

مروری بر رفتار بتن‌های معمولی و متراکم در برابر آتش

سعید بختیاری^۱، علی اله وردی^{۱*}، علی اکبر رضانیانپور^۲، طیبه پرهیزکار^۲، مازیار رییس قاسمی^۳

۱- تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی

۲- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران

۳- تهران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

پیام نگار: ali.allahverdi@iust.ac.ir

چکیده

در این مقاله رفتار و مقاومت بتن‌های معمولی، متراکم و خودتراکم در برابر آتش با استفاده از ادبیات علمی موضوع مرور شده است. بتن از مصالح دارای مقاومت بالا در برابر آتش به شمار می‌رود، با وجود این افزایش دما در هنگام آتش‌سوزی می‌تواند باعث تغییرات شیمیایی و ابعادی بتن و در نتیجه کاهش مقاومت مکانیکی عنصر بتنی و نهایتاً شکست آن شود. وجود آب هیدراته، بالا بودن گرمای ویژه و هدایت حرارتی اندک بتن، می‌تواند این موضوع را به تأخیر اندازد، اما در عوض، پدیده ترکیبگی می‌تواند باعث کاهش مقاومت بتن و شکست آن شود. در بین مکانیسم‌های متعدد، فشار بخار، مهم‌ترین دلیل برای ترکیبگی بتن در آتش ذکر شده است. با گرم شدن بتن، رطوبت به هر دو شکل بخار و مایع در بدنه بتن منتقل می‌گردد و در فاصله مشخصی یک فشار بخار حداکثر ایجاد می‌شود. این فاصله بحرانی برای بتن‌های متراکم در حد ۵ تا ۱۰ میلی‌متر است که نسبت به بتن معمولی بسیار کمتر می‌باشد. اینکه فشار بخار به حد کافی برای ترکیدن بتن برسد یا خیر، علاوه بر مقدار رطوبت، به شدت گرمایش، نفوذپذیری، تخلخل و توزیع حفره‌ها نیز بستگی دارد. عامل ترکیبگی در برابر آتش برای بتن‌های متراکم بسیار مهمتر از بتن‌های معمولی است و برای جلوگیری از شکست نسبتاً سریع آن نیاز به تمهیدات مناسب می‌باشد. بتن‌های خودتراکم نیز دارای رفتار متفاوتی از سایر بتن‌ها در برابر آتش می‌باشند که عمدتاً به دلیل حجم بالای پودر، مقدار تراکم و وجود مواد افزودنی ذکر شده است. اثرات پرکننده، سن بتن، وجود الیاف، مقدار رطوبت و مسائل متعدد دیگر برای شناخت رفتار بتن خودتراکم در برابر آتش، نیاز به تحقیقات وسیع دارد.

کلمات کلیدی: بتن، بتن خودتراکم، بتن توانمند، آتش، مقاومت در برابر آتش

۱- مقدمه

نکات فنی مختلف در طرح اختلاط مواد و اجرا می‌باشد تا ماده‌ای با مشخصات فنی مورد نظر، همراه با مقاومت، دوام و عملکرد مناسب به دست آید. از جمله خواص مهم بتن که در اکثر سازه‌ها مورد توجه خاص است، کسب مقاومت لازم در برابر آتش است. اگر چه

بتن یک ماده مرکب است که پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی به شمار می‌رود [۱]. در عین حال استفاده مناسب از بتن، مستلزم آگاهی از مشخصات مواد، واکنش‌های بین تشکیل‌دهنده‌ها، رعایت

نیز مقادیر بالای پودر در بتن خودتراکم، پیچیدگی‌های بیشتری را از نظر مقاومت آنها در برابر آتش ایجاد می‌کند. یکی از پدیده‌هایی که باعث شکست بتن در برابر آتش می‌شود، پدیدهٔ ترکیدگی یا پوسته شدن^۴ بتن در دمای بالا است. در بتن‌های معمولی، افزایش درصد تخلخل، کمک خوبی به مقاومت بتن در برابر آتش می‌کند، اما این موضوع در بتن‌های مقاومت بالا مطلوب نیست، زیرا مقاومت مکانیکی کاهش می‌یابد. بنابراین به طور کلی در بتن‌های با مقاومت بالا، توانمند و خودتراکم، زمینه ترکیدن بتن در برابر آتش، متفاوت با بتن‌های معمولی بوده و بیشتر از آنهاست.

در این مقاله، ادبیات علمی مقاومت بتن‌های متراکم و خودتراکم در برابر آتش و پارامترهای مؤثر بر آنها از دهه ۱۹۷۰ تاکنون مرور شده است. خصوصاً کارهای جدید ارائه شده در سال‌های اخیر مورد توجه بیشتر بوده است. برای امکان مقایسه بهتر رفتار این بتن‌ها با بتن‌های معمولی، اطلاعات کلی و تجویزی در مورد بتن‌های معمولی به صورت خلاصه ارائه شده است. همچنین از آن جایی که معمولاً اطلاعات پایه در خصوص مقاومت مصالح در برابر آتش کمتر بیان شده است، به منظور درک بهتر مفاهیم موجود در مقاله، بحث‌های پایه در خصوص مقاومت مصالح در برابر آتش به صورت خلاصه در ابتدای مقاله بیان شده است.

۲- آزمایش‌های آتش و طبقه‌بندی مصالح در رابطه با گرما

برای ارزیابی رفتار مصالح در برابر آتش از آزمایش‌های آتش بهره‌گیری می‌شود. در کل، ارزیابی عملکرد محصولات ساختمانی در برابر حریق، در دو حوزه اصلی زیر صورت می‌گیرد:

الف - واکنش مواد در برابر آتش: میزان مشارکت یک فرآورده در گسترش حریق است و با آزمون پارامترهایی مانند قابلیت آفرزش، شدت گرما یا دود آزاد شده ناشی از سوختن مواد و پیشروی سطحی شعله بر روی فرآورده مورد نظر ارزیابی می‌شود.

ب - مقاومت در برابر آتش: توانایی یک عنصر ساختمانی برای ادامهٔ عملکرد خود و جلوگیری از گسترش آتش‌سوزی از فضای وقوع به فضاهای مجاور می‌باشد. آزمایش مقاومت در برابر

بتن یک مادهٔ غیر قابل سوختن است، اما این لزوماً به معنای مقاومت بالا در برابر آتش نیست، زیرا مقاومت در برابر آتش، مفهومی متفاوت از قابلیت اشتعال مواد دارد.

مقاومت مصالح ساختمانی در برابر آتش به خواص آنها در دمای بالا بستگی دارد. با بالا رفتن دما، خواص فیزیکی و شیمیایی ماده تغییر می‌کند. این تغییرات، چگونگی انتقال گرما به داخل ماده، ابعاد ماده، نیروهای فیزیکی و شیمیایی بین مولکول‌ها و ذرات تشکیل‌دهنده و در نتیجه مقاومت مکانیکی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

رفتار بتن در برابر آتش موضوع پیچیده‌ای است. بتن به طور معمول از سیمان و سنگدانه تشکیل شده است که هر دو در مقاومت آن در برابر آتش مؤثر هستند. به طور معمول حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد حجم مواد جامد خمیر سیمان کاملاً هیدراته شده از ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (با ژل توپرموریت) تشکیل شده است [۱]. درجه بلوری پایین و مساحت سطح داخلی زیاد این ژل باعث می‌شود تا بتن مقادیر زیادی رطوبت در حالت تعادل با محیط داشته باشد. با گرما دیدن بتن، رطوبت موجود در خلل و فرج خمیر سیمان از دست می‌رود. با رسیدن دمای بتن به حدود 100°C ، آب آزاد موجود در آن تبخیر می‌شود. با بالا رفتن بیشتر دما، تبخیر آب مویینه صورت می‌گیرد. در دمای بیش از 500°C ، دهیدراسیون (آب‌زدایی) و تخریب شیمیایی ژل توپرموریت آغاز می‌شود که تا دمای بیش از 800°C ادامه می‌یابد. دهیدراسیون هیدروکسیدکلسیم نیز در دمای حدود 420°C رخ می‌دهد. جذب گرما برای واکنش دهیدراسیون به همراه مقدار بالای گرمای نهان تبخیر، باعث می‌شود تا انتقال گرما به داخل بدنه بتن با تأخیر و کندی صورت گیرد و از این نظر رفتار بتن در برابر آتش بهبود یابد. از طرف دیگر، هدایت حرارتی بتن به سنگدانه‌های موجود در آن نیز بستگی دارد. سنگدانه‌های با پایداری کمتر (مانند سنگدانه‌های دارای مقادیر زیاد آب هیدراته یا مواد فرار)، در دمای بالا تجزیه شده و واکنش‌های تجزیه در آنها رخ می‌دهد.

خواص بتن‌های نسبتاً جدید مانند بتن‌های مقاومت بالا^۱، بتن‌های توانمند^۲ و بتن‌های خودتراکم^۳ در برابر آتش، با بتن‌های معمولی بسیار متفاوت است. بخصوص حجم اندک تخلخل در این بتن‌ها و

1. High Strength Concrete
2. High Performance Concrete
3. Self compacting concrete

4. Spalling

گروه، هر دو خاصیت مکانیکی (عمدتاً رفتار فشاری) و حرارتی، دارای اهمیت هستند.

۳- مصالح گروه I (عایق): مصالحی که برای تحمل بار طراحی نمی‌شوند. نقش آنها در آتش‌سوزی مقاومت در برابر عبور گرما از عناصر ساختمانی و یا فراهم کردن عایق برای مصالح گروه L یا (L/I) است. در مصالح گروه I تنها خواص حرارتی مورد نظر می‌باشد.

۴- مصالح گروه (L/I/F²) (باربر/عایق/سوخت): مصالح گروه (L/I) که ممکن است در آتش‌سوزی نقش سوخت را هم داشته باشند.

۵- مصالح گروه (I/F) (سوخت/عایق): مصالح گروه I که ممکن است در آتش‌سوزی نقش سوخت را نیز داشته باشند.

خواص مواد (مقاومت‌های مکانیکی، هدایت حرارتی، تغییرات ابعادی، گرمای ویژه و غیره) در دمای بالا بسیار متفاوت از دمای اتاق است و به طور مستقیم بر روی مقاومت ماده در برابر آتش اثر دارد. هرمتی [۶] در مورد خواص مکانیکی و حرارتی مواد در دمای بالا بحث کرده است.

۳- برهم‌کنش و مقاومت بتن در برابر آتش و پارامترهای مؤثر بر آن

۳-۱- واکنش‌های ایجاد شده در بتن در اثر اعمال گرما

همانگونه که بیان شد خواص ماده در دمای بالا بر روی مقاومت آن در برابر آتش اثر دارد. خواص بتن به طور گسترده بر حسب نوع و مقدار تشکیل‌دهنده‌ها تغییر می‌کند. آندربگ [۷] و اشنایدر [۸] روش‌هایی برای محاسبه تغییر شکل بتن تحت شرایط دمای بالا پیشنهاد کرده‌اند. هرمتی [۹] منحنی‌های دیلاتومتری را برای تعدادی از مصالح ارائه کرده است. وی همچنین مثال‌هایی از محاسبات گرمای ویژه ظاهری بر حسب دما برای یک خمیر سیمان و چهار نوع بتن ارائه کرده است [۱۰]. وی با استفاده از روش‌های آنالیز حرارتی، نشان داد که خمیر سیمان بر اثر گرما دچار واکنش‌های تخریبی کم و بیش برگشت‌ناپذیر می‌شود [۱۱].

هاندو [۱۲] و راینا [۱۳] استفاده از روش‌های (DTA/TG) را برای ارزیابی بتن‌های تخریب شده در آتش گزارش کرده‌اند. هاندو [۱۴] گزارش کرده است که می‌توان با استفاده از کاهش مقدار پرتلندیت

آتش در کوره‌های مخصوصی که برای همین منظور طراحی می‌شوند، صورت می‌گیرد. بسته به نوع عنصر ساختمانی، از کوره‌های افقی، عمودی یا ستونی استفاده می‌شود. ابعاد عنصر ساختمانی مورد آزمایش معمولاً حدود ۳ متر و یا در اندازه واقعی می‌باشد. در استاندارد بین‌المللی ISO 834 رژیم افزایش دما به شکل زیر تعریف شده است:

$$T = 345 \log(8t + 1) + 20$$

که در آن t زمان آزمایش بر حسب دقیقه، T دمای کوره به درجه سلسیوس در زمان t و T_0 دمای اولیه کوره بر حسب درجه سلسیوس است. در این آزمایش با بالا رفتن دما در کوره، سه مشخصه زیر در نمونه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد:

الف- پایداری: جزء مورد نظر بایستی پایداری خود را در برابر افزایش دما حفظ کند و دچار گسیختگی و ریزش نشود.

ب- یکپارچگی: جزء ساختمانی مورد نظر بایستی یکپارچگی خود را حفظ کند و دچار ترک و شکاف نشود تا از انتقال گرما و دود به فضاها مجاور جلوگیری گردد.

ج - نارسایی: جزء مورد نظر بایستی در حد نیاز عایق باشد تا موجب انتقال سریع گرما به فضاها مجاور نشود.

مقاومت مورد نیاز برای اجزای ساختمان در مقررات و آیین‌نامه‌های مربوط ارائه شده است که از جمله "آیین‌نامه پیشنهادی محافظت ساختمان‌ها" [۲] را می‌توان نام برد. برای اطلاعات بیشتر در زمینه آزمایش‌های آتش و طبقه بندی رفتار مواد در برابر آتش به مراجع [۲] تا [۵] مراجعه شود.

هرمتی [۶] مصالح ساختمانی را از نظر تحلیل عملکرد آنها در آتش، به گروه‌های زیر تقسیم کرده است:

۱- مصالح گروه L⁺ (باربر): مصالحی که قابلیت تحمل تنش‌های بالا (معمولاً در کشش) را دارند. برای این مصالح، بیشتر، خواص مکانیکی و بخصوص، مقاومت کششی آنها مورد توجه است.

۲- مصالح گروه (L/I⁺) (باربر/عایق): مصالحی که قادرند تنش‌های متوسط را تحمل کنند، ضمناً در هنگام آتش‌سوزی، می‌توانند حفاظت حرارتی را برای مصالح گروه L فراهم نمایند. در این

1. Harmathy
2. L = Loadbearing
3. I = Insulating

4. F = Fuel

محیط بستگی دارد. با توجه به ریزدانگی Ca(OH)_2 تجزیه شده، برگشت‌پذیری آن می‌تواند سریع صورت گیرد و تجزیه مجدد آن نیز به دمای کمتر منتقل می‌شود که در منحنی‌های بالای 500°C قابل مشاهده است.

برای آزمون‌های عملیات حرارتی شده تا بالای 600°C ، واکنش‌های دکربناسیون دیگر وجود ندارد. اگرچه واکنش تجزیه CaCO_3 نیز برگشت‌پذیر است، اما در صورت تجزیه کامل، برای برگشت واکنش، لازم است که CaO به میزان کافی در معرض CO_2 قرار گیرد.

واکنش دهیدراسیون با بالا رفتن دمای نمونه، به آهستگی کاهش یافته و محو می‌شود، بنابراین از آن می‌توان به عنوان شاخصی برای تعیین تاریخچه دمایی بتن پس از آتش‌سوزی استفاده کرد. واکنش‌های دهیدرکسی شدن و دکربناسیون به هم مربوط هستند. همان گونه که در نمونه‌های حرارت دیده تا 700°C و 800°C درجه سلسیوس مشاهده می‌شود، افزایش پرتلندیت مرتبط به کاهش واکنش دکربناسیون است. این اساساً به علت شکفتن و تبلور مجدد پرتلندیت در هنگام خنک شدن در کوره پس از پایان عملیات حرارتی است، در حالی که سرعت برگشت‌پذیری واکنش دکربناسیون بسیار کمتر است و لذا در این منحنی‌ها مشاهده نشده است.

منحنی‌های DTG نشان می‌دهند که پیک مربوط به دکربناسیون کربنات کلسیم به طور کامل پس از 800°C ناپدید می‌شود، بنابراین از آن می‌توان برای تشخیص دمای آتش‌سوزی بهره برد. پیک مربوط به دهیدرکسی شدن پرتلندیت حتی برای نمونه‌های عملیات حرارتی شده در 800°C ناپدید نمی‌شود که به علت تبلور مجدد CaO در حین سرد شدن در کوره است. ساختار آمورف باقی‌مانده از تجزیه CSH نیز می‌تواند هیدراته شود. این موضوع اهمیت آزمایش سریع نمونه پس از آتش‌سوزی را نشان می‌دهد.

۲-۳ تغییرات خواص مکانیکی بتن با حرارت

بتن‌ها را از نظر وزنی می‌توان به سه گروه تقسیم‌بندی کرد: (۱) بتن‌های با چگالی حدود 2400 کیلوگرم بر متر مکعب، (۲) بتن‌های سبک با چگالی کمتر از 1800 کیلوگرم بر متر مکعب و (۳) بتن‌های سنگین (اغلب برای کاربردهای خاص مانند محافظت در برابر اشعه) با چگالی بیش از 3200 کیلوگرم بر متر مکعب [۱].

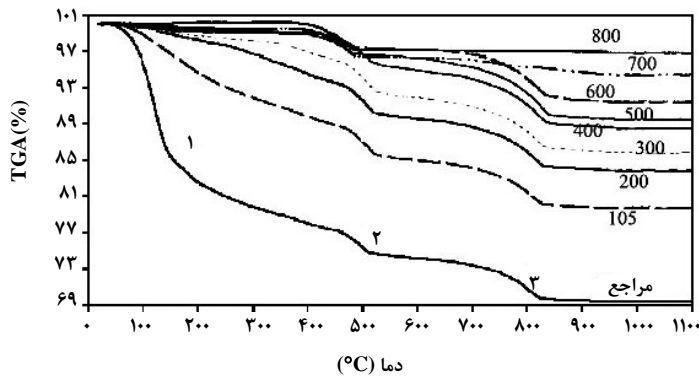
بر اثر افزایش دما، شرایط بتنی را که در معرض حریق قرار گرفته است، ارزیابی کرد. واکنش‌هایی که با افزایش دما در خمیرسیمان و بتن رخ می‌دهد، توسط محققین مختلف، گزارش شده است [۱۵-۱۸] و می‌توان آنها را به شرح زیر بیان کرد:

- $(^\circ\text{C}) 30-120$: فرار آب قابل تبخیر و حذف کلی آب قابل تبخیر در 120°C .
- $(^\circ\text{C}) 110-170$: تجزیه گچ و اترینجیت و حذف آب از قسمتی از هیدرات‌های کربوآلومینات.
- $(^\circ\text{C}) 450-550$: از دست رفتن آب پیوندی به علت تخریب C-S-H و هیدرات‌های کربوآلومینات، و دهیدروکسی شدن پرتلندیت.
- $(^\circ\text{C}) 700-900$: دکربناتی شدن کربنات کلسیم.

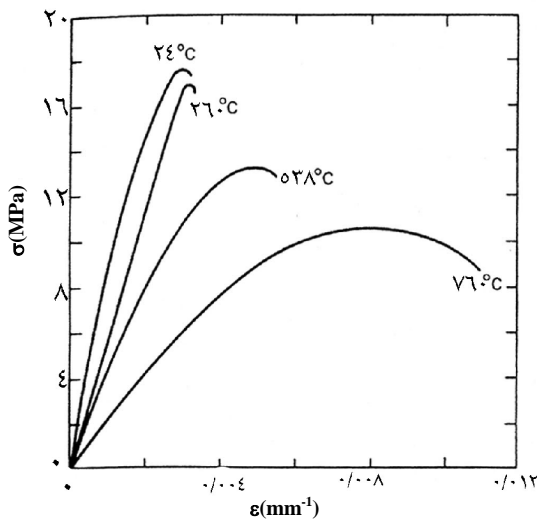
روییز [۱۹] با استفاده از آنالیز (TGA/DTG) اثر گرمابر خمیر سیمان را بررسی کرد. نتایج TG در شکل (۱) آمده است. نمونه مرجع، مربوط به نمونه خمیر سیمان است که در معرض دمای بالا قرار نگرفته است. این آزمون سه افت وزنی سریع از خود نشان می‌دهد. اولی بین دماهای 100 تا 200°C درجه سلسیوس، بر اثر از دست رفتن آب آزاد و مویینه و آب شیمیایی اترینجیت رخ می‌دهد. دومین افت وزنی در دمای $(^\circ\text{C}) 450-500$ قابل مشاهده است که مربوط به دهیدروکسی شدن پرتلندیت است. سومین افت وزنی مربوط به دکربناسیون کربنات کلسیم ناشی از کلینکر و پرکننده است که در 750°C مشاهده می‌شود.

منحنی‌های بعدی (که روی آنها دماهای مختلف نوشته شده است) مربوط به نتایج TG بر روی نمونه‌هایی است که تا دمای نوشته شده روی منحنی بالا برده شده و 24 ساعت در آن دما نگاه داشته شده‌اند. پس از خنک شدن نمونه‌ها در کوره، آنالیز حرارتی بر روی آنها انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که دومین افت وزنی مربوط به دهیدرکسی شدن، حتی برای نمونه‌های حرارت داده شده تا بالای 500°C وجود دارد. چنانچه پذیرفته شود که با عملیات حرارتی تا بالای 600°C ، واکنش‌های دهیدروکسی شدن به طور کامل رخ می‌دهد، آنگاه بایستی این واکنش را برگشت‌پذیر تلقی کرد. واکنش تجزیه Ca(OH)_2 برگشت‌پذیر است، ولی اگر تجزیه به طور کامل صورت گیرد، برگشت‌پذیری آن به وجود رطوبت در

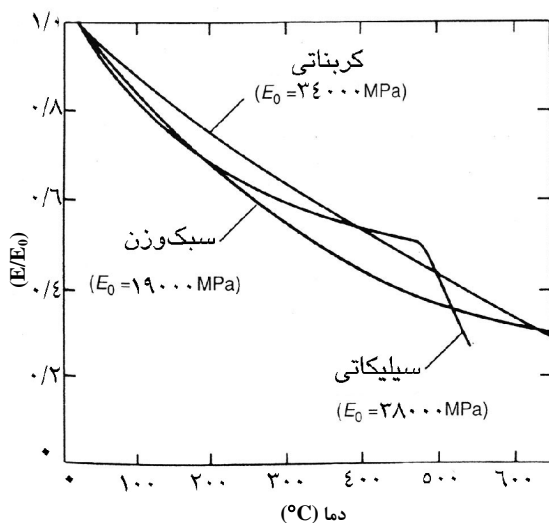
1. Dehydroxylation



شکل ۱- منحنی‌های TGA برای خمیر سیمان حرارت‌دیده تا دماهای مختلف [۱۹]



شکل ۲- منحنی‌های (تنش- کرنش) برای بلوک بتنی سبک در دمای اتاق و دماهای بالا [۶]

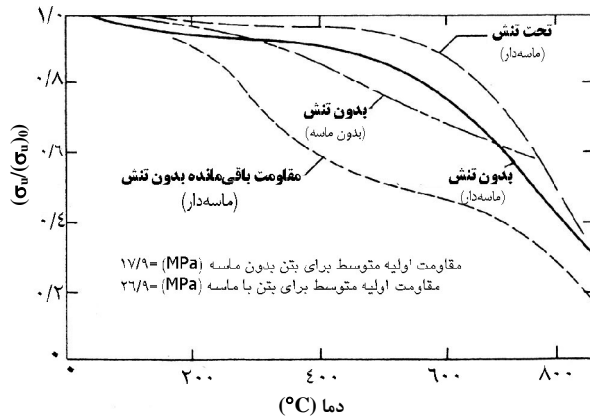


شکل ۳- اثر دما روی مدول کشسانی بتن‌های با سنگدانه‌های مختلف [۶]

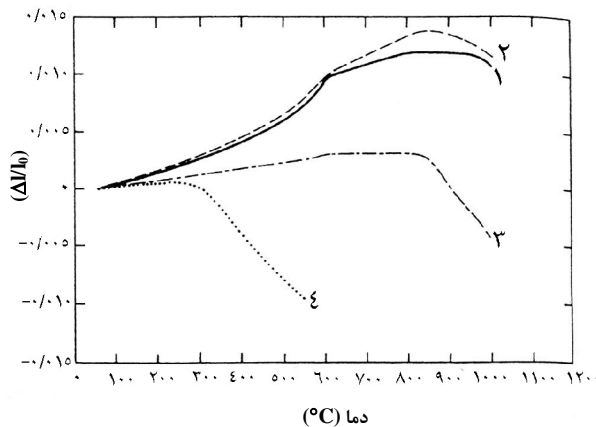
معمولاً بتن‌های با وزن معمولی، از نظر ایمنی در برابر آتش، بر حسب نوع سنگدانه اصلی به کار رفته به بتن‌های با سنگدانه سیلیسی و کربناتی تقسیم می‌شوند [۶]. در شکل (۲) منحنی‌های (تنش - کرنش) برای بتن سبک با سنگدانه رسی منبسط شده در دمای 24°C و چند دمای بالا نشان داده شده است. شکل منحنی‌ها ممکن است به مدت نگه داشتن آزمون در دمای مورد نظر، پیش از آزمون فشاری، وابسته باشد. مدول کشسانی (E) بتن‌های مختلف در دمای اتاق در محدوده بسیار وسیع $5/0 \times 10^3$ تا $35/0 \times 10^3$ مگاپاسکال قرار می‌گیرد که عمدتاً وابسته به نسبت آب به سیمان، سن بتن، روش عمل‌آوری و مقدار و ماهیت سنگدانه‌ها است. مدول کشسانی با افزایش دما به سرعت کاهش می‌یابد و این کاهش چندان وابسته به نوع سنگدانه نیست [۶] (شکل (۳)). در شکل E_0 مدول کشسانی در دمای اتاق است.

مقاومت فشاری (σ_{II}) بتن نیز با دما به طور وسیعی تغییر می‌کند. عوامل تأثیرگذار بر مقاومت فشاری مشابه با مدول کشسانی است. اطلاعات درباره تغییر مقاومت فشاری با دما برای بتن با سنگدانه‌های مختلف در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. در این شکل‌ها، $(\sigma_{II})_0$ مقاومت فشاری در دمای اتاق است. در این منحنی‌ها آزمون‌هایی که تا دمای آزمون بدون بار مکانیکی گرم شدند، با عبارت «بدون تنش» مشخص شده‌اند. برخی آزمون‌ها در معرض باری معادل ۴۰٪ مقاومت نهایی گرم شدند که در کنار منحنی‌های آنها عبارت «تحت تنش» نوشته شده است. تعدادی از آزمون‌ها نیز بدون اعمال بار، گرم و سپس تا دمای اتاق، سرد و در رطوبت نسبی ۷۵٪ برای ۶ روز نگهداری، و سرانجام، در دمای اتاق آزمون شدند (منحنی‌های «مقاومت باقی‌مانده بدون تنش»).

۷۰۰°C مشاهده می‌شود که علت آن تخریب جزئی سنگدانه‌ها است. بر اثر تجزیه CaCO_3 تقریباً نیمی از وزن آن به صورت CO_2 خارج و در نتیجه چگالی آن کم می‌شود.

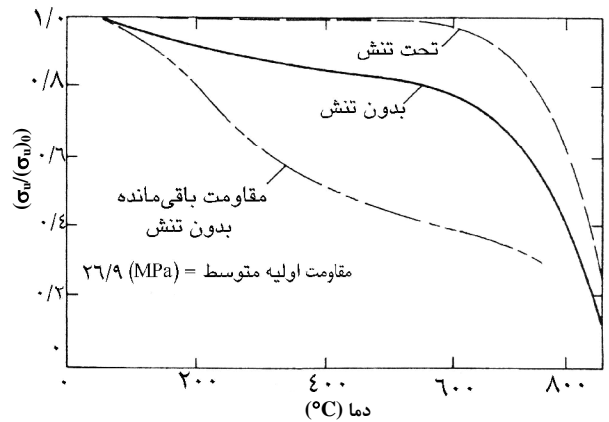


شکل ۵- اثر دما بر مقاومت فشاری بتن سبک (به تفکیک ماسه‌دار و بدون ماسه) [۶]

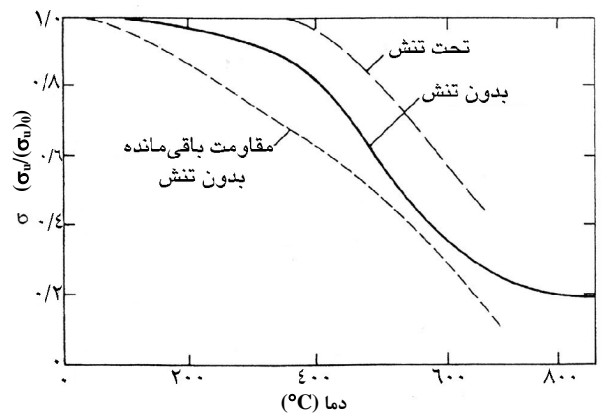


شکل ۶- منحنی‌های دیلاتومتری [۶] برای بتن معمولی با سنگدانه سیلیسی (۱) و کربناتی (۲) و بتن سبک با شیل منبسط‌شده (۳) و پامیس (۴)

گرمای ویژه و ویژه بتن معمولی خشک با سنگدانه‌های سیلیسی یا کربناتی در دماهای بین ۲۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس، حدود 900 (J/kg.K) و در دماهای ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سلسیوس، حدود 1100 (J/kg.K) گزارش شده است [۹ و ۶]. هدایت حرارتی (k) بتن عمدتاً وابسته به ماهیت سنگدانه‌های آن است. به طور کلی، بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌های بلوری متراکم، هدایت بالاتری در مقایسه با بتن‌های



شکل ۴- اثر دما بر روی بر مقاومت فشاری بتن معمولی با سنگدانه سیلیسی [۶]



شکل ۵- اثر دما بر مقاومت فشاری بتن معمولی با سنگدانه کربناتی [۶]

اثر دما بر مقاومت فشاری بتن سبک در شکل (۶) و منحنی‌های دیلاتومتری برای چند بتن با وزن معمولی و سبک حاصل از مطالعات روی ۱۶ نمونه بتنی بر روی ۴ منحنی در شکل نمایش داده شده است [۶]. از آن جا که مقدار سنگدانه‌ها تا $75-60\%$ حجم بتن است، منحنی دیلاتومتری معمولاً شبیه به منحنی سنگدانه اصلی به کار رفته است. اما برخی سنگدانه‌های سبک مثل پرلیت و ورمیکولیت قادر به مقاومت در برابر جمع‌شدگی خمیر سیمان حین گرم شدن نیستند، بنابراین منحنی آنها، نمایانگر منحنی‌های مشخصه برای سیمان است. نتایج آزمون‌های دیلاتومتری و وزن‌سنجی حرارتی برای محاسبه رابطه چگالی (ρ) با دما برای ۴ نوع بتن در شکل آمده است. یک افت قابل توجه در چگالی بتن‌های ساخته شده با سنگدانه کربنات در دمای بالای

۳-۳ اطلاعات تجویزی برای مقاومت بتن‌های معمولی و سبک در برابر آتش

آزمایش‌های زیادی در طول سال‌های طولانی بر روی مقاومت بتن‌های رایج صورت گرفته و تجربیات و اطلاعات مطمئنی را برای مقاومت در برابر آتش آنها فراهم کرده است. از جمله، جزئیات برخی اجزای بتنی معمولی و سبک (با سنگدانه‌های سبک) برای تأمین درجات معین مقاومت در برابر آتش در مقررات ساختمانی IBC [۲۰] ارائه شده است. به عنوان مثال در جدول (۱) مقاومت در برابر آتش برای دال بتنی با بتن‌های معمولی و سبک و بدون سقف کاذب بر اساس اطلاعات تجویزی داده شده در مقررات IBC ارائه شده است. حداقل ضخامت پوشش بتن روی میلگردها نباید کمتر از ۲۰ میلی‌متر باشد. این اطلاعات در اینجا به منظور ارائه یک تصویر کلی از مقاومت بتن‌های معمولی در برابر آتش ارائه شده و در ادامه عمدتاً در مورد مقاومت بتن‌های متراکم (مقاومت بالا و توانمند) و خودتراکم در برابر آتش بحث خواهد شد.

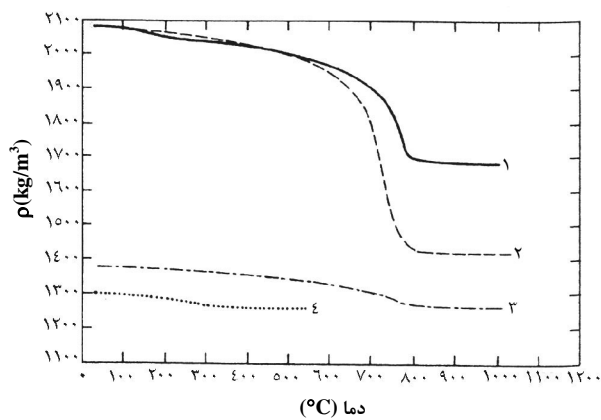
جدول ۱- حداقل ضخامت لازم برای دال بتن مسلح (mm) بدون سقف کاذب برای درجات مشخص مقاومت در برابر آتش [۲۰]

نوع بتن	مقاومت در برابر آتش (ساعت)			
	۴	۳	۲	۱
بتن با سنگدانه سیلیسی	۱۸۰	۱۶۰	۱۳۰	۹۰
بتن با سنگدانه کربناتی	۱۷۰	۱۴۵	۱۲۰	۸۰
بتن سبک	۱۳۰	۱۱۰	۹۰	۶۵

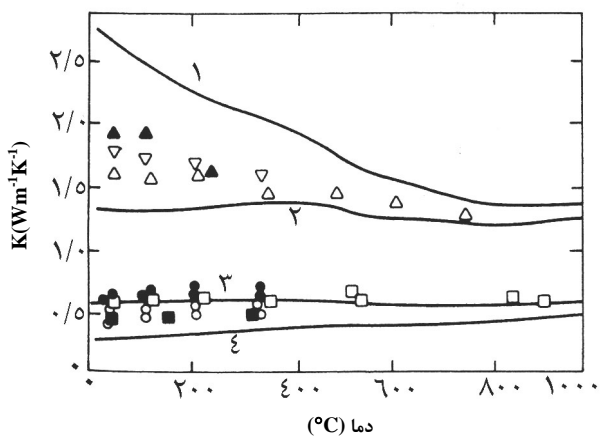
۳-۴ پدیده ترک‌یدن بتن در دمای بالا

یکی از دلایل مهم شکست اجزای بتنی در برابر آتش، پدیده ترک‌یدن (یا پوسته پوسته شدن) است. هنگامی که ترک‌یدن بتن به علت قرار گرفتن آن در معرض آتش رخ دهد، تکه‌های کوچک و بزرگ بتن از سطح آن جدا می‌شود و پوشش روی میلگردهای فولادی تقویت‌کننده از بین می‌رود. این موضوع باعث گرمایش مستقیم میلگردها و کاهش سریع ظرفیت باربری بتن می‌شود. ممکن است ابعاد ترک‌یدن بسیار وسیع باشد و موجب شکست فوری سازه شود. ترک‌یدن، ممکن است به صورت انفجاری و یا به شکل آرام‌تری باشد.

دارای سنگدانه‌های متخلخل یا آمورف (بی‌شکل) نشان می‌دهند. از میان سنگدانه‌های معمولی، کوارتز بالاترین هدایت را دارد، بنابراین بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌های سیلیسی در کل هدایت حرارتی بالاتری از بتن‌های ساخته شده با سایر سنگدانه‌ها دارند. منحنی‌های شکل (۹) تغییرات هدایت حرارتی با دما را برای ۴ نوع بتن نشان می‌دهد. این منحنی‌ها مربوط به دو نوع بتن فرضی (شماره‌های ۱ و ۲) به عنوان منحنی‌های حدی برای بتن‌های با وزن معمولی و دو نوع بتن فرضی دیگر (شماره‌های ۳ و ۴) به عنوان موارد حدی برای بتن‌های سبک هستند. نقاط نمایش داده شده در شکل (۹) داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهند.



شکل ۸- چگالی برای بتن معمولی با سنگدانه سیلیسی (۱) و کربناتی (۲) و بتن سبک با شیل منبسط‌شده (۳) و پامیس (۴) [۶]



شکل ۹- ضریب هدایت حرارتی برای ۴ نوع بتن حدی و تعدادی نتیجه تجربی: ▲: بتن‌های با سنگدانه‌های مختلف،

●: سرباره منبسط‌شده، ■ و □: بتن‌های با شیل منبسط‌شده،

○: پامیس [۶]

سمت داخل حرکت می‌کند. در شکل (۱۰) موقعیت پس از یک زمان مشخص برای بتن‌های توانمند و معمولی نمایش داده شده است. در نزدیک‌ترین لایه به سطح، یک منطقه خشک وجود دارد که ضخامت آن در بتن معمولی سریع‌تر از بتن توانمند افزایش می‌یابد. در لایه‌های داخلی‌تر نیز منطقه‌ای وجود دارد که در آن، رطوبت به شکل آب آزاد است. بخاری که در منطقه بخار تولید می‌شود، به سمت سطح داغ حرکت می‌کند، اما در منطقه مخالف آن، بخار، سرد و چگالیده می‌شود. انتقال بخار عمدتاً به علت اختلاف فشار صورت می‌گیرد که بیشترین مقدار آن در مرز تبخیر (مرزی که آب موجود در بتن به علت رسیدن دمای آن به 100°C ، شروع به تبخیر می‌کند) است [۲۲].

با جلو رفتن مرز تبخیر به طرف داخل، فاصله از سطح داغ افزایش می‌یابد و فشار بیشتری برای خارج کردن بخار لازم است. همزمان، به علت چگالیده شدن^۱ بخار آب در ناحیه سردتر، مقدار رطوبت در منطقه بتن مرطوب (در نزدیکی جبهه بخار) افزایش می‌یابد، در برابر عبور بخار مانع ایجاد می‌کند و باعث انتقال بخار کمتری به سمت سرد می‌شود. بنابراین فشار بخار در منطقه بخار، هر چه به سمت داخل می‌رود، افزایش می‌یابد. اما شدت جریان حرارت با افزایش فاصله از سطح داغ، کاهش می‌یابد که این خود باعث تولید بخار کمتر می‌شود. هنگامی که منطقه بخار به فاصله مشخصی از سطح داغ برسد، حداکثر فشار بخار ایجاد می‌شود و مجدداً در فاصله‌های بیشتر، فشار افت می‌کند. این فاصله بحرانی برای بتن توانمند، بسیار کم و در حدود ۵ تا ۱۰ میلی‌متر است، در حالی که برای بتن معمولی حدود ۲۰ تا ۴۰ میلی‌متر است. اینکه فشار بخار به حد کافی برای ترکیدن بتن برسد یا خیر، علاوه بر مقدار رطوبت، به شدت گرمایش، نفوذپذیری، تخلخل و توزیع حفره‌ها نیز بستگی دارد. آزمون‌های تجربی حاکی از آن است که ترکیدن بتن توانمند با مشخصه ریزش یک لایه حدود ۵ میلی‌متری همراه است که به دنبال آن یک جبهه جدید ۵ میلی‌متری تشکیل می‌شود و نهایتاً کل لایه‌های پوسته پوسته شده می‌تواند عمق قابل ملاحظه‌ای را تشکیل دهد [۲۲].

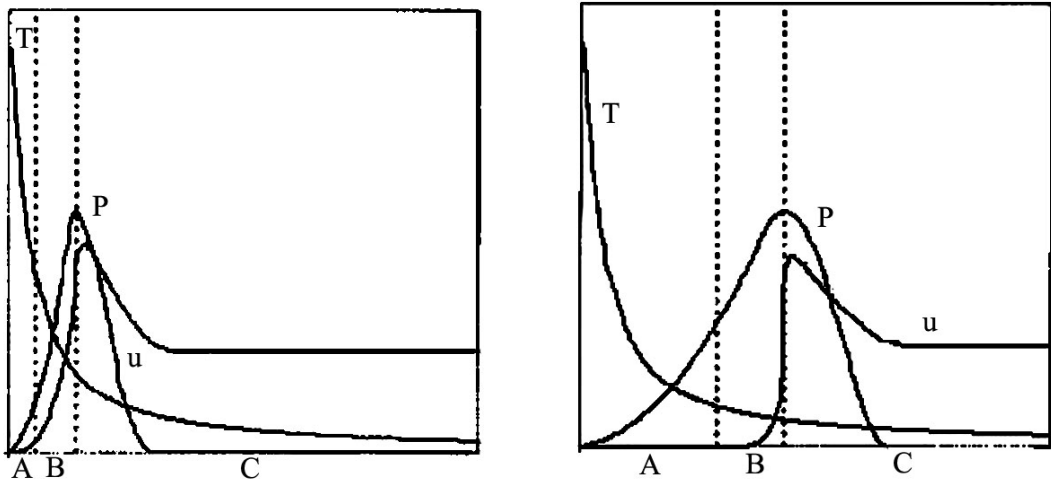
تجربه نویسندگان این مقاله نشان می‌دهد که توضیحات بالا فقط برای حالت ساده شده درست است. در عمل ممکن است سناریوی

زمینه ترکیدن با مواردی نظیر درصد بالای رطوبت، تراکم بالای بتن، شدت زیاد افزایش دما، نازک بودن مقطع و تراکم بالای میلگردها افزایش می‌یابد [۲۲ و ۲۱].

زمینه ترکیدن در بتن‌های متراکم (مانند بتن‌های توانمند و مقاومت بالا) بسیار متفاوت از بتن‌های معمولی است. ساختار متراکم در بتن باعث می‌شود تا انتقال بخار و رطوبت در آن دشوارتر شود و فشار بخار بالایی در نزدیکی سطح بتن ایجاد گردد. این، به معنای خطر بیشتر ترکیدگی در مقایسه با بتن معمولی است. در بتن معمولی بخار آب با سادگی بیشتری می‌تواند در توده بتن انتقال یابد، به این ترتیب که در سمت گرم، بخار به سطح بتن مهاجرت کند و در طرف مقابل (ناحیه سردتر)، رطوبت از طریق خلل و فرج موجود به قسمت‌های داخلی منتقل شود. اما در نهایت، معمولاً به علت وجود درصد رطوبت بالا، ممکن است که یک ترکیدن معمولی یا انفجاری در ۲۰ تا ۴۰ میلی‌متری بتن رخ دهد. وجود حباب‌های هوا و تخلخل در بتن‌های معمولی از نظر رفتار آن در آتش می‌تواند مثبت باشد، اما برای بتن توانمند، وجود تخلخل، یک نقطه ضعف محسوب می‌شود و بر مقاومت مکانیکی آن اثر منفی می‌گذارد (زیرا از مشخصات مهم بتن توانمند، دوام بالای آن در برابر شرایط محیطی است که با افزایش تخلخل، امکان نفوذ مواد مضر مانند سولفات افزایش می‌یابد).

هرتس [۲۱] درباره ۱۵ عامل مختلف مؤثر بر ترکیدن بتن بحث کرده است. آندریگ [۲۲] سه مکانیسم فشار بخار، تنش‌های حرارتی و تغییرات ساختاری سنگدانه‌ها را جداگانه یا در ترکیب با یکدیگر به عنوان عوامل اصلی ترکیدن بتن بر می‌شمارد. مکانیسم سوم فقط برای سنگدانه‌های درشت صادق است، اما فشار بخار در اکثر اوقات مهم‌ترین مکانیسم پوسته پوسته شدن یا ترکیدن بتن است. این موضوع بخصوص برای ترکیدن‌های انفجاری صادق است. با گرم شدن بتن، یک فرایند همزمان انتقال گرما و رطوبت آغاز می‌شود. رطوبت به هر دو شکل بخار آب و آب مایع منتقل می‌شود. با فرض خطی بودن این انتقال (مانند یک دیوار که به طور یکنواخت از یک سمت در معرض آتش قرار گرفته است)، ابتدا آب در سطح داغ (که در معرض مستقیم آتش است)، با رسیدن دما به 100°C تبخیر می‌شود. با افزایش دما، منطقه بخار (یعنی ضخامت از بتن که به علت بالا رفتن دما، آب به صورت بخار در آن وجود دارد) به

1. Condensation



شکل ۱۰- نمایش اجمالی دما و رطوبت برای گرمایش یک بعدی بتن مرطوب، راست: بتن معمولی، چپ: بتن HPC. A: بتن خشک، B: منطقه بخار، C: بتن مرطوب، T: دما، P: فشار بخار، u: میزان رطوبت [۲۲] (توضیح: مقادیر بیشینه u و p در جبهه بخار مشاهده می‌شود که بخار آب در آن چگالیده شده و به مایع تبدیل می‌شود، بنابراین مقاومت زیادی در برابر انتقال بخار به مناطق داخلی‌تر بتن ایجاد می‌شود)

دربرگیرنده سایر بتن‌ها می‌باشد. وی مفهوم بتن ابر متراکم^۱ را نیز به عنوان مصالحی معرفی می‌کند که از چنان تراکمی برخوردار هستند که ترکیدن در آنها، حتی بدون حضور تنش‌های فشاری، ممکن است روی دهد. اگر چه اکثر اوقات ذکر بتن‌های متراکم مترادف با بتن‌های با مقاومت بالا (HSC) گرفته می‌شود، اما مشکل ترکیدن در دمای بالا در بتن‌های با مقاومت پایین با ریز ساختار متراکم نیز دیده شده است. به عنوان مثال ترکیدن تعدادی ستون بتنی دارای سنگدانه سبک و با مقاومت فشاری حدود 30 MPa که با میکروسیلیس متراکم شده بودند، در آزمون‌های آتش و نیز در صنایع نفت و گاز گزارش شده است [۲۱].

بتن‌های متراکم در شرایطی دچار ترکیدگی می‌شوند که حتی تصور آن برای بتن‌های معمولی نمی‌رود. به عنوان مثال، نمونه‌های بتن متراکم حتی در سرعت‌های گرمایش $1 \text{ (}^\circ\text{C/min)}$ دچار ترکیدن انفجاری شده‌اند، در حالی که برای چنین اتفاقی در بتن‌های معمولی باید شدت‌های بیش از $(20-10) \text{ (}^\circ\text{C/min)}$ وجود داشته باشد. بتن‌های متراکم، حتی با وجود خشک کردن کامل آنها قبل از آزمون (در حد باقی ماندن آب تبلور) پوسته پوسته می‌شوند که بیابانگر

حریق متفاوت باشد و به این علت و یا به علت مسائل رخ داده در اجرا، اتفاقات به شکل دیگری رخ دهد. از جمله ممکن است وجود ضعف‌های ساختاری یا ایجاد ترک‌های ریز و درشت باعث عبور بخار آب شده و ترکیدن بتن رخ ندهد.

گرم شدن بتن هنگامی که در معرض آتش‌سوزی قرار گیرد، با یک گرادین تند دمایی همراه است که علل آن، ضریب هدایت حرارتی اندک بتن، گرمای نهان بالای تبخیر آب و ظرفیت حرارتی بالای بتن است. این موضوع باعث ایجاد تنش‌های حرارتی می‌شود که می‌تواند دو یا سه بعدی باشد. در نتیجه تنش‌های کششی ایجاد می‌شود که می‌تواند تا حد مقاومت کششی بتن بالا رود. این تنش‌های کششی گاهی اوقات می‌توانند به تنهایی یا در ترکیب با فشار حفرات^۱ در یک جهت، باعث ترکیدن یا پوسته پوسته شدن بتن شوند [۲۲].

هرتس [۲۱] برای بحث ترکیدن بتن‌ها، آنها را به دو دسته بتن‌های سنتی و متراکم تقسیم کرده است. طبق این تعریف، بتن متراکم، بتنی است که به وسیله ذرات بسیار ریز، کوچکتر از ذرات سیمان (مانند پودر میکروسیلیس)، متراکم شده است و بتن سنتی

2. Super Dense Concrete

1. Pore pressure

کافی بودن آب شیمیایی برای ترکیدن بتن‌های متراکم است. مرور وسیعی که بر روی رفتار بتن‌های با مقاومت بالا توسط مؤسسه ملی استاندارد و فناوری‌های امریکا^۱ انجام شده [۲۳]، بیانگر این است که رفتار این نوع بتن‌ها در برابر آتش بسیار غیر قابل پیش‌بینی است و توصیه‌های طراحی ایمنی حریق که برای بتن‌های سنتی و معمولی می‌شود، به هیچ وجه برای آنها صادق نیست. بنابراین تحقیقات زیادی برای سیستماتیک کردن تحلیل و پیش‌بینی رفتار بتن‌های دارای مقاومت بالا در برابر آتش انجام شده و یا در حال انجام است.

آلدا^۲ (۱۹۹۷) [۲۴] برای بررسی ترکیدن بتن‌های معمولی و بتن‌های با مقاومت بالا، شش ستون تقویت شده بتنی کوتاه را تحت شرایط استاندارد حریق، آزمایش کرد. تعداد و قطر میلگردهای تقویت و نوع بتن (معمولی یا با مقاومت بالا) پارامترهای مورد بررسی بودند. آزمایش‌های وی نشان داد که اگرچه معمولاً انتظار می‌رود که بتن‌های تقویت شده مقاومت خوبی در برابر آتش از خود نشان می‌دهند، اما پدیده ترکیدن باعث می‌شود تا مقاومت این مصالح به شدت کاهش یابد و حتی به نصف مقدار مورد انتظار برسد. بررسی‌ها بر روی ۲۱ ستون بارگذاری شده نشان دادند که استاندارد (یوروکد ۲)^۳ [۲۵] از ایمنی کافی، حتی برای بتن‌های معمولی، برخوردار نیست. همچنین نتایج نشان دادند که احتمال وقوع ترکیدن در ستون‌های دارای میلگردهای تقویت طولی با قطر بزرگ، بیشتر از ستون‌های با میلگردهای کوچک است. مقاومت نمونه‌های شدیداً مقاوم در برابر آتش، بسیار کمتر از نمونه‌های معمولی بود [۲۴]. کلیه نمونه‌ها حین آزمون تحت بار فشاری معادل ۵۰٪ بار طرح قرار داشتند. برای بتن معمولی پدیده ترکیدن مشاهده نشد، اما برای نمونه‌های با مقاومت بالا پدیده ترکیدن پس از ۸ دقیقه برای بتن C۹۰ (مقاومت فشاری ۹۰ مگاپاسکال) و 8φ۱۲mm (۸ عدد میلگرد تقویت‌کننده با قطر ۱۲ میلی‌متر) و حدود ۱۱ دقیقه برای بتن C۹۰ و 4φ۲۵ mm مشاهده شد. در هر دو مورد مقاومت بالا، ترکیدن در گوشه‌ها رخ داد که به علت از دست رفتن مقاومت کششی در گوشه‌ها در دمای بالا است.

کالیفا^۴ [۲۶] با بحث بر روی ترکیدن بتن‌های با مقاومت بالا و

توانمند، تأکید می‌کند که مقاومت این بتن‌ها در برابر آتش در اثر رفتار شکننده آنها در دمای بالا و وقوع ترکیدن انفجاری، می‌تواند در مقایسه با بتن‌های معمولی، کمتر باشد. وی توصیه می‌کند که از بتن توانمند در فضاها و ساختمان‌هایی که به درجه مقاومت بالا در برابر آتش نیاز است، استفاده نشود.

کاهش مقاومت نسبی در دماهای متوسط (۱۰۰ تا ۴۰۰ درجه سلسیوس) و رخداد ترکیدن انفجاری نمونه‌های با مقاومت بالا در دماهای مذکور، دو تفاوت بارز رفتار بتن‌های معمولی و با مقاومت بالا، در برابر آتش است [۲۸ و ۲۷ و ۱۳]. مقاومت فشاری بتن با مقاومت بالا در این محدوده دمایی تقریباً به میزان ۴۰ درصد مقاومت آن در دمای اتاق، کاهش می‌یابد که این تقریباً ۲۰ تا ۳۰ درصد بیشتر از بتن معمولی است. از نظر ترکیدن انفجاری، بتن با مقاومت بالا در آزمایش‌های تجربی، پتانسیل بسیار بیشتری در مقایسه با بتن معمولی، حتی برای شدت‌های پایین گرمایشی در حد ۵ °C/min، نشان داده است [۳۱-۲۹].

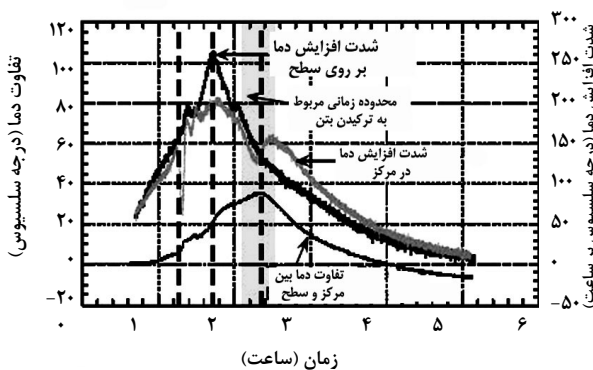
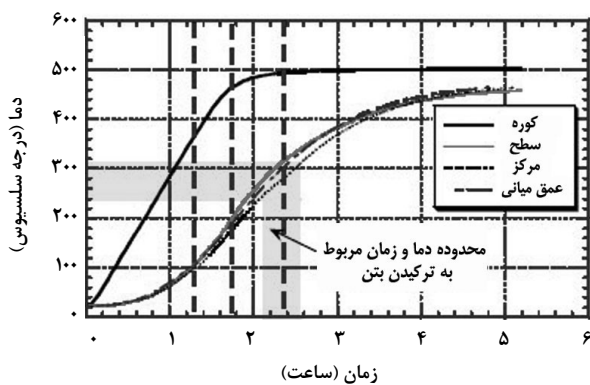
۳-۵ رطوبت و توسعه فشار حفره

هنوز درک کامل از پارامترهای کنترل‌کننده ترکیدن انفجاری وجود ندارد. یک درک کلی این است که علت این ترکیدن انفجاری، عدم توانایی بتن با مقاومت بالا برای انتقال فشار داخلی ایجاد شده از تبخیر آب آزاد و شیمیایی با افزایش دماست. دلیل این موضوع، نفوذپذیری اندک بتن با مقاومت بالاست. هیچ یک از کدهای ساختمانی این رفتار خاص بتن با مقاومت بالا را پوشش نداده‌اند [۲۳]. بنابراین اطلاع دقیق از رفتار این بتن در برابر آتش بسیار مهم است تا در فرایند طراحی، امکان تأمین سطح لازم ایمنی در برابر آتش وجود داشته باشد.

آزمایش‌های بسیاری بر روی نمونه‌های با مقاومت بالا (HSC) انجام شده است. در مؤسسه NIST یک سری آزمون بر روی مقاومت فشاری و مدول کشسانی در دمای بالا با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای mm (۱۰۰×۲۰۰) و سری دیگر برای اندازه‌گیری فشار حفره‌ها در نمونه‌های بلوکی mm (۱۰۰×۲۰۰×۲۰۰)، دارای الیاف پلی‌پروپیلن، و بدون الیاف نامبرده، انجام شد. اثرات نسبت آب به سیمان، درصد رطوبت اولیه، الیاف پلی‌پروپیلن (PP) و مقدار آن و اثر شدت گرمایش (۵ °C/min) و (۲۵ °C/min) بر توسعه فشار حفره و پتانسیل ترکیدن انفجاری، بررسی شد. آزمون‌ها از نظر

1. National Institute for Standards and Technology (NIST)
2. Aldea
3. Eurocode 2
4. Kalifa

این مشکل نشدند. برای آزمون‌های بدون تنش، استوانه‌های ۷۵ مگاپاسکال و یکی از چهار آزمون مخلوط ۶۶ مگاپاسکال در حین گرمایش به 450°C دچار ترکیدگی شدند. ضمن اینکه تمام آزمون‌های ۵۳ و ۶۶ مگاپاسکال نیز در حین گرمایش به 600°C ترکیدند. در بین آزمون‌های خاصیت باقیمانده بدون تنش، یک استوانه از هر سری مخلوط‌های ۶۶ و ۷۵ مگاپاسکال در حین رسیدن به 300°C و تمام آزمون‌های ۷۵ مگاپاسکال در حین رسیدن به 450°C دچار ترکیدگی شدند.



شکل ۱۱- بالا: توسعه دما در استوانه مخلوط I، پایین: اختلاف دما بین سطح و مرکز استوانه مخلوط I [۲۳]

فن [۲۳] رفتار مذکور در فوق را تفسیر نکرده است، اما به نظر می‌آید که موارد زیر قابل استخراج باشد: در نمونه‌های تحت تنش، مخلوط مقاومت بالا با مقاومت ۲۸ روزه ۷۵ مگاپاسکال بیشترین مقاومت را داشته است، لذا پیش‌بار مربوط به قیددار کردن آزمون که معادل ۴۰ درصد مقاومت فشاری طرح است، مقدار بیشتری از بقیه داشته و به نظر می‌آید که این موضوع به عدم ترکیدن آزمون

مکانیکی به صورت‌های تحت تنش، بدون تنش، و باقیمانده بدون تنش انجام شد. آزمون‌های تحت تنش با پیش‌بار معادل ۴۰ درصد مقاومت فشاری در دمای اتاق ($0/4f_{28c}$)، پیش از فرایند گرمایش و در حین آن، مقید شدند. هر دو گروه آزمون‌های تحت تنش و بدون تنش تا رسیدن به نقطه شکست در دمای بالا تحت بار قرار گرفتند. بارگذاری پس از رسیدن آزمون به حالت پایدار انجام شد که با شدت $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ، حدود ۵ ساعت و ۱۵ دقیقه برای دستیابی به دمای هدف (600°C) به طول انجامید.

آزمون‌ها از سه طرح اختلاط مقاومت بالا و یک اختلاط معمولی، با سیمان پرتلند تیپ I و سنگ آهک خرد شده و ماسه رودخانه‌ای ساخته شدند. تمام آزمون‌ها در دمای اتاق و زیر آب تا رسیدن به زمان آزمون عمل‌آوری شدند. آزمون‌ها در داخل یک کوره الکتریکی استوانه‌ای با دو انتهای باز برای بارگذاری توسط جک‌های ماشین فشاری قرار داده شدند. آزمون‌های باقیمانده بدون تنش، جداگانه داغ و سرد شدند و سپس مقاومت فشاری آنها اندازه گرفته شد. سرد شدن آزمون‌ها با نگاه داشتن آنها در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت انجام شد.

نتایج به دست آمده از ترموکوپل‌های (زوج‌های گرمایی) سطحی و مرکزی برای آزمون HSC-I (در شکل ۱۱) (بالا) نشان داده شده است. در منحنی پایین شکل ۱۱) تفاوت دمای سطح و مرکز آزمون نشان داده شده است که حداکثر آن 36°C (متناظر با دمای 270°C در مرکز آزمون) است. شکل پیچیده منحنی‌ها و نوسان‌های آنها، به علت تبخیر رطوبت و انتقال آب آزاد و آب شیمیایی در دماهای مختلف است. هنگامی که مرکز آزمون به دمای 180°C می‌رسد، مقدار قابل توجهی آب شیمیایی آزاد می‌شود. به علاوه شدت افزایش دمای سطح بالا می‌رود که به علت کاهش اثر خنک‌کننده تبخیر است (خط‌چین عمودی دوم در شکل ۱۱)).

بررسی نمونه‌های پوسته‌شده نشان داد که قسمت وسط نمونه‌ها تقریباً سالم مانده و یک لایه ۲ سانتی‌متری از روی آنها جدا شده بود. برای آزمون‌های تحت تنش، نمونه‌های مقاومت بالا با مقاومت ۲۸ روزه حدود ۵۳ تا ۶۶ مگاپاسکال، در حین گرمایش برای رسیدن به 600°C دچار ترکیدگی شدند، در حالی که آزمون‌های با مقاومت ۷۵ مگاپاسکال و نمونه‌های معمولی با مقاومت ۴۰ مگاپاسکال دچار

۳۰ درصد کاهش مقاومت، نشان داد. اما در دمای 450°C ، کاهش مقاومت نسبی برای خاصیت باقیمانده در حد ۵۰ درصد بود که بسیار بالاتر از ۲۵ و ۳۰ درصد مربوط به سایر روش‌ها بود. این نتایج، پیچیدگی روابط بین مقاومت و دما و مقاومت باقیمانده در دمای اتاق را نشان می‌دهند، در این مطالعات نشانه‌ای از اثر قابل توجه میکروسیلیس در رفتار نمونه‌ها مشاهده نشد [۲۳].

این نتایج نشان دادند که روابط ارائه شده توسط یوروکد [۲۵] در دماهای زیر 450°C غیر محتاطانه است، اما در بالای این دما وضع بهتر شده و اطلاعات با یکدیگر انطباق نسبتاً بهتری دارند. از آنجایی که رخداد ترکیدن انفجاری مورد اشاره یوروکد نیست، محاسبات غیرمحتاطانه مقاومت بالا با روابط یوروکد، اهمیت بیشتری می‌یابد [۲۵].

فشار حفره در دمای بالا برای چند نمونه بتن‌های توانمند و مقاومت بالا توسط کالیفا [۲۶] بررسی و گزارش شده است. دما و فشار در پنج نقطه از نمونه‌های دو نوع بتن معمولی ($M30$) و توانمند ($M100$) با ابعاد $30 \times 30 \times 12 \text{ cm}^3$ اندازه گرفته شد. نمونه‌ها تحت تابش‌های حرارتی معادل ۴۵۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس آزمایش شدند. در 800°C نمونه‌ها دچار ترک خوردگی وسیع شدند و اندازه‌گیری فشار در عمق‌های مختلف میسر نشد. فشار حفره یک بیشینه مشخص بر حسب دما نشان داد که برای نمونه‌های $M100$ تا ۳۷ بار و برای نمونه‌های $M30$ تا ۱۸ بار رسید. با توجه به مقدار آب بیشتر در نمونه‌های $M30$ ، کاهش جرم آنها نیز بیشتر از نمونه‌های $M100$ بود.

از روی منحنی‌های فشار حفره و مشتق دما نسبت به زمان برای نمونه‌ها مشاهده می‌شود که کمینه‌های منحنی‌های مشتق دما نسبت به زمان با بیشینه‌های فشارها مطابقت دارد، یعنی بیشینه فشار همراه با پدیده تبخیر و انتقال مقادیر قابل توجه آب است. مقادیر بیشینه فشار حفره در نمونه‌های $M100$ بسیار بیشتر از نمونه‌های $M30$ است. به عبارت دیگر نمونه‌های توانمند با مقاومت بالا بیشتر در معرض ترکیدن هستند. فشار در نمونه‌های $M100$ به طور پیوسته با افزایش عمق بیشتر می‌شود، اما در نمونه‌های $M30$ ، P_{\max} تقریباً در عمق ۳۰۰ mm به بیشترین مقدار می‌رسد. دمای $T_{p\max}$ برای نمونه‌های $M30$ حدوداً ۲۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس کمتر از $M100$ بود. فشار بخار اشباع در چنین محدوده‌ای به طور

کمک کرده است. در نمونه با مخلوط مشابه با همین آزمون، وقتی که تنش بیرونی وجود ندارد، ضعیف‌ترین رفتار از نظر ترکیدن یا پوسته پوسته شدن دیده می‌شود که به علت تخلخل اندک (کمترین تخلخل در کل نمونه‌ها به علت نسبت پایین آب به سیمان) و افزایش فشار بخار حفره است.

توسعه فشار حفره‌ها در نقاط با عمق ۲۵ و ۵۰ میلی‌متر در نمونه‌های مکعبی با مخلوط ۷۵ مگاپاسکال بررسی شد. فارغ از این‌که ترکیب‌های رخ داده باشد، حداکثر فشار حفره در عمق ۲۵ میلی‌متری دیده شد. فشار حفره قبل از ترکیدگی به $2/1$ مگاپاسکال رسید. توسعه فشار حفره به عنوان تابعی از دما در عمق ۲۵ میلی‌متری برای ۵ نمونه مختلف بررسی شد. میانگین دماهای بتن (در عمق ۲۵ mm در هر دو سری بلوک‌ها و استوانه‌ها) در هنگام وقوع ترکیدگی، $(250 \pm 50^{\circ}\text{C})$ بود. محدوده دمایی که ترکیدن انفجاری رخ داد متقارن با زمانی بود که گرادیان دمایی سطح و مرکز به حداکثر رسید. نمونه ۷۵ مگاپاسکال دچار ترکیدگی انفجاری شد، اما برای سایر نمونه‌ها این اتفاق رخ نداد. نتایج نشان داد که اگر چه فشار حفره نقش اصلی در ترکیدن انفجاری دارد، اما ایجاد کرنش‌های ناشی از حرارت نیز می‌تواند یک نقش ثانوی در این خصوص داشته باشد [۲۳]. اثر مثبت افزودن الیاف کاملاً مشهود بود. نمونه‌های ۷۵ مگاپاسکال حاوی مقادیر $1/5$ و ۳ کیلوگرم بر متر مکعب دچار پوسته‌شدگی نشدند. در نمونه دارای ۳ کیلوگرم بر متر مکعب الیاف پلی‌پروپیلن، حداکثر فشار حفره کمتر از $0/5$ مگاپاسکال بود [۲۳].

رابطه مقاومت با دما برای بتن‌های با مقاومت بالا و معمولی تحت تنش، بدون تنش و خاصیت باقی‌مانده ارائه گردیده و با اطلاعات داده شده توسط سایرین مقایسه شده است [۲۳]. تفاوت زیادی بین نتایج نمونه‌های مختلف و همینطور بین نتایج پژوهشگران مختلف مشاهده شد. بیشترین تفاوت‌ها در دمای 100°C مشهود است که از یک طرف کاهش‌های تا ۳۰ درصد و از طرف دیگر افزایش‌های تا ۵ درصد برای نمونه‌های با مقاومت بالا در پژوهش‌های مختلف دیده می‌شود. کاهش مقاومت‌های اندازه‌گیری شده در سه روش آزمون مختلف، کاملاً وابسته به دما بود. در دماهای بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس، خاصیت باقیمانده با ۲۰ درصد کاهش وضعیت بهتری نسبت به شرایط تحت تنش و بدون تنش، به ترتیب با ۲۵ درصد و

HSC در دماهای بالا، اولین بار در سال ۱۹۸۲ توسط کرشنل^۴ [مکاتبات شخصی هرتس با کرشنل، طبق مرجع ۲۱] پیشنهاد شد، اما هرتس [۲۱] در آن هنگام، آن را اساساً به عنوان یک موضوع تحقیقاتی رد کرد، زیرا بنا به نظر وی اولاً چگونگی خروج فاز مذاب پلی پروپیلن از محل آن در بتن جای تردید داشته و ثانیاً با توجه به نظریه‌های موجود، ترکیدن انفجاری از ریزساختار بتن آغاز نمی‌شود که بسیار کوچکتر از فاصله بین الیاف است. با وجود این، تجربیات مختلف سودمندی استفاده از الیاف پلی پروپیلن در جلوگیری از ترکیدن بتن را نشان داد. عقیده کلی بر این است که حفره‌های با جای مانده از ذوب و تجزیه الیاف پلی پروپیلن باعث ایجاد حفره‌های اضافی در بتن می‌شود که فضاهای اضافی برای فاز بخار مهاجرت کرده را ایجاد می‌کند. پس از اثبات عملی سودمندی الیاف پلی پروپیلن، هرتس نظریه دیگری را ارائه کرد که بر آن اساس با ذوب شدن الیاف، مقاومت کششی بتن کاهش می‌یابد، در نتیجه در عمق بتن ترک‌های حرارتی ایجاد می‌شود که باعث رها شدن تنش‌های فشاری حرارتی (که برای ترکیدن بتن مورد نیاز هستند) می‌گردد [۲۱].

ساختمان مرکز ژاپن در فرانکفورت، اولین ساختمانی است که از بتن توانمند مسلح به الیاف پلی پروپیلن ساخته شد [۳۶]. این ساختمان از بتن توانمند با مقاومت اسمی ۱۰۵ مگاپاسکال ساخته شده و حاوی (kg/m^3) ۲ الیاف پلی پروپیلن با طول ۱۲ mm و قطر (mm) ۱۰۰-۲۰۰ می‌باشد. پژوهشگران مختلفی در مورد اثر الیاف آلی کار کرده‌اند. ساروارانتا و میکولا [۳۸-۴۰] نشان دادند که از بین الیاف مختلف، پلی پروپیلن بهترین اثر را دارد، اما سایرین تنها روی پلی پروپیلن کار کرده‌اند. پژوهش‌ها با استفاده از منحنی‌هایی نزدیک به ISO۸۳۴ روی ستون‌های بارگذاری شده [۳۷] یا بارگذاری نشده [۴۱ و ۴۲]، تیرهای کوتاه [۴۳]، نمونه‌های استوانه‌ای [۴۱] و صفحات ملات در ابعاد کوچک [۳۷، ۳۸، ۳۹] و [۷] انجام شده‌اند. اما در اکثر این پژوهش‌ها، ارزیابی‌ها به صورت کیفی و با مشاهدات چشمی انجام گرفته است. کالیفا با اندازه‌گیری کاهش وزن نمونه‌های با مقاومت (MPa) ۱۰۵-۱۱۰ و استفاده از مقادیر صفر تا ۳ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف پلی پروپیلن نشان داد که این الیاف حتی در مقادیر (kg/m^3) ۰/۹ مؤثر هستند. نتایج لنون و کلاپتون [۴۳] نیز این موضوع را تأیید می‌کند. بنتس [۴۴] نشان داد که الیاف بلندتر،

قابل توجه متفاوت است. بیشترین دما حدود $240^{\circ}C$ بود. این عدد با دمای نقطه بحرانی بخار آب ($374^{\circ}C$)، که طبق ادعای هرتس [۲۱] ترکیب در آن رخ می‌دهد، بسیار متفاوت است. احتمال دارد که عدم ترکیب نمونه‌ها در آزمایش‌های کالیفا [۲۶] به دلیل همین دمای پایین باشد. به عبارت دیگر، احتمالاً به علت نوع گرمایش نمونه‌ها توسط یک تابش مشخص الکتریکی، نمونه تحت تابش کافی برای افزایش سریع دما نبوده است. ضمن این که احتمال می‌رود، ترک‌های ناشی از حرارت‌دهی و نیز کانال‌های ایجاد شده توسط وسایل اندازه‌گیری، باعث خروج راحت‌تر بخار آب شده و از افزایش فشار بخار حفره‌ها تا حد کافی برای ترکیب جلوگیری شده باشد.

ایشی‌کاوا^۱ [۳۲] مهاجرت رطوبت و ایجاد فشار داخل حفره‌ها در بتن در دمای بالا را مدل و پیش‌بینی کرده است. وی با استفاده از مدل توسعه داده شده توسط خود، پیش‌بینی مهاجرت بلندمدت رطوبت در بتن، ایجاد فشار داخل حفره‌ها در کوتاه‌مدت و پیش‌بینی ترکیدن بتن در حین آتش‌سوزی را ارائه کرده است. مدل ایشی‌کاوا قابلیت محاسبه دقیق و ساده فشار، چگالی و لزجت دینامیک آب داخل حفره‌های بتن را با استفاده از معادلات پایه ارائه شده توسط زال و واگنر^۲ [۳۴ و ۳۳] و زنگرز و واتسون^۳ [۳۵] دارد [۳۲].

۳-۶ کاربرد الیاف پلی پروپیلن برای بهبود رفتار بتن در برابر آتش

تحقیقات زیادی برای ارائه فناوری‌هایی که باعث محافظت بتن در برابر آتش شوند، انجام شده است. از بین آنها استفاده از الیاف پلی پروپیلن، موفقیت‌آمیز نشان داده شده است [۳۶-۴۳]. الیاف پلی پروپیلن در $170^{\circ}C$ ذوب می‌شوند، درحالی‌که ترکیدن بتن در دمای بین ۱۹۰ تا ۲۵۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد [۲۶]. ذوب شدن پلی پروپیلن و جذب جزئی آن توسط خمیر سیمان باعث می‌شود تا مسیرهایی برای عبور گاز ایجاد شود. با ایجاد شبکه‌ای از این مسیرها، گازهای ایجاد شده در داخل بتن، می‌تواند به بیرون راه یافته و از بالا رفتن فشار جلوگیری کند.

استفاده از الیاف پلی پروپیلن برای جلوگیری از ترکیدن بتن‌های

1. Ichikawa
2. Saul and Wagner
3. Sengers and Watson

4. Krechnel

ناهمگنی ناشی از اختلاط الیاف، پراکندگی در نتایج به وضوح دیده می‌شود.

کالیفا [۳۶] با رسم منحنی‌های P_{max} (فشار حداکثر)، T_{max} (دمای مربوط به فشار حداکثر)، و vP_{max} (گرادیان فشار ماکزیمم = $(\partial P / \partial x)_{max}$)، اثر مثبت الیاف در جلوگیری از ترک‌شدن را نشان داد. برای دوز الیاف بیشتر از $1/75$ (kg/m^3)، فشار حداکثر در دمای نزدیک به نقطه ذوب الیاف رخ داد. بنابراین به نظر می‌آید که الیاف به محض ذوب شدن مؤثر واقع می‌شوند. افزودن الیاف باعث شد تا فشار حداکثر، از $4 MPa$ در بتن بدون الیاف به $1 MPa$ در بتن با دوز الیاف 3 (kg/m^3) برسد. مقادیر T_{Pmax} و vP_{max} به طور قابل توجهی در دوزهای $(1/5-1/75)$ (kg/m^3) تغییر کرد.

کالیفا [۳۶] تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر روی نفوذپذیری و ریزساختار را نیز بررسی کرد. برای این که الیاف پلی‌پروپیلن بتوانند بر روی نفوذپذیری بتن اثر قابل توجه بگذارند، باید دو معیار زیر برآورده شود: اول این که حداقل، قسمتی از الیاف پلی‌پروپیلن به وسیله ماتریس سیمانی جذب شود تا مسیری برای انتقال جرم باز گردد. دوم این که الیاف، یک شبکه متصل به هم ایجاد می‌کنند که این می‌تواند فقط از طریق جاهای خالی به جای مانده از ذوب و تخریب پلی‌پروپیلن و یا در مشارکت با نقص‌های موجود در ساختار باشد. گاربوتسی [۴۷] امکان ارتباط بین اجسام بیضوی را که به طور تصادفی در یک ماتریس پخش شده‌اند، بررسی و آستانه نفوذ را برای آنها با استفاده از شبیه‌سازی عددی تعیین کرد. آستانه نفوذ، نسبتی از ماده است که در بالاتر از آن، این مواد تشکیل یک شبکه متصل به هم می‌دهند. در بالای آستانه نفوذ، خاصیت انتقالی (در اینجا نفوذ گاز) به سرعت افزایش می‌یابد. کالیفا این موضوع را برای الیاف پلی‌پروپیلن با مقطع مستطیلی بررسی کرده است. به این منظور طول الیاف $19 mm$ و مساحت سطح مقطع $7/5 \times 10^{-3} mm^2$ در نظر گرفته شد. برای این اعداد، قطر معادل، $98 \mu m$ و نسبت شکلی $\lambda = \frac{l}{d} = 200$ می‌شود. بر اساس کارهای گاربوتسی، آستانه نفوذ برای

چنین الیافی 32% است. در این نسبت فقط باید سیمان و ماسه در نظر گرفته شود. بنابراین با حذف 40% درصد حجمی مربوط به سنگدانه، دوز الیاف تقریباً $1/8$ (kg/m^3) برای بتن به دست می‌آید که در محدوده مطالعه شده توسط کالیفا قرار دارد. البته کالیفا برای

اثر بیشتری دارند. اگرچه بررسی‌های تجربی روی نمونه‌های گچی نشان داده است که عملاً الیاف با طول‌های متفاوت بین 12 تا 20 میلی‌متر بهترین اثر را بر مقاومت ماتریس در برابر آتش دارد [۴۵ و ۴۶]، زیرا الیاف کوتاه‌تر دارای نفوذ اندک در ماده بوده و الیاف بلندتر در کارپذیری ایجاد مشکل می‌کنند، ضمن اینکه خم شدن یا تا شدن الیاف بلندتر، اثر آنها را کاهش می‌دهد. از دیدگاه صنعتی، مقدار 2 (kg/m^3)، با الیاف بین 10 تا 20 میلی‌متر و قطر $(200-50)$ میکرون به صورت کلی برای جلوگیری از ترک‌شدن بتن‌های توانمند پذیرفته شده است [۳۶]. در عین حال اثر بر کارایی بتن نیز باید مورد توجه قرار گیرد، ضمن این که این اعداد را نباید به بتن‌های با مقاومت‌های بالاتر، تخلخل‌های کمتر و یا سایر شرایط بسط داد.

کالیفا [۳۶] اثر الیاف پلی‌پروپیلن را روی نمونه‌های بتن HPC با مقاومت $MPa (110-105)$ و با ابعاد $cm^3 (30 \times 30 \times 120)$ آزمایش کرد. بتن مورد استفاده، مشابه بتن مورد مطالعه در طرح تحقیقات ملی فرانسه بود. سنگدانه آن کربناتی، دارای میکروسیلیس معادل 1 درصد وزن سیمان و نسبت آب به سیمان در آن، $0/3$ بوده است. دوز الیاف از صفر تا 3 (kg/m^3) بود. برای حفظ کارایی مخلوط‌ها، اضافه کردن مقادیر بیشتر سیمان به میزان 10 درصد (معادل $38 kg/m^3$) و فوق‌روان‌کننده به مقدار 30 درصد (معادل $3 kg/m^3$) لازم شد. مقاومت‌های فشاری اسمی نمونه‌های استوانه‌ای $\phi 16 cm \times H 32 cm$ پس از 28 روز اندازه‌گیری و یک افت مقاومت فشاری تا حداکثر 8 درصد مشاهده گردید که می‌تواند مربوط به عیب‌هایی نظیر ایجاد حباب هوا در هنگام اختلاط باشد. فشار حفره‌ها، دما و افت جرم نمونه‌های تحت تابش، معادل $600^\circ C$ اندازه‌گیری شد. شدت افت جرم با افزایش مقدار الیاف بیشتر شد. این موضوع، اثر الیاف در ایجاد شبکه متصل به هم را که می‌تواند بخار آب را به بیرون هدایت کند، نشان می‌دهد [۳۶]. مطالعات ساروارانتا [۳۸] و ساروارانتا و میکولا [۴۰ و ۳۹] بر روی نمونه‌های ملات با ضخامت کمتر از $50 mm$ این موضوع را تأیید می‌کند.

وجود الیاف به طور کلی اثری بر دمای نمونه‌ها نداشت. وجود الیاف و ذوب شدن آنها باعث می‌شود که بخار آب از طریق مسیرهای ایجاد شده، به خارج برود. بررسی منحنی‌های فشار حفرات نشان داد که افت فشار پس از رسیدن به نقطه حداکثر، در بتن‌های الیافی بیشتر است که به علت وجود شبکه‌ای از مسیرهای دارای تخلخل است. حداکثر فشار با افزایش الیاف، کاهش نشان داد. به علت

برخی نمونه‌ها، حتی با نسبت $0/9 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ نیز اثر جلوگیری از ترکیدن را مشاهده کرد [۳۶].

کالیفا ریز ترک‌ها و پراکندگی آنها را با میکروسکوپ نوری بررسی کرد. نمونه‌های بتن بدون الیاف و با دوز $3 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ بررسی شد. در دمای 400°C بتن الیافی چگالی ترک بسیار بیشتر از بتن معمولی نشان داد. در بتن الیافی، ترک‌ها یک شبکه متراکم از ترک‌های مویینه بسیار ریز (در حد یک میکرون) بین و در اطراف اسکلت شن و ماسه‌ای تشکیل دادند. مشاهده شد که در بتن الیافی، ترک‌ها ضخیم‌تر (در حد ۱۰ میکرون) بود و فاصله بزرگی بین سنگدانه‌های درشت‌تر به هم ارتباط یافتند. کالیفا دلیل دقیق این رفتار را نامعلوم توصیف می‌کند، اما احتمال می‌دهد که الیاف، محلی برای هسته‌سازی ترک‌ها باشند. همچنین انبساط الیاف پیش از ذوب آنها ممکن است باعث ایجاد یک تنش کوچک در ماتریس شده، به هسته‌سازی ترک‌ها کمک کند. تفاوت میزان ترک‌ها در دمای 400°C با دماهای 200°C و 300°C قابل ملاحظه بود [۳۶].

برای مطالعه رفتار الیاف پس از ذوب شدن، از میکروسکوپ الکترونی SEM با نمونه‌های صیقلی مغزه‌گیری شده از نمونه‌های بتنی که برای حداقل ۶ ساعت در معرض دمای 160°C و 200°C قرار داده شدند، استفاده شد. آزمایش نشان داد که الیاف به محض گذشتن از دمای ذوب 171°C ناپدید شدند. کالیفا [۳۶] این را به معنای جذب آنها توسط ماتریس سیمانی تفسیر می‌کند.

نفوذپذیری باقیمانده نمونه‌ها بررسی شد. تمام نمونه‌های بتن الیافی با مقادیر مختلف الیاف در دمای 80°C نفوذپذیری یکسانی داشتند که تنها دو برابر بتن بدون الیاف بود. بنابراین در دماهای پایین، الیاف تأثیر چندانی روی نفوذپذیری بتن ندارند. اما با بالا رفتن دما، اثر الیاف به مراتب بیشتر، مشاهده شد، به طوری که در 200°C ، بتن با $0/9 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ الیاف حدود ۱۵ برابر و نمونه با $3 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ الیاف، حدود ۷۰۰ برابر دارای نفوذپذیری بیشتر نسبت به نمونه‌ها در 80°C بود [۳۶]. سیمبوروفسکا [۴۸] نشان داد که برای بتن بدون الیاف، نفوذپذیری با افزایش دما بالا می‌رود. بین دماهای 80°C تا 300°C درجه سلسیوس این افزایش عمدتاً به علت بزرگ شدن ابعاد فضاهای تخلخلی و در دمای بالاتر از 300°C (بخصوص در 400°C) اساساً بر اثر نفوذپذیری به علت ترک خوردگی است. اما الگوی رفتار در بتن الیافی متفاوت است. نفوذپذیری در اینجا پس از ذوب شدن

الیاف، به وسیله آنها کنترل می‌شود.

۴- خواص بتن خودتراکم در برابر آتش

تفاوت‌های مهمی نظیر مقادیر مختلف پودر، مقدار تراکم و وجود مواد افزودنی، باعث می‌شود تا بتن‌های خودتراکم دارای خواص بسیار متفاوتی از سایر بتن‌ها در برابر آتش باشند. با توجه به جدید بودن نسبی فناوری بتن خودتراکم، تحقیقات بسیار اندکی بر روی رفتار آن در برابر آتش انجام شده است [۵۱]. بلونتروک [۵۲] استوانه‌های کوچک بتن خودتراکم را در معرض آزمایش آتش قرار داد. نتایج نشان داد که ترکیدن نمونه‌ها به نوع پرکننده و درصد رطوبت بستگی دارد. پی (Ye) [۵۰ و ۴۹] تغییرات ریزساختار چند نوع خمیر سیمان، با الیاف پلی‌پروپیلن و بدون آن، بر اثر افزایش دما را بررسی کرد. آزمون‌های خمیر سیمان بتن خودتراکم، خمیر سیمان بتن توانمند و خمیر سیمان سنتی با نسبت‌های اختلاط یکسان با بتن‌های مربوطه، اما بدون سنگدانه، ساخته شد. مخلوط‌های خمیر سیمان خودتراکم استفاده شده در این مطالعه با سیمان پرتلند نوع (CEM I ۵۲/۵) با پودرسنگ آهک اضافه شده به عنوان پرکننده تهیه شد. نتایج این پژوهش، مفید بودن الیاف پلی‌پروپیلن برای بهبود رفتار بتن خودتراکم در برابر آتش را نشان داد. خواص ریزساختار، یعنی خلل و فرج، توزیع اندازه منافذ و توزیع فاز اندازه‌گیری شد. برای این کار از تخلخل‌سنج جیوه‌ای استفاده شد. همچنین میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای بررسی توزیع فاز (تخلخل، CSH، Ca(OH)_2 و مغزه هیدراته نشده سیمان) به کار برده شد. تخریب شیمیایی خمیر سیمان خودتراکم در دماهای مختلف به روش آنالیز وزن‌سنجی حرارتی (TG) تعیین شد. اثر مقدار الیاف پلی‌پروپیلن بر تغییر ریزساختار بررسی شد. همه نمونه‌ها در معرض دمای بالا در یک کوره الکتریکی با شدت گرمایش 10°C/min قرار داده شدند. حداکثر دمای به دست آمده در کوره 950°C بود. هیچ یک از آزمون‌ها نشانه‌ای از ترکیدن انفجاری نشان نداد، اما ترک‌های زیادی در آنها مشاهده شد. دلیل عدم ترکیدن نمونه‌ها، اندازه کوچک آزمون‌ها و مهمتر از آن، سرعت اندک افزایش دما است. یادآور می‌شود که در آزمایش‌های استاندارد آتش، دما در دقایق اول با سرعت بسیار زیادی افزایش می‌یابد و در کمتر از ۲۰ دقیقه به 800°C می‌رسد. مشاهده شد که نمونه‌های

رمضانیانپور و اسماعیلی [۵۳ و ۵۴] تأثیر دمای زیاد بر خواص مکانیکی بتن خودتراکم حاوی پومیس را بررسی کرده‌اند. پوزولان پومیس به صورت ۱۵ درصد وزنی جایگزین سیمان و نیز ۱۵ درصد وزنی جایگزین پرکننده و نسبت آب به سیمان در طرح اختلاطها ثابت و برابر با ۰/۴ بوده است. نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری تحت شرایط یکسان و بدون اعمال هیچ گونه باری در کوره تا رسیدن به دماهای ۲۰۰، ۴۵۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس حرارت داده شده و ۲ ساعت در این دماها نگه داشته شدند. سپس با رسیدن دمای کوره به دمای محیط، آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش‌های غیر مخرب مانند چکش اشمیت و اولتراسونیک (فراصوتی) و همچنین توزین نمونه‌ها انجام شد. در محدوده دمای ۴۵۰ تا ۶۰۰ درجه سلسیوس، یک افت مقاومتی ۷۰ تا ۷۵ درصدی در تمام نمونه‌ها مشاهده شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های غیرمخرب چکش اشمیت و اولتراسونیک برای بتن‌های معمولی و خودتراکم تفاوت قابل توجهی نشان داد که علت آن می‌تواند تأثیر سختی لایه سطحی نمونه‌ها در نتایج چکش اشمیت و نیز بروز ریزترک‌ها در نتایج اولتراسونیک باشد. کلاً نتایج حاصل از نمونه‌های خودتراکم حاوی پومیس به صورت جایگزین پرکننده، مقاومت پسماند بیشتری از سایر نمونه‌ها نشان داد.

کلاً به علت جدید بودن فناوری بتن خودتراکم هنوز تعداد اندکی کارهای پژوهشی بر روی خواص این نوع بتن در برابر آتش صورت گرفته است، که این کارها نیز نیاز به تحقیقات بیشتر بر روی رفتار و مقاومت این بتن در برابر آتش را نشان می‌دهد. آزمایش‌های محدود وجود زمینه ترکیدگی بسیار بیشتر بتن خودتراکم نسبت به بتن‌های معمولی را نشان داده است. اثرات پرکننده، سن بتن، وجود الیاف، نوع الیاف، مقدار رطوبت، شرایط بارهای روی بتن و مسائل متعدد دیگر برای شناخت رفتار بتن خودتراکم در برابر آتش نیاز به تحقیقات وسیع دارد [۵۱].

۵- نتیجه‌گیری

مقاومت در برابر آتش از مشخصات مهم عناصر بتنی است که بر حسب الزامات مقرراتی یا طراحی باید تأمین شود. درجات مورد نیاز برای مقاومت در برابر آتش معمولاً بین ۱ تا ۴ ساعت می‌باشد که بستگی به کاربری ساختمان، ابعاد آن و نوع عنصر ساختمانی دارد.

خمیر (SCCP)، الگوی متفاوتی در مقایسه با خمیرهای بتن توانمند (HPCP) و بتن معمولی یا سنتی (TCP) نشان دادند.

به اعتقاد برخی پژوهشگران در نسبت آب به پودر یکسان، خلل و فرج و توزیع اندازه منافذ خمیر سیمان خودتراکم شبیه به خمیر سیمان توانمند است [۵۰]. بنابراین به نظر می‌آید که وقتی بتن خودتراکم در معرض تأثیر دماهای بالا قرار گیرد، احتمالاً باید خطر ترکیدن و شکست آن مشابه با بتن توانمند باشد. اما مشاهدات میکروسکوپ الکترونی SEM و اندازه‌گیری‌های (DTA/TGA) نشان داد که ترکیب فازهای SCCP و HPCP متفاوتند [۵۰].

بوستروم [۵۱] خواص برخی بتن‌های خودتراکم در برابر آتش را بررسی کرد. شانزده نمونه بتنی شامل ۴ نمونه معمولی و ۱۲ نمونه خودتراکم تحت آزمون مقیاس بزرگ مطالعه شد. نمونه‌ها به شکل منشوری با ابعاد $2 \times 2 \times 0.2$ m^۳ ساخته شدند و به نحوی در کوره قرار گرفتند که از ۴ طرف جانبی در معرض دمای کوره باشند. نمونه‌ها پیش‌تنیده شدند و بار مکانیکی دیگری در حین آزمون روی آنها وارد نشد. نسبت‌های آب به سیمان معادل ۰/۴، ۰/۵۵ و ۰/۷ بررسی شدند. کلیه نمونه‌ها برای ۶ ماه، تعدادی در زیر آب و تعدادی دیگر در هوا، عمل‌آوری شدند. برای نمونه‌های خودتراکم از دو نوع پرکننده، یکی پودر سنگ آهک و دیگری پودر شیشه، استفاده شد. به برخی از نمونه‌ها الیاف پلی‌پروپیلن با مقادیر ۲ و ۴ کیلوگرم بر متر مکعب افزوده شد. ستون‌ها در معرض دو رژیم آتش هیدروکربنی و استاندارد قرار داده شدند. تمام نمونه‌ها دچار ترکیدگی شدند که موارد زیر از این نظر قابل ذکر است:

- ۱- ترکیدن برای تمام نمونه‌ها در همان دقایق ابتدایی (از ۲ تا ۷ دقیقه) رخ داد و بین ۳ تا ۳۴ درصد کاهش وزن در نمونه‌ها مشاهده شد.
- ۲- مقدار ترکیدن نمونه‌های خودتراکم بسیار بیشتر از نمونه‌های معمولی بود.
- ۳- با افزایش نسبت آب به سیمان، ترکیدن در نمونه‌ها کاهش یافت.
- ۴- با افزایش الیاف، ترکیدن در نمونه‌ها کاهش یافت.
- ۵- رفتار نمونه‌های خودتراکم حاوی پرکننده شیشه بهتر از نمونه‌های حاوی پودر سنگ آهک بود.
- ۶- بدترین رفتار از نظر ترکیدگی، مربوط به نمونه‌های حاوی پودر سنگ آهک با نسبت آب به سیمان ۰/۴ بود.

- [۲] آیین‌نامه محافظت ساختمان‌ها در برابر آتش، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، (۱۳۸۵).
- [۳] بختیاری، سعید؛ زمانی، سهیل؛ قاسم‌زاده، مسعود. "راهنمای آیین‌نامه محافظت ساختمان‌ها در برابر آتش"، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، (۱۳۸۵).
- [۴] استاندارد ایران شماره ۷۲۷۱، استانداردهای آزمایش‌های آتش برای مصالح و فرآورده‌های ساختمانی، آزمایش‌های واکنش در برابر آتش - قسمت‌های اول تا هشتم.
- [۵] بختیاری، سعید؛ و همکاران. "استانداردسازی و طبقه‌بندی مصالح ساختمانی از نظر خطر حریق". مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، برنامه ملی تحقیقات، شورای پژوهش‌های علمی کشور، تهران، (۱۳۸۵).

- [6] Harmathy, T. Z. "Properties of building materials". In: SFPE handbook of Fire protection engineering, Society of Fire Protection Engineers, Boston, USA, (1995).
- [7] Anderberg, Y., Thelandersson, S., Bulletin 54, Lund Institute of technology, Lund, Sweden, (1976).
- [8] Schneider, U. Fire and Materials, Vol. 1), 103, (1976).
- [9] Harmathy, T. Z., "Properties of building materials at elevated temperatures". DBR paper No. 1080, NRC 20956, National Research Council of Canada, Ottawa, (1983).
- [10] Harmathy, T. Z. "Fire safety design and concrete". Longman Scientific and Technical, Harlow, U.K., (1993).
- [11] Harmathy, T. Z. "Determining the temperature history of concrete Institut Naviere constructions following fire exposure". ACI J. 65, 959- 964, (1968).
- [12] Handoo, S. K., Agarwal, S., Agarwal, S. K., Ahluwalia, S. C. "Effect of temperature on the physico-chemical characteristics of hardened concrete". in: H. Justnes (Ed.), 10th International Congress of Chemistry of Cement, Gothenburg, Sweden, June 2 -6, (1997).
- [13] Raina, S. J., Vishwanathan, V. N., Ghosh, S. N., "Instrumental techniques for investigation of damaged concrete". Indian Concr. J., 52, 147- 149, (1978).
- [14] Handoo, S. K., Agarwal, S., Agarwal, S. K. "Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures, Cement and Concrete Research, 32, 1009-1018, (2002).
- [15] Zhou, Q., Glasser, F. P. "Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at < 120 °C"., Cement and Concrete Research, 31, 1333-1339, (2001).
- [16] Nonnet, E., Lequeux, N., Boch, P., "Elastic properties of high alumina cement castables from room temperature to 1600 °C, J. Eur. Ceram. Soc., 19, 1575-1583, (1999).

مقاومت بتن در برابر آتش به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که مهم‌ترین آنها عبارت از نوع و درصد ترکیبات، تراکم، درصد رطوبت و تخلخل می‌باشد. برای مقاومت بتن‌های با وزن معمولی و نیز بتن‌های سبک (دارای سنگدانه‌های سبک) تجربیات طولانی‌تر و نتایج بیشتری وجود دارد که بعضاً در برخی مقررات ساختمانی در دنیا به شکل تجویزی ارائه شده‌اند (با این توضیح که حتی برای این بتن‌ها نیز تغییرات مواد می‌تواند باعث تغییر نتایج شده و به علاوه دلایل دقیق پدیده‌هایی مانند ترک‌یدن برای آنها نیز هنوز به طور کامل مشخص نشده است). اما رفتار بتن‌های متراکم و بتن‌های جدید (مانند بتن‌های با مقاومت بالا، توانمند و خودتراکم) به مراتب پیچیده‌تر است و کدهای طراحی موجود، پیش‌بینی موفقی برای آنها ارائه نمی‌دهد. خصوصاً ترک‌یدگی شدید این بتن‌ها در دمای بالا، ضعف اساسی برای آنها محسوب می‌شود که می‌تواند باعث سقوط سریعتر از انتظار این عناصر در آتش‌سوزی شود. پارامترهای تخلخل و درصد رطوبت و به تبع آنها فشار حفره، پارامترهای تعیین‌کننده مهمی برای این رفتار بتن‌های متراکم هستند. بتن‌های متراکم در دماهای حدود ۱۰۰ تا ۴۰۰ درجه سلسیوس دچار افت مقاومت فشاری، تقریباً به میزان ۴۰ درصد مقاومت آن در دمای اتاق، می‌شوند که این حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد بیشتر از بتن معمولی است. افزایش الیاف پلی‌پروپیلن برای کمک به رفع این مشکل در تجربیات آزمایشگاهی نتیجه خوبی داده است. بتن‌های خودتراکم نیز دارای رفتار متفاوتی از سایر بتن‌ها در برابر آتش می‌باشند که به دلیل عواملی نظیر حجم بالای پودر، مقدار تراکم و وجود مواد افزودنی (مانند افزودنی‌های شیمیایی که برای تغییر رئولوژی اضافه می‌شوند) است. اثرات پرکننده‌ها، سن بتن، وجود الیاف، مقدار رطوبت و نحوه انتقال آن در دمای بالا (بخصوص با توجه به وجود پودرهای معدنی بیشتر در بتن‌های خودتراکم)، شرایط بارهای روی بتن، مشخصات حرارتی و مسائل متعدد دیگر برای شناخت رفتار بتن خودتراکم در برابر آتش، نیاز به تحقیقات وسیع دارد.

مراجع

- [۱] مهتا و مونته‌ئیرو. "ریزساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)". ترجمه رضانیانپور، علی‌اکبر، قدوسی، پرویز، گنجیان، اسماعیل، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۸۵).

- [17] Khoury, G. A. "Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment, *Mag. Concr. Res.*, 44, 291–309, (1992).
- [18] Grattan-Bellew, P. E. "Microstructural investigation of deteriorated Portland cement concretes". *Constr. Build. Mat.*, 10, 3 – 16, (1996).
- [19] Ruiz, L. A., Platretb, G., Massieub, E., Ehrlachera, A. "The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste". *Cement and Concrete Research*, 35, 609-613, (2005).
- [20] International Code Council. "International Building Code". USA, (2003).
- [21] Hertz, K. D. "Limits of spalling of fire exposed concrete". *Fire safety journal*, 38, 103-116, (2003).
- [22] Anderberg, Y. "Spalling phenomena of HPC and OC". In Phan, L. T. (editor), *Proceedings of International workshop on fire performance of high strength concrete*, NIST, MD, (1997).
- [23] Phan, L. T. "High Strength Concrete at high temperature – An Overview". In: G.; Dehn, F.; Faust, T. (Editors), *Utilization of High Strength/High Performance Concrete*, 6th Int. Symposium. Proceedings. Volume 1. June 2002, Leipzig, Germany, 501-518, (2002).
- [24] Aldea, C. M. "Fire tests on normal and high – strength reinforced concrete columns". In: Phan, L. T. (editor), *Proceedings of International workshop on fire performance of high strength concrete*, NIST, MD, (1997).
- [25] European Committee of Normalisation. "Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1 -2: Structural Fire Design". CEN/TC 250/SC 2, (1993).
- [26] Kalifa, P. "Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures". *Cement and Concrete Research*, 30, pp 1915-1927, (2000).
- [27] Phan, L.T., Carino, N.J. "Review of mechanical properties of HSC at elevated temperature". *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 10 (1), February, 58-64, (1998).
- [28] Phan, L.T., Carino, N.J., "Mechanical properties of high strength concrete at elevated temperatures". NISTIR 6726, Building and Fire Research Laboratory, NIST, Gaithersburg, Maryland, March, (2001).
- [29] Castillo, C., Durrani, A. J. "Effect of transient high temperature on high-strength concrete". *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 1, Jan-Feb, 47-53, (1990).
- [30] Hertz K. "Heat Induced Explosion of Dense Concretes". Institute of Building Design, Report No. 166, Technical University of Denmark, (1984).
- [31] Diederichs, U., Jumppanen, U. M., Schneider, U. "High temperature properties and spalling behavior of high strength concrete". *Proceedings of 4th Weimar Workshop on HPC Concrete: Material Properties and Design*, Germany, Oct., pp 219-236, (1995).
- [32] Ichikawa, Y., England, G. L. "Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperatures". *Nuclear Engineering and Design*, 228, 245–259, (2004).
- [33] Saul, A., Wagner, W. "International equations for the saturation properties of ordinary water substance". *J. Phys. Chem. Ref. Data* 16, 893–901, (1987).
- [34] Saul, A., Wagner, W. "A fundamental equation for water covering the range from the melting line to 1273 K at pressures up to 25 000 MPa". *J. Phys. Chem. Ref. Data* 18, 1537–1564, (1989).
- [35] Sengers, J.V., Watson, J.T.R. "Improved international formulations for the viscosity and thermal conductivity of water substance". *J. Phys. Chem. Ref. Data* 15, 1291–1314, (1986).
- [36] Kalifa, P. "High – temperature behavior of HPC with polypropylene fibers: from spalling to microstructure". *Cement and Concrete Research*, 31, 1487-1499, (2001).
- [37] Breitenbücker, R. "High strength concrete C 105 with increased fire resistance due to polypropylene fibres". in: F. de Larrad, R. Lacroix, (Eds.), *4th International Symposium on the Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete*, Paris, France, 571– 577, (1996).
- [38] Sarvaranta, L., Jarvela, E., Mikkola, E. "Fibre mortar composites under thermal exposure". in: Pluralis (Ed.), *Proceedings of 2nd International Symposium on Textile Composites in Building Construction*, Lyon, France, 23–25 June, 47–56, (1992).
- [39] Sarvaranta, L Mikkola, E. "Fibre mortar composites in fire conditions". *Fire Mater*, 18, , 45– 50, (1994).
- [40] Sarvaranta, L Mikkola, E. "Fibre mortar composites under fire conditions: Effects of ageing and moisture content of specimens, *Mater. Struct.*, 27, 532–538, (1994).
- [41] Nishida, A., Yamazaki, N., Inoue, H., Schneider, U., Diederichs, U. "Study on the properties of high strength concrete with short polypropylene fibers for spalling resistance". in: K. Sakai, N. Banthia, O.E. Gjorv (Eds.), *Proceedings of the Symposium on Concrete Under Severe Environment 2*, 1141–1150, (1995).
- [42] Diederichs, U., Jumppanen, U. M., Schneider, U. "High temperature properties and spalling behaviour of high strength concrete". *4th Int. Workshop on High Performance Concrete — Characteristics, Material Properties and Structural Performance*, Weimar, Germany, October 5 –6, (1995).
- [43] Lennon, T., Clayton, N. "Fire tests on high grade concrete with polypropylene fibres". *BRE Report 395*, (1999).
- [44] Bentz, D. "Fibers, percolation and spalling of high performance concrete". *ACI Mater. J.*, 97, 351– 359, (2000).
- [۴۵] بختیاری، سعید، جعفرپور، فاطمه، فیروزیار، فهیمه، هدایتی، محمد جعفر، محمد کاری، بهروز. "بهبود مقاومت در برابر آتش و خواص فیزیکی – مکانیکی اندود و تخته‌های گچ و گچ/پرلیت به وسیله الیاف شیشه و امولسیون پلی‌وینیل‌استات"، *مجله علمی-پژوهشی امیرکبیر*، سال هجدهم، شماره ج-۶۶، تابستان (۱۳۸۶).

- [46] Bakhtiyari, S.B.; Jafarpoor, F.; Firoozyar, F. "Thermal and Mechanical Properties of Fire Resistant Gypsum Plasters". Asian Journal of Civil Engineering (Building & Housing), Vol. 1, No. 2, (2000), PP67-82.
- [47] Garboczi, E., Snyder, K., Douglas, J., Thorpe, M. "Geometrical percolation threshold of overlapping ellipsoids". Phys. Rev. E: Stat. Phys., Plasmas, Fluids, Relat. Interdiscip. Top., 52, 819–828, (1995).
- [48] Tsimbrovska, M., Kalifa, P., Quenard, D., Daïan, J. F. "High performance concrete at elevated temperature: Permeability and microstructure". in: M. Livolant (Ed.), Transactions of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Lyon, France 5, 475–482, (1997).
- [49] Ye, G., Liu, X., De Schutter, G., Taerwe, L., Vandeveld, P. "Phase distribution and microstructural changes of self-compacting cement paste at elevated temperature". Cement and Concrete Research Journal, Vol. 37, 978-987, 2007.
- [50] Ye, G., Liu, X., De Schutter, G., Poppe, A. M., Taerwe, L. "Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes". Cement and Concrete Research, Vol. 29, 94–102, 2007.
- [51] Boström, L. "The performance of some self compacting concretes when exposed to fire". SP report 2002:23, SP Swedish National Testing and Research Institute, (2002).
- [52] Blontrock, H., Taerwe, L., "Exploratory spalling tests on self compacting concrete", Proc. 6th Int. symp on utilization of HPC, Germany, (2002).
- [۵۳] رمضانپور، علی‌اکبر، اسماعیلی، رضا. "تأثیر دمای زیاد بر خواص مکانیکی بتن خودتراکم حاوی مواد پوزولانی". دومین کارگاه تخصصی بتن خود تراکم، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، اردیبهشت (۱۳۸۸).
- [54] Ramezani pour, A.A., Esmaili, R. "SCC containing pozzolanic materials as filler replacement at elevated temperatures". 3rd International Conference on Concrete & Development, Tehran, May, pp 743-751, (2009).