- Yan, Z. G., Zhu, H. H. and Ju, J. W. 2013. "Behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete shield TBM tunnel linings exposed to high temperatures". Constr. Build. Mater., 38: 610-618.
- Yasuda, F., Ono, K. and Otsuka, T. 2004. "Fire protection for TBM shield tunnel lining". Tunn. Underg. Sp. Tech., 19(4-5): 317.
- Zeiml, M., Leithner, D., Lackner, R. and Manh, H. A. 2006. "How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-sit uconcrete". Cement Concrete Res., 36: 929-942.
- Zlatanovic, S. 2014. "Emerging best practices in tunnel liner design can save lives, preserve structural integrity". Tunnel Business Magazine (TBM), Approach to Tunnel Design for Fire Loads, Oct. 23.

