

بررسی اثر افزایش دما بر پدیده پوسته شدن در قطعات بتنی پر مقاومت

وحیدرضا افخمی^{1*}، احسان دهقانی²

¹ دکترای مهندسی سازه، دانشگاه قم

² استادیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم

دریافت: 1401/4/23، بازنگری: 1401/11/3، پذیرش: 1402/1/26، نشر آنلاین: 1402/1/26

چکیده

در دنیای امروز استفاده از بتن پرمقاومت در صنعت ساختمانی روبه افزایش بوده و نیاز است که رفتار اجزای ساخته شده از این نوع بتن، در برابر عوامل گوناگون و از جمله افزایش دما، مورد بررسی قرار گیرد. بیشتر تحقیقات صورت گرفته در بررسی اثر افزایش دما بر رفتار قطعات بتنی پرمقاومت، بر مبنای مدل‌های آزمایشگاهی بوده است و بررسی‌های نرم‌افزاری و عددی در این زمینه کمتر بوده است. در این تحقیق، با معرفی یک مدل تحلیلی، به بررسی رفتاری انواع قطعات بتنی ساخته شده از بتن پرمقاومت در برابر افزایش دما پرداخته شده است و هم‌زمان پدیده پوسته شدن بتن تحت حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق پیش‌رو، ارتباط بین نرخ حرارت‌دهی و زمان پوسته شدن اولیه با معرفی یک رابطه، مشخص شده است. نتایج حاصل از این تحقیق گویای این مسئله است که افزایش دما بر قطعات بتنی پرمقاومتی که کاهش نفوذپذیری آن‌ها نسبت به رده‌های پائین‌تر خود بیشتر است، صرف‌نظر از رده آن، اثر بیشتری داشته، طوری که اجزای ساخته شده از بتن رده 80 مگاپاسکال این تحقیق، در معرض بیشتر پدیده پوسته شدن، حین افزایش دما، بوده و سرعت پوسته شدن اولیه در این نوع خاص از بتن می‌تواند تا دو برابر دیگر رده‌های بتن پرمقاومت باشد، ضمن این‌که در نرخ حرارت‌دهی کم ($2/5^{\circ}\text{C}/\text{min}$)، برخلاف نرخ حرارت‌دهی بالای ($15^{\circ}\text{C}/\text{min}$) اجزای بتنی، تفاوت قابل ملاحظه‌ای در سرعت پوسته شدن اولیه در رده‌های مختلف بتن پرمقاومت مشاهده نمی‌شود.

کلیدواژه‌ها: بتن پرمقاومت، نرخ حرارت‌دهی، نفوذپذیری، پوسته شدن.

1- مقدمه

جریان بخار آب حین حریق می‌باشد. برای افزایش نفوذپذیری و بهبود عملکرد دال‌های بتن در برابر حریق، از افزودنی‌هایی استفاده می‌شود که برخی از این افزودنی‌ها مثل جوت و دیگر مواد گیاهی و سلولزی هستند که به‌عنوان افزودنی‌های طبیعی شناخته می‌شوند (Ozawa و Morimoto، 2014).

برخی دیگر از افزودنی‌ها مثل الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف پلی‌وینیل‌الکل از افزودنی‌های مصنوعی هستند که حین افزایش دما با ذوب شدن خود کمک به افزایش درجه‌های نفوذپذیری بتن می‌کنند (Heo و همکاران، 2011؛ Thakre و همکاران، 2014).

دستورالعمل‌هایی که در آئین‌نامه‌ها (ASTM E119، 2001) در جهت بهبود عملکرد اجزای بتنی در برابر افزایش دما و حریق ارائه شده، اغلب بر مبنای آزمایش‌هایی صورت گرفته است که قدیمی و غیرواقعی بوده‌اند (Matesova و همکاران، 2006). با این اوصاف در بیشتر موارد آزمایش روی اجزای بتنی با اندازه

در چند دهه اخیر رسیدن به مقاومت فشاری بالا در بتن از اهداف اصلی مهندسی سازه بوده است. با پیدایش بتن پرمقاومت این امکان فراهم گشت تا ساختمان‌ها و برج‌های بتنی مرتفع که دارای ظرافت و هنر معماری بیشتری هستند، احداث شوند. رده‌بندی بتن پرمقاومت براساس استانداردها و آئین‌نامه‌های مختلف، متفاوت می‌باشد، اما عمدتاً به بتن‌های با مقاومت فشاری بیش از 50 یا 60 مگاپاسکال تا حدود 100 مگاپاسکال، بتن پرمقاومت اطلاق می‌شود (CEB-FIP، 2012). در کشور ما نیز هم‌زمان با افزایش ساخت برج‌های بلندمرتبه و تنوع ایجاد شده در طرح‌های معماری، روند استفاده از بتن‌های پرمقاومت افزایش یافته است.

یکی از مهم‌ترین عواملی که بر رفتار قطعات بتنی پرمقاومت در برابر حریق مؤثر است، نفوذپذیری این قطعات در برابر نفوذ



حرارت‌دهی، شرایط آزمایشگاهی و اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن مبنای بررسی قرار گرفته است. نتایج بیانگر این است که اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن اثر قابل توجهی در کاهش ریسک پوسته شدن در بتن‌های پرمقاومت خواهد داشت.

Li و همکاران (2018) اثر اندازه سنگ‌دانه‌ها و الیاف پلی‌پروپیلن بر نفوذپذیری بتن با عملکرد بسیار بالا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج گویای افزایش نفوذپذیری و بالتبع آن عملکرد مناسب‌تر در برابر حریق این‌گونه بتن‌ها با اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن و همچنین افزایش اندازه سنگ‌دانه‌ها خواهد بود.

Abaeian و همکاران (2018) اثر الیاف پلی‌پروپیلن بر رفتار بتن پرمقاومت در برابر اعمال حرارت پرداخته و اثر نوع خاصی از این الیاف‌ها که با نام HPP 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 الیاف‌های مذکور در یک مترمکعب از مخلوط بتنی، بیشترین تأثیر بر بهبود رفتار قطعات بتنی در برابر افزایش دما خواهد داشت.

Khaliq و Waheed (2017) با به چالش کشیدن استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در بتن با مقاومت بالا، پیشنهاد استفاده از بتن‌های اسفنجی پرمقاومت جهت مقابله با اثرات افزایش دما بر رفتار این‌گونه بتن‌ها ارائه کرده‌اند.

در پژوهشی Khaliq و Taimur (2018) به بررسی رفتاری بتن پرمقاومت 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 پرمقاومت 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.

Mohd Ali و همکاران (2017) عملکرد قطعات بتنی پرمقاومت دارای افزودنی‌های ژئوپلیمری را مورد ارزیابی قرار داده و حد معینی از این افزودنی‌ها برای جلوگیری از پدیده پوسته شدن در برابر حریق هیدروکربنی را پیشنهاد کرده‌اند.

Ali و همکاران (2016) عملکرد اثر افزودنی‌هایی مثل شیشه‌های ضایعاتی و نانوسیلیکاها در بتن پرمقاومت را مورد بررسی قرار داده و با بررسی مشخصه‌های مقاومتی و فیزیکی قطعات بتنی ساخته شده از این نوع از بتن پس از حریق اعمالی، نظر به بهبود عملکرد قطعات بتنی پرمقاومت دارای افزودنی شیشه‌ای داشته‌اند.

Mohammed و همکاران (2016) با افزودن نوع خاصی از CFRP که با نام NSM شناخته می‌شود در قطعه بتنی پرمقاومت، اثر افزایش دما بر این قطعات را نسبت به قطعات بتنی پرمقاومت بدون افزودنی مورد بررسی قرار داده و این نوع از افزودنی را در

واقعی انجام نشده و ممکن است عواملی که در واقعیت، بر رفتار در برابر حرارت این اجزای مؤثر است، در محیط آزمایشگاهی لحاظ نشده باشد. علاوه بر این، در اغلب موارد نتایج این آزمایش‌ها در برخی از سازه‌ها قابل اتکا نبوده و منجر به اشتباهات بزرگ در پیش‌بینی رفتار در برابر حرارت این سازه‌ها خواهد شد (Gales و همکاران، 2009).

ذکر این نکته ضروری است که در بسیاری موارد آزمایش‌ها بر روی اجزای بتنی ساخته شده از بتن معمولی صورت گرفته و عملکرد بتن پرمقاومت مورد بررسی کمتری قرار گرفته است. علی‌رغم رشد استفاده از بتن‌های پرمقاومت در سازه‌های مختلف، تحقیقات بیانگر این است که این نوع از بتن در برابر افزایش دما رفتار مناسبی ارائه نمی‌کند و پدیده پوسته شدن در این‌گونه بتن‌ها شایع‌تر می‌باشد (Zhao و همکاران، 2017).

سالیان متمادی است که مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای بر روی رفتار بتن‌های پرمقاومت در برابر افزایش دما صورت گرفته است. Kodur و همکاران (2003) عواملی مثل رسانایی دمایی، گرمای ویژه، ضریب انبساط حرارتی و افت وزنی در ستون‌های ساخته شده از بتن‌های پرمقاومت به‌همراه پدیده پوسته شدن و گسترش ترک در ستون‌های بتنی را مورد آزمایش و بررسی قرار دادند. نتایج گویای ضعف بیشتر ستون‌های ساخته شده از بتن‌های پرمقاومت نسبت به نوع بتن معمولی در برابر حریق و افزایش دما بوده است.

Matesova و همکاران (2006) به رفتار در برابر افزایش دمای قطعات بتنی پرمقاومت ساخته شده از سنگ‌دانه‌های کوارتزی و دولومیتی پرداخته و تصریح کردند که تغییر مشخصه‌های فیزیکی و نوع ترک‌های ایجاد شده در اثر حرارت در این قطعات، متأثر از نوع سنگ‌دانه‌های مصرفی بوده است.

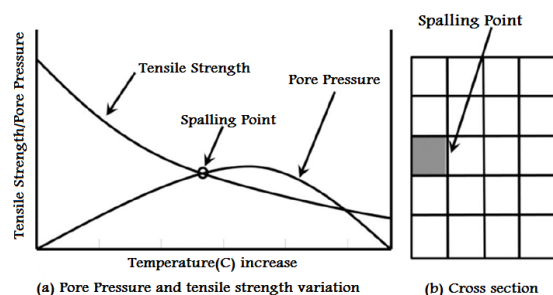
Gawin و همکاران (2004) با استفاده از روش‌های مبتنی بر تئوری الاستیسیته، به ارائه معادلاتی جهت محاسبه متغیرهای فیزیکی بتن پرمقاومت تحت افزایش دما مبادرت ورزیده و امکان افزایش فشارحفره‌ای حین اعمال حرارت، در این نوع خاص از بتن را مورد بررسی قرار داده‌اند.

Liu و همکاران (2018) با ارائه یک مدل عددی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی، میزان ریسک پوسته شدن در قطعات بتنی خام را تحت افزایش دما مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

Lo Monte و همکاران (2019) به بررسی آزمایشگاهی اثر بارگذاری دو محوره بر پوسته شدن دال بتنی حین حریق استاندارد پرداخته که مشاهدات آزمایش، گواه بر ایجاد جداشدن لایه‌ای (پوسته شدن) در هر دو صفحه تحت بار دال بوده است.

Phan (2007) به بررسی عوامل مؤثر بر ایجاد و توسعه فشار حفره‌ای تحت اثر افزایش دما و حریق پرداخته است. عواملی مثل نسبت آب به سیمان، شرایط نگهداری و مراقبت بتن، نرخ

هنگام اعمال حرارت بر قطعه بتنی، آب موجود در حفرات کم‌کم و با رسیدن به دمای 100 درجه سانتی‌گراد تبدیل به بخار آب شده و به‌علت گرادیان دمایی ایجاد شده، بخار آب شروع به جریان در لایه‌های داخلی بتن می‌کند و در مسیر حرکت خود، حفره‌ها را اشباع و یا نیمه‌اشباع می‌کند. هنگامی که جریان بخار آب به قسمت‌های سردتر بتن برسد، به تدریج سرعت جریان بخار آب کاهش خواهد یافت. در صورتی که نفوذپذیری جهت ادامه جریان کم باشد، جریان متوقف خواهد شد و حفرات انتهایی جریان به‌حالت اشباع در آمده و لایه‌ای از حفرات اشباع در مقابل ادامه جریان ایستادگی می‌کند. با مسدود شدن مسیر جریان بخار آب، فشار حفره‌ای در این حفرات شکل گرفته (مطابق شکل (1)) و به تدریج افزایش می‌یابد. فشار حفره‌ای ایجاد شده در حفرات لایه اشباع به‌همراه تنش‌های حرارتی ناشی از اعمال حرارت، منجر به ایجاد تنش‌های کششی در این قسمت از جزء بتنی شده که در صورت تجاوز تنش‌های کششی ایجاد شده از حد مقاومت کششی بتن (مطابق شکل (2))، پدیده جداسازی لایه‌ای بتن از این لایه اشباع رخ خواهد داد. این پدیده با نام پوسته شدن شناخته می‌شود که خود باعث کاهش سطح مقطع بتن و کاهش باربری قطعه بتنی خواهد شد (Consolazio و همکاران، 1998).



شکل 2- پوسته پوسته شدن در بتن (Raut و Kodur، 2011)

3- مدل تحلیلی پیش‌بینی رفتار بتن در برابر افزایش دما

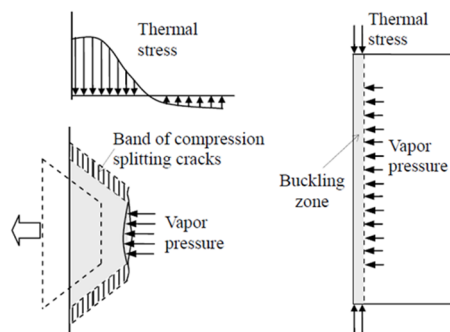
در این تحقیق، با ارائه یک مدل تحلیلی جهت بررسی اثر افزایش دما بر قطعات بتنی پرمقاومت، رفتار این اجزا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نرخ حرارت‌دهی و افزایش دما یکی از مهم‌ترین مشخصاتی می‌باشد که بر پدیده پوسته شدن در بتن تحت حرارت، اثرگذار است، که این عامل باعث ایجاد تغییر در سرعت پیشروی دما در مقاطع بتنی خواهد شد. علاوه بر این، تغییر در نرخ حرارت‌دهی منجر به تغییر در نحوه شکل‌گیری بخار آب و توسعه فشار حفره‌ای در حفرات بتن خواهد شد. به علاوه، با افزایش نرخ حرارت‌دهی، سرعت رخدادن پدیده پوسته شدن در بتن بیشتر خواهد شد. در این تحقیق از چندین الگوی نرخ حرارت‌دهی و افزایش دما در قطعات بتنی استفاده شده است تا درک مناسب‌تری

عملکرد بهتر بتن پرمقاومت در برابر افزایش دما پیشنهاد کرده‌اند. عمده تحقیقات صورت گرفته بر روی رفتار قطعات بتنی ساخته شده از بتن پرمقاومت در برابر افزایش دما به‌صورت آزمایشگاهی بوده و کمتر مدل تحلیلی در این راستا ارائه شده است. استفاده از مدل‌های نرم‌افزارهای مبتنی بر اجزای محدود می‌تواند درک صحیح‌تری از رفتار اجزای بتنی در برابر حریق یا اعمال حرارت ارائه کند.

در این تحقیق، جهت پیش‌بینی رفتار این قطعات در برابر افزایش دما، یک مدل تحلیلی مبتنی بر نرم‌افزار آباکوس ارائه می‌گردد که قابلیت شبیه‌سازی نحوه انتقال بخار آب درون لایه‌های بتن حین افزایش حریق و تعیین میزان پوسته شدن در دال بتنی را دارد. این مدل قادر به تحلیل حرارتی این قطعات بتنی که شامل پنج رده خاص مقاومتی 60، 70، 80، 90 و 100 مگاپاسکال از بتن پرمقاومت بوده و هم‌زمان اندرکنش‌های فازهای مختلف مواد موجود در بتن را در نظر می‌گیرد. در نتایج این تحقیق مواردی از جمله چگونگی توزیع و انتقال حرارت در اجزای بتنی، روند تشکیل فشار حفره‌ای و نحوه پوسته پوسته شدن در اجزای بتنی پرمقاومت می‌باشند که با ارائه این نتایج رفتار قطعات بتنی پرمقاومت تحت افزایش دما مورد بررسی بیشتر قرار می‌گیرند.

2- اثر افزایش دما بر رفتار قطعات بتنی

اعمال حرارت بر قطعات بتنی منجر به یکسری فعل و انفعالات در این اجزا خواهد شد که در نهایت منجر به کاهش مقاومت و ایمنی این قطعات می‌گردد. ایجاد تنش‌های حرارتی و پوسته شدن دو پدیده مهم هستند که در اثر نفوذ حرارت در اجزای بتنی رخ می‌دهد. با اعمال حرارت در سطح قطعه بتنی، به‌علت این‌که همه نقاط قطعه در یک وضعیت دمایی قرار ندارند، یک گرادیان دمایی ایجاد می‌شود که منجر به شکل‌گیری و توسعه تنش‌های داخلی (مطابق شکل (1)) در این اجزا خواهد شد. تنش‌های حرارتی نیز باعث ایجاد تغییر شکل‌های حرارتی حین و پس از اعمال حرارت خواهند شد (de Morais و همکاران، 2010).



شکل 1- فشار حفره‌ای و تنش‌های حرارتی در بتن تحت حرارت

(Zhao، 2012)

در بخش دوم، مدل سازی در آباکوس، نحوه جریان سیال (به صورت خاص آب یا بخار آب) در جزء بتنی به همراه نحوه شکل گیری تنش های کششی در نقاط مختلف این جز و در نهایت ضخامت لایه جدا شده و زمان پوسته شدن در قطعه را به نمایش می گذارد. در این قسمت از مدل از توانایی مدل سازی Soils در آباکوس بهره گرفته شده است. در این مدل که به صورت مجزا از مدل انتقال حرارت است، از نتایج مدل انتقال حرارت، به عنوان ورودی استفاده شده است. براساس فلوجارت مدل سازی ارائه شده در شکل (3)، در این قسمت از مدل سازی یک سری مشخصه ها وارد می گردد که شامل ضریب انبساط حرارتی قطعه بتنی و سیال، مدول الاستیسیته، نفوذپذیری، نسبت پواسون، مدول بالک اجزا، درصد اشباع شدگی، میزان تخلخل اولیه و منحنی جذب سطحی آب (نمودار فشار در مایع بر مبنای میزان اشباع شدگی) می باشند. با در نظر گرفتن این نکته که نرم افزار آباکوس تنها قادر به مدل سازی یک حالت از سیال می باشد در استخراج و ورود داده های مربوط به ضریب انبساط حرارتی و مدول بالک سیال فرض شده است که در دمای کمتر از 100 درجه سانتی گراد، سیال، ویژگی آب (مایع) را داشته است و در دمای فراتر از 150 درجه سانتی گراد، سیال حالت بخار آب (گاز) را دارد و در بین دمای 100 و 150 درجه سانتی گراد، سیال حالت مخلوطی از آب و بخار آب خواهد داشت و در این حدود دمایی، مشخصه های یاد شده از سیال، از درونیابی بین خطی داده های ارائه شده در دماهای 100 و 150 درجه سانتی گراد به دست می آید. ضریب انبساط حرارتی سیال (آب) در حالت مایع در دماهای 20 و 100 درجه سانتی گراد به ترتیب برابر 0/00207 (1/°C) و 0/000752 (1/°C) بوده و در صورتی که در دمای 150 درجه سانتی گراد کل حجم آب در حفرات تبدیل به بخار آب شود، برای دماهای 150 درجه سانتی گراد و فراتر از این دما (مطابق قانون ایده آل گازها) برای بخار آب خواهیم داشت.

$$V_{\phi} = \frac{nR\phi}{P} \quad (2)$$

در رابطه (2)، V_{ϕ} ، حجم بخار آب در دمای ϕ (به درجه کلونین)، n مولاریته آب، R ثابت گازها و P میزان فشار در محیط می باشند. حجم اولیه آب برابر 1 واحد فرض شده و با فرض حفرات به صورت کروی خواهیم داشت.

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

$$r_0 = \sqrt[3]{\frac{3(1)}{4\pi}}$$

که r_0 و r_{ϕ} به ترتیب شعاع اولیه حفره و شعاع در دمای ϕ می باشند. بنابراین کرنش در حفره از رابطه (4) به دست می آید.

از اثر افزایش دما در مقاطع بتنی ساخته شده از بتن پرمقاومت به دست آید. نرم افزار آباکوس به عنوان یکی از نرم افزارهای مشهور تحلیل های مهندسی مکانیک شناخته می شود (Abaqus، 2014). در این تحقیق از نتایج تحلیلی این نرم افزار جهت ارزیابی موضوع اعمال حرارت در قطعات بتنی پرمقاومت استفاده شده است. روند مدل سازی در نرم افزار آباکوس در دو بخش مجزا صورت گرفته است:

1- مدل انتقال حرارت قطعات بتنی پرمقاومت

2- مدل انتقال سیال (آب یا بخار آب) در حفرات قطعات بتنی پرمقاومت

در بخش اول، مدل سازی، نحوه توزیع دما در قطعه بتنی مشخص می گردد. در این مدل، انتقال حرارت یک جسم صلب که همگن فرض شده است، با مشخصات مادی مشخص، تشریح می شود. در ادامه تحلیل انتقال حرارت صورت می گیرد، که این تحلیل به صورت مجزا صورت گرفته است، به این مفهوم که مشخصه های دما به تنهایی (یک نوع) درجه آزادی در این تحلیل فرض شده است. در نرم افزار آباکوس نحوه توزیع دما در قطعات بتنی با معادله دیفرانسیلی سه بعدی فوریه بیان می گردد (Breugel و همکاران، 1998).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_c \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

$$\alpha_c = \frac{\lambda_c}{\rho_c c_c} \quad (1)$$

α_c ضریب نفوذ دمایی بتن (m^2/s)، ρ_c جرم حجمی بتن (kg/m^3)، λ_c رسانایی دمایی بتن (W/mK)، C_c گرمای ویژه بتن ($KJ/kg.m$)، T دمای بتن (درجه سانتی گراد)، t زمان (ثانیه)، می باشد.

مدل انتقال حرارت در آباکوس بر مبنای یک قطعه بتنی (دال بتنی غیر مسلح) پرمقاومت است که به صورت سه بعدی مدل سازی شده است و در سطح زیرین خود تحت افزایش دمای دینامیکی می باشد. علت انتخاب دال بتنی، به جای دیگر اجزای بتنی، مثل تیر و ستون، این است که معمولاً دال ها نسبت به دیگر اجزا از ضخامت کمتری برخوردار بوده و حرارت حریق و پوسته شدن نیز بیشتر این اعضا را تحت شعاع خود قرار می دهد. در ادامه با توجه به تحلیل انتقال حرارت، توزیع دما در طول مقطع بتنی حاصل می شود. با توجه به فلوجارت مدل سازی ارائه شده در شکل (3)، قبل از انجام تحلیل حرارتی قطعه بتنی، ابتدا مشخصه های فیزیکی و حرارتی شامل چگالی، رسانایی، گرمای ویژه، نحوه مش بندی، شرایط مرزی و گام های تحلیل حرارتی با توجه به ابعاد قطعات و دقت تحلیل اعمال می شود آنگاه تحلیل حرارتی انجام شده که نتایج آن شامل شار حرارتی و دمای لحظه ای نقاط جهت استفاده در مدل دوم خواهد بود.

$$\varepsilon_{\phi} = \frac{r_{\phi}}{r_0} \quad (4)$$

در نهایت با توجه به کرنش (ε_{ϕ}) ، ضریب انبساط حرارتی بخار آب در دمای φ ، α_{ϕ} ، به دست می‌آید.

$$\alpha_{\phi} = \frac{\varepsilon_{\phi}}{\Delta\phi} \quad (5)$$

در رابطه (5)، $\Delta\phi$ تغییرات دما نسبت به دمای اولیه 20 درجه سانتی‌گراد محیط می‌باشد. مدول بالک سیال نیز از رابطه (6) به دست آمده است.

$$K_{\phi-fluid} = \frac{P_{\phi}}{\varepsilon_{\phi}} \quad (6)$$

در رابطه (6)، $K_{\phi-fluid}$ مدول بالک سیال در دمای φ و P_{ϕ} فشار در سیال می‌باشد که از رابطه (7) به دست می‌آید.

$$P_{\phi} = \frac{nR\phi}{(1+\alpha_c\Delta\phi)} \quad (7)$$

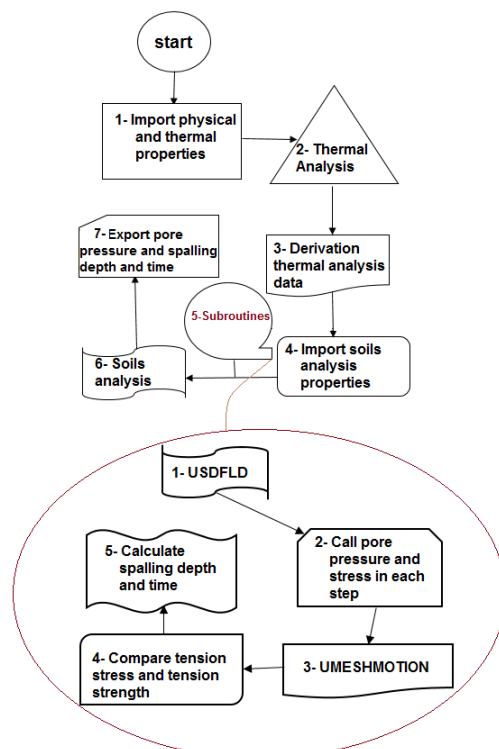
در رابطه (7)، α_c ضریب انبساط حرارتی بتن و برابر $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ در نظر گرفته شده است. یکی از سابروتین‌های (زیربرنامه‌های) مطرح در نرم‌افزار آباکوس، سابروتین USDFLD می‌باشد، که در معرفی و فراخوان ویژگی‌های مواد مرکب (مثل بتن) کارایی دارد. در هنگام استفاده از این سابروتین، مشخصات مادی اجزا می‌تواند به صورت تابعی از متغیرها (Field Variables) تعریف شود.

سابروتین USDFLD این امکان را فراهم می‌کند، نتایج مربوط به تنش‌ها، کرنش‌ها و ... در هر مرحله از تحلیل، در نقاط تجمع¹ ذخیره و قابل دسترسی شود. روند تحلیل در نرم‌افزار آباکوس به گونه‌ای است که در ابتدای محاسبه تنش و سختی المان‌ها، درون‌یابی مقادیر گره‌های اطراف جهت استفاده در نقاط تجمع صورت می‌گیرد. اما هنگامی که سابروتین USDFLD وارد مدل شود، مقادیر معرفی شده در این نرم‌افزار می‌تواند جایگزین مقادیر درون‌یابی شده گردد. جهت مشاهده و ذخیره مقادیر متغیرها از SDVs² استفاده می‌شود.

از دیگر سابروتین‌هایی که در مواقعی که نیاز به حذف یا به‌روز شدن مش‌بندی المان است، از آن استفاده می‌شود، سابروتین UMESHMOTION می‌باشد. امکانات این سابروتین با استفاده از فعال‌سازی Adaptive Mesh Algorithm (ADA) یا مش تطبیقی در نرم‌افزار آباکوس خواهد بود. این الگوریتم امکان به‌روز کردن و حذف المان‌ها در مواقعی مثل پوسته شدن در بتن، حین حریق، را فراهم می‌کند. در واقع این سابروتین با استفاده از الگوریتم مذکور، موجب مکان‌دهی و جایابی جدید در گره‌ها، پس از حذف یا منحرف شدن قسمتی از المان‌های مش‌بندی شده، خواهد شد. در این تحقیق برای به‌دست آوردن عمق و زمان لایه پوسته شدن از سابروتین‌های USDFLD و UMESHMOTION استفاده شده است (Abaqus-subroutine, 2010). با استفاده از سابروتین USDFLD تنش‌های کششی و فشار حفره‌ای ایجاد شده در هر مرحله در قطعه بتنی فراخوانده می‌شود و با بهره‌گیری از سابروتین UMESHMOTION در هر مرحله بین تنش کششی با مقاومت کششی بتن مقایسه‌ای صورت گرفته و در صورتی که تنش کششی از حد مجاز مقاومت کششی تجاوز کند عملیات تحلیل متوقف شده و عمق و زمان پوسته شدن به دست می‌آید. شکل (3) (قسمت پایینی) فلوجارت عملکردی دو سابروتین مذکور را نشان می‌دهد. سابروتین‌های مذکور به‌عنوان یکی از مراحل تحلیل در مدل وارد شده و نتایج مربوط به پوسته شدن در بتن را ارائه می‌دهند. در مدل‌سازی تحلیلی در نرم‌افزار آباکوس فرض شده است که بتن ماده‌ای همگن بوده و از اثر مصرف انرژی در تبخیر شدن آب صرف‌نظر شده است، علاوه بر این بخار آب به‌عنوان یک گاز ایده‌آل در نظر گرفته شده است.

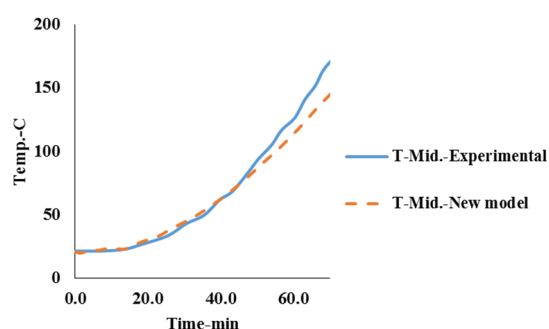
4- صحت‌سنجی مدل تحلیلی

در این بخش از تحقیق، صحت مدل تحلیلی ارائه شده، با مقایسه نتایج این مدل با نتایج مدل‌های آزمایشگاهی و عددی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل آزمایشگاهی یک دال تخت با ابعاد

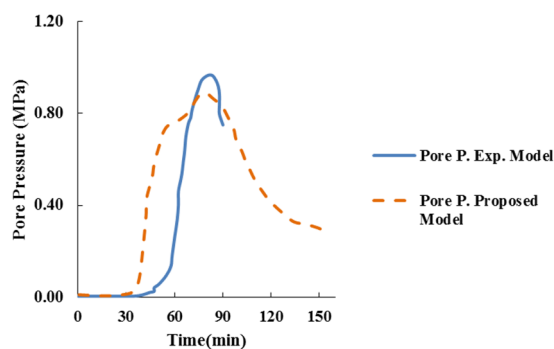


شکل 3- فلوجارت مدل‌سازی و عملکرد سابروتین

در ادامه دال بتنی B40، با دمای اولیه 20 درجه سانتی‌گراد، تحت افزایش دمای 10°C/min قرار می‌گیرد. شکل (6) نحوه توزیع دما در عمق 6 سانتی‌متری از سطح تحت حرارت مقطع به نمایش می‌گذارد. در ادامه شکل (7) نیز نحوه توسعه فشارحفره‌ای در وسط قطعه بتنی (عمق 6 سانتی‌متری)، تحت این افزایش دما، به نمایش می‌گذارند. با توجه به اشکال (4) تا (7)، مدل تحلیلی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی (با در نظر گرفتن شرایط مدل آزمایشگاهی در مقابل شرایط مدل تحلیلی و عوامل گوناگونی که بر نحوه اعمال حرارت، فازهای مختلف سیال در حفرات، کیفیت و همگن بودن بتن و ... می‌توانند بر نتایج آزمایشگاهی اثرگذار باشند) از دقت مناسبی برخوردار است (Felicetti و همکاران، 2017).



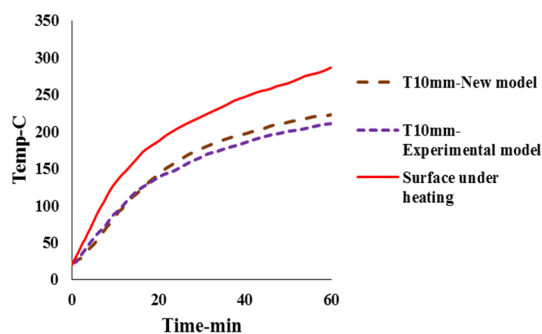
شکل 6- توزیع دما در مرکز قطعه دال B40



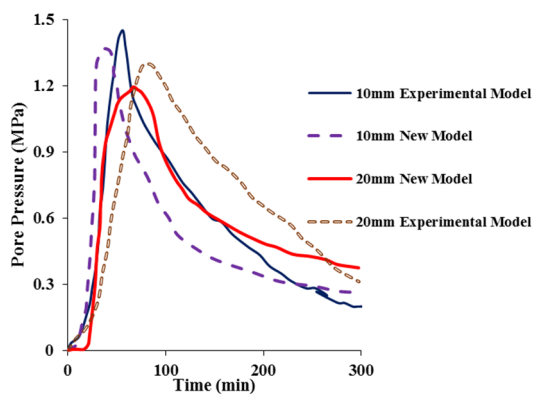
شکل 7- فشارحفره‌ای در مرکز قطعه دال B40

در ادامه مدل ارائه شده با مدل عددی Zeimi و همکاران (2006) مورد مقایسه قرار گرفته است. مطابق شکل (8) یک قطعه بتنی با ابعاد 1.8×1.4 مترمربع و ضخامت 20 سانتی‌متر در سطحی به ابعاد 1.2×0.8 مترمربع تحت حرارت ناشی از حریق مطابق شکل (9) (عددی) قرار می‌گیرد. جدول (1) مشخصات اولیه مدل مذکور را به نمایش می‌گذارد. در مدل Zeimi پارامترهای مثل رسانایی دمایی، چگالی، گرمای ویژه، تخلخل و نفوذپذیری مشخصه‌های متغیر نسبت به دما معرفی شده است که طبق رابطه (8) تغییر می‌کند.

300×300×120 mm³ بوده که از وجه زیرین خود تحت حرارت می‌باشد (نمونه B40) (Mindeguia و همکاران، 2013). نفوذپذیری قطعه بتنی مذکور برابر $5.5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ و درصد رطوبت اولیه برابر 3.82 درصد می‌باشد. رسانایی دمایی دال بتنی برابر $2.55 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ و مدول الاستیسیته اولیه برابر 36 Gpa بوده است (Mindeguia و همکاران، 2012). منحنی اعمال حرارت در شکل (4) به نمایش گذاشته شده است. اعمال حرارت از طریق سطح زیرین اعمال شده است و دیگر وجوه در معرض حرارت نمی‌باشند و در شرایط اولیه (25 درجه سانتی‌گراد) قرار گرفته‌اند. شکل (4) نحوه توزیع دمای ناشی از منحنی اعمال حرارت یاد شده برحسب زمان در عمق 10 میلی‌متری از سطح زیرین دال بتنی در مدل‌های آزمایشگاهی و تحلیلی، به نمایش می‌گذارد. با توجه به مباحث پیشین، فشار حفره‌ای نقش اساسی در شکل‌گیری تنش‌های کششی و پدیده پوسته‌شدن در قطعه بتنی در اثر افزایش دما دارد، شکل (5) به مقایسه فشارحفره‌ای در دو مدل تحلیلی و آزمایشگاهی در عمق‌های 10 و 20 میلی‌متری از سطح تحت حرارت دال بتنی (بر اثر منحنی اعمال حرارت اشاره شده در شکل (4)) می‌پردازد.

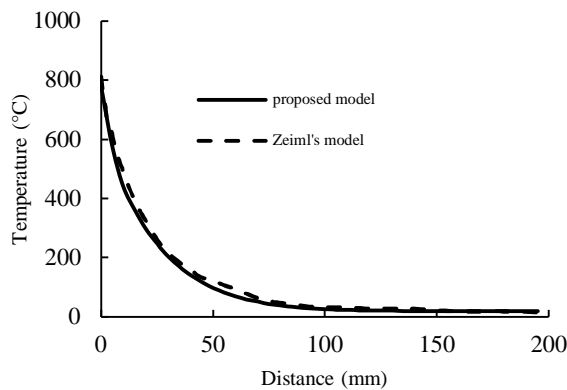


شکل 4- منحنی اعمال حرارت و توزیع دما در عمق 10 میلی‌متری دال B40

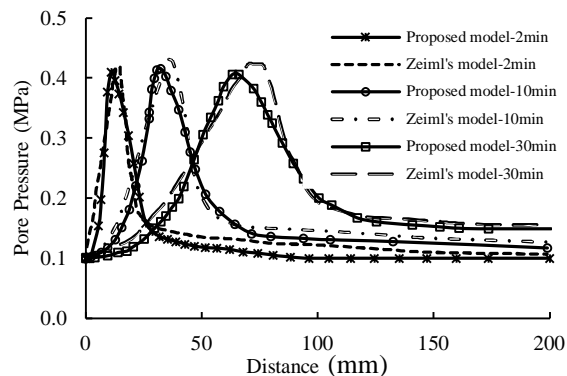


شکل 5- توزیع فشار حفره‌ای در اعماق 10 و 20 میلی‌متری از دال B40

شکل (10) نحوه توزیع دما در قطعه بتنی پس از گذشت 30 دقیقه از شروع حریق در دو مدل Zeiml و مدل سازی پیشنهادی به نمایش می گذارد. شکل (11) نیز نحوه توزیع فشارحرفه ای در زمان های 2، 10 و 30 دقیقه پس از شروع حریق به نمایش می گذارد.



شکل 10- نحوه توزیع دما در زمان 30 دقیقه در مدل های پیشنهادی و مدل Zeiml



شکل 11- نحوه توزیع فشارحرفه ای در مدل های پیشنهادی و مدل Zeiml

با در نظر گرفتن نمودارهای ارائه شده در شکل های (10) و (11)، مدل سازی صورت گرفته در مقایسه با مدل عددی Zeiml نیز از دقت مناسبی برخوردار می باشد.

5- نتایج مدل تحلیلی

هدف این تحقیق مدل سازی تحلیلی قطعات بتنی پرمقاومت (دال غیرمسلح) و بررسی اثر افزایش دما بر رفتار آن با در نظر گرفتن مقاومت فشاری بتن بین 60 تا 100 مگاپاسکال (حد بتن پرمقاومت) می باشد. دلیل بررسی رفتار قطعات بتنی غیرمسلح در این تحقیق این بوده است که افزایش دمای اعمال شده در اجزای بتنی مسلح، به علت پوشش بتنی موجود بر اجزای فولادی، بیشتر

$$\lambda = \lambda_0 - 0.006 (T - T_0)$$

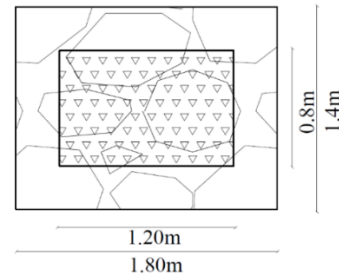
$$\rho = \rho_0 - 0.3 (T - T_0)$$

$$C_p = C_{p0} - 0.0005 (T - T_0)$$

$$n = n_0 - 0.0001$$

$$K = 10^{-16} K_0^{0.00426T}$$

(8)

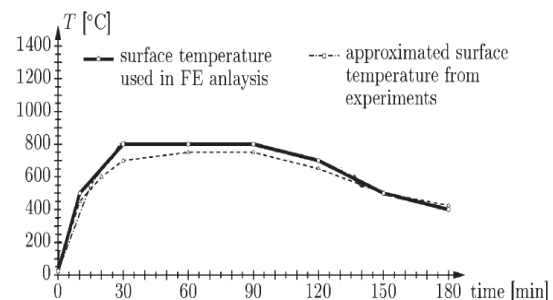


شکل 8- سطح تحت حرارت قطعه بتنی مدل Zeiml

جدول 1- مشخصات اولیه مدل Zeiml و همکاران (2006)

مقدار	مشخصه
1.8×1.4×0.2	ابعاد (m ³)
6.72	رسانایی دمایی (KJ/h.m.K)
1.2×10 ⁽⁻¹⁶⁾	نفوذپذیری اولیه (m ²)
2362	چگالی (Kg/m ³)
0.142	تخلخل
0.4	اشباع شدگی
0.9	گرمای ویژه (KJ/Kg.K)

در رابطه (8)، λ و λ_0 به ترتیب رسانایی دمایی بتن در دمای T و رسانایی دمایی اولیه بتن، ρ و ρ_0 به ترتیب چگالی بتن در دمای T و چگالی اولیه بتن، C_p و C_{p0} به ترتیب گرمای ویژه بتن در دمای T و گرمای ویژه اولیه بتن، n و n_0 به ترتیب میزان تخلخل قطعه بتنی در دمای T و میزان تخلخل اولیه بتن، K و K_0 به ترتیب نفوذپذیری بتن در دمای T و نفوذپذیری اولیه بتن می باشد. منحنی حریق عددی Zeiml مطابق شکل (9) بر قطعه بتنی مذکور اعمال شده و نتایج مدل سازی پیشنهادی با نتایج عددی مدل Zeiml مورد مقایسه قرار گرفته است.



شکل 9- منحنی حریق مورد استفاده Zeiml و همکاران (2006)

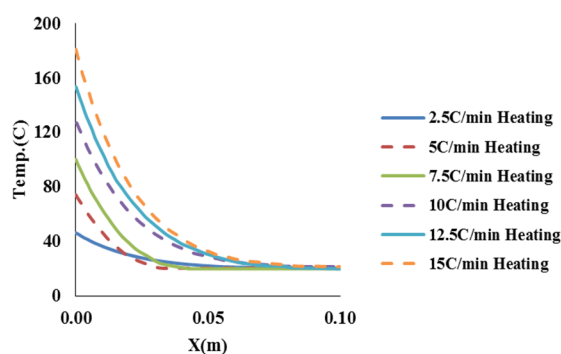
$$\theta = -0.002T + 0.2 \quad (12)$$

از مهم‌ترین مشخصه‌هایی که بر پدیده پوسته شدن در بتن اثر می‌گذارد، نرخ حرارت‌دهی جزء بتنی است (بهنام، 2017). نرخ حرارت‌دهی منجر به توسعه تبخیر و فشارحفره‌ای خواهد شد. زمانی که نرخ حرارت‌دهی بتن افزایش یابد، احتمال رخ دادن پوسته شدن در بتن بیشتر می‌شود. در این تحقیق جهت بررسی دقیق‌تر موضوع، از شش نرخ حرارت‌دهی مطابق رابطه (13) بهره گرفته شده است.

$$T' = aT + 20 \quad (13)$$

در رابطه (13)، T' ، دمای لحظه‌ای اعمالی (درجه سانتی‌گراد)، t ، زمان (دقیقه) و α ، نرخ حرارت‌دهی با شش الگوی $2.5^\circ\text{C}/\text{min}$ ، $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ، $7.5^\circ\text{C}/\text{min}$ ، $10^\circ\text{C}/\text{min}$ ، $12.5^\circ\text{C}/\text{min}$ و $15^\circ\text{C}/\text{min}$ می‌باشند. علاوه بر این رسانایی دمایی بتن برابر $2\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ گرمای ویژه بتن، $850\text{J}/\text{Kg}^\circ\text{C}$ در نظر گرفته شده است.

در این تحقیق فرض شده است که قطعات (دال‌های) بتنی پرمقاومت به ضخامت 10cm بوده و از وجه زیرین خود، تحت شش منحنی افزایش دما مطابق رابطه (13) به مدت یک ساعت، قرار گرفته‌اند. با توجه به مباحث پیشین، گام نخست در مدل‌سازی تحلیلی رفتار بتن در برابر افزایش دما، نحوه توزیع حرارت در دال بتنی می‌باشد. شکل (12) توزیع حرارت در 10 دقیقه پس از اعمال حرارت از قطعه بتنی مینای تحقیق تحت اثر شش الگوی حرارت‌دهی به نمایش می‌گذارد.



شکل 12- توزیع دما در عمق پس از 10 دقیقه از اعمال حرارت

با توجه به شکل (12) پس از 10 دقیقه، در الگوی حرارتی بالاتر از $7.5^\circ\text{C}/\text{min}$ ، دمای قطعه بتنی به فراتر از 100 درجه سانتی‌گراد رسیده است که این مطلب گویای ظرفیت آب موجود در حفرات بتن برای تبدیل شدن به بخار آب و به جریان افتادن است. با در نظر گرفتن این نکته که مهم‌ترین مشخصه تعیین کننده رفتار بتن در برابر افزایش دما و پیش‌بینی پوسته شدن در

بر قسمت بتنی اثر می‌گذارد و اجزای فولادی در حالت اولیه کمتر تحت اثر حرارت قرار گرفته و کاهش مقاومت این اجزا در ابتدا به دلیل کاهش مقاومت قسمت بتنی می‌باشد. با توجه به این که اصولاً روش و طرح اختلاط ثابتی برای تولید بتن پرمقاومت وجود ندارد، اطلاعات مرتبط با انواع بتن پرمقاومت، Khan و Lynsdale (2002) به عنوان مبنای این تحقیق قرار می‌گیرد. جدول (2) مشخصات انواع بتن پرمقاومت مورد نظر در این تحقیق را به نمایش می‌گذارد.

جدول 2- مشخصات بتن پرمقاومت

نوع / مشخصه	f_c (MPa)	f_t (MPa)	E_{mit} (MPa)	K ($\text{m}^2 \cdot 10^{-16}$)	EP (%)
1- رده C60	60	4/54	36406	1/12	32/95
2- رده C70	70	5/18	39323	0/64	31/8
3- رده C80	80	5/80	42038	0/47	30/84
4- رده C90	90	6/42	44588	0/33	30/02
5- رده C100	100	7/01	47000	0/26	29/30

در جدول (2)، f_c ، مقاومت فشاری بتن و K ، نفوذپذیری بتن می‌باشند و نیز f_t ، مقاومت کششی بتن، و EP ، درصد تخلخل بتن می‌باشد که طبق رابطه (9) به دست می‌آیند (Mindogua و همکاران، 2012؛ Felicetti و همکاران، 2017؛ Zeiml و همکاران، 2006؛ Khan و Lynsdale، 2002).

$$EP = 84.5f_c^{-0.23} \quad (9)$$

$$f_t = 0.14f_c^{0.85}$$

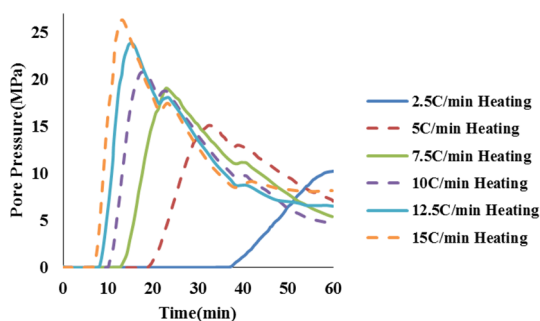
علاوه بر این در جدول (1)، E_i ، مدول الاستیسیته اولیه بتن است که طبق رابطه (10) به دست می‌آید (ACI 318، 2017).

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

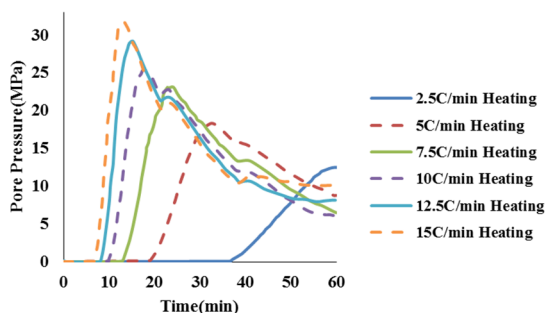
با توجه به این که مدول الاستیسیته بتن با افزایش دما دچار تغییر خواهد شد در این تحقیق این اثر طبق رابطه (11) در مدل تحلیلی اعمال گردیده است (Gert و Jianzhuang، 2004).

$$E_c = \begin{cases} E_i & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 60^\circ\text{C} \\ (0.83-0.0011T) E_i & T \geq 60^\circ\text{C} \end{cases} \quad (11)$$

در رابطه (11)، E_c ، مدول الاستیسیته وابسته به دمای بتن و T ، دمای بتن می‌باشد. یکی از مشخصه‌های بتن که بر اثر تغییرات دما دست‌خوش تغییر خواهد شد، ضریب پواسون بتن خواهد بود. رابطه (12) میزان ضریب پواسون وابسته به دمای بتن را به نمایش می‌گذارد (Bahr و همکاران، 2013).



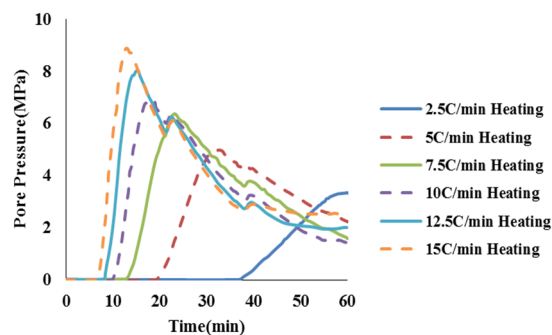
شکل 16- فشار حفره‌ای در عمق 1 سانتی‌متری قطعه بتنی C90



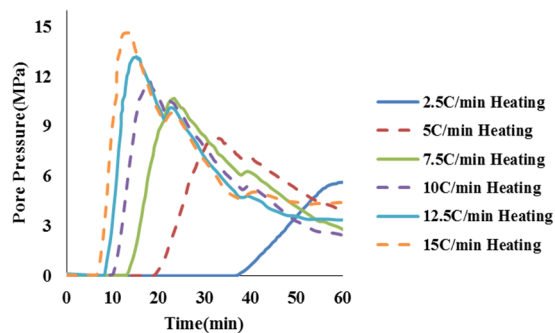
شکل 17- فشار حفره‌ای در عمق 1 سانتی‌متری قطعه بتنی C100

علاوه بر این با افزایش مقاومت فشاری بتن و تغییر رده بتن از C60 به C100، در حداکثر فشار حفره‌ای رشد قابل ملاحظه‌ای رخ داده و در همه الگوهای حرارتی بیش از دو برابر رشد، صورت گرفته است. یکی از موضوعات مهم در بررسی رفتار قطعات بتنی پرمقاومت در برابر افزایش دما، موضوع پوسته شدن در قطعه بتنی خواهد بود. در این قسمت از تحقیق با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد نحوه مدل‌سازی قطعات بتنی پرمقاومت در نرم‌افزار آباکوس و استفاده از سابروتین‌های USDFLD و UMESHMOTION که در بخش (3) به آن اشاره گردید، پدیده پوسته شدن را در این قطعات مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل‌های (18) و (19) به ترتیب عمق اولیه پوسته شدن و زمان پوسته شدن اولیه در قطعه بتنی مینا، تحت انواع مکانیزم‌های حرارت‌دهی مدنظر تحقیق، به نمایش می‌گذارند. شکل‌های (18) و (19)، بیانگر این مسئله هستند که الگوی حرارت‌دهی این تحقیق می‌تواند تا پوسته شدن اولیه بیش از 2 سانتی‌متری در قطعه بتنی پرمقاومت را ایجاد کند که حداکثر میزان پوسته شدن اولیه در الگوی حرارت‌دهی 2.5°C/min دیده می‌شود، به این دلیل که نفوذ بخار آب در این الگوی حرارت‌دهی در لایه‌های بتنی سرعت کمتری داشته و دیرتر سدهای اشباع شده حفرات شکل می‌گیرد بنابراین لایه‌های اشباع و حداکثر فشار حفره‌ای در عمق بیشتری از سطح تحت حرارت شکل می‌گیرد.

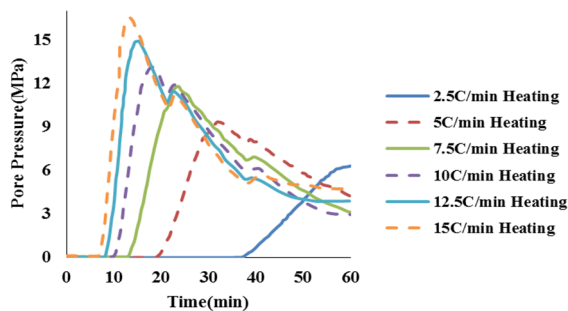
بتن، روند تشکیل و توسعه فشار حفره‌ای می‌باشد، در شکل‌های (13) تا (17) روند توسعه فشار حفره‌ای در عمق 1 سانتی‌متری از سطح تحت حرارت با انواع مکانیزم‌های حرارت‌دهی مدنظر، در بتن‌های پرمقاومت 60 تا 100 مگاپاسکال (مطابق جدول (2))، ارائه شده است. با توجه به شکل‌های (13) تا (17)، افزایش نرخ حرارت‌دهی قطعه بتنی نقش مهمی در افزایش میزان فشار حفره‌ای حداکثر و کاهش زمان رسیدن به حداکثر فشار حفره‌ای در قطعه بتنی پرمقاومت خواهد داشت، طوری که با افزایش نرخ حرارت‌دهی از 2.5°C/min تا 15°C/min (شش برابر شدن نرخ حرارت‌دهی)، حداکثر فشار حفره‌ای در همه رده‌های بتنی مورد بررسی بیش از 100 درصد افزایش داشته است و زمان رسیدن به حداکثر فشار حفره‌ای به حدود یک‌چهارم خواهد رسید.



شکل 13- فشار حفره‌ای در عمق 1 سانتی‌متری قطعه بتنی C60

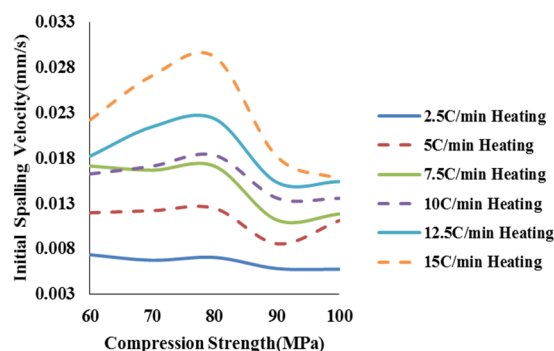


شکل 14- فشار حفره‌ای در عمق 1 سانتی‌متری قطعه بتنی C70



شکل 15- فشار حفره‌ای در عمق 1 سانتی‌متری قطعه بتنی C80

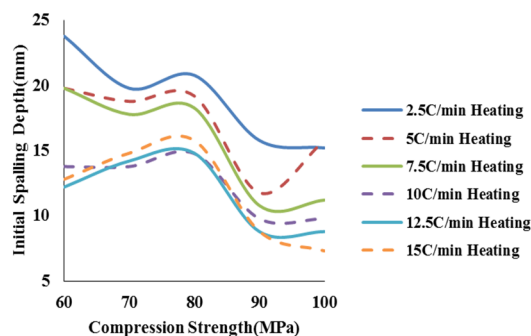
در رابطه (14)، t ، زمان پوسته شدن اولیه برحسب دقیقه و h ، نرخ حرارت دهی برحسب درجه سانتیگراد بر دقیقه می‌باشند. شکل (21) سرعت رسیدن به پوسته شدن اولیه در انواع قطعات بتنی پرمقاومت به نمایش می‌گذارد. با توجه به شکل (21)، در بتن با مقاومت 80 مگاپاسکال، سرعت رسیدن به پوسته شدن اولیه بیشتر بوده که علت این امر را می‌توان در بزرگتر بودن شیب افت نفوذپذیری در این رده از بتن (نسبت به رده مقاومتی کمتر از خود) در مقایسه با شیب افت نفوذپذیری رده‌های بالاتر مقاومتی بتن جستجو کرد. این مسئله بیانگر این مطلب است که صرفاً افزایش مقاومت فشاری بتن منجر به کاهش ضریب ایمنی ایمنی آن در برابر افزایش دما نشده و سرعت کاهش نفوذپذیری نیز در آن نقش دارد. ضمن این‌که با توجه به شکل (21) این نکته دریافت می‌شود که در نرخ حرارت دهی کم ($2.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$) تفاوت قابل ملاحظه‌ای در سرعت رخداد پوسته شدن اولیه در رده‌های مختلف بتن پرمقاومت مشاهده نمی‌شود. با این حال در نرخ حرارت دهی زیاد ($15^{\circ}\text{C}/\text{min}$) این تفاوت قابل ملاحظه بوده طوری که بتن رده‌ی مقاومت 80 مگاپاسکال، می‌تواند نسبت به دیگر انواع بتن پرمقاومت، سرعت رسیدن به پوسته شدن اولیه تا دو برابر را نیز داشته باشد.



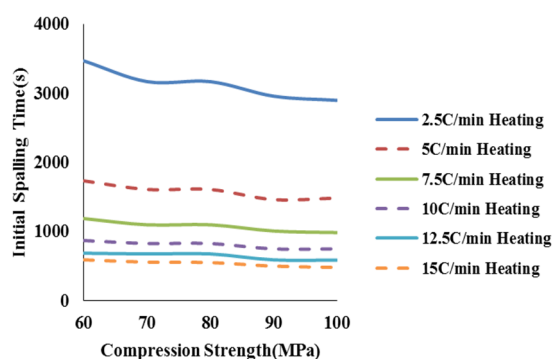
شکل 21- سرعت پوسته شدن اولیه انواع بتن با الگوهای مختلف حرارت

6- نتیجه‌گیری

با توجه به این‌که امروزه بتن پرمقاومت در صنعت ساختمانی از کاربرد ویژه‌ای برخوردار می‌باشد، نیاز است رفتار این ماده در برابر عوامل تهدید کننده محیطی و از جمله اعمال حرارت مورد بررسی جدی قرار گیرد. با افزایش دما در اجزای بتنی، آبی که در حفرات بتن جای گرفته کم‌کم شروع به تغییر فاز به حالت بخار آب داده و به علت تفاوت فشار در نقاط مختلف بتن، شروع به جریان به لایه‌های درونی سرد بتن کرده و در مسیر خود لایه‌های اشباع از حفرات ایجاد می‌کنند. با شکل‌گیری لایه‌های اشباع، فشارحفره‌ای در این قسمت از بتن شکل گرفته و در ادامه



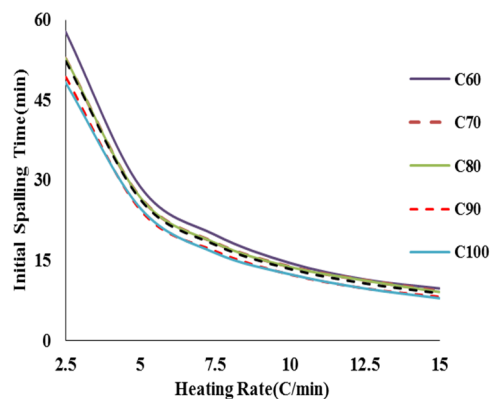
شکل 18- عمق پوسته شدن اولیه انواع بتن با الگوهای مختلف حرارت



شکل 19- زمان پوسته شدن اولیه انواع بتن با الگوهای مختلف حرارت

علاوه بر این زمان رسیدن به پوسته شدن اولیه با افزایش نرخ حرارت دهی کاهش می‌یابد طوری که می‌توان به‌طور تقریبی و مناسب بین نرخ حرارت دهی و زمان پوسته شدن اولیه در رده‌های مختلف بتن پرمقاومت (براساس شکل (20))، یک رابطه کلی ارائه کرد.

$$t = -0.0529h^3 + 1.798h^2 - 20.7h + 93.081 \quad (14)$$



شکل 20- پوسته شدن اولیه - نرخ حرارت دهی انواع بتن پرمقاومت

performance synthetic macro polypropylene (HPP) fibres", *Construction and Building Materials*, 2018, 165, 631-638.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.064>
Abaqus "Abaqus Analysis Theory Manual", Version 6.14, United Kingdom, 2014.

Abaqus-subroutine "Abaqus user subroutines, reference manual", Dassault Systèmes. USA, 2010.

ACI 318 "Building Code Requirements for Reinforced Concrete", Volume 2012, American Concrete Institute, US, 2012.

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. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.12.004>

ASTM E119 "Test method E119-01: standard methods of fire test of building construction and materials" Report no. E119-01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 2001.

Bahr O, Schaumann P, Bollen B, Bracke J, "Young's modulus and Poisson's ratio of concrete at high temperatures: Experimental investigations", *Materials and Design*, 2013, 45, 421-429. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.070>

Behnam B, "Post-earthquake Fire Analysis in Urban Structures", CRC Press Taylor & Francis Group, Edition 1, 2017.

Breugel K, Van.Veen CJ Braam CR, "Betonconstructies onder temperatuur", en krimpvervormingen *Betonpraktijkreeks*, 2, 1998.

CEB-FIP "Model Code 2010", Final draft Volume 1, Ernst & Sohn publishing house, Germany, 2012.

Consolazione GR, McVay MC, Rish JW, "Measurement and prediction of pore pressures in saturated cement mortar subjected to radiant heating", *ACI Materials Journal*, 1998, 95 (5), 525-536. <https://doi.org/10.14359/395>

de Morais MVG, Pliya P, Noumowé A, Beaucour A, Ortola S, "Contribution to the explanation of the spalling of small specimen without any mechanical restraint exposed to high temperature", *Nuclear Engineering and Design*, 2010, 240, 2655-2663. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.04.041>

Felicetti R, Lo Monte F, Pimienta P, "A new test method to study the influence of pore pressure on fracture behaviour of concrete during heating", *Cement and Concrete Research*, 94, 2017, 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.01.002>

Gales J, Bisby LA, MacDougall CC, NMacLean KJ, "Transient High Temperature Stress, Relaxation of prestressing tendons in unbonded construction", *Fire Safety Journal*, 2009, 570-579. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.11.006>

Gawin D, Pesavento F, Schrefer BA, "Modelling of deformations of high strength concrete at elevated temperatures", *Materials and Structures, Concrete Science and Engineering*, 2004, 37, 218-236.

Heo YS, Sanjayan JG, Han CG, Han MC, "Critical parameters of nylon and other fibres for spalling protection of high strength concrete in fire", *Materials and Structures*, 2011, 44, 599-610.

Iranian Building code "No. 2800 Standard", Tehran,

تنش‌های کششی ناشی از این فشار، بتن را دچار ضعف ساختاری می‌کند که در صورت تجاوز تنش‌های کششی از حد مقاومت کششی بتن، پوسته شدن در بتن شکل می‌گیرد. امکان رخدادن پدیده‌ی پوسته شدن در بتن پرمقاومت به‌علت کاهش درجه‌های نفوذپذیری و تخلخل بیشتر از دیگر انواع بتن می‌باشد. در این تحقیق به ارائه یک روش مدل‌سازی تحلیلی پرداخته شد که قادر است رفتار کلی قطعات بتنی پرمقاومت در برابر افزایش دما را پیش‌بینی نماید. در این مدل که توأم با استفاده از سابروتین‌های USDFLD و UMESHMOTION در محیط نرم‌افزار جامع آباکوس بوده است، اثر افزایش دما طبق یک مکانیزم خاص اعمال حرارت بر قطعه پرمقاومت بتنی، مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق یک رابطه بین زمان پوسته شدن اولیه و نرخ حرارت‌دهی بتن پرمقاومت ارائه شد که قادر است زمان رسیدن به پوسته شدن اولیه قطعات بتنی پرمقاومت، تحت انواع الگوهای حرارتی را پیش‌بینی کند. با توجه به این‌که در اکثر مراجع بتن با مقاومت فشاری فراتر از 50 مگاپاسکال به‌عنوان بتن پرمقاومت شناخته می‌شود، در بررسی صورت گرفته از 5 رده بتن پرمقاومت خاص از رده 60 تا 100 مگاپاسکال استفاده شده است. الگوی حرارتی افزایش دما، شش مکانیزم از 2/5 تا 15 درجه سانتی‌گراد در هر دقیقه بوده است. نتایج گویای این مطلب است که:

۱- افزایش نرخ حرارت‌دهی قطعه بتنی نقش مهمی در افزایش میزان فشارحفره‌ای حداکثر و کاهش زمان رسیدن به حداکثر فشارحفره‌ای در قطعه بتنی پرمقاومت خواهد داشت، طوری‌که با افزایش نرخ حرارت‌دهی از 2.5 °C/min تا 15 °C/min (شش برابر شدن نرخ حرارت‌دهی)، حداکثر فشارحفره‌ای در همه رده‌های بتنی مورد بررسی، بیش از 100 درصد افزایش داشته است و زمان رسیدن به حداکثر فشارحفره‌ای به 25 درصد رسیده است.

۲- با افزایش رده مقاومتی بتن، تحت افزایش دما، فشار حفره‌ای در قطعه بتنی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد یافت طوری‌که انتظار پوسته شدن بیش از 2 سانتی‌متری را در رده‌های بتن مورد بررسی وجود دارد.

۳- حداکثر میزان پوسته شدن اولیه در الگوی حرارت‌دهی 2.5°C/min تا حد 25 میلی‌متر دیده می‌شود.

۴- سرعت رسیدن به پوسته شدن اولیه با بزرگتر شدن شیب افت نفوذپذیری بیشتر شده، طوری‌که به‌همین دلیل، بتن رده مقاومت 80 مگاپاسکال، نسبت به دیگر انواع بتن پرمقاومت، سرعت رسیدن به پوسته شدن اولیه تا حد دو برابر داشته باشد.

7- مراجع

Abaeian R, Pesaran Behbahani H, Jalali Moslem S, "Effects of high temperatures on mechanical behavior of high strength concrete reinforced with high

- geopolymer high strength concrete wall panels and cylinders when exposed to a hydrocarbon fire", *Construction and Building Materials*, 2017, 137, 195-207.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.099>
- Ozawa M, Morimoto H, "Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-performance concrete", *Construction and Building Materials*, 2014, 71, 83-92.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.068>
- L Phan, "Spalling and mechanical properties of high strength concrete at high temperature", *Concrete under Severe Conditions, Environment and Loading*, 2007.
- Raut NK, Kodur VKR, "Response of High-Strength Concrete Columns under Design Fire Exposure", *Journal of Structural Engineering @ ASCE*, January 2011, 69-79.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000265](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000265)
- Shah S, Akashah F, Shafiq P, "Performance of high strength concrete subjected to elevated temperatures: a review", *Fire Techno*, 2019, 55 (5), 1571-1597.
- Thakre N, Rajput H, Saxena J, Mitangale H, "Comparative Study on Strength and Permeability of Pervious Concrete by Using Nylon and Polypropylene Fiber", *International Journal of Computing and Technology*, 2014, 1 (4).
- Thanaraj DP, Anand N, Prince Arulraj G, Zalok E, "Post-fire damage assessment and capacity based modeling of concrete exposed to elevated temperature", *International Journal of Damage Mechanics*, 2020, 29 (5), 748-779.
<https://doi.org/10.1177/1056789519881484>
- Wang Y, Duan Y, Ma S, Huang Z, "Behaviour of continuous reinforced concrete floor slabs subjected to different compartment fires", *Engineering Structures*, 197, 2019, 109445.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109445>
- Xu Q, Chen L, Li X, Han C, Wang Y, Zhang Y, "Comparative experimental study of fire resistance of two-way restrained and unrestrained precast concrete composite slabs", *Fire Safety Journal*, 118, December 2020, 103225.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103225>
- Zeiml M, Leithner D, Lackner R, Manh HA, "How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete", *Cement and Concrete Research*, 36, 2006, 929-942.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.018>
- Zhao J, "Fire-Induced Spalling Modeling of High-Performance Concrete", *Master of Science aan de Beijing University of Technology, China*, 2012.
- Zhao J, Zheng J, Peng G, Breugel KV, "Numerical analysis of heating rate effect on spalling of high-performance concrete under high temperature conditions", *Construction and Building Materials*, 2017, 152, 456-466.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.023>
- Iran: Edition 4, 2015.
- Jianzhuang X, Gert K, "Study on concrete at high temperature in China-an overview", *Fire Safety Journal*, 2004, 39, 89-103.
[https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(03\)00093-6](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(03)00093-6)
- Khalig W, Waheed F, "Mechanical response and spalling sensitivity of air entrained high-strength concrete at elevated temperatures", *Construction and Building Materials*, 2017, 150, 747-757.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.039>
- Khalig W, Taimur, "Mechanical and physical response of recycled aggregates high-strength concrete at elevated temperatures", *Fire Safety Journal*, 2018, 96, 203-214.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.01.009>
- Khan MI, Lynsdale CJ, "Strength, permeability, and carbonation of high-performance concrete", *Cement and Concrete Research*, 2002, 32, 123-131.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00641-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00641-X)
- Kodur VKR, McGrath R, "Fire endurance of high strength concrete columns", *Fire Technology*, 2003, 39 (1), 73-87.
- Li Y, Kang HT, Yang EH, "Influence of aggregate size and inclusion of polypropylene and steel fibers on the hot permeability of ultra-high performance concrete (UHPC) at elevated temperature", *Construction and Building Materials*, 2018, 169, 629-637.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.105>
- Liu C, Liu Ch, Xu W, Zhang X, Lan Y, "A fractal-interpolation model for diagnosing spalling risk in concrete at elevated temperatures", *KSCIE Journal of Civil Engineering*, 2018, 22 (12), 5154-5163.
<https://doi.org/10.1007/s12205-018-0697-z>
- Lo Monte F, Felicetti R, Rossino C, "Fire spalling sensitivity of high-performance concrete in heated slabs under biaxial compressive loading", *Materials and Structures*, 2019, 52 (14).
- Matesova D, Bonen D, Shah SP, "Factors affecting the resistance of cementitious materials at high temperatures and medium heating rates", *Materials and Structures*, 2006, 39, 455-469.
- Mindeguia J, Pimienta P, Carré H, La Borderie C, "Experimental analysis of concrete spalling due to fire exposure", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 17 April 2013.
<https://doi.org/10.1080/19648189.2013.786245>
- Mindeguia JC, Pimienta P, Carré H, La Borderie C, "On the influence of aggregate nature on concrete behaviour at high temperature", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2012, 16 (2), 236-253.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.005>
- Mohammed A, Al-Saadi NTK, Al-Mahaidi R, "Bond behaviour between NSM CFRP strips and concrete at high temperature using innovative high-strength self-compacting cementitious adhesive (IHSSC-CA) made with graphene oxide", *Construction and Building Materials*, 2016, 127, 872-883.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.066>
- Mohd Ali AZ, Sanjayan J, Guerrieri M, "Performance of

EXTENDED ABSTRACT

Investigating the Effect of Increasing Temperature on the Spalling Phenomenon in High Strength Concrete Parts

Vahidreza Afkhami ^{a,*}, Ehsan Dehghani ^b

^a *PhD. Graduate, University of Qom, Qom 02532103000, Iran*

^b *Faculty of Civil Engineering, University of Qom, Qom 02532103000, Iran*

Received: 08 May 2023; **Review:** 09 September 2023; **Accepted:** 17 September 2023

Keywords:

High strength concrete, Heating rate, Permeability, Spaling.

1. Introduction

In this research, by introducing an analytical model, the behavioral investigation of various types of concrete parts made of high-resistance concrete against the increase in temperature has been investigated, and at the same time, the phenomenon of flaking of concrete under heat has been investigated. In the upcoming research, the relationship between the heating rate and the initial spalling time has been determined by introducing a relationship.

2. Methodology

2.1. FE modeling

Abaqus software is known as one of the famous mechanical engineering analysis software. In this research, the analytical results of this software have been used to evaluate the issue of applying heat to high strength concrete parts. The modeling process in Abaqus software has been done in two separate parts:

- 1) Heat transfer model of high strength concrete parts
- 2) Fluid transfer model (water or steam) in the holes of high strength concrete parts

3. Results and discussion

3.1. Spalling

The purpose of this research is analytical modeling of high-strength concrete parts (non-reinforced slab) and investigating the effect of temperature increase on its behavior, considering the compressive strength of concrete between 60 and 100MPa (limit of high-strength concrete). The reason for examining the behavior of non-reinforced concrete parts in this research is that the increase in temperature applied to reinforced concrete parts, due to the concrete coating on the steel parts, affects the concrete part more and the steel parts are less affected by heat in the initial state and the reduction of the strength of these components is initially due to the reduction of the strength of the concrete part. Fig. 1 and 2 show, respectively, the initial spalling depth and initial spalling time in the base concrete part, under various heating mechanisms considered in the research.

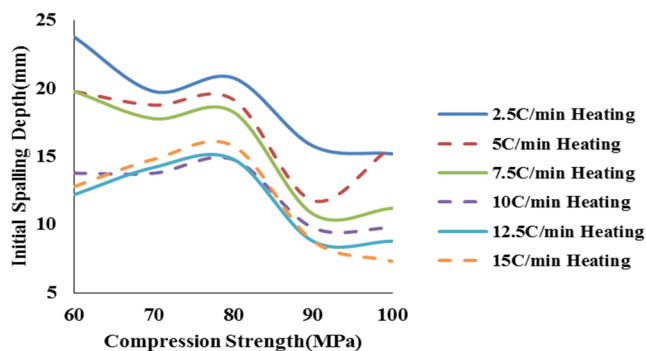


Fig. 1. The depth of initial spalling of concrete types with different heat patterns

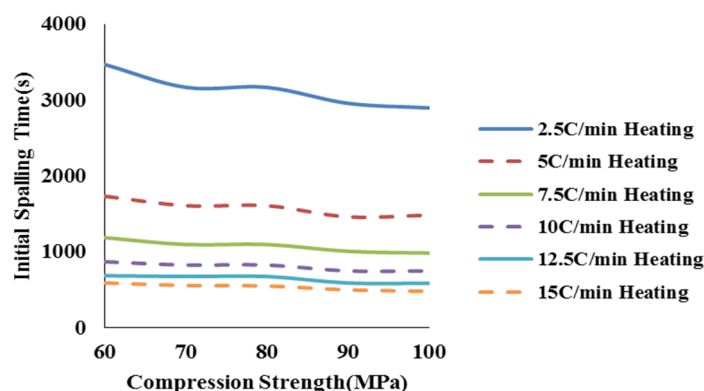


Fig. 2. Initial spalling time of concrete types with different heat patterns

Fig. 1 and 2 show that the heating pattern of this research can cause initial spalling of more than 2cm in the high-strength concrete part, and the maximum amount of initial spalling can be seen in the heating pattern of 2.5°C/min.

4. Conclusions

In this research, an analytical modeling method was presented which is able to predict the general behavior of high resistance concrete parts against temperature increase. In this model, which has been in Abaqus comprehensive software environment, the effect of temperature increases according to a special mechanism of applying heat to high strength concrete piece has been investigated. The results show that:

- 1) With the increase of the resistance class of concrete, under the increase of temperature, the pore pressure in the concrete piece will increase significantly, so that there is an expectation of spalling of more than 2cm in the studied concrete classes.
- 2) The speed of reaching the initial spalling increases with the increase of the slope of the permeability drop, so that for this reason, the 80MPa strength class concrete has twice the speed of reaching the initial spalling compared to other types of high-strength concrete.

5. References

- Abaqus, Abaqus Analysis Theory Manual version 6.14, United Kingdom, 2014.
- Felicetti R, Lo Monte F, Pimienta P, "A new test method to study the influence of pore pressure on fracture behaviour of concrete during heating", *Cement and Concrete Research*, 2017, 94, 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.01.002>
- Ozawa M, Morimoto H, "Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-performance concrete", *Construction and Building Materials*, 2014, 71, 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.068>