

بررسی عددی رفتار بتن تحت اثر حریق

احسان دهقانی^{۱*} و وحیدرضا افخمی^۲

^۱ استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

^۲ دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

(دریافت: ۹۶/۵/۳۱، پذیرش: ۹۸/۲/۴، نشر آنلاین: ۹۸/۲/۴)

چکیده

هنگامی که یک قطعه بتنی تحت اثر افزایش دما و یا حریق قرار می‌گیرد، چندین پدیده در بتن رخ می‌دهد که شامل انتقال حرارت، تبخیر آب موجود در حفرات، انتقال آب و بخار آب، دی‌هیدراته شدن سیمان و در نهایت انبساط حجمی ساختار جامد بتن می‌شود. همه این فرایندها منجر به شکل‌گیری فشارحفره‌ای و ایجاد تنش‌های حرارتی در قطعه بتنی شده که اگر این تنش‌ها و یا فشارحفره‌ای به اندازه کافی بزرگ باشد منجر به شکست در بتن و کاهش سطح مقطع بتن از لایه‌های در معرض حرارت می‌شود که این موضوع به عنوان تورق در بتن شناخته می‌شود. در تحقیق پیش‌رو یک بررسی عددی در مورد توزیع دما، فشارحفره‌ای در بتن و تنش‌های حرارتی که منجر به پدیده تورق در بتن می‌شود، صورت می‌گیرد. در این مقاله سه نوع از بتن مورد بررسی قرار گرفته است: بتن با سنگ‌دانه‌های کوارتزی، بتن با سنگ‌دانه‌های آهکی و بتن با سنگ‌دانه‌های بازالتی. همه انواع این سنگ‌دانه‌ها در کشور ما فراوان بوده و در ساختار بتن از آن استفاده می‌شود. نتایج گویای این حقیقت است که احتمال تورق در قطعه بتنی با سنگ‌دانه‌های کوارتزی بیشتر از انواع دیگر بوده و این نوع بتن در معرض خطرات کاهش مقاومت بیشتری در برابر حریق می‌باشد که البته با افزایش ضخامت قطعه بتنی و یا افزودن حداقل ۱/۷۵ کیلوگرم فیبر پلی‌پروپیلن در هر مترمکعب مخلوط بتنی، می‌توان منجر به کاهش این خطر شد. علاوه بر این، بررسی صورت گرفته مؤید افزایش سرعت تورق در قطعات بتنی تحت حریق هیدروکربنی نسبت به دیگر انواع حریق بوده است.

کلیدواژه‌ها: قطعه بتنی، انتقال حرارت، فشار حفره‌ای، تورق، فیبر پلی‌پروپیلن.

۱- مقدمه

به همراه اندرکنش رفتاری این عناصر با یکدیگر می‌باشد، اهمیت موضوع شناخت رفتاری بتن را دوچندان می‌کند. دستورالعمل‌های ارائه‌شده در آئین‌نامه‌های طراحی (Anon, ۲۰۰۱) جهت مقابله با حریق در اجزای بتنی، بیشتر مبتنی بر یکسری آزمایش‌های غیرواقعی و قدیمی روی قطعات و تیرهای مجزا بوده است (Chung و Consolazio, ۲۰۰۵). با این حال واضح است که هیچ‌گونه آزمایش واقعی روی المان‌های با اندازه واقعی صورت نگرفته است و در بسیاری موارد عواملی که ممکن است در واقعیت، بر رفتار در برابر حریق اجزای بتنی، مؤثر باشد در محیط آزمایشگاهی لحاظ نشده است. با همه این تفاسیر، در بسیاری موارد نتایج این آزمایش‌ها در مورد برخی سازه‌های بتنی محافظه‌کارانه نبوده و موجب خطاهای بزرگی در برآورد و پیش‌بینی رفتار در برابر حریق این‌گونه سازه‌ها شده است (Gales, ۲۰۰۹). برخی مطالعات صورت گرفته روی رفتار در برابر حریق سازه‌های بتنی که تا مرحله گسیختگی قطعه بتنی پیش‌رفته‌اند،

هدف اصلی مهندسی سازه در دنیای دیروز و امروز فراهم کردن سازه‌هایی ایمن در برابر عوامل محیطی بوده است؛ عوامل محیطی که خود می‌تواند امنیت جانی و مالی افراد را به مخاطره بیاندازد. یکی از عوامل محیطی که می‌تواند ایمنی سازه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد آتش‌سوزی است که در کنار عوامل دیگری مثل زلزله می‌تواند باعث کاهش عمر مفید سازه گردد. برخلاف عوامل لرزه‌ای در طراحی سازه‌ها، موضوع حریق یا آتش‌سوزی به عنوان عاملی که در طول حیات سازه امکان رخ دادن آن وجود دارد، تا حد زیادی مورد چشم‌پوشی طراحان قرار گرفته است. سالیان متمادی است که بتن به عنوان یک ماده پرکاربرد در صنعت ساختمانی شناخته می‌شود. این ماده پرکاربرد از موادی ساخته شده است که اکثراً در محیط طبیعی به‌وفور یافت می‌شود که این مسئله، استفاده از بتن را در سراسر گیتی فراگیرتر کرده است. این مطلب که بتن یک ماده مرکب از چندین ماده دیگر است و به تبع آن، رفتار واقعی بتن متأثر از رفتار عناصر سازنده آن

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۲۵-۳۲۱۰۳۲۴۰

یک مترمکعب از مخلوط بتنی بیشترین تأثیر بر بهبود رفتار قطعات بتنی در برابر افزایش دما خواهد داشت.

در این تحقیق به رفتار قطعات بتنی با سنگدانه‌های کوارتزی، آهکی و بازالتی با ضخامت مشخص، در برابر حریق، پرداخته می‌شود. با توجه به تنوع خاکی و وسعت کشور ما، هر یک از انواع سنگدانه‌های بتنی مذکور، در ساختار بتن، تحت اختلاط با دیگر اجزای بتن، قرار می‌گیرند، که این مسئله لزوم شناخت بیشتر رفتار انواع بتنی یاد شده را می‌رساند. در تحقیق پیش‌رو جهت پیش‌بینی رفتار در برابر حریق اجزای بتنی، یک مدل عددی مبتنی بر اصول اجزای محدود ارائه شده است. نتایج این تحقیق شامل توزیع و انتقال حرارت در مقاطع، توزیع تنش حرارتی و نحوه پوسته‌پوسته شدن (تورق)^۴ در اجزای بتنی می‌باشد که علاوه بر به چالش کشیدن دید اولیه نسبت به مقاومت مناسب اجزای بتنی در برابر حریق، راه را در شناخت بهتر رفتار مقاطع بتنی در برابر حریق هموارتر می‌سازد.

۲- رفتار بتن در برابر حریق

عموماً بتن با دو ماده اصلی شناخته می‌شود؛ یکی خمیر سیمان هیدراته و دیگری سنگدانه. رفتار و ویژگی بتن به وسیله رفتار مواد سازنده آن و اثر اندرکنش آن‌ها مشخص می‌شود (Harmathy, ۱۹۹۳).

سیمان هیدراته یک ماتریس ژله‌ای و یک سیستم با حفره‌های باریک می‌باشد، که این حفره‌ها در بسیاری مواقع با آب و یا بخار آب پر شده که با نیروهای واندروالسی نگه‌داشته شده‌اند. آب موجود در این حفره‌های باریک، آب مستعد تبخیر شدن نامیده می‌شود. علاوه بر آب مستعد تبخیر شدن، آب غیرقابل تبخیر نیز وجود دارد که این آب (آب غیرقابل تبخیر)، آبی است که باند شیمیایی در خمیر سیمان ایجاد می‌کند و زمانی که دما بالا رود و حالت خمیری رو به کاهش رود در دسترس قرار می‌گیرد. شکل (۱) ساختار کلی بتن در دمای محیط را به نمایش می‌گذارد.

با بالا رفتن دما در اثر حریق، حالت خمیری بتن کاهش می‌یابد و رفتار سازه‌ای بتن روند کاهشی به خود می‌گیرد. با افزایش دما و رسیدن آن به حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در خمیر سیمان، در ابتدا از دست رفتن آب مستعد تبخیر در حفره‌های باریک، صورت می‌گیرد. به محض این که دما به بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برسد، نرخ تبخیر فراتر می‌رود (به علت خروج آب ناشی از فشارحفره‌ای بالاتر از فشار اتمسفر)، وقتی که دما به ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد برسد، فقط آب غیرمستعد تبخیر شدن وجود خواهد داشت.

بیانگر قابل اعتماد نبودن دستورالعمل‌های آئین‌نامه‌های طراحی در برابر حریق بوده است (Post و Korman, ۲۰۰۰; Groner, ۲۰۱۶). با این که تا چندین دهه پیش بتن یک ماده کاملاً مقاوم در برابر حریق شناخته می‌شد، در سال‌های متممادی شاهد آسیب رسیدن ساختمان‌های بتنی در برابر حریق بوده‌ایم که آتش‌سوزی ۵ ساعته در ساختمان ۱۸ طبقه بانکوک تایلند (Lukkunaprasit, ۱۹۸۷) در سال ۱۹۸۷ میلادی، که منجر به فروریختگی این ساختمان شد، یکی از این موارد است. خرابی گسترده در اثر حریق در ساختمان ۱۲ طبقه بتنی پیش‌تنیده با تاندون‌های غیرچسبیده در Key Biscayne ایالت فلوریدا (Post و Korman, ۲۰۰۰) در سال ۲۰۰۰ میلادی، از دیگر موارد آسیب دیدن این‌گونه سازه‌ها در برابر حریق می‌باشد. با این حال، مسائلی شبیه واقعه ۱۱ سپتامبر در سال ۲۰۰۱ میلادی (Groner, ۲۰۱۶) و موج حملات تروریستی در محیط‌های سازه‌ای، توجه مهندسان را به سمت بررسی رفتاری قطعات بتنی در برابر حریق معطوف کرده و در این زمینه تحقیقاتی که عمدتاً به صورت آزمایشگاهی بوده است، صورت گرفته است. Taimur و Khaliq (۲۰۱۸) به بررسی رفتاری بتن با دو نوع سنگدانه طبیعی و بازیافت شده در برابر افزایش دما پرداخته‌اند. در این بررسی آزمایشگاهی مشخص گردید که افت مقاومت کششی و فشاری بتن با سنگدانه‌های بازیافتی در برابر نوع طبیعی آن کم‌تر بوده و در این نوع بتن تحت اثر افزایش دما تغییر رنگ و ترک‌های کم‌تری در مقایسه با نوع دارای سنگدانه‌های طبیعی مشاهده می‌شود (Ali و همکاران, ۲۰۱۶).

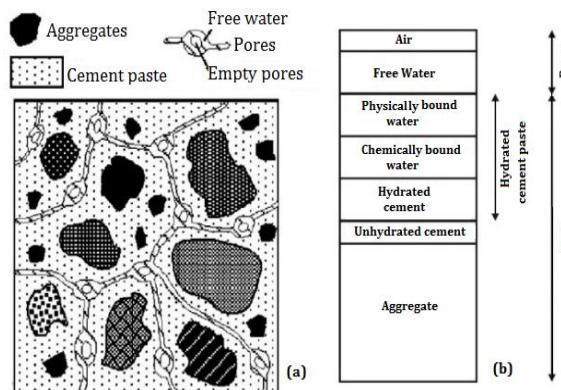
اثر افزودنی‌هایی مثل شیشه‌های ضایعاتی و نانوسیلیکاها^۱ در اجزای بتنی را مورد بررسی قرار داده و با بررسی مشخصه‌های مقاومتی و فیزیکی قطعات بتنی ساخته شده از این نوع از بتن پس از اعمال حریق، نظر به بهبود عملکرد قطعات بتنی دارای افزودنی شیشه‌ای داشته‌اند (Mohd Ali و همکاران ۲۰۱۷).

عملکرد قطعات بتنی دارای افزودنی‌های ژئوپلیمری^۲ را مورد ارزیابی قرار داده و حد معینی از این افزودنی‌ها را برای جلوگیری از پدیده تورق در برابر حریق هیدروکربنی پیشنهاد کرده‌اند. Abaeian و همکاران, ۲۰۱۸).

اثر فیبر پلی‌پروپیلن بر رفتار قطعات بتنی در برابر اعمال حرارت پرداخته و اثر نوع خاصی از این فیبرها که بانام HPP^۳ شناخته می‌شود بر مقاومت کششی و فشاری بتن پرمقاومت را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این تحقیق آزمایشگاهی گویای این مطلب است که اضافه کردن یک کیلوگرم از فیبرهای مذکور در

1. Nanosilica
2. Geopolymer Additives
3. High Performance Polymer Fibers
4. Spalling

سریع در پرتلندیت^۵ رخ می‌دهد. آب غیرمستعد تبخیری که در ابتدا وظیفه باند شیمیایی را داشته است، در این مرحله تبخیر می‌شود. در بتن با دانه‌های آهکی در دمای بین ۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد یک کاهش وزن رخ می‌دهد که به علت رخدادهای کربناسیون یا به عبارتی تجزیه کربنات کلسیم است. در دمای فراتر از ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش وزن دیگری صورت نمی‌گیرد و در دمای ۱۱۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بتن ذوب می‌شود، در برخی موارد نیز رسیدن به این دما باعث دوده‌ای شدن دانه‌ها می‌شود (Khoury, ۲۰۰۰). دی‌هیدراسیون و روند تجزیه بتن تحت حریق در شکل (۲) نمایش داده شده است (دماهایی که نمایش داده شده دماهای بتن است نه دماهای حریق).



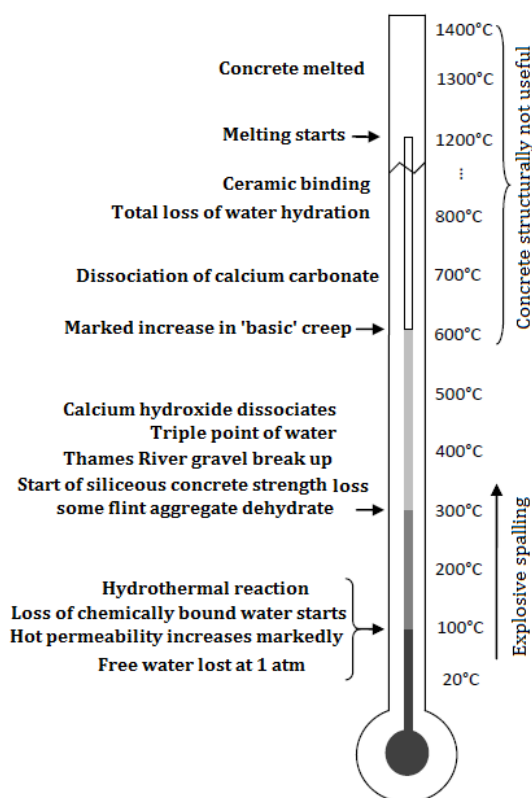
شکل ۱- (الف) توصیف شماتیک ساختار بتن، (ب) مشخصات حجمی مربوط به مواد سازنده بتن (England و Ichikawa, ۲۰۰۴)

۳- پوسته‌پوسته شدن (تورق) بتن

هنگام رخدادن حریق در سازه‌های بتنی، ایمنی قطعات بتنی تحت تأثیر قرار گرفته و در معرض بالاترین دماها، اثرات مستقیم و غیرمستقیمی بر قطعه مذکور وارد می‌گردد، برخی از این اثرات عبارتند از:

- ۱- در هنگام افزایش حرارت در بتن، گرادیانی دمایی صورت می‌گیرد که باعث ایجاد یکسری تنش‌های داخلی در قطعه بتنی می‌شود. علاوه بر این، تنش‌های داخلی به علت کرنش‌ها و تغییر شکل‌های حین حریق و پس از آن تولید می‌شوند (Anon, ۲۰۰۴).
- ۲- موضوع مهم دیگر پوسته‌پوسته شدن (تورق) بتن است. این پدیده بدین معنی است که حریق می‌تواند رویه بتن را به صورت ورقه‌هایی که از هسته بتن جداشدنی است، درآورد. آسیب تورق بتن ناشی از حریق (انفجار) با نوع فرورویختگی تفکیک‌پذیر می‌شود و به سه دسته پوسته‌پوسته شدن انفجاری^۶، پوسته‌پوسته شدن محلی^۷ و پوست‌اندازی^۸ تقسیم می‌شوند.

در دقایق اولیه حریق، حرارت به مقطع بتنی نفوذ کرده و آب مستعد تبخیر در لایه سطحی بتن، به بخار آب تبدیل می‌شود و در اثر تفاوت در فشارحفره‌های لایه‌ها، به‌سوی سطح حرارت دیده رهسپار می‌شود. تبدیل آب به بخار آب و به عبارتی تغییر فاز آب موجب انبساط آب و افزایش فشارحفره‌ای می‌شود. این آب از سطح بتن خارج شده و به شکل بخار آب دیده می‌شود. در این زمان، حرارت نفوذ بیشتری داشته و جریان تبخیر آب به سمت قسمت‌های داخلی سرد بتن افزایش می‌یابد که این مسئله، به علت افزایش دمای لایه، رخ می‌دهد. به‌محض این‌که حرارت بیشتری به لایه نفوذ کند دمای لایه تحت حرارت، بیشتر می‌شود. هم‌زمان، جریان بخار آب، که به‌وسیله اختلافات فشار ایجاد شده است،

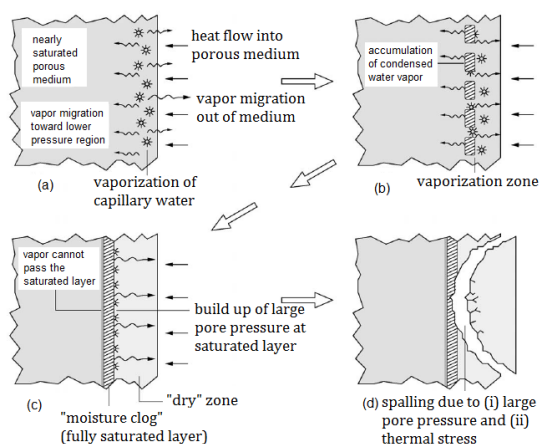


شکل ۲- مراحل بی‌آب شدن و تجزیه بتن در اثر افزایش دما (Khoury, ۲۰۰۰)

با افزایش دما، تجزیه ماده ژله‌ای شروع خواهد شد که این مسئله باعث دی‌هیدراته (بی‌آب) شدن ژل کلسیم-سیلیکا می‌شود. حداکثر نرخ دی‌هیدراته شدن در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و این روند تا دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد ادامه می‌یابد. در دمای بین ۴۵۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد یک تجزیه

5. Portlandite
6. Explosive spalling
7. Local spalling
8. Sloughing off

داخلی بتن جلوگیری کرده و منجر به جریان بخار آب در جهت سطح بتن می‌شود. با این حال، در جهت روی سطح بتن یک گرادیان دمایی افزایشی وجود دارد که در این جهت از سطح مقطع افزایش می‌یابد. در جریان بخار آب که به علت اختلاف فشار رخ داده است، دمای بخار آب افزایش یافته و بخار آب تمایل به انبساط شدن دارد، که از این کار به علت ساختار حفرات مانع به عمل می‌آید. این ممانعت از انبساط، منجر به ایجاد نیروهای اصطکاکی در دیواره حفرات می‌شود. در همین حال، اختلاف فشار جهت هل دادن بخار آب به روی سطح ناکافی بوده و بنابراین در جلوی لایه اشباع یک فشارحفره‌ای بزرگ‌تر نسبت به فشارحفره‌ای قبلی شروع به شکل‌گیری و رشد می‌کند. در شکل (۴) (Qian, 2005) روند توسعه و شکل‌گیری فشارحفره‌ای در قطعه بتنی در طول زمان حرارت‌دهی نشان داده شده است. سطح مقطع بتن به ناحیه‌های مختلفی تقسیم شده است؛ در جلوی این مقطع، ناحیه در حال خشک شدن وجود دارد که این ناحیه بین ناحیه خشک (دی هیدراته) و لایه اشباع است. به محض این که لایه اشباع شکل گیرد فشار بخار لایه اشباع شروع به شکل‌گیری می‌کند.



شکل ۳- بیان شماتیک فرایند پوسته‌پوسته شدن

(Zeiml, 2006)

پیش‌تر گفته شد که افزایش دما در لایه‌های سطحی بتن باعث فرایند تجزیه در بتن می‌شود (Harmathy, 1993). فرایند تجزیه منجر به افزایش نفوذپذیری در بتن می‌شود. این بدین معنی است که میزان حفرات متصل شده در تبخیر در یک گذرگاه به تدریج از لایه اشباع به سمت روی سطح بیرونی بتن افزایش می‌یابد. به علاوه، به علت اختلاف انبساط حرارتی بین سنگ‌دانه‌ها و خمیر سیمان، ریزترک‌ها گسترش می‌یابد که این مسئله، افزایش بیشتر میزان گذرگاه‌هایی که برای عبور بخار آب به کار می‌روند را موجب

بسیار تحت تأثیر افزایش دما قرار می‌گیرد. حین جریان بخار آب، دمای بخار آب افزایش می‌یابد و بخار آب در پی افزایش حجم حفره می‌شود، که راه برای این کار در حفرات سازه مسدود است و محدود شدن انبساط، نیروهای اصطکاکی در دیواره‌های حفرات ایجاد می‌کند که از جریان بخار آب جلوگیری می‌کند. به علاوه، سطح بتن در اثر تنش‌های حرارتی شدیداً تحت فشار قرار می‌گیرد که این مسئله باعث کاهش ریزترک‌های موجود این لایه شده، بنابراین مقدار فضایی که برای جریان بخار آب موردنیاز است کاهش می‌یابد. شکل (۳) نحوه پوسته‌پوسته شدن بتن را به صورت کلی نمایش می‌دهد. در توضیحات پیشین، بخش اولیه این رخداد، تشریح شد. پس از این مرحله، مقدار زیادی از بخار آب به سمت قسمت داخلی سرد بتن می‌رود. وقتی شرایط به گونه‌ای شود که دما کم‌تر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد است، بخار آب دوباره به آب تبدیل شده و دوباره توسط حفرات بتن جذب می‌شود. بنابراین مقدار آب مستعد تبخیر در حفرات افزایش می‌یابد زیرا که آب‌های دوباره جذب‌شده نیز به عنوان آب مستعد تبخیر در بتن در شرایط اولیه حاضر می‌شوند و این فرایند ادامه می‌یابد. ضخامت لایه حرارت دیده به تدریج افزایش یافته و در پشت این لایه حرارت دیده که دما به حد ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است، تبخیر در آب مستعد تبخیر رخ داده و بخار آب به سمت لایه‌های داخلی سردتر بتن حرکت می‌کند. در انتهای لایه حرارت دیده، تجزیه خمیر سیمان رخ داده که منجر به تولید آب مستعد تبخیر می‌شود که این آب تبخیر شده و اغلب به سمت لایه‌های داخلی سردتر بتن روانه می‌شود. در ابتدا سرعت جریان بخار آب از سرعت نفوذ دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر است، به علاوه، اختلاف فشار به اندازه‌ای نیست که بخار آب را هل دهد؛ زیرا که ضخامت و درجه اشباع‌شدگی ناحیه تجمع آب در زمان افزایش یافته و به تدریج از جریان بخار آب ممانعت به عمل می‌آید. بنابراین در جلوی قسمت نفوذ دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، ناحیه تجمع آب رشد می‌کند. علاوه بر این، تجمع لایه آب باعث می‌شود که به تدریج توسعه فشارحفره‌ای سریع‌تر شود. بعد از مدتی لایه تجمع آب بزرگ‌تر شده و یک لایه اشباع رشد می‌کند (شکل می‌گیرد) که یک مانع رطوبتی نامیده می‌شود. در شکل (۳) این قسمت از فرایند در بخش‌های b و c تقسیم شده‌اند (Zeiml, 2006).

وقتی که دمای پیش‌رونده ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مرز برسد، تبخیر آب از لایه اشباع رخ می‌دهد. ضمناً، در این اثنا، دما در ناحیه دی‌هیدراته بیشتر افزایش یافته و یک گرادیان دمایی افزایشی در طول ناحیه دی‌هیدراته رشد می‌کند که منجر به یک نرخ بالای جریان حرارتی و تبخیر شدید آب از لایه اشباع می‌شود. این لایه اشباع از انتقال بیشتر آب و تشکیل بخار آب در لایه‌های

پس از این، فرایند پوسته‌پوسته‌شدن در بتن ادامه می‌یابد زیرا که لایه پشت لایه پوسته‌پوسته شده اکنون لایه سطحی است (و فرایند قبل ادامه می‌یابد). بدین معنی که دما در سطح جدید به سرعت افزایش می‌یابد و بنابراین فرایند تشکیل لایه اشباع و امکان شروع پوسته‌پوسته شدن دوباره افزایش می‌یابد.

۴- مدل‌سازی عددی حریق در بتن

هدف این تحقیق مدل‌سازی عددی قطعه بتنی (قطعه بتنی غیرمسلح) و بررسی اثر حریق بر رفتار آن و در نتیجه دست یافتن به درک مناسب‌تری از رفتار بتن در برابر حریق می‌باشد. مدل‌سازی عددی بر مبنای برنامه‌نویسی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است. مدل‌سازی به صورت یک‌بعدی در جهت ضخامت قطعه و با فرض غیرمسلح بودن بتن انجام شده است. علت بررسی رفتار قطعات بتنی غیرمسلح در این تحقیق این است که حریق در قطعات بتنی مسلح، معمولاً به علت پوشش آرماتور در قطعات، بیشتر قسمت بتنی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و آرماتورها و دیگر اجزای فولادی کم‌تر تحت تأثیر اولیه حریق قرار می‌گیرند و کاهش مقاومت این قطعات در وهله اول به علت کاهش مقاومت جز بتنی می‌باشد.

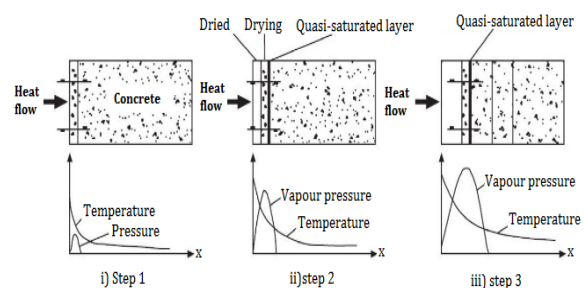
۴-۱- مشخصات مادی و هندسی

با توجه به این که رفتار بتن به عنوان یک ماده مرکب متأثر از رفتار عناصر سازنده آن می‌باشد بنابراین نوع سنگ‌دانه‌ها به عنوان یک جز اصلی سازنده بتن که عامل اصلی افتراق انواع بتن‌ها می‌باشد، در رفتار در برابر حریق بتن اثر قابل‌ملاحظه‌ای دارد. در این تحقیق سه نوع از سنگ‌دانه‌های مرسوم در کشور ما، که در ساختار بتن قرار می‌گیرند، مورد بررسی قرار گرفته است. این سنگ‌دانه‌ها عبارت‌اند از: سنگ‌دانه‌های بازالتی، آهکی و کوارتزی. مدل انتقال حرارت در پژوهش حاضر به صورت یک‌بعدی در نظر گرفته شده و بنابراین فرض گردیده یک قطعه بتنی غیرمسلح به ضخامت مشخص، در تمام سطح زیرین خود به صورت یکسان تحت تأثیر حرارت ناشی از حریق قرار گرفته است که انتقال حرارت و فرایند تورق در بتن در جهت ضخامت قطعه اتفاق می‌افتد.

مهم‌ترین مشخصه‌ای که بر پدیده پوسته‌پوسته شدن در بتن تحت حریق مؤثر است، نرخ حرارت‌دهی است که از نرخ توسعه حرارت در حریق و پیشروی در مقطع بتنی به دست می‌آید. نرخ حرارت‌دهی منجر به توسعه تبخیر و فشارحفره‌ای می‌شود. زمانی که نرخ حرارت‌دهی بتن افزایش یابد، احتمال رخ دادن تورق در بتن افزایش می‌یابد. به علاوه، با افزایش نرخ حرارت‌دهی، سرعت رخداد تورق در بتن بیشتر می‌شود.

می‌شود. با این حال، لایه داخلی بتن به شدت فشرده می‌شود و میزان ریزترک‌ها و به تبع آن گذرگاه‌های عبوری بخار آب کاهش می‌یابد. جریان بخار آب به علت اختلاف فشار، اختلاف دما و نفوذپذیری، صورت می‌گیرد. در حالتی که اختلاف فشار و نفوذپذیری بتن بالاست، میزان گذرگاه‌هایی که جهت انتقال بخار آب از لایه اشباع و تشکیل آسان فشارحفره‌ای در دسترس می‌باشد، کافی است. دمای بخار آب در حین جریان به سمت روی سطح همچنان در حال افزایش می‌باشد و بنابراین بخار آب تمایل به انبساط دارد، با این حال اندازه و تعداد گذرگاه‌ها جهت انبساط بخار آب کفایت می‌کند. اگر نفوذپذیری کم باشد و جهت انتقال بخار آب از لایه اشباع ناکافی باشد فشارحفره‌ای شروع به تشکیل شدن می‌کند و اختلاف فشار جهت هل دادن بخار آب به روی سطح بتن ناکافی می‌شود. نرخ تبخیر آب با افزایش دما افزایش یافته و بنابراین میزان آب موردنیاز جهت انتقال به بیرون از لایه اشباع به تدریج افزایش می‌یابد. این فرایند از تشکیل فشارحفره‌ای ادامه یافته تا اختلاف فشار جهت هل دادن بخار آب به سمت روی سطح بتن (جهت تشکیل آسان فشارحفره‌ای) کاملاً کافی باشد. این نقطه حداکثر فشارحفره‌ای است که ایجاد می‌شود.

تشکیل فشار حفره‌ای منجر به تنش‌های کششی می‌شود که بر حفرات بتن مماس است. تنش‌های کششی باید به وسیله مقاومت کششی، در دمای رو به افزایش بتن، مقابله شوند. هنگامی که مقاومت کششی بتن جهت مقابله با تنش‌های کششی کافی باشد، آنگاه لایه اشباع و توسعه فشارحفره‌ای منجر به آسیب رساندن به بتن نمی‌شود. در زمانی که مقاومت کششی بتنی ناکافی باشد، آنگاه تنش‌های کششی، ترک‌هایی را که در جهت شعاع منتشر شده است، تولید می‌کند. این ترک‌ها، ساختار بتن را تضعیف کرده و زمانی که الگوی ترک به اندازه کافی بتن را تضعیف کرد، یک لایه از مقطع بتنی با ضخامتی تقریباً برابر لایه دی-هیدراته (خشک‌شده) کنده می‌شود. این واقعه را پوسته‌پوسته شدن (تورق) در بتن می‌خوانند.



شکل ۴- بیان شماتیک روند توسعه فشارحفره‌ای در بتن تحت افزایش دمت (Qian و همکاران، ۲۰۰۵)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_c * \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \alpha_c = \frac{\lambda_c}{\rho_c c_c} \quad (1)$$

که α_c ، ضریب نفوذ حرارتی بتن (m^2/s)، λ_c ، رسانایی دمایی بتن (W/mK)، ρ_c ، چگالی بتن (kg/m^3)، c_c ، گرمای ویژه بتن ($KJ/kg.m$)، T ، دمای بتن ($^{\circ}C$)، t ، زمان (s)، می‌باشد. المان‌های بتنی که دارای عرض و ارتفاع بزرگ‌تری نسبت به ضخامت هستند می‌توانند به صورت کلی به عنوان یک المان بتنی نیمه محدود در نظر گرفته شوند. در این المان‌ها یک توزیع دمایی یک‌بعدی ارائه شده و رابطه فوریه را می‌توان به صورت رابطه (۲)، بازنویسی کرد:

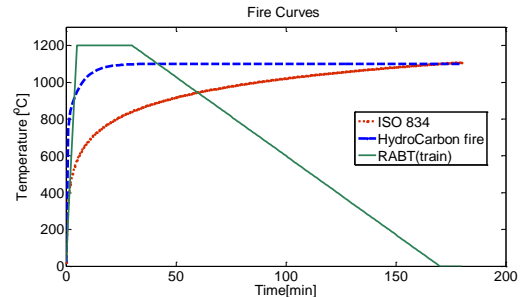
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_c * \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (2)$$

۴-۳- تئوری انتقال بخار آب در بتن

در قسمت‌های پیشین فرایندی که منجر به پوسته‌پوسته شدن بتن می‌شد تشریح گردید و گفته شد که یکی از مهم‌ترین عوامل این پدیده، انتقال بخار آب می‌باشد. در این تحقیق فرض بر این است که تنها انتقال بخار آب از بین حفره‌های بزرگ‌تر در نظر گرفته می‌شود، بدین معنی که با توجه به چهار فرایند مشخص شده در شکل (۳) جریان ویسکوز برای مدل‌سازی جریان بخار آب در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این سرعت جریان بخار آب کم بوده، بنابراین جریان آرام یا لایه‌ای در نظر گرفته شده است.

جریان ویسکوز بخار آب در اثر اختلاف فشار رخ می‌دهد و این اختلاف فشار به وسیله فرایند تبخیر صورت می‌گیرد. وقتی که حرارت به آب وارد می‌شود برخی مولکول‌ها انرژی کینتیکی^{۱۰} کافی جهت شکستن سطح آزاد (رها شدن از سطح آزاد) دارند که به این معنی است که قسمتی از آب، بخار شده است. در اینجا در حفرات بتن، بخشی از مولکول‌های رها شده به سطح آب برمی‌گردند (شکل ۷-الف)) بنابراین تبخیر آب یک پدیده سطحی است (شکل ۷-ب)).

تبادل وقتی برقرار می‌شود که تعداد مولکول‌هایی که از سطح رها می‌شوند برابر تعداد مولکول‌هایی که به آن باز می‌گردند، باشد، در این حالت بخار اشباع شده و فشار در این حالت به عنوان فشار اشباع بخار نامیده می‌شود، که با افزایش دما افزایش می‌یابد. فشار حالت اشباع بخار از فشار ناحیه خشک، جایی که فرایند تبخیر توسعه یافته و اختلاف فشار ایجاد شده است، به دست می‌آید.



شکل ۵- انواع منحنی‌های حریق (Yi و همکاران، ۲۰۱۵)



شکل ۶- نحوه اعمال حریق در قطعه بتنی

در این تحقیق از چند منحنی حریق بهره گرفته شده که در شکل (۵) به نمایش گذاشته شده است. منحنی حریق ISO834 یکی از منحنی‌های مرسوم در آتش‌سوزی سلولوزی ساختمان‌هاست، منحنی حریق Carbon Hydro مربوط به حریق ناشی از هیدروکربن‌های نفتی در سازه‌هاست. منحنی حریق RABT از منحنی‌های معروف اعمال حریق در تونل‌ها می‌باشد. در این تحقیق فرض شده است که حریق مطابق شکل (۶) بر سطح زیرین قطعه بتنی اعمال شده است. ذکر این نکته ضروری است که دیگر وجوه قطعه بتنی در شرایط اولیه دمای اتاق (۲۰ درجه سانتی‌گراد) قرار دارند.

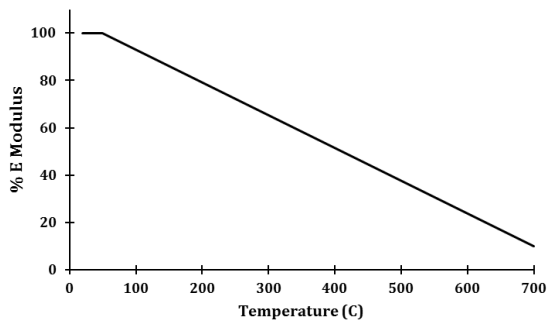
۴-۲- توزیع دما در قطعه بتنی

حین نفوذ حرارت به داخل بتن یک توزیع دمایی در سطح مقطع بتن (در جهت ضخامت)، رخ می‌دهد. این توزیع حرارت غیرخطی بوده و شکل آن به صورت منحنی درجه دوم است. توزیع دمایی در سطح مقطع به ضخامت، ویژگی‌های مواد سازنده بتن و درصد رطوبت وابسته است، هرچند بسیاری از این ویژگی‌ها مثل درصد رطوبت، خود به دما وابسته هستند. این مسئله باعث یک اندرکنش بین ویژگی‌های مواد، درصد رطوبت و توزیع دما می‌شود که به وسیله آن ویژگی‌های مواد و درصد رطوبت نسبت به افزایش دما در بتن به دست می‌آیند. در دماهای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و بالاتر به علت تغییر فاز آب مستعد تبخیر در بتن، تغییرات عمده‌ای در ویژگی‌های مواد سازنده بتن و میزان رطوبت صورت می‌گیرد. عموماً دریافت می‌شود که در صورتی که میزان رطوبت بتن کم‌تر باشد، حرارت سطح و اختلاف دما در مقطع بیشتر می‌شوند، علاوه بر این در مقاطع ضخیم‌تر، حرارت با سرعت کم‌تری به عمق مقطع می‌رسد. توزیع دما در قطعه بتنی را می‌توان با معادله سه‌بعدی دیفرانسیلی فوریه بیان کرد (Breugel و همکاران، ۱۹۹۸).

مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۹) الگوریتم کلی مدل تحلیلی را به نمایش گذاشته است. با توجه به شکل (۹)، فلوجارت مدل تحلیلی دارای ۹ مرحله است که در ادامه، این مراحل تشریح شده است.

جدول ۱- مشخصات مادی متفاوت انواع بتن (Breugel و همکاران، ۱۹۹۸؛ Anon، ۱۹۷۰)

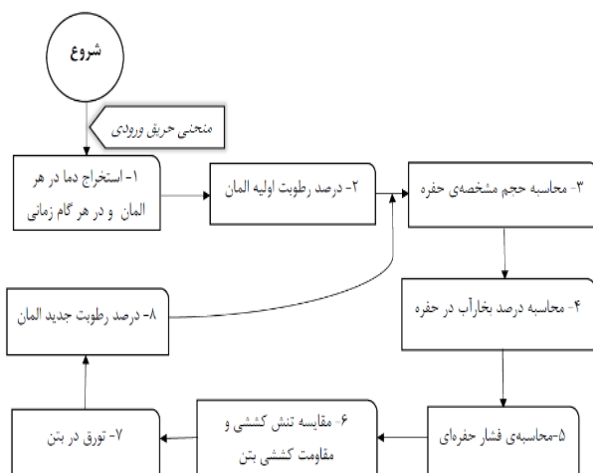
نوع	چگالی اولیه بتن (Kg/m ³)	رسانایی دمایی (W.m/K)	ضریب نفوذ حرارتی (m ² /hr)
بتن کوارتزی	۲۴۰۰	۴/۱	۰/۰۰۷۹
بتن آهکی	۲۴۵۰	۳/۲	۰/۰۰۵۵
بتن بازالتی	۲۵۵۰	۲	۰/۰۰۲۵



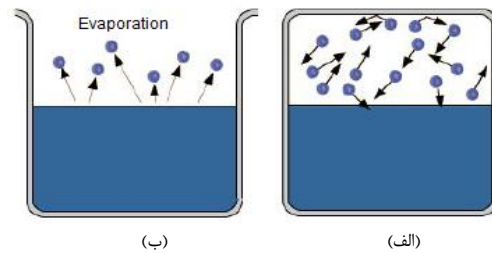
شکل ۸- درصد مدول الاستیسیته بتن نسبت به مدول الاستیسیته اولیه با توجه به دمای بتن

جدول ۲- مشخصات مادی مشترک انواع بتن‌ها

مدول الاستیسیته اولیه (GPa)	ضریب انبساط حرارتی (1/C)	درصد رطوبت آزاد اولیه (%)	نفوذپذیری (m ²)
۳۰	10 (-5)	۲/۸	1.5*10 ⁽⁻¹⁸⁾



شکل ۹- فلوجارت مدل تحلیلی



شکل ۷- بیان شمانیک فرایند تبخیر (England و Ichikawa، ۲۰۰۴)

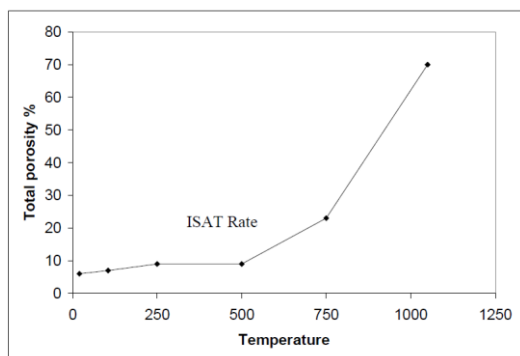
۴-۴- روند انجام عملیات در مدل تحلیلی

با توجه به مباحث پیشین، این تحقیق بر مبنای ارائه مدل تحلیلی جهت پیش‌بینی تورق در بتن استوار است. در این قسمت بخش‌های مرتبط با انجام عملیات در مدل تحلیلی به صورت گام-به‌گام تا رسیدن به تورق در قطعه بتنی ارائه شده است.

بخش اول) در ابتدا مشخصات مادی و هندسی قطعه بتنی مدنظر مطابق توضیحات بخش ۴-۱ و ۴-۲ به عنوان ورودی برنامه MATLAB وارد می‌شوند. مشخصات مادی و هندسی شامل نوع بتن (از نظر نوع سنگ‌دانه)، چگالی، گرمای ویژه، مدول الاستیسیته، مقاومت کششی، ضریب انبساط حرارتی، دمای اولیه، ضخامت قطعه بتنی و تعداد المان‌ها در جهت ضخامت قطعه به همراه تعداد گام‌های زمانی می‌باشند که به عنوان ورودی مدل انتقال حرارت قرار گرفته‌اند. مشخصه‌های دیگر بتن که شامل درصد رطوبت اولیه، نفوذپذیری، تخلخل و ... می‌باشند نیز به عنوان ورودی‌های دیگر برنامه جهت پیش‌بینی جریان بخار آب در حفرات بتن در نظر گرفته می‌شوند.

جدول (۱) مشخصات مادی که در هر یک از انواع بتن نسبت به هم متفاوت می‌باشد را به نمایش گذاشته است. جدول (۲) مشخصات مادی و هندسی مشترک در سه نوع بتن را به نمایش می‌گذارد، ضمن این‌که ضخامت قطعه ۳۰ سانتی‌متر، دمای اولیه ۲۰ درجه سانتی‌گراد و مقاومت کششی بتن ۴ مگاپاسکال فرض شده است. برخی از مشخصه‌های مذکور مثل چگالی، با افزایش دمایی تغییر می‌کند که اثر آن در فرایند انتقال بخار آب وارد شده است ضمناً اثر کاهش مدول الاستیسیته بتن نسبت به افزایش دما مطابق تحقیقات Breugel و همکاران (۱۹۹۸)، مطابق شکل (۸) وارد مدل تحلیلی می‌گردد (ذکر این نکته ضروری است که شرایط مرزی قطعه‌های بتنی غیرمسلح مورد بررسی در این تحقیق، به صورت مهار نشده می‌باشد و بتن غیرمسلح به عنوان یک ماده همگن در نظر گرفته شده است).

در ادامه، با توجه به محاسبات دمایی و توزیع دما در اجزای قطعه بتنی، وضعیت آب و بخار آب موجود در حفرات بتن، جریان بخار آب و میزان فشارحفره‌ای و در انتها تورق در المان‌های مذکور



شکل ۱۰- درصد تخلخل در قطعه بتنی با توجه به دمای قطعه (Anon, ۱۹۷۰)

که P ، میزان فشار در المان مدنظر، P_{sv} ، فشار حالت اشباع، R ، ثابت گازها برای بخار آب می‌باشند. جریان بخار آب با توجه فشار در المان مشخص می‌گردد، در صورتی که فشار در المانی بیشتر از المان دیگری باشد جهت جریان بخار آب از المان با فشار بیشتر به سمت المان با فشار کم‌تر می‌باشد. شار جریانی بخار آب از رابطه (۶) محاسبه شده است:

$$\varepsilon = \frac{K * dP * dA}{\mu * dt} \quad (6)$$

که ε ، شار جریانی بخار آب، K ، نفوذپذیری، dP ، اختلاف فشار بین دو المان متوالی، μ ، لزجت دینامیکی بخار آب (Torrent و Frenzer، ۱۹۹۵) $(17.1 * 10^{-6} \text{ (N}\cdot\text{s)/m}^2)$ می‌باشد. در نهایت میزان بخار آب اضافه‌شده یا کاسته‌شده از هر المان با توجه به جهت جریان از رابطه (۷) به‌دست می‌آید:

$$dw = \varepsilon * dt * \rho_v \quad (7)$$

که، dw ، بخار آب اضافه شده یا کاسته شده به المان، dt ، گام زمانی، ρ_v ، چگالی بخار آب (Wagner و Kruse، ۱۹۹۸) می‌باشد.

مرحله ششم و هفتم) فشار حفره‌ای حالت اشباع طبق رابطه (۸) به تنش کششی در بتن تبدیل می‌شود (Ichikawa و England، ۲۰۰۴).

$$\sigma_t = \frac{(1+2V_p)P}{2(1-V_p)} \quad (8)$$

در ادامه با توجه به تنش کششی محاسبه‌شده در رابطه (۸) و مقاومت کششی (f_t):

۱- اگر $\sigma_t < f_t$ باشد امکان رخ دادن تورق وجود ندارد.

۲- اگر $\sigma_t \geq f_t$ باشد امکان رخ دادن تورق وجود دارد.

مرحله اول) در این گام از برنامه، منحنی حریق به وجه پایینی قطعه بتنی وارد شده و نحوه انتقال حرارت و توزیع دما در قطعه بتنی با توجه به رابطه (۲) مشخص می‌گردد. دمای ایجاد شده در هر المان و در هر گام زمانی مبنای محاسبات در مراحل بعدی می‌باشد.

مرحله دوم) پس از مشخص شدن میزان دما در المان‌های بتنی و تحلیل حرارتی اولیه، درصد رطوبت اولیه، در هر یک از المان‌ها، به عنوان ورودی برنامه قرار می‌گیرد.

مرحله سوم) حجم مشخصه حفره طبق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد.

$$V_p = \frac{e * dt * dA}{w_w} \quad (3)$$

که V_p ، حجم مشخصه حفره، e ، درصد تخلخل بتن، dt ، ضخامت هر المان قطعه بتنی، dA ، اندازه سطح مقطع سطح تحت حرارت قطعه (برابر 1 m^2 در نظر گرفته می‌شود)، w_w ، میزان کل آب (آب و بخار آب در قطعه بتنی) می‌باشد.

مشخصه‌های تخلخل بتن و میزان کل آب، وابسته به دما می‌باشند. میزان تخلخل نسبت به دما در قطعه بتنی طبق شکل (۱۰) به مدل تحلیلی اضافه شده است. میزان کل آب با توجه به جریان بخار آب در قطعه بتنی در هر مرحله به‌روز می‌شود.

مرحله چهارم) میزان بخار آب موجود در حفره‌ها طبق رابطه در هر گام زمانی محاسبه می‌گردد.

$$w_v = \alpha w_w \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{V_p - V_1}{V_2 - V_1}$$

که w_v ، میزان بخار آب موجود در حفره‌ها، α ، نسبت بخار آب به کل آب، V_1 ، حجم مشخصه آب، V_2 ، حجم مشخصه بخار آب می‌باشد. حجم مشخصه آب و بخار آب با توجه به شکل (۱۱) وارد مدل تحلیلی شده است.

مرحله پنجم) در این گام از مدل تحلیلی، ابتدا میزان فشار در المان‌های قطعه بتنی، طبق رابطه (۵) محاسبه شده است (Kalifa و همکاران، ۲۰۰۰).

$$P = \begin{cases} 101325 \text{ Pa} & \text{if } T \leq 100 \text{ } ^\circ\text{C} \\ P_{sv} & \text{if } T > 100 \text{ } ^\circ\text{C}, 0 < \alpha < 1 \\ \frac{R * T}{V_p} & \text{if } T > 100 \text{ } ^\circ\text{C}, \alpha \geq 1 \end{cases}$$

$$P_{sv} = 610.78 * \exp\left(\frac{T}{T + 238.3}\right) * 17.2694$$

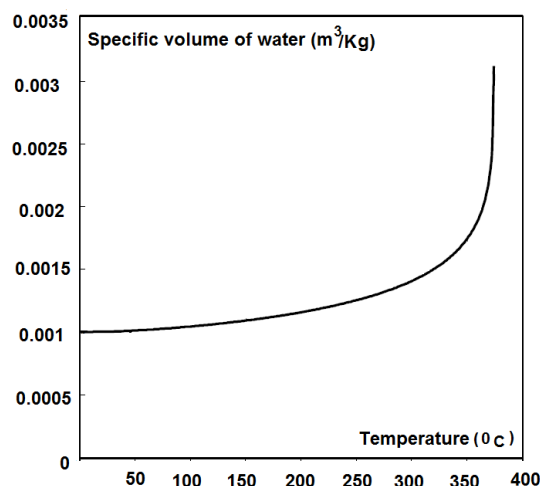
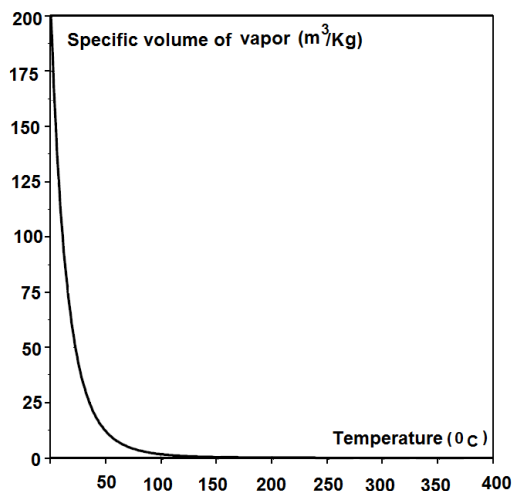
$$R = 462 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (5)$$

۱- مدل انتقال حرارت قطعه بتنی

۲- مدل انتقال سیال در حفرات قطعه بتنی

قسمت اول مدل سازی در آباکوس، توزیع دما در قطعه بتنی را مشخص می کند. این مدل، انتقال حرارت یک جسم صلب تحت اثر مشخصات وابسته به دمای مواد را تشریح می کند. تحلیل انتقال حرارت به صورت مجزا صورت گرفته است، بدین معنی که دما تنها (یک نوع) درجه آزادی در این تحلیل می باشد. مدل انتقال حرارت در آباکوس بر مبنای یک نوار باریک بتن در معرض یک منحنی دما می باشد که بر روی سطح زیرین قطعه بتنی اعمال شده است. از تحلیل انتقال حرارت، توزیع دما در کل مقطع بتنی به دست می آید. مدل انتقال حرارت مبتنی بر ۵ مؤلفه اساسی است: هندسه، مشخصات مواد (رسانایی، چگالی و گرمای ویژه)، مش بندی، شرایط مرزی و گام های تحلیل که با توجه به ضخامت قطعات و نوع سنگدانه مصرفی در قطعه بتنی، این مشخصه ها، وارد شده است.

قسمت دوم مدل سازی در آباکوس، نحوه انتقال سیال (آب یا بخار آب) در قطعه بتنی و به تبع آن نحوه ایجاد تنش های کششی در قسمت های مختلف قطعه و در نهایت ضخامت لایه تورق شده و زمان تورق در قطعه را با مقایسه تنش های کششی و مقاومت کششی مجاز، به نمایش می گذارد. این قسمت از مدل با توجه به قابلیت مدل سازی بر اساس Soils در آباکوس صورت گرفته است. در این مدل مجزا، نتایج مدل انتقال حرارت به عنوان ورودی مورد استفاده قرار می گیرد. مطابق فلوجارت مدل سازی ارائه شده در شکل (۱۲) مشخصه های مورد نیاز از قطعه بتنی در این قسمت از مدل سازی شامل مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، ضریب انبساط حرارتی قطعه بتنی و سیال، نفوذ پذیری، مدول بالک سنگدانه ها و سیال، درصد اشباع شدگی و تخلخل اولیه و منحنی جذب سطحی آب (نمودار فشار در مایع بر اساس درصد اشباع-شدگی) می باشند. با توجه به این که نرم افزار آباکوس تنها قادر به مدل سازی یک فاز از سیال می باشد در استخراج و ورود داده های مرتبط با ضریب انبساط حرارتی و مدول بالک سیال فرض شده است که تا دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد، سیال، ویژگی آب را داشته است و از دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد به بالا سیال بخار آب می باشد و در بین دماهای ۱۰۰ و ۱۵۰ درجه سانتی گراد، سیال مخلوطی از آب و بخار آب بوده و مشخصه های مذکور از سیال، از درون یابی بین داده های ارائه شده در دماهای ۱۰۰ و ۱۵۰ درجه سانتی گراد به دست می آید. جهت حصول زمان و عمق لایه پوسته پوسته شده از سابروتین های USDFLD و UMESHMOTION بهره گرفته شده است.



شکل ۱۱- حجم مشخصه آب و بخار آب

(Krusse و Wagner, ۱۹۹۸)

مرحله هشتم) در این مرحله با توجه به میزان رطوبت اولیه و میزان رطوبت اضافه شده یا کاسته شده در رابطه (۷)، میزان رطوبت جدید در حفره محاسبه می شود و در ادامه اشباع شدگی یا عدم اشباع شدگی بررسی شده و مراحل سه تا هشت با اطلاعات جدید، مجدداً تکرار می شود و الگوریتم در چرخه تکرار قرار می گیرد.

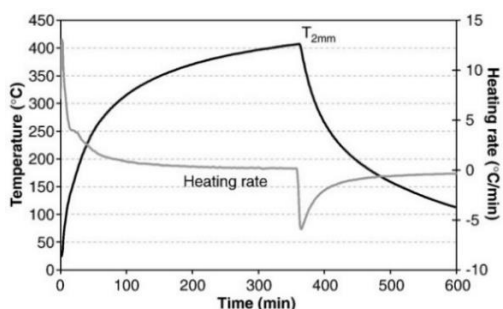
۴-۵- مدل سازی در نرم افزار آباکوس

نرم افزار آباکوس به عنوان یکی از نرم افزارهای مشهوری است که در مهندسی مکانیک جامدات و سیالات در تحلیل و بررسی مورد استفاده قرار می گیرد. در تحقیق صورت گرفته از نتایج این نرم افزار جهت بررسی بیشتر موضوع استفاده گردیده است. روند مدل سازی در نرم افزار آباکوس شامل دو بخش مجزا می باشد:

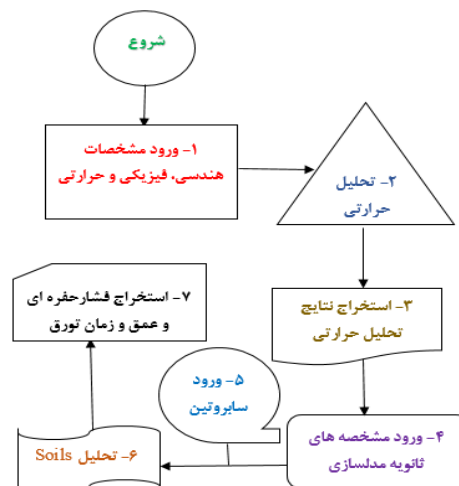
این فشار رخ می‌دهد، در این قسمت در جهت به چالش کشیدن و صحت‌سنجی مدل تحلیلی ارائه شده ابتدا به مقایسه نتایج حاصل از مدل مذکور با نتایج آزمایشگاهی پرداخته می‌شود. مدل آزمایشگاهی یک قطعه بتنی با ابعاد $300 \times 300 \times 120 \text{ mm}^3$ می‌باشد (Mindeguia و همکاران، ۲۰۱۰).

مقاومت فشاری مشخصه متوسط بتن 76 MPa می‌باشد. میزان نفوذپذیری قطعه بتنی در نوع B500 (که نوع خاص قطعه بتنی مورد بررسی در این قسمت می‌باشد) با توجه به شرایط اولیه برابر $1.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ و درصد رطوبت اولیه برابر $2/8$ می‌باشد. رسانایی دمایی قطعه بتنی برابر $1 \text{ W.m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ و مدول الاستیسیته اولیه و نسبت پواسون قطعه مذکور به ترتیب برابر 52 GPa و 0.25 بوده است. قطعه مذکور مهار نشده بوده است و در شرایط اولیه دمای محیط 25 درجه سانتی‌گراد بوده است. حریق از طریق یکی از وجه‌های بزرگ‌تر اعمال شده است و دیگر وجه‌ها در معرض اولیه حریق نمی‌باشند و در شرایط اولیه دمای اتاق (25 درجه سانتی‌گراد) قرار دارند. نحوه توزیع دمای ناشی از حریق اعمالی به همراه نرخ حرارت‌دهی در عمق 2 mm از قطعه آزمایشگاهی را به نمایش می‌گذارد.

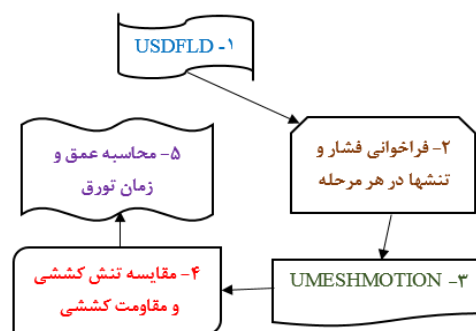
در قسمت اول به مقایسه توزیع دما در قطعه بتنی آزمایشگاهی و مدل تحلیلی پرداخته می‌شود. شکل (۱۵) به مقایسه نحوه توزیع دما در اعماق 10 mm ، 30 mm ، 50 mm از قطعه بتنی مذکور در مدل آزمایشگاهی (Experimental) و مدل تحلیلی (Analytical) با شرایط حریق مشابه می‌پردازد. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره گردید فشار بخار آب نقش مهمی در پدیده تورق در بتن در اثر افزایش دما دارد، شکل (۱۶) به مقایسه فشار اشباع بخار در دو مدل تحلیلی و آزمایشگاهی در عمق 50 mm می‌پردازد. همان‌گونه که از شکل‌های (۱۵) و (۱۶) مشخص است مدل تحلیلی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی (با در نظر گرفتن سه‌بعدی بودن مدل آزمایشگاهی در برابر یک‌بعدی بودن مدل تحلیلی و عوامل متعددی که بر نحوه اعمال حریق، کیفیت و همگنی بتن و ... می‌تواند بر نتایج آزمایشگاهی تأثیرگذار باشد) از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد.



شکل ۱۴- توزیع دما و نرخ حرارت‌دهی در عمق 2 mm از قطعه بتنی (Mindegui و همکاران ۲۰۱۰)



شکل ۱۲- فلوچارت مدل سازی



شکل ۱۳- فلوچارت عملکرد سابروتین

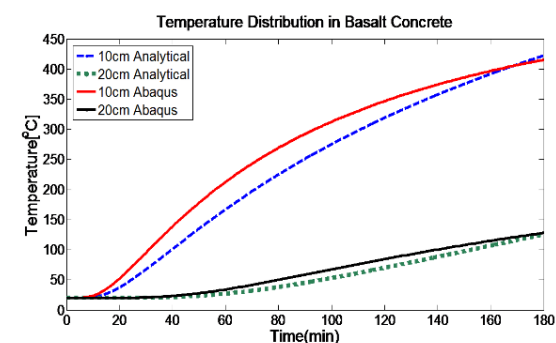
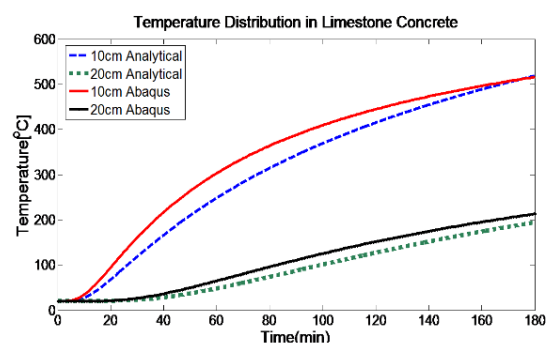
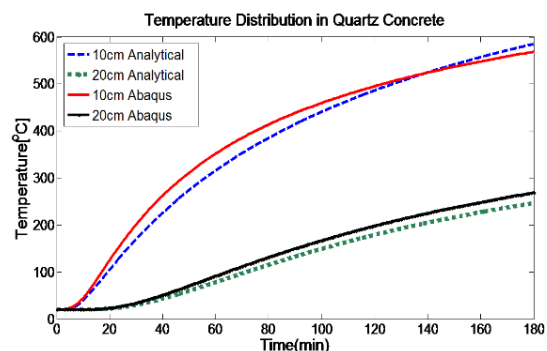
با استفاده از سابروتین USDFLD در هر مرحله تنش‌ها و فشار حفره‌ای ایجاد شده در قطعه بتنی فراخوانده می‌شود و با استفاده از سابروتین UMESHMOTION در هر مرحله بین تنش کششی ایجاد شده با مقاومت کششی مجاز بتن مقایسه صورت می‌گیرد و در صورت تجاوز تنش کششی از حد مجاز مقاومت کششی عملیات متوقف شده و عمق و زمان پوسته‌پوسته شدن استخراج می‌شود. شکل (۱۳) فلوچارت عملکرد دو سابروتین مذکور را به نمایش می‌گذارد. سابروتین‌های مذکور به عنوان یکی از مراحل تحلیل در مدل‌سازی وارد شده (شکل (۱۲)) و خروجی‌های مرتبط با تورق در بتن را ارائه می‌دهند. ذکر این نکته ضروری است که در مدل‌سازی صورت گرفته در نرم‌افزار آباکوس فرض شده است که بتن ماده‌ای همگن با حفرات هم‌اندازه بوده و از اثر مصرف انرژی در تبخیر آب صرف‌نظر شده است. ضمن این‌که بخار آب نیز به عنوان یک گاز ایده‌آل در نظر گرفته شده است.

۴-۶- صحت‌سنجی نتایج

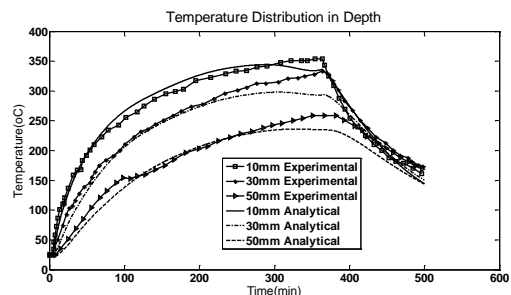
از آن جهت که پدیده تورق در بتن ارتباط مستقیم با توزیع دما در قطعه بتنی داشته و این پدیده به سبب ایجاد فشار بخار آب در حالت اشباع و به تبع آن ایجاد تنش‌های کششی ناشی از

است. نتایج به وضوح انتقال حرارت سریع تر در بتن با سنگدانه کوارتزی نسبت به دیگر انواع بتنی را بیان می کند، که این امر را می توان در بیشتر بودن ضریب انتقال حرارت این نوع از بتن نسبت به دیگر انواع مورد بررسی، جستجو کرد.

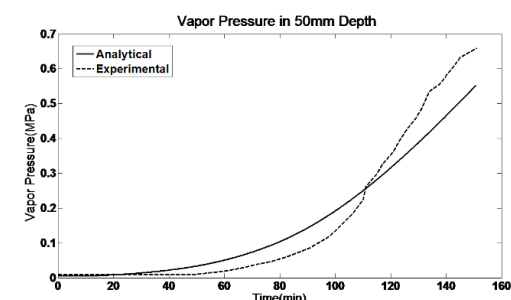
فرایند تبخیر آب در قطعه بتنی از دمای ۱۰۰ درجه سانتی-گراد شروع می شود، بنابراین روند نفوذ و رسیدن دمای ۱۰۰ درجه سانتی-گراد در قطعه بتنی از اهمیت بسزایی برخوردار است. شکل (۱۹) روند نفوذ دمای ۱۰۰ درجه سانتی-گراد تحت یک حریق مشخص (ISO834) در مقطع بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی-متر را به نمایش گذاشته است. در واقع این نمودار بیانگر این است که با توجه به مدل انتقال حرارت و نحوه توزیع دما در قطعه بتنی، در هر گام زمانی، کدام قسمت از بتن برای بار اول در معرض دمای ۱۰۰ درجه سانتی-گراد یا نزدیک ترین دمای فراتر از ۱۰۰ درجه سانتی-گراد، قرار گرفته است.



شکل ۱۸- نحوه توزیع دما در قطعه بتنی با سه نوع سنگدانه در اعماق ۱۰ و ۲۰ سانتی-متر



شکل ۱۵- نحوه توزیع دما در اعماق ۱۰، ۳۰ و ۵۰ میلی-متری از قطعه بتنی B500 در دو مدل آزمایشگاهی و تحلیلی



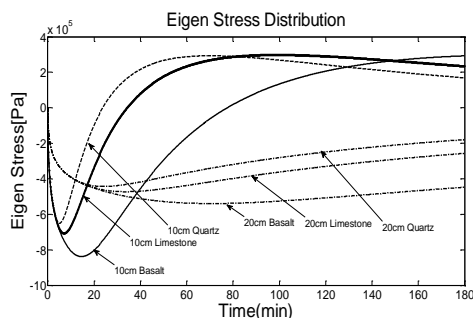
شکل ۱۶- فشار اشباع بخار در دو مدل تحلیلی و آزمایشگاهی در عمق 50mm

برای بررسی رفتار قطعات بتنی در برابر حریق، مدل المان محدودی توسط Mindeguia و همکاران ارائه شده است (Mindeguia, ۲۰۱۰) که مبنای صحت‌سنجی دیگر مدل ارائه شده در این تحقیق قرار گرفته است. قطعه بتنی مورد بررسی یک دیوار برشی بتنی با ضخامت 20cm می باشد که از یک وجه تحت حریق ISO834 قرار گرفته است، رسانایی گرمایی قطعه بتنی برابر $1W.m^{-1}.K^{-1}$ و مدول الاستیسیته اولیه و نسبت پواسون قطعه مذکور به ترتیب برابر 52Gpa و 0.25 بوده است. دیوار مذکور در شرایط اولیه دمای محیط ۲۰ درجه سانتی-گراد بوده است. شکل (۱۷) تنش محوری ایجاد شده در قطعه موردنظر در دو مدل المان محدود را در زمان‌های ۵، ۱۰ و ۲۵ دقیقه نشان می دهد. همان گونه که از شکل (۱۷) دریافت می شود نتایج دو مدل تحلیلی از قرابت مناسبی برخوردار می باشند.

۷-۴- نتایج مدل تحلیلی

۷-۴-۱- توزیع دما در قطعه بتنی

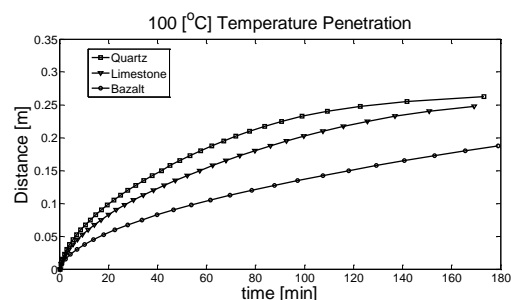
با توجه به مباحث پیشین، اولین گام در مدل سازی تحلیلی رفتار بتن در برابر حریق، نحوه توزیع و انتقال حرارت در قطعه بتنی می باشد. شکل (۱۸) نحوه توزیع دمای ناشی از حریق ISO834 در اعماق ۱۰ و ۲۰ سانتی-متری از سطح تماس حریق در قطعه بتنی مینا، با سه نوع سنگدانه مورد بررسی در دو مدل تحلیلی و مدل انتقال حرارت نرم افزار آباکوس، را به نمایش گذاشته



شکل ۲۰- توزیع تنش ویژه در اعماق مختلف مقاطع بتنی

در رابطه (۹)، E_{CT} ، مدول الاستیسیته بتن وابسته به دما (مطابق شکل (۸))، α ضریب انبساط بتن، ΔT اختلاف دمایی در یک زمان مشخص بین دو المان متوالی، ΔT_{avg} متوسط ΔT ، l فاصله المان تا سطح تحت حرارت، l ضخامت قطعه، می- باشد. با توجه به مباحث پیشین (بخش ۴-۴)، با دانستن میزان تنش کششی ایجاد شده در قسمت‌های مختلف بتن می‌توان امکان پوسته‌پوسته شدن بتن و رفتار قطعه بتنی در برابر حریق را مورد بررسی قرار داد. شکل (۲۱) تنش کششی ایجادشده تحت اثر حریق در اعماق ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری از سطح حرارت دیده بتن (در سه نوع خاص بتن مورد بررسی در این تحقیق و ناشی از حریق ISO834) در زمان‌های مختلف حریق را به نمایش گذاشته است. شکل مذکور گویای این مطلب هستند که تنش کششی ایجادشده در عمق ۱۰ سانتی‌متری بسیار بیشتر از عمق ۲۰ سانتی‌متری از سطح تحت حرارت بتن بوده که این مسئله گویای امکان رخ دادن تورق و کاهش ضخامت قطعه بتنی حداقل تا این عمق (۱۰ سانتی-متری) در حین حریق استاندارد خواهد بود.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، یکی از مسائلی که در بتن حین حریق ممکن است رخ دهد، تورق (پوسته‌پوسته شدن) می‌باشد. جدول (۳) زمان و عمق تورق اولیه در دو مدل تحلیلی و مدل نرم‌افزار آباکوس را به نمایش می‌گذارد. با توجه به فشارحفره‌ای و تنش کششی ایجاد شده می‌توان احتمال تورق در عمق بتن نسبت به زمان را محاسبه کرد. شکل (۲۲) به مقایسه امکان تورق در قطعه بتنی با سه نوع سنگ‌دانه تحت حریق ISO834 پرداخته است. با توجه به نمودارهای موجود با توجه به این شکل و جدول (۳) مشخص می‌شود که در اثر حریق استاندارد، بتن با سنگ‌دانه کوارتزی، بیشتر مستعد تورق بوده و سرعت این پدیده نیز در این نوع از بتن، نسبت به دیگر انواع آن، بیشتر خواهد بود. با توجه به شکل (۲۲) دریافت می‌شود که حریق می‌تواند درصد بالایی از عمق قطعه بتنی را تحت تأثیر خود قرار دهد و باعث ایجاد تورق در عمق قابل‌ملاحظه‌ای از قطعه شود که این مسئله باعث کاهش باربری قطعات بتنی به علت کاهش ضخامت می‌شود.



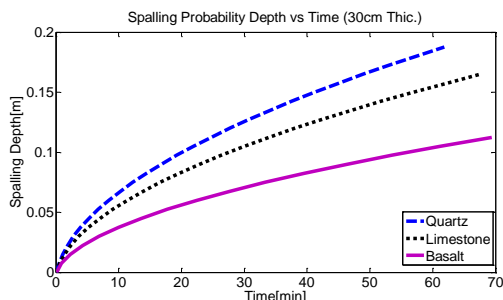
شکل ۱۹- روند پیشروی (در عمق) دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به زمان در سه نوع بتن

همان‌گونه که در شکل (۱۹) مشاهده می‌شود پیشروی دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در عمق بتن با سنگ‌دانه‌های کوارتزی، نسبت به دیگر انواع بتن، بیشتر بوده و این حقیقت را ثابت می‌کند با کاهش چگالی سنگ‌دانه‌های بتن انتقال حرارت سریع‌تر رخ می‌دهد و در ادامه باعث تسریع در افزایش فشار حفره‌ای در این نوع از بتن خواهد شد. ضمناً در ابتدای حریق که گرادیان دمایی بالاتر بوده است، سرعت نفوذ دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در هر سه نوع از بتن بیشتر می‌باشد.

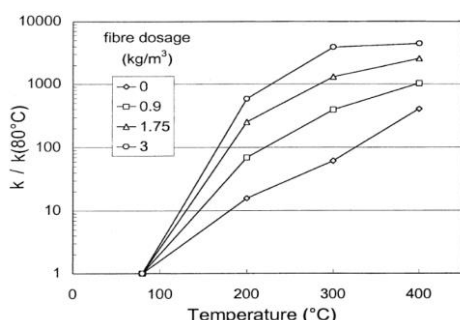
۴-۷-۲- تنش‌های داخلی حین توزیع دما

توزیع دمای ناشی از حریق در مقطع بتنی (با توجه به رابطه (۱))، به عواملی مثل چگالی، گرمای ویژه و رسانایی بتن وابسته است، که این مشخصه‌ها هر یک به‌نوبه خود نیز به دما وابسته‌اند، بنابراین توزیع دما در قطعه بتنی غیرخطی بوده و این توزیع غیرخطی، باعث ایجاد تنش‌های حرارتی در مقطع می‌شود. در این وضعیت، در سطح حرارت دیده، تنش‌های حرارتی و در داخل مقطع، تنش‌های کششی رخ می‌دهد. در حالتی که حرارت به صورت جانبی بر مقطع وارد می‌شود در داخل مقطع تنش‌های کششی رخ می‌دهد. این تنش‌ها به عنوان تنش‌های ویژه شناخته می‌شوند. تنش ویژه در هر گام زمانی در مقطع بتنی از رابطه (۹) محاسبه می‌شود. شکل (۲۰) نحوه توزیع تنش ویژه در مقطع بتنی با سنگ‌دانه‌های کوارتزی، آهکی و بازالتی، ناشی از حریق ISO834، را در اعماق ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری از سطح تحت حرارت به نمایش گذاشته است. همان‌گونه که از شکل مذکور دریافت می‌شود، در دماهای پایین‌تر، ابتدا تنش ویژه حالت فشاری داشته، در ادامه در دماهای بالاتر به سمت تنش کششی پیش رفته و به تبع در عمق ۱۰ سانتی‌متری نسبت به عمق ۲۰ سانتی‌متری و در نوع سنگ‌دانه کوارتزی این تغییر جهت تنش، سریع‌تر رخ می‌دهد.

$$\begin{aligned} \sigma_e &= E_{CT} * \alpha * \Delta T_e \\ \Delta T_e &= \Delta T - (\Delta T_{avg} + \Delta T_b) \\ \Delta T_b &= (\Delta T - \Delta T_{avg}) * \frac{z}{l} \end{aligned} \quad (9)$$



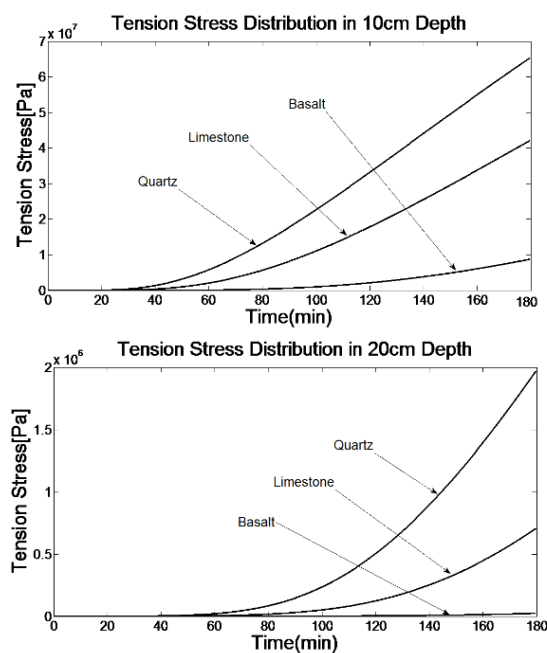
شکل ۲۲- عمق ممکن تورق در سه نوع بتن نسبت به زمان



شکل ۲۳- ضریب نفوذپذیری وابسته به دما و میزان فیبر پلی پروپیلن (Galle و Kalifa, ۲۰۰۱)

یکی از راهکارهای مقابله با حریق در سازه‌های بتنی استفاده از فیبرهای پلی پروپیلن در مخلوط بتنی می‌باشد. شکل (۲۳) ضریب نفوذپذیری وابسته به دما و میزان فیبر پلی پروپیلن را به نمایش می‌گذارد که این ضریب از تقسیم نفوذپذیری در هر دما نسبت به نفوذپذیری در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمده است. جدول (۵) اثر افزایش دما بر قطعه بتنی تحت حریق ISO834 با مشخصه‌های مادی ارائه شده در بخش ۴-۴، ولی این بار با اعمال ضریب افزایشی نفوذپذیری مذکور در مدل تحلیلی ارائه شده در این تحقیق را به نمایش می‌گذارد (بدین گونه که در هر دمایی از قطعه بتنی با توجه به شکل (۲۳) یک میزان نفوذپذیری جدید در مراحل تحلیل با در نظر گرفتن هر میزان مشخص از فیبر پلی پروپیلن وارد می‌گردد). نتایج گویای این اهمیت است که استفاده از حداقل 1.75 Kg/m³ فیبرهای پلی پروپیلن در مخلوط بتنی می‌تواند میزان حداکثر تورق قابل پیش‌بینی قطعه را تا کم‌تر از ۱۰ درصد ضخامت برساند که این مسئله باعث بهبود عملکرد رفتاری قطعه بتنی در برابر حریق خواهد شد و ایمنی قطعات بتنی را در برابر حریق افزایش خواهد داد. بتن به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی بوده است که در اکثر سازه‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین قطعات ساخته شده بتنی می‌توانند تحت انواع حریق قرار گیرند.

جهت بررسی بیشتر موضوع تورق در بتن با سه نوع سنگ‌دانه مورد بررسی با توجه به مدل المان محدود ارائه شده در بخش ۴-۴، اثر کاهش یا افزایش ضخامت قطعه بتنی بر پدیده تورق مورد بررسی قرار گرفته است. جدول (۴) اثر افزایش دما تحت حریق ISO834 بر قطعه بتنی با مشخصه‌های مادی ارائه شده در بخش ۴-۴، ولی این بار با مشخصه‌های متفاوت (ضخامت‌های ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰ سانتی‌متر) را به نمایش می‌گذارد. همان‌گونه که در جدول (۴) مشخص است سرعت رسیدن به حداکثر تورق در بتن با سنگ‌دانه‌های کوارتزی از دیگر انواع مورد بررسی بیشتر بوده که این اثر با کاهش ضخامت قطعه بیشتر دیده شده است، ضمن این‌که افزایش ضخامت قطعه موجب می‌شود که تورق در بتن از حد معینی فراتر نرود و باعث پایداری بیشتر قطعه بتنی تحت حریق ISO834 می‌شود. این موضوع اهمیت تعیین حداقل ضخامت قطعات بتنی برای پایداری بیشتر در برابر حریق را به اثبات می‌رساند.



شکل ۲۱- توزیع تنش کششی در اعماق ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری

جدول ۳- تورق اولیه در سه نوع بتن

نوع سنگ‌دانه	مدل تحلیلی		مدل آباکوس	
	زمان تورق اولیه (Sec)	عمق تورق اولیه (mm)	زمان تورق اولیه (Sec)	عمق تورق اولیه (mm)
کوارتزی	۷۵/۶	۱۵	۷۲/۵	۱۳/۵۳
آهکی	۹۱/۴	۲۰/۵	۸۷/۵	۱۸/۷۵
بازالتی	۱۰۸	۲۲/۵	۹۹/۸	۲۰/۷۴

جدول ۴- تورق در سه نوع بتن با ضخامت‌های متفاوت

نوع سنگ‌دانه	ضخامت قطعه	۱۰ سانتی‌متر	۲۰ سانتی‌متر	۳۰ سانتی‌متر	۴۰ سانتی‌متر
کوارتزی	زمان تورق نهایی (min)	۱۳/۴۷۷۵	۴۰/۳۸۷۵	۶۱/۸۵۲۵	۶۹/۲۵۵
	عمق تورق نهایی (mm)	۷۴/۵	۱۴۵	۱۸۷/۵	۲۰۰/۵
آهکی	زمان تورق نهایی (min)	۱۸/۱۳۵	۵۱/۴۱۲۵	۶۷/۶۵۷۵	۷۱/۳۴۷۵
	عمق تورق نهایی (mm)	۷۵	۱۴۰	۱۶۵	۱۷۰
بازالتی	زمان تورق نهایی (min)	۳۲/۹۶۲۵	۶۶/۷۸	۶۹/۴۱۲۵	۶۶/۴۴۲۵
	عمق تورق نهایی (mm)	۷۲/۵	۱۱۰	۱۱۲	۱۱۰/۵

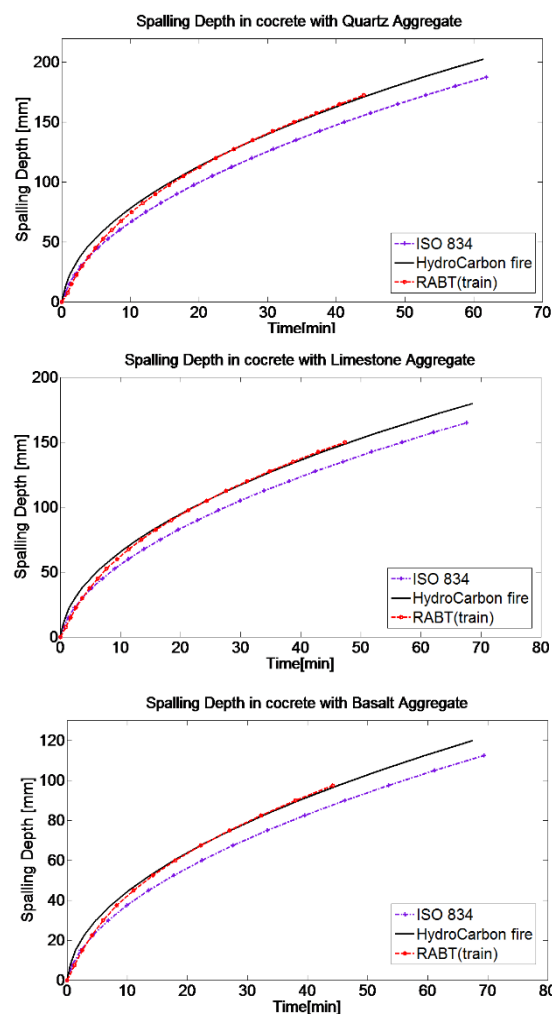
جدول ۵- اثر افزودنی فیبر پلی‌پروپیلن بر تورق بتن

نوع سنگ‌دانه / میزان افزودنی PP	کوارتزی		آهکی		بازالتی	
	زمان تورق نهایی (min)	عمق تورق نهایی (mm)	زمان تورق نهایی (min)	عمق تورق نهایی (mm)	زمان تورق نهایی (min)	عمق تورق نهایی (mm)
۰ کیلوگرم در مترمکعب	۴۱/۱۹۸	۱۵۰	۴۲/۴۳۵	۱۲۷/۵	۳۹/۵۷۷	۸۲/۵
۰/۹ کیلوگرم در مترمکعب	۳/۹۳۸	۳۷/۵	۳/۶۶۷	۳۰	۴/۲۹۶	۲۲/۵
۱/۷۵ کیلوگرم در مترمکعب	۲/۸۱۳	۳۰/۵	۲/۳۸۵	۲۲/۵	۲/۲۹۵	۱۵
۳ کیلوگرم در مترمکعب	۱/۰۸	۱۴	۱/۳۵	۱۲/۵	۰/۸۷۵	۷/۵

نمودارهای شکل (۲۴) اثر منحنی‌های حریق اعمالی بر قطعه بتنی (با توجه به شکل (۵)) با مشخصه‌های مادی ارائه شده در بخش ۴-۴، را به نمایش می‌گذارد. نتایج گویای این موضوع است که قرار گرفتن قطعات بتنی در محیط حریق هیدروکربنی ناشی از فرآورده‌های نفتی، باعث افزایش تورق قطعه شده است و ایمنی قطعات بتنی در برابر حریق در این محیط‌ها نیاز به توجه بیشتر می‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که با توجه به این مسئله که در منحنی حریق ISO834 نرخ افزایش دما از سرعت کم‌تری برخوردار می‌باشد (مطابق شکل (۵)) به تبع آن اشباع‌شدگی لایه‌ها از بخار آب و افزایش فشار حفره‌ای در عمق قطعه بتنی روند کندتری داشته که این عامل منجر به کاهش سرعت رخداد تورق در قطعه بتنی تحت این حریق نسبت به دیگر انواع حریق خواهد شد.

۵- نتیجه‌گیری

باتوجه به این‌که بتن به عنوان یک ماده پرمصرف در صنعت ساختمان می‌باشد نیاز است رفتار این ماده در برابر عوامل محیطی و از جمله در برابر حریق شناخته شود. یکی از مسائلی که در حین حریق یا پس از آن ممکن است برای بتن رخ دهد پوسته‌پوسته شدن یا تورق است که باعث کاهش سطح مقطع مؤثر بتن می‌شود. حین حریق با توجه به آب موجود در بتن فرایند تغییر فاز آب به بخار آب و به تبع آن جریان بخار آب و تشکیل لایه‌های اشباع در حفرات بتن شکل می‌گیرد. پس از تشکیل لایه‌های اشباع، به علت شکل‌گیری فشارحفره‌ای و در ادامه تنش‌های کششی ناشی از آن، بتن دچار ضعف ساختاری شده که در ادامه در صورت تجاوز تنش‌های کششی از مقاومت کششی در هر قسمت بتن می‌توان



شکل ۲۴- اثر منحنی حریق بر تورق در قطعه بتنی

- Anon, "ASTM E119: standard methods of fire test of building construction and materials", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, US, 2001.
- Breugel K, Van, Veen C, Van, Walraven JC, Braam CR, "Betonconstructies onder temperatuur- en krimpvervormingen (in Dutch)", Stichting BetonPrisma, Netherlands, 1998.
- Chung JH, Consolazio GR, "Numerical modeling of transport phenomena in reinforced concrete exposed to elevated temperatures", Cement and Concrete Research, 2005, 35 (3), 597-608.
- Gales J, Bisby LA, MacDougall CC, NMacLean KJ, "Transient High Temperature Stress, Relaxation of prestressing tendons in unbonded construction", Fire Safety Journal, 2009, 44 (4), 570-579.
- Groner N, "A decision model for recommending which building occupants should move where during fire emergencies", Fire Safety Journal, 2016, 80, 20-29.
- Harmathy T, "Concrete Design and Construction Series", Fire Safety Design and Concrete, Ottawa, Canada, 1993.
- Ichikawa Y, England GL, "Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperatures", Nuclear Engineering and Design, 2004, 228 (1-3), 245-259.
- Kalifa P, Che'ne' G, Galle' C, "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres From spalling to microstructure", Cement and Concrete Research, 2001, 31 (10), 1487-1499.
- Khaliq W, Taimur, "Mechanical and physical response of recycled aggregates high-strength concrete at elevated temperatures", Fire Safety Journal, 2018, 96, 203-214.
- Khoury GA, "Effect of fire on concrete and concrete structures", Progress in Structural Engineering and Materials, 2001, 2 (4), 429-447.
- Lukunaprasit P, "Unbonded post-tensioned concrete flat plates under 5-hours of fire", The 11th FIP Congress, Hamburg, Germany, 5-7 June, 1990.
- Mindeguia JC, Pimienta P, Noumowé A, Kanema M, "Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature-Experimental and numerical discussion on spalling risk", Cement and Concrete Research, 2010, 40 (3), 477-487.
- Mohd Ali AZ, Sanjayan J, Guerrieri M, "Performance of geopolymer high strength concrete wall panels and cylinders when exposed to a hydrocarbon fire", Construction and Building Materials, 2017, 137, 195-207.
- Post N, Korman R, "Implosion spares foundations", Engineering News Record, 2000, 12, 12-13.
- Qian C, Wang H, Sun W, Guo Z, Stroeven P, "Numerical calculations of vapour pressure in concrete exposed to fire", magazine of Concrete Research, 2005, 57 (3), 179-184.
- Torrent R, Frenzer G, "Management und Beratung Materialtechnische Abteilung Studie über Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Ueberdeckungsbetons auf der Baustelle (in German)", Bundesamt für Strassenbau, 1995, 106.
- Wagner W, Kruse A, "Properties of water and steam: The انتظار تورق در بتن را داشت. مدل عددی ارائه شده این تحقیق که تورق در بتن غیرمسلح به صورت یک بعدی را بررسی می کند، می تواند با دقت مناسبی، رفتار کلی بتن را در برابر حریق پیش بینی نماید. در کشور ایران حداقل سه نوع سنگدانه در ساختار بتن به کار می رود که این سنگدانه ها عبارتند از سنگدانه کوارتزی، آهکی و بازالتی. نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر این است که در صورت اعمال حریق بر قطعه بتنی، تغییر جهت تنش ویژه در بتن با سنگدانه های کوارتزی سریع تر شده و نیز در بتن با سنگدانه های کوارتزی امکان پیشروی تورق در قطعه، حین حریق، تا حد قابل توجهی از ضخامت قطعه وجود دارد که این پیشروی تورق در بتن با سنگدانه های آهکی و (به خصوص) بازالتی کم تر می باشد اما استفاده از حداقل 1.75 Kg/m^3 فیبرهای پلی پروپیلن در مخلوط بتنی می تواند این میزان تورق را به کم تر از ۱۰ درصد ضخامت برساند. با توجه به این که پدیده تورق در قطعات بتنی، به علت کاهش ضخامت قطعه، باعث کاهش عملکرد مقاومتی قطعه می شود، بنابراین بتن با سنگدانه های کوارتزی به مراقبت بیشتری در برابر حریق نیازمند است. علاوه بر این با توجه به این که با افزایش ضخامت قطعه بتنی امکان تورق و کاهش باربری در قطعه مذکور تحت حریق کم تر می شود، بنابراین نیازمند این است که حداقل ضخامت برای قطعات بتنی جهت مقابله با حریق در نظر گرفته شود. با توجه به امکان مواجهه قطعات بتنی در برابر انواع حریق، نتایج گویای این موضوع است که قرار گرفتن قطعات بتنی در محیط حریق هیدروکربنی ناشی از فرآورده های نفتی، باعث افزایش سرعت تورق در قطعه بتنی شده و قطعات بتنی در برابر این نوع از حریق نیاز به رعایت نکات ایمنی بیشتر می باشند.
- ۶- مراجع**
- Abaeian R, Pesaran Behbahani H, Jalali Moslem S, "Effects of high temperatures on mechanical behavior of high strength concrete reinforced with high performance synthetic macro polypropylene (HPP) fibres", Construction and Building Materials, 2018, 165 (1), 631-638.
- Ali MH, Dinkha YZ, Haido JH, "Mechanical properties and spalling at elevated temperature of high performance concrete made with reactive and waste inert powders", Engineering Science and Technology, an International Journal, 2016, 20 (2), 536-541.
- Anon, "Civiel technisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (CUR)", Proceedings of the first International Symposium, Safe and Reliable Tunnels, Innovative European Achievement, Prague, Czech, 4-6 February, 2004.
- Anon, "BS 1881: Methods of Testing Concrete, Part 5; Methods of Testing Hardened Concrete for Other than Strength", British Standards Institution, London, UK, 1970.

industrial standard IAPWS-IF97 for the thermodynamic properties and supplementary equations for other properties", Springer, Germany, 1998.

Yi Na-H, Choi SJ, Lee SW, Kim, JHJ, "Failure behavior of unbonded bi-directional prestressed concrete panels under RABT fire loading", Fire Safety Journal, 2015, 71, 123-133.

Zeiml M, Leithner D, Lackner R, Manh HA, "How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete", Cement and Concrete Research, 2006, 36 (5), 929-942.

EXTENDED ABSTRACT

Numerical Evaluation of Concrete Behavior under Fire Condition

Ehsan Dehghani*, Vahid Reza Afkhami

Faculty of Technology and Engineering, University of Qom, Qom, Iran

Received: 23 August 2017; Accepted: 25 April 2019

Keywords:

The concrete segment, Heat conduction, Pore pressure, Spalling, Polypropylene fiber.

1. Introduction

In the present paper, a numerical investigation aimed at determining the significance of temperature distribution, pore pressures, and thermally induced stresses for spalling of concrete under fire conditions is performed. In this paper three types of concrete are evaluated: concrete with quartz aggregate, concrete with limestone aggregate, concrete with basalt aggregate. All of these aggregates are abundant in our country and are used in concrete admixtures. Results show that spalling in Quartz-based concrete is higher than others and this concrete exposes to decreasing in strength under fire in comparison to others, and increasing concrete segment depth or adding the specified amount of polypropylene fiber in concrete mix can improve the fire performance of concrete pieces.

2. FE modeling

Matlab software is using for FEM of the concrete segment under fire conditions. According to Fig. 1 (FEM flowchart), after importing physical properties of concrete such as thickness, thermal conductivity, density, modulus of elasticity,..., of three cases of concrete (Quartz, Basalt, Limestone), first applying fire curve in the bottom of the concrete segment and getting element temperature at every step. Then due to the initial moisture content of elements, get pores specific volume and vapor content amount. In the following Matlab code calculate pore pressure and tension stress of every element and by comparing tension stress and tensile strength, spalling possibility and spalling depth and time are evaluated. In the end, the analysis continues with new depth and new moisture content of every element.

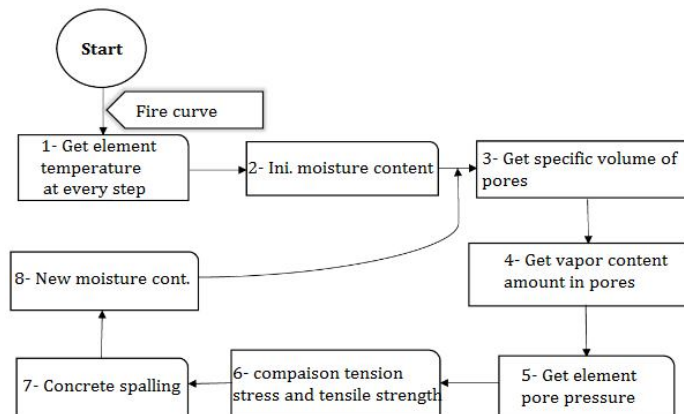


Fig. 1. FEM flowchart

* Corresponding Author

E-mail addresses: dehghani@qom.ac.ir (Ehsan Dehghani), varafkhami@gmail.com (Vahid Reza Afkhami).

3. Results and discussion

3.1. Temperature distribution

In order to investigate three cases of concrete (Quartz, Basalt, Limestone), it was found that heat transfer due to fire in Quartz-based concrete easier than others and based on Fig. 2, 100°C Temperature (evaporation temperature of water) penetration in the depth of this type of concrete is faster than two other cases in ISO834 fire curve.

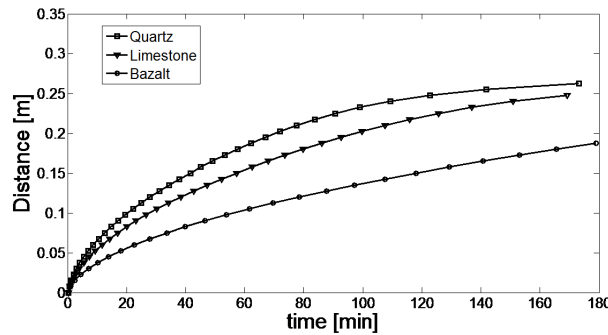


Fig. 2. 100°C Temperature penetration

3.2. Spalling Data

Another process that is done in this research is the Abaqus design of the concrete segment under fire condition equations. By using this mechanical software pore pressure and tension stress of concrete are derived and spalling time and depth conclude with joining some subroutines. Spalling results according to the FEM and Abaqus model are presented in Table 1. According to this table Spalling speed in Quartzian concrete is faster than others under ISO 834 fire curve.

Table 1. Results of Spalling

Concrete type	FE Model		Abaqus Model	
	Spalling time (s)	Spalling Depth (mm)	Spalling time (s)	Spalling Depth (mm)
Quartz	75.6	15	72.5	13.53
Limestone	91.4	20.5	87.5	18.75
Basalt	108	22.5	99.8	20.74

In the continuation of the discussion, the effect of concrete segment thickness is evaluated and specified that the stability of concrete under fire is improved. At the end of this study, the effect of adding polypropylene fiber in the concrete mix is checked, and adding 1.75Kg of this fiber in every cubic meter of the concrete mix to improve concrete fire behavior is suggested.

4. Conclusions

When concrete elements are exposed to elevated temperatures (under fire), numerous phenomena will occur, such as heat conduction, transport of water and gases, evaporation of liquid water in pores, dehydration of cement paste, thermal expansion of the solid skeleton, and fracturing and loss of material from the surface of the concrete elements, i.e. spalling. Most of the study on the concrete segment under fire condition is experimental research (Groner, 2016, Post, 2000) and numerical or analytical analysis in this issue is novel. This paper presents a numerical model for evaluating concrete segment behavior under fire. This model can derive the temperature distribution of the concrete segment under fire and show pore pressure and tension stress in elements and at the end display spalling time and depth. Results show that the concrete segments that based on Quartz aggregates have weak performance comparing with Limestone and Basalt-based concrete segments. Furthermore results pointing to the increased thickness of the concrete segment to improve stability conditions under fire. Moreover, in this study, it was found adding 1.75Kg polypropylene fiber in every cubic meter of the concrete mix can decreasing spalling depth less than one-tenth of concrete thickness under ISO 834 fire curve.

5. References

- Groner N, "A decision model for recommending which building occupants should move where during fire emergencies", *Fire Safety Journal*, 2016, 80, 20-29.
- Natick M, "MATLAB and Statistics Toolbox Release 2014a", Math Works Inc, Massachusetts, US, 2014.
- Post N, Korman R, "Implosion spares foundations", *Engineering News Record*, 2000, 12, 12-13.
- Smith M, "ABAQUS/Standard User's Manual 6.9", Providence, RI, US, 2016.