

## Investigating the performance and mechanical properties of normal and high performance concretes against direct fire

Meysam Farahmandi<sup>1</sup>, Mohammadhossein Ahmadian Khameneh<sup>1</sup>, Hassan Afshin<sup>2\*</sup>, Gholamreza Qudsi Sharif<sup>3</sup>,  
Abu Meysam Moulai<sup>4</sup>

1- Master Student of Structural Engineering, faculty of Civil & Environmental Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2- Associate Professor of Structural Engineering, faculty of Civil & Environmental Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

3- Instructor of the Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

4-Master in structural civil engineering and an expert in the laboratory complex of the Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

### ABSTRACT

Concrete is an excellent thermal insulator with a high heat capacity. Heat transfer within concrete specimens depends on the thermal and mechanical properties of its constituent materials, the compactness of the microstructure, and the presence or absence of reinforcing fibers. In this research, the performance of three types of concrete: normal concrete (NSC), high-strength concrete (HSC), and ultra-high performance concrete (UHPC) in terms of compressive strength, elastic modulus, and appearance properties after exposure to a temperature of  $900^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$  from flames for 3 hours was investigated. Based on the results, adding  $50 \text{ kg/m}^3$  of recycled steel fibers increased the residual compressive strength of NSC and UHPC after heat exposure by 7% and 1%, respectively, while the use of fibers in HSC did not improve compressive strength. Also, adding  $50 \text{ kg/m}^3$  of recycled steel fibers to the NSC, HSC, and UHPC mix designs increased the residual elastic modulus after heat exposure by 9%, 4%, and 18%, respectively. The addition of recycled steel fibers in NSC and HSC reduced the length, depth, and width of cracks and also limited the effects of spalling and preserved the structural integrity of the specimens, while in UHPC it reduced heat transfer and preserved the structural integrity of the specimens. Also, in all concretes, fibers improved the bending behavior after heating and UHPC reinforced concrete had the best bending performance and energy absorption was achieved in the two states before and after heating, respectively 59.07 and 7.63 Joules.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 27 June 2024

Revise Date: 17 August 2024

Accept Date: 05 September 2024

### Keywords:

Normal strength concrete  
High strength concrete  
ultra-high performance concrete  
high-temperature  
Elastic modulus  
pore pressure  
Concrete cracking

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.459880.3429](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.459880.3429)

\*Corresponding author: Hassan Afshin

Email address: [hafshin@sut.ac.ir](mailto:hafshin@sut.ac.ir)

## بررسی عملکرد و مشخصات مکانیکی بتن‌های معمولی و عملکرد بالا در برابر شعله مستقیم آتش

میثم فرهمندی<sup>۱</sup>، محمد حسین احمدیان خامنه<sup>۲</sup>، حسن افشین<sup>۳\*</sup>، غلامرضا قدسی شریف<sup>۴</sup>، ابومیثم مولایی<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۳- مربی دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۴- کارشناس ارشد مهندسی عمران سازه و کارشناس مجموعه آزمایشگاه‌های دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

### چکیده

بتن یک عایق حرارتی عالی و دارای ظرفیت حرارتی بالایی است. مقاومت بتن در برابر حرارت زیاد و انتشار حرارت در داخل نمونه‌های بتنی به خواص حرارتی و مکانیکی مواد تشکیل دهنده آن، میزان فشردگی ریزساختار و وجود یا عدم وجود الیاف مسلح کننده بستگی دارد. با توجه به احتمال وقوع آتش سوزی در طول عمر هر سازه و از طرف دیگر کاربرد سازه‌ای و غیرسازه‌ای بتن در محیط با درجه حرارت خیلی بالا، نشانگر ضرورت بررسی انواع بتن در دماهای خیلی بالا است. در تحقیق حاضر عملکرد سه نوع بتن معمولی (NSC)، بتن با مقاومت بالا (HSC) و بتن فوق توانمند (UHPC) از لحاظ مقاومت فشاری و خمشی، مدول الاستیسیته و ویژگی‌های ظاهری بعد از ۳ ساعت قرارگیری در معرض درجه حرارت  $20 \pm 900^\circ\text{C}$  ناشی از شعله‌های آتش سنجیده شده است. بر اساس نتایج افزودن  $50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  الیاف فولادی بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۷ و ۱ درصدی مقاومت فشاری باقیمانده در بتن‌های (NSC) و (UHPC) بعد از حرارت دیدگی گردید، ولی به کارگیری الیاف در بتن (HSC) موجب بهبود مقاومت فشاری نگردید. همچنین افزودن  $50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  الیاف فولادی بازیافتی در طرح اختلاط‌های NSC، HSC و UHPC به ترتیب موجب افزایش ۹، ۴ و ۱۸ درصدی مدول الاستیسیته باقیمانده بعد از حرارت دیدگی گردید. بکارگیری الیاف فولادی بازیافتی در NSC و HSC باعث کاهش طول، عمق و عرض ترک و همچنین محدود کردن آثار پوسته پوسته شدگی و حفظ انسجام ساختاری نمونه‌ها و در بتن UHPC باعث کاهش انتشار حرارت و حفظ انسجام ساختاری نمونه‌ها گردید. همچنین در تمامی بتن‌ها، الیاف موجب بهبود رفتار خمشی بعد از حرارت دیدگی و بتن مسلح شده UHPC بهترین عملکرد خمشی را داشته و در دو حالت قبل و بعد از حرارت، به ترتیب جذب انرژی ۵۹/۰۷ و ۷/۶۳ ژول حاصل شد.

کلمات کلیدی: بتن معمولی، بتن مقاومت بالا، بتن فوق توانمند، درجه حرارت بالا، مدول الاستیسیته، فشار منفذی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.459880.3429">10.22065/jsce.2024.459880.3429</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.459880.3429">https://doi.org/10.22065/jsce.2024.459880.3429</a>	۱۴۰۴/۰۱/۳۱	۱۴۰۳/۰۶/۱۵	۱۴۰۳/۰۶/۱۵	۱۴۰۳/۰۵/۲۷	۱۴۰۳/۰۴/۰۷
حسن افشین hafshin@sut.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

برای حفظ سلامتی و کاهش آثار مخاطرات طبیعی و مصنوعی بروسازی مصالح و اصلاح روش ساخت ضروری است. آتش‌سوزی یکی از حوادث غیرمترقبه‌ای می‌باشد که احتمال وقوع آن در طول عمر بهره برداری هر سازه، با توجه به وجود مستمر عوامل آتش در انواع سازه‌های صنعتی و مسکونی محتمل می‌باشد [۱]. از آتش‌سوزی و گسترش آن به عنوان یکی از عوامل فروپاشی و ایجاد خرابی پیش‌روندهی ساختمان‌ها یاد می‌گردد. به عنوان مثال آتش‌سوزی بزرگ ۱۶ دسامبر سال ۱۸۳۵، آتش‌سوزی مدرسه هاریانا هندوستان در ۲۳ دسامبر سال ۱۹۹۵، آتش‌سوزی انبار اوکلند کالیفرنیا در ۲ دسامبر ۲۰۱۶ و آتش‌سوزی ساختمان پلاسکو تهران در ۱۹ ژانویه ۲۰۱۷ از جمله آتش‌سوزی‌های وسیعی هستند که منجر به خرابی سازه و حوادث ناگوار شده‌اند [۲ و ۳]. هدایت حرارتی بالای سازه‌های فولادی موجب می‌گردد، این سازه‌ها در معرض آتش عملکرد مناسبی نداشته و بعد ۱۵ الی ۲۰ دقیقه با توجه به کاهش سریع مقاومت تسلیم و مدول الاستیسیته دچار تغییر شکل شدید و شکست اعضا و یا کمانش موضعی یا کلی گردند [۴]. از طرف دیگر ضریب انتقال حرارت پایین بتن موجب عملکرد بهتر سازه‌های بتن آرمه و مصالح ساختمانی بتنی در برابر آتش نسبت به سایر مصالح و قرارگیری بتن در بالاترین ردهی طبقه‌بندی مقاومت مصالح در برابر آتش گردیده است [۵]. بتن یک ماده ناهمگن و خواص آن به تک تک اجزای تشکیل دهنده وابسته است. در دمای محیط، ضریب انبساط حرارتی بتن بر اساس مصالح به کار گرفته شده و اندازه درشت‌ترین سنگ‌دانه‌ها در محدوده  $6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  الی  $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  است [۶]. براساس تحقیقات صورت گرفته، مقاومت فشاری بتن در شرایط دمایی متفاوت، یکسان نبوده و با افزایش دما، مقاومت‌های کمتری حاصل می‌گردد. تا افزایش دمای  $400^\circ\text{C}$  کاهش مقاومت فشاری بتن ناچیز و در محدوده دمایی  $400^\circ\text{C}$  الی  $800^\circ\text{C}$  با توجه به تجزیه محصولات هیدراتاسیون که در طی آن، بتن آب خود را از دست می‌دهد، بیشترین کاهش مقاومت فشاری حاصل می‌گردد. توسط محققین محدوده دمایی مذکور، به عنوان دمای بحرانی بتن در نظر گرفته شده است. در دماهای بالاتر از  $800^\circ\text{C}$  مقدار مقاومت فشاری بتن ناچیز و کمتر از ۳۰ درصد مقاومت فشاری اولیه است [۷]. تحت آتش مدول الاستیسیته بتن علاوه بر نسبت آب به سیمان، سن بتن، طرح اختلاط و مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها، در وهله اول به درجه حرارت تحت تاثیر وابسته است. همچنین رخداد همزمان رویدادهای حرارتی- مکانیکی و ترموهیگرال ممکن است، باعث جدا شدن تکه‌های از بتن شوند که به عنوان پدیده پوسته پوسته شدگی بتن شناخته می‌شود. جهت مقابله با این پدیده و همچنین ارتقای مقاومت‌های فشاری و خمشی و افزایش مدول الاستیسیته‌ی بتن در دماهای بالا می‌توان از الیاف فولادی در درصد‌های حجمی ۰ الی ۳ درصد استفاده گردد [۸ و ۹].

Suha و همکاران اثر دماهای بالا را، بر روی بتن سنگین با سنگدانه‌های مگنتیت و بتن معمولی با سنگدانه‌های کوارتز با نسبت‌های مختلف w/c را به عنوان بتن‌های محافظ هسته‌ای مورد بررسی قرار دادند، براساس نتایج آنها، با توجه به ظاهر شدن ترک در نمونه‌های بتنی در دمای  $500^\circ\text{C}$  پایداری حرارتی بتن‌های مگنتیت در مقایسه با بتن‌های کوارتز نسبتاً بالا است. با این حال تعداد ترک‌های ایجاد شده برای بتن‌هایی که نسبت آب به سیمان بالایی دارند، زیاده‌تر است [۱۰]. Malik و همکاران با بررسی تغییرات خواص حرارتی و مکانیکی سنگدانه‌های درشت، ملات سیمان و نمونه‌های بتن سیمانی مختلف مشاهده کردند که ضریب انبساط حرارتی بتن معمولی (NSC) به طور غیرخطی از  $0.85 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  در  $200^\circ\text{C}$  تا  $2.76 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  در  $800^\circ\text{C}$  متفاوت است و ترک‌های متعدد در نمونه‌های بزرگتر باعث افزایش انبساط حرارتی می‌گردند [۱۱]. Benjeddou و همکاران با بررسی تجربی اثرات دماهای بالا بر روی خواص بتن خود متراکم، با مقاومت مشخصه ۳۵ مگاپاسکال نشان دادند در دمای  $600^\circ\text{C}$  به دلیل تخریب توأم ماتریس سیمانی و شروع تجزیه سنگدانه‌ها مقادیر مقاومت فشاری کمتر از ۵ مگاپاسکال است [۱۲]. Felicetti و همکاران خواص حرارتی و مکانیکی سه نوع بتن معمولی (NSC)، بتن سبک با مقاومت معمولی (LWC) و بتن سبک با مقاومت بالا (HPLWC) را در معرض دمای حداکثر  $750^\circ\text{C}$  مورد ارزیابی قرار دادند. در هر دو بتن LWC و HPLWC سنگدانه‌های درشت از خاک رس منبسط و سنگدانه‌های ریز عمدتاً از ماسه سیلیسی تشکیل شده بودند، در حالی که در بتن NSC سنگدانه‌های درشت عمدتاً آهکی بودند، نتایج آنها نشان داد که نفوذ و انتشار حرارتی در محدوده دمایی  $200^\circ\text{C}$  الی  $500^\circ\text{C}$  تقریباً ثابت و مقاومت فشاری بتن HPLWC در دماهای بیشتر از  $400^\circ\text{C}$  نسبت به بتن‌های LWC و NSC حساسیت بیشتری نسبت به دما دارد [۱۳]. براساس مطالعات Khan و همکاران استفاده از یک نوع الیاف برای خنثی‌سازی پوسته‌پوسته شدگی کافی نیست. بنابراین ترکیبی از الیاف فولادی و بازالت را مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج آنان در حالت استفاده از ۲ درصد حجمی الیاف فولادی مقاومت فشاری بتن

فوق توانمند متوسط بهبود ۱۵ درصدی را در حالت بدون حرارت دیدگی و تحت حرارت  $250^{\circ}\text{C}$  تجربه می‌کند. در دماهای  $500^{\circ}\text{C}$ ،  $750^{\circ}\text{C}$  و  $1000^{\circ}\text{C}$  (بتن فوق توانمند غیر مسلح و مسلح شده توسط ۲ درصد الیاف فولادی، خوردشدگی کلی رخ داد. در حالت استفاده ترکیبی الیاف فولادی و بازالت، در حالت بدون حرارت دیدگی کاهش مقاومت فشاری حاصل شد ولی در حالت حرارت دیدگی تحت دماهای  $750^{\circ}\text{C}$  و  $1000^{\circ}\text{C}$  عملکرد بهتری داشته و بهبود ۷۵ درصدی مشاهده شد [۱۴]. Wang و همکاران به مقایسه مقاومت بتن با الیاف پلی پروپیلن در دماهای بالا پرداختند. براساس نتایج آنها بعد از قرارگیری بتن در دمای بالای  $500^{\circ}\text{C}$  افت شدید مقاومت حاصل و نسبت مقاومت کششی به فشاری حساس تر می‌گردد. مقاومت فشاری نسبی بتن‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن بیشتر از بتن غیرمسلح بوده و با بکارگیری دو درصد حجمی این الیاف در حالتی که عیار سیمان ۲۰۰، ۲۶۰ و ۳۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب است، به ترتیب مقاومت فشاری ۶۱، ۵۹ و ۴۲ درصد کاهش یافت [۱۵]. Dong و همکاران به بهینه‌سازی مقاومت بتن با عملکرد بالای فعال شده توسط قلیا و مسلح شده توسط الیاف فولادی پرداختند. براساس نتایج آنها استفاده از قلیایی موجب بهبود عملکرد بتن تا دمای  $200^{\circ}\text{C}$  می‌گردد ولی افزایش دما و انتشار حرارت در داخل ریزساختار موجب آسیب بتن گردید. همچنین استفاده از الیاف فولادی موجب شکست انعطاف پذیر، حتی در دماهای بالا گردید [۱۶]. Bugno و همکاران به بررسی فرآیندهای مخرب و ارزیابی تغییر شکل‌ها در بتن اصلاح شده با پلی پروپیلن در هوا خشک و در معرض آتش با استفاده از روش انتشار صوتی، تحلیل عددی و همبستگی تصویر دیجیتال پرداختند. در نتایج آنان تفاوت در روش‌های تخریب نمونه‌ها در شرایط محیطی و نمونه‌هایی که در معرض دمای آتش هستند نشان داده شده است. تجزیه و تحلیل‌های انجام شده ارزیابی قابل اعتمادی از روش انتشار صوتی را برای شناسایی فرآیندهای مخرب و ارزیابی وضعیت فنی بتن را فراهم کرد [۱۷]. Monar و همکاران به بررسی اثرات الیاف فولادی هیبرید، پلی پروپیلن، پلی وینیل الکل و کنف (جوت) بر روی عملکرد بتن در دمای بالا پرداختند. براساس نتایج آنها الیاف فولادی با نفوذپذیری بالاتر در مقابل آتش عملکرد بهتری داشته و موجب جلوگیری از تکه شدن بتن گردید. همچنین در حالت استفاده ترکیبی الیاف فولادی و پلی وینیل الکل در دمای  $300^{\circ}\text{C}$  با ۲۸ درصد کاهش مقاومت فشاری، بهترین نتیجه حاصل شد [۱۸].

با توجه به خواص حرارتی مناسب، بتن به عنوان یک عایق حرارتی عالی در حوزه ساخت و ساز و در آماده سازی زیرساخت‌ها و تجهیزات صنایع مختلف از جمله ریخته‌گری به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرف دیگر لزوم توجه به پایداری ساختمان‌های بتنی بعد از آتش‌سوزی ضرورت بررسی عملکرد بتن در حین و بعد از آتش‌سوزی مشخص می‌گردد. در این تحقیق ابتدا با بررسی طرح اختلاط‌های متنوع در انواع بتن، تحت درجه حرارت  $50^{\circ}\text{C} \pm 450^{\circ}\text{C}$  در هر یک از بتن‌های معمولی، مقاومت بالا و فوق توانمند طرح اختلاط‌های مناسب از نظر خواص مکانیکی و حرارتی انتخاب گردید. سپس عملکرد سازه‌ای سه نوع بتن معمولی (NSC)، بتن با مقاومت بالا (HSC) و بتن فوق توانمند (UHPC) در دماهای بالا از نظر مقاومت فشاری و خمشی، مدول الاستیسیته و ویژگی‌های ظاهری بعد از قرارگیری نمونه‌ها به مدت ۳ ساعت در معرض درجه حرارت  $200^{\circ}\text{C} \pm 900^{\circ}\text{C}$  ناشی از شعله‌های مستقیم آتش بررسی شدند. همچنین برای بهبود خواص مکانیکی انواع بتن در برابر حرارت بالا، اثرات الیاف فولادی بازیافتی مورد بررسی واقع شد.

## ۲- مصالح

### ۲-۱- سیمان، آب، فوق روان کننده، میکروسیلیس، پودر سیلیس

در تحقیق حاضر از سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان صوفیان، تولید شده بر اساس استاندارد EN 197-1 استفاده شده است [۱۹]. آب بکارگرفته شده در تمامی طرح اختلاط‌ها، آب شرب پردیس دانشگاه صنعتی سهند تبریز می‌باشد که pH آن در محدوده ۵ الی ۸/۵ و منطبق بر مقررات ملی ساختمان است. فوق‌روان کننده مورد استفاده نسل جدید فوق روان کننده بتن بر پایه پلی‌کربوکسیلات اتر، تولیدی شرکت البرز شیمی آسیا (Carboxal HF5000) می‌باشد که pH آن در محدوده ۵ الی ۷ و چگالی آن  $1.02 \pm 1/1$  گرم بر سانتی متر مکعب و براساس استانداردهای ASTM C494 ، INSO 2930-1 و INSO 2930-2 است.

میکروسیلیس مصرفی در تحقیق حاضر تولیدی شرکت صنایع فروآلیاژ ایران مطابق با استاندارد ملی ۱۳۲۷۸ و ضوابط استاندارد آمریکایی ASTM C1240 می‌باشد که از جمله خواص فیزیکی آن می‌توان به سطح ویژه ۱۵ الی ۳۰ متر مربع بر گرم و چگالی ویژه ۲/۲

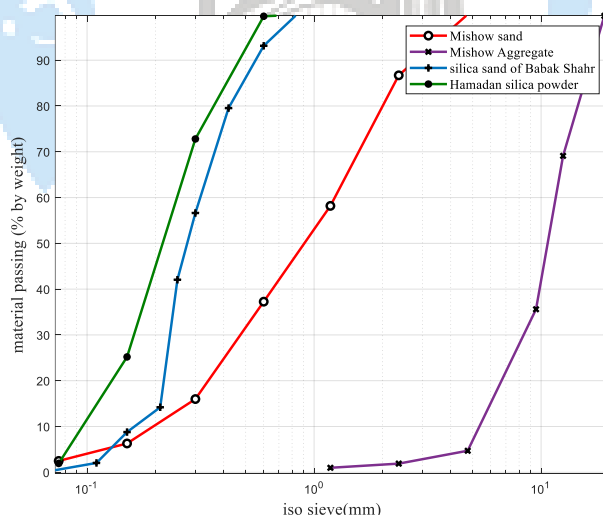
گرم بر سانتی متر مکعب اشاره کرد. همچنین این آمورف در ترکیب شیمیایی خود دارای ۹۰ الی ۹۵ درصد  $\text{SiO}_2$  می باشد [۲۰]. پودر سیلیس مورد استفاده میکرونیزه ( $50\mu\text{m}$ )، تولیدی از ندریان همدان با فرمول شیمیایی  $\text{SiO}_2$  و درجه خلوص آن بیش از ۹۹ درصد است. این پودر سفید رنگ و وزن مخصوص آن  $2/33$  گرم بر سانتی متر مکعب است.

## ۲-۲- مصالح سنگی

مصالح سنگی مورد استفاده در بتن های معمولی و با مقاومت بالا، شن و ماسه معدن میشو (واقع در ۲۰ کیلومتری جاده صوفیان - مرند) است. مدول نرمی این ماسه  $2/95$  و حداکثر اندازه ماسه و نخودی به ترتیب  $4/75$  و  $19$  میلی متر است. همچنین در طرح اختلاط های بتن فوق توانمند از ماسه سیلیسی منطقه شهر بابک استان کرمان با حداکثر اندازه اسمی ذرات  $1/18$  میلی متر و مدول نرمی  $1/41$  استفاده شده است. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی در جدول ۱ و منحنی دانه بندی آنها در شکل ۱ ارائه شده است [۲۱]. لازم به توضیح است دانه بندی شن و ماسه مورد استفاده در محدوده مجاز توصیه شده توسط ASTM C33 قرار دارد.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی مصالح سنگی

مصالح	درصد جذب آب	چگالی انبوهی متراکم ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	چگالی انبوهی غیرمتراکم ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$G_s$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
ماسه معدن میشو	۱/۰۰۴۴	۱۸۰۵	۱۶۳۴	۲۷۰۹/۱
شن معدن میشو	۰/۶۹	۱۶۸۳	۱۵۲۴	۲۷۳۳/۷
ماسه سیلیسی شهر بابک	۱/۹۹	-	-	۲۶۲۰



شکل ۱: دانه بندی مصالح سنگی

## ۲-۳- الیاف

الیاف مورد استفاده در این تحقیق ترکیبی از الیاف فولادی بازیافتی حاصل از ضایعات صنایع مفتول سازی و لاستیک های فرسوده است. مطابق شکل ۲ قطر این الیاف متفاوت و در دو نوع ماکرو و میکرو بوده و نتایج تست کشش این الیاف مطابق شکل ۳ می باشد. لزوم توجه به مباحث محیط زیستی و از طرف دیگر تغییر رفتار بتن های مقاومت بالا در حین شکست موجب به کارگیری این الیاف گردید.

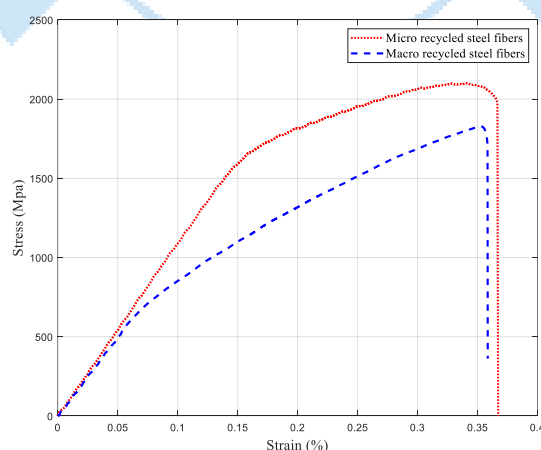
همچنین برای بهبود رفتار بتن در برابر شعله‌های آتش با توجه به ظرفیت گرمایی بالای الیاف فولادی و جهت بررسی تاثیر الیاف مسلح کننده بر روی مشخصات مکانیکی و رفتار بتن، بعد از قرارگیری در معرض درجه حرارت بیش از  $900 \pm 20^\circ\text{C}$  الیاف فولادی بازیافتی با مشخصات جدول ۲ بکار گرفته شد [۲۲].



شکل ۲: الیاف فولادی بازیافتی

جدول ۲: مشخصات فیزیکی الیاف فولادی بازیافتی

نسبت ظاهری	کرنش گسیختگی	وزن مخصوص	مقاومت کششی	مدول الاستیسیته	طول $l$	قطر $d$	
$(l/d)$	(%)	( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	(MPa)	(GPa)	(mm)	(mm)	
$\approx 125$	$4 <$	$7/85$	$2100$	$210$	$\approx 25$	$\approx 0/2$	میکرو
$\approx 18$	$4 <$	$7/85$	$1800$	$210$	$\approx 27$	$\approx 1/5$	ماکرو



شکل ۳: نمودار تنش - کرنش الیاف فولادی بازیافتی ماکرو و میکرو

### ۳- طرح اختلاط و روش اجرا

در روند این تحقیق، ابتدا در انواع بتن معمولی، مقاومت بالا و فوق توانمند، طرح اختلاط‌های متفاوت بدون حرارت دیدگی و تحت حرارت  $450 \pm 50^\circ\text{C}$  بعد از حرارت، تحت آزمون‌های مکانیکی قرار گرفتند. در نهایت طرح‌های مناسب از نظر رفتار رئولوژیکی و

مشخصات مکانیکی، برای بررسی تاثیر درجه حرارت بیش از  $800^{\circ}\text{C}$  ناشی از شعله‌های مستقیم آتش انتخاب گردیدند. لازم به توضیح است که اجرای طرح اختلاط‌های مربوطه در بتن معمولی و مقاومت بالا با استفاده از میکسرهای دورانی و طرح اختلاط‌های بتن فوق توانمند با استفاده از چند میکسر دستی سرعت بالا مطابق با شکل ۴ و به شیوه رایج تهیه نمونه بتنی انجام شد. در انتها ۶ طرح اختلاط نهایی انتخاب و با توجه به اینکه علائم نوشتاری روی نمونه‌های بتنی بعد از حرارت از بین می‌روند، علائم لازم مطابق شکل (۵-الف) توسط سنگ فلز دستی روی نمونه‌ها حکاکی شدند. در ادامه بر اساس روش بیان شده در استاندارد ASTM E119 بعد از ۱۰۰ ساعت پیش‌گرمایش در دمای  $0.5 \pm 105^{\circ}\text{C}$  نمونه‌ها آماده تست حرارت اصلی شدند. حداکثر دمای حاصل از شعله‌های آتش برابر  $20^{\circ}\text{C} \pm$  با نرخ رشد گرمایش در شاخه صعودی  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  بوده که مطابق شکل (۵-ب) توسط کوره‌های ذوب فلزات کارخانه آذرفلز تبریز ایجاد شده است. بر اساس منحنی دما - زمان مورد استفاده برای گرمایش نمونه‌ها که شکل ۶ نشان داده شده است. نمونه‌ها به مدت سه ساعت در حداکثر دمای  $20^{\circ}\text{C} \pm 900$  قرار گرفتند و برای خنک سازی نمونه‌ها کوره خاموش و بعد از ۲۰ ساعت دمای آن به  $200^{\circ}\text{C}$  رسید. در این مرحله نمونه‌ها از کوره خارج و برای ادامه خنک سازی در هوای آزاد قرار گرفتند لازم به توضیح است به علت نوع عملکرد کوره صنعتی، تلورانس دمایی آن  $20^{\circ}\text{C} \pm$  بوده است. همچنین در جدول ۳ طرح اختلاط‌های مورد بررسی بیان شده است. در روند این تحقیق برای مقایسه تاثیر الیاف در انواع بتن مورد بررسی، درصد حجمی الیاف مصرفی ثابت و برابر  $0.64\%$  درصد حجمی می‌باشد. همچنین برای سنجش مقاومت فشاری تمامی طرح اختلاط‌ها بر اساس استاندارد BS EN 12390-3 (Part 3)، برای اندازه‌گیری مدول الاستیسیته نمونه‌ها، بر اساس دستورالعمل استاندارد ASTM C469 مطابق شکل (۷-الف) با استفاده از محفظه تعیین مدول الاستیسیته بتن<sup>۱</sup>، انجام شد و از تست خمش چهار نقطه‌ای تیرهای قالب‌گیری شده با ابعاد  $450 \times 100 \times 100$  میلی‌متر برای سنجش پارامترهای خمشی بر اساس استاندارد ASTM C1609 و از دستگاه شکل (۷-ب) استفاده گردید [۲۳ و ۲۴].



شکل ۴: نمونه‌ای از ساخت بتن فوق توانمند



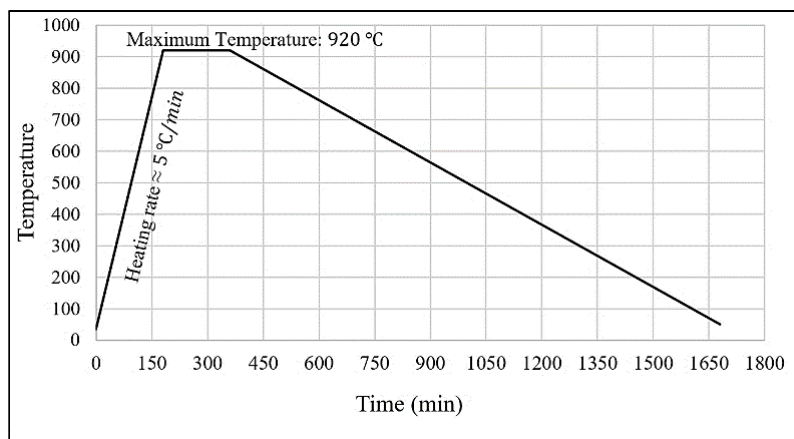
(ب)



(الف)

شکل ۵: الف) پیش‌گرمایش و نشانه گذاری نمونه‌ها (ب) کوره مورد استفاده جهت گرمایش نمونه‌های بتنی تا دمای  $20^{\circ}\text{C} \pm 900$

<sup>۱</sup> Extensometer



شکل ۶: منحنی دما - زمان مورد استفاده برای گرمایش نمونه‌ها در تحقیق حاضر

جدول ۳: طرح اختلاط‌های نهایی

طرح اختلاط	سیمان $\frac{kg}{m^3}$	ماسه $\frac{kg}{m^3}$	شن $\frac{kg}{m^3}$	میکروسیلیس			فوق روان کننده		پودر سیلیس $\frac{kg}{m^3}$	ماسه سیلیسی $\frac{kg}{m^3}$	الیاف (درصد حجمی)
				$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{sf}{c}$ %	$\frac{w}{c + sf}$	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{sp}{c + sf}$ %			
NMM.stf-0%	۴۵۰	۱۲۰۰	۵۲۴	-	-	۰/۳۶	۲/۲۵	۰/۵	-	-	-
NMM.stf-0.64%	۴۵۰	۱۲۰۰	۵۰۰	-	-	۰/۳۶	۳	۰/۶۶	-	-	۰/۶۴
HMM.stf-0%	۶۸۶	۹۰۲	۵۸۰	۱۰۶	۱۵/۵	۰/۲۱	۲۶	۳/۳	-	-	-
HMM.stf-0.64%	۶۸۶	۹۰۲	۵۲۵	۱۰۶	۱۵/۵	۰/۲۱	۲۶	۳/۳	-	-	۰/۶۴
RS.stf-0%	۷۲۰	-	-	۲۱۶	۳۰	۰/۱۹	۵۱	۵/۵	۲۵۳	۹۲۷	-
RS.stf-0.64%	۷۲۰	-	-	۲۱۶	۳۰	۰/۱۹	۵۴	۵/۷	۲۵۳	۹۰۰	۰/۶۴

جدول ۴: تفکیک نوع بتن طرح اختلاط‌های (جدول ۳)

طرح اختلاطها	NMM.stf-0%	NMM.stf-0.64%	HMM.stf-0%	HMM.stf-0.64%	RS.stf-0%	RS.stf-0.64%
نوع بتن	بتن معمولی بدون الیاف فولادی بازیافتی	بتن معمولی با $۵ \frac{kg}{m^3}$ الیاف فولادی بازیافتی	بتن با مقاومت بالا بدون الیاف فولادی بازیافتی	بتن با مقاومت بالا با $۵ \frac{kg}{m^3}$ الیاف فولادی بازیافتی	بتن فوق توانمند بدون الیاف فولادی بازیافتی	بتن فوق توانمند با $۵ \frac{kg}{m^3}$ الیاف فولادی بازیافتی



(ب)

(الف)

شکل ۷: الف) آزمون مدول الاستیسیته ب) آزمون خمش تیر

#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- آزمایش‌های بتن تازه

در جدول ۵ نتایج آزمون‌های صورت گرفته بر روی بتن تازه بیان شده است. اسلامپ و غلظت بتن‌های NSC, HSC در محدوده مناسبی قرار داشته و پمپ پذیری، انتقال و بتن ریزی به سهولت انجام پذیرفت. استفاده از الیاف فولادی بازیافتی در این طرح‌ها موجب متوسط کاهش ۱۵ درصدی کارایی گردید. با توجه به خاصیت خودتراکمی بتن UHPC، کارایی این بتن توسط میز جریان مورد بررسی واقع شد. براساس نتایج طرح اختلاط‌های بتن فوق توانمند بکارگرفته شده دارای قابلیت پرکنندگی مناسبی هستند. در این بتن بکارگیری الیاف فولادی کاهش ۵ درصدی کارایی مشاهده گردید. لازم به توضیح است که تمامی بتن‌های ساخته شده به صورت همگن و یکپارچه بوده و در هیچ یک جدایش صورت نگرفت. در تمامی طرح اختلاط‌های بتن‌های NSC, HSC با توجه به استفاده از فوق‌روان کننده، درصد هوای بتن تازه از مقدار توصیه شده توسط استاندارد ASTM C 318 برای دوام بتن در برابر ذوب و یخبندان پایین‌تر است. همچنین استفاده از درصد بالای مصالح پودری و فوق‌روان کننده در بتن UHPC موجب گردیده است، درصد هوای پایینتری داشته باشند ولی با توجه به مشخصات فیزیکی مناسب، تمامی این طرح‌ها در ذوب و یخبندان عملکرد مناسبی خواهند داشت. مقایسه حالت غیر مسلح و مسلح شده الیافی به ترتیب نشانگر متوسط افزایش ۵، ۸ و ۱۶ درصدی میزان هوا در بتن‌های NSC, HSC و UHPC می‌باشد. همین افزایش درصد هوای بتن تازه نشانگر ایجاد مسیرهایی برای تخلیه فشار داخلی بتن‌ها تحت حرارت توسط الیاف می‌باشد

جدول ۵: نتایج آزمایش‌های صورت گرفته بر روی بتن تازه

درصد هوای بتن تازه	روانی		وزن مخصوص بتن تازه $Kg/m^3$	طرح اختلاط‌ها
	استاندارد	mm		
۳/۵	ASTM-C143(اسلامپ)	۱۳۰	۲۴۸۵	NMM.stf-0%
۳/۷	ASTM-C143(اسلامپ)	۱۱۰	۲۵۳۰	NMM.stf-0.64%
۲/۳	ASTM-C143(اسلامپ)	۱۲۰	۲۴۹۰	HMM.stf-0%
۲/۵	ASTM-C143(اسلامپ)	۱۰۰	۲۵۲۷	HMM.stf-0.64%
۱/۰	ASTM-C124(میز جریان)	۲۲۹/۲	۲۲۶۵	RS.stf-0%
۱/۲	ASTM-C124(میز جریان)	۲۱۹/۷	۲۲۹۲	RS.stf-0.64%

## ۴-۲- آزمایش مقاومت فشاری و تغییر جرم نمونه‌ها

میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه و جرم متناظر نمونه‌های مکعبی تهیه شده از بتن‌های معمولی (NSC)، با مقاومت بالا (HSC) و بتن فوق توانمند (UHPC) در دو حالت بدون حرارت و بعد از حرارت دیدگی در دمای  $20 \pm 900^\circ\text{C}$  (ناشی از شعله‌ی مستقیم آتش) در جدول ۶ بیان شده‌است. براساس نتایج حاصل در حالت بدون حرارت دیدگی، بکارگیری الیاف فولادی بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۳۹، ۲۴ و ۲ درصدی مقاومت فشاری در بتن‌های معمولی، با مقاومت بالا و بتن فوق توانمند گردید. بنابراین می‌توان گفت؛ جذب آب ناچیز و استحکام بالای الیاف فولاد موجب می‌گردد در بتن معمولی و مقاومت بالا که از مصالح با استحکام و چگالی پایین‌تری تشکیل شده‌اند، نسبت به بتن فوق توانمند که از سنگ‌دانه‌های سیلیسی سخت تشکیل شده‌است، با بکارگیری الیاف فولادی افزایش مقاومت بیشتری حاصل گردد.

کمترین درصد کاهش مقاومت فشاری بعد از حرارت دیدگی مربوط به بتن معمولی الیافی، با ۷۶ درصد کاهش است. همچنین در بتن فوق توانمند بدون الیاف فولادی بازیافتی، با ۹۴ درصد کاهش، بیشترین درصد کاهش مقاومت فشاری حاصل گردید. با در نظرگیری میانگین مقاومت فشاری بعد از حرارت دیدگی طرح اختلاط‌های مربوطه مشاهده می‌گردد، عملکرد فشاری بتن معمولی در حالت مسلح شده توسط الیاف، میانگین ۲۵ درصد از عملکرد بتن‌های الیافی با مقاومت بالا و فوق توانمند بهتر است. همچنین در میان طرح اختلاط‌های غیرمسلح بعد از حرارت دیدگی، بتن با مقاومت بالا میانگین ۳۰ درصد نسبت به سایر بتن‌های غیرمسلح عملکرد بهتری داشته است. در دماهای خیلی بالا با توجه به تبخیر سریع آب محبوس شده در داخل بتن، فشار منفذی در داخل بتن ایجاد می‌گردد. تخلخل و نفوذ پذیری بالاتر در بتن‌های معمولی الیافی موجب تخلیه و تبخیر آب محبوس شده در داخل بتن و در نهایت موجب کاهش فشار منفذی می‌گردند. در حالی که در بتن‌های مقاومت بالای الیافی به دلیل افزایش عیار سیمان و استفاده از میکروسیلیس به میزان ۱۵ درصد وزنی سیمان، ریز ساختار بتن متراکم می‌گردد. بنابراین مقاومت فشاری نمونه‌های (HSC) قبل از حرارت دیدگی نسبت به بتن‌های (NSC) در دو حالت مسلح و غیر مسلح به ترتیب ۴۵ و ۵۱ درصد مقاومت فشاری بیشتری را نتیجه می‌دهند.

بعد از قرارگیری نمونه‌های بتن (HSC) در معرض شعله‌های آتش، همین ساختار متراکم موجب تخلیه زمانبر فشار آب محبوس در داخل نمونه‌های الیافی شده و در حالت مسلح ۱۴ درصد مقاومت فشاری کمتری را نسبت به بتن (NSC) حاصل می‌کند. ولی در حالت غیر مسلح، بتن (HSC) نسبت به بتن (NSC) ۳۵ درصد عملکرد بهتری داشته است. بنابراین می‌توان گفت با توجه به تخلیه فشار منفذی هم رده‌ی هر دو نوع بتن در حالت غیر مسلح، ساختار بهتر بتن مقاومت بالا موجب عملکرد بهتر بوده است. در بتن (UHPC) به دلیل عیار سیمان خیلی بالا و استفاده بیشتر میکروسیلیس (به میزان ۳۰ درصد وزنی سیمان) و همچنین مقدار نسبتاً زیاد پودر سیلیس میکرونیزه ( $253 \frac{kg}{m^3}$ )، ریز ساختار متراکم‌تر می‌باشد و در حالت مسلح نسبت به بتن (NSC) ۴۰ درصد مقاومت فشاری کاهش داشته است ولی در حالت غیر مسلح ۱۱ درصد بتن (UHPC) نسبت به بتن (NSC) عملکرد بهتری داشته است. مقایسه مقاومت فشاری بعد از حرارت دیدگی بتن‌های (HSC) و (UHPC) در دو حالت مسلح و غیرمسلح به ترتیب نشانگر عملکرد بهتر ۳۰ و ۲۶ درصدی بتن (HSC) نسبت به بتن (UHPC) است. بر اساس نتایج، نقش الیاف فولادی در تخلیه فشار منفذی نمایان می‌گردد و به ترتیب در بتن‌های (NSC) و (HSC) و (UHPC) با توجه به اصلاح ریزساختار، نقش الیاف کمرنگ‌تر می‌گردد. همچنین از علل عملکرد فشاری ضعیف‌تر نمونه‌های بتن فوق توانمند در مقایسه با بتن‌های با مقاومت بالا و بتن معمولی می‌توان گفت که در دمای  $570^\circ\text{C}$ ، CTE سنگ‌دانه‌های حاوی کوارتز (ماسه سیلیسی در تحقیق حاضر) به دلیل وارونگی گسترده از کوارتز  $\alpha$  به  $\beta$  به شدت افزایش می‌یابد [۲۵].

بر اساس نتایج تغییر جرم طرح اختلاط‌ها در جدول ۶، تغییر جرم نمونه‌ها در دو حالت خشک شده در هوای آزاد و بعد از مرحله پیش‌گرمایش در بتن (NSC) میانگین ۴/۵ درصد و در بتن‌های عملکرد بالای (HSC) و (UHPC) میانگین برابر ۲/۲ درصد است. تغییر جرم این حالت ناشی از تبخیر آب داخلی نمونه‌های مربوطه بوده است. این نتایج نشانگر نفوذپذیری بالاتر بتن (NSC) و تخلیه سریع‌تر فشار

منفذی در مرحله گرمایش اصلی است. تغییر جرم نمونه‌ها بعد از مرحله پیش‌گرمایش و گرمایش اصلی، ناشی از جدایش و پوسته پوسته شدگی نمونه‌ها است. بر اساس نتایج در بتن معمولی، ساختار ضعیف و در بتن‌های عملکرد بالا فشار داخلی زیادتر موجب تغییر جرم نسبتاً یکسان طرح اختلاط‌ها گردیده است. همچنین با بکارگیری الیاف فولادی بازیافتی، متوسط کاهش ۴/۲۲ درصدی تغییر جرم مشاهده گردید.

جدول ۶: نتایج آزمون مقاومت فشاری و تغییر جرم نمونه‌ها در دو حالت بدون حرارت و بعد از حرارت دیدگی

میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kgf/cm <sup>2</sup> )	میانگین جرم نمونه‌ها بعد از حرارت در دمای ۲۰±۰.۱°C (gr)		میانگین جرم نمونه‌ها بعد از ۹۰ ساعت پیش گرم (gr)	جرم نمونه‌های خشک شده در هوای آزاد (gr)	طرح اختلاط‌ها
	بدون حرارت دیدگی	بعد از حرارت دیدگی			
۷۸	۴۷۱	۲۱۸۶	۲۳۶۱	۲۴۷۴	NMM.stf-0%
۱۵۸	۶۵۶	۲۲۴۳	۲۳۹۰	۲۵۰۰	NMM.stf-0.64%
۱۲۰	۹۶۳	۲۲۰۹	۲۳۷۳	۲۴۴۳	HMM.stf-0%
۱۳۶	۱۱۹۳	۲۲۶۷	۲۴۵۰	۲۴۸۷	HMM.stf-0.64%
۸۸	۱۳۸۲	۲۰۳۸	۲۲۰۰	۲۲۶۰	RS.stf-0%
۹۵	۱۴۰۴	۲۰۸۰	۲۲۳۰	۲۲۷۶	RS.stf-0.64%

#### ۴-۳-آزمایش مدول الاستیسیته

در تحقیق حاضر اندازه‌گیری مدول الاستیسیته طرح اختلاط‌های اجرا شده بر اساس دستورالعمل استاندارد ASTM C469 انجام شد و نتایج آن در جدول ۷ بیان شده است. در حالت بدون حرارت دیدگی بکارگیری الیاف فولادی بازیافتی به ترتیب موجب افزایش ۸، ۷ و ۳ درصدی مدول الاستیسیته در بتن‌های معمولی، با مقاومت بالا و بتن فوق توانمند گردید. براساس نتایج حاصل، کمترین درصد کاهش مدول الاستیسیته بعد از حرارت دیدگی برابر با ۸۲ درصد و مربوط به بتن فوق توانمند الیافی با به کارگیری ۰/۶۴ درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی است. همچنین در بتن‌های معمولی و بتن فوق توانمند بدون الیاف فولادی بازیافتی با ۱۰۰ درصد کاهش، بیشترین کاهش مدول الاستیسیته حاصل شد.

در این تحقیق برای ساخت بتن فوق توانمند در طرح اختلاط‌ها از ماسه سیلیسی استفاده شده است. با توجه به ماهیت ساختاری سنگدانه‌های سیلیسی، ضریب رسانایی حرارتی این مصالح سنگی نسبت به سایر مصالح سنگی بیشتر و به موجب آن رسانایی حرارتی بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی و مقاومت بالا بیشتر است. از طرف دیگر در دماهای بالا سنگدانه‌های سیلیسی دچار وارونگی کوارتز می‌گردند. همچنین بتن معمولی در دماهای بالا دچار کرنش زیاد و زداپی سنگدانه‌های آهکی می‌گردد. این موارد موجب ایجاد ریزشکاف، ترک خوردگی، افزایش تخلخل و تضعیف پیوند سنگدانه-سیمان (ITZ) بتن‌های غیرمسلح معمولی و فوق توانمند می‌گردد که به موجب آن کاهش ۱۰۰ درصدی مدول الاستیسیته این بتن‌ها نتیجه شد [۲۶].

اصلاح ریزساختار در بتن‌های فوق توانمند و مقاومت بالا موجب درگیری بهتر الیاف فولادی بازیافتی با ماتریس بتنی و حفظ انسجام ساختاری نمونه‌ها گردید و به موجب آن به ترتیب در بتن فوق توانمند الیافی و بتن مقاومت بالای الیافی بیشترین مدول الاستیسیته باقی مانده بعد از حرارت دیدگی حاصل شد. در بتن مقاومت بالای غیر مسلح پیوند مستحکم سنگدانه‌های درشت و ماتریس بتنی موجب گردید بعد از حرارت دیدگی، بتن مقاومت بالای غیرمسلح ظرفیت باربری داشته باشد و مدول الاستیسیته باقی مانده ۱/۹ گیگاپاسکال حاصل گردد.

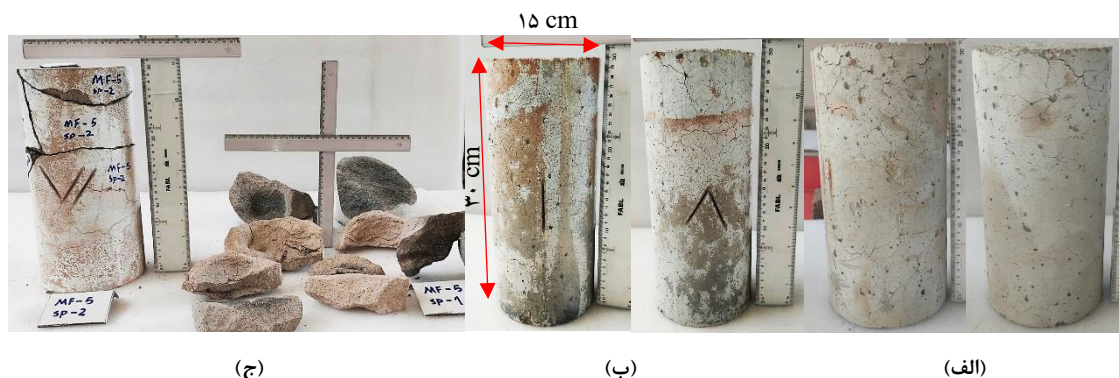
جدول ۷: نتایج آزمون مدول الاستیسیته در دو حالت قبل و بعد از حرارت دیدگی

طرح اختلاطها	میانگین مقادیر مدول الاستیسیته بدون حرارت دیدگی (Gpa)	میانگین مقادیر مدول الاستیسیته بعد از حرارت دیدگی (Gpa)	درصد کاهش میانگین مدول الاستیسیته در دو حالت قبل و بعد از حرارت دیدگی
NMM.stf-0%	۲۶/۲	۰	٪۱۰۰
NMM.stf-0.64%	۲۸/۳	۲/۵	٪۹۱
HMM.stf-0%	۳۱/۹	۱/۹	٪۹۴
HMM.stf-0.64%	۳۴/۲	۳/۴	٪۹۰
RS.stf-0%	۳۸/۴	۰	٪۱۰۰
RS.stf-0.64%	۳۹/۴	۷	٪۸۲

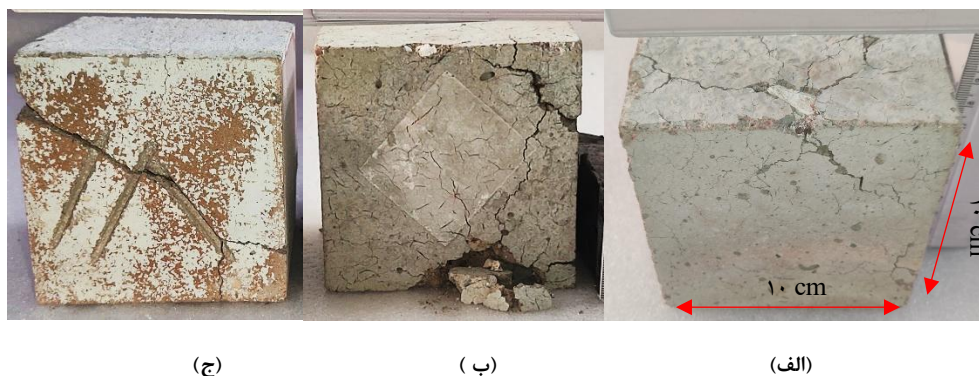
#### ۴-۴- مشخصات ظاهری و فیزیکی

همچنین در روند این تحقیق بعد از اعمال حرارت بر روی نمونه‌های بتنی مطابق شکل ۸، برای ارزیابی کیفی مشخصات ظاهری و تغییر شکل نمونه‌های بتنی تحت تاثیر حرارت، از نظر بصری مورد بررسی واقع شدند. براساس مشاهدات صورت گرفته در بتن‌های NSC و HSC تعداد ترک‌های نمایان شده بیشتر از بتن UHPC ولی عمق، طول و عرض ترک‌ها کمتر است. در بتن فوق توانمند غیر الیافی، فشردگی زیاد ساختار داخلی و عدم به کارگیری الیاف فولادی بازیافتی موجب تخریب ساختاری بیشتر بتن‌های فوق توانمند در مقایسه با سایر بتن‌ها گردید.

بررسی اشکال و مقاطع مختلف نمونه‌های بتنی نشان داد، کوچک‌تر شدن ابعاد نمونه‌های بتنی باعث اثرپذیری بیشتر نمونه‌های بتنی و افزایش آسیب‌های ساختاری می‌گردد. بر اساس نتایج، با وجود کمتر بودن آثار پوسته پوسته شدگی، بتن HSC در مقایسه با بتن NSC، عمق موثر پوسته پوسته شدگی در بتن HSC ۱ تا ۳ میلیمتر است در حالیکه در بتن NSC حداکثر ۱/۵ میلیمتر می‌باشد. استفاده از سنگدانه‌های آهکی - سیلیسی در NSC و HSC موجب آسیب ساختاری، آماس موضعی (بالا زدگی) و جدا شدن قطعات کوچک شد ( شکل ۹).



شکل ۸: بخشی از نمونه‌های تهیه شده برای مقایسه تغییرات خصوصیات ظاهری و فیزیکی نمونه‌های (الف) بتن معمولی (ب) بتن با مقاومت بالا (ج) بتن فوق توانمند



شکل ۹: آماس موضعی و جداسدن قطعات کوچک در نمونه بتن: الف و ب) بتن معمولی ج) بتن فوق توانمند

#### ۴-۵- نتایج تست XRF سنگ‌دانه‌ها بعد از حرارت

سیمان پرتلند عمدتاً از تری کلسیم سیلیکات ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ) و بتا دی کلسیم سیلیکات ( $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ ) تشکیل شده است. واکنش هیدراتاسیون در OPC<sup>۲</sup> منجر به تولید کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) و پورتلندیت ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) می‌شود. C-S-H یک ساختار ژل مانند است و در تعیین خواص رئولوژیکی خمیر سیمان سخت شده و کارایی آن مهم است. قرار گرفتن در معرض دمای بالا باعث می‌شود خمیر سیمان یک سری تغییرات فیزیکی و شیمیایی برگشت ناپذیر را تجربه کند. این واکنش منجر به تجزیه محصولات هیدراتاسیون می‌گردد. فرآیند آب زدایی C-S-H (تجزیه محصولات هیدراتاسیون) در طول فرآیند حرارت دیدگی باعث از بین رفتن خاصیت چسبندگی مواد سیمانی و افزایش حجم ریزساختار می‌گردد. همچنین با توجه به شکل ۱۰ پدیده آماس (بالا زدگی) با شدت‌های متفاوت در نمونه بتن‌های مختلف مشاهده می‌گردد. به موجب این پدیده قسمت‌هایی از نمونه‌ها یا قطعاتی از آن‌ها جدا و یا دچار ترک‌های طولی و عمیق پیشرونده می‌شوند، که دلیل آن در بتن‌های NSC و HSC می‌تواند به علت نوع سنگدانه‌های مصرفی باشد. با توجه به نتایج آزمایش XRF سنگدانه‌های معدن میشو در جدول ۸ که در دو حالت بدون حرارت و بعد از حرارت دیدگی در دمای  $900 \pm 20^\circ\text{C}$  انجام گردید، می‌توان گفت در محدوده دمایی  $900^\circ\text{C}$  سنگدانه‌های موجود در نمونه‌ها به ترکیبات کلسیم‌دار همچون اکسید کلسیم یا آهک تبدیل می‌شوند و به دلیل جذب رطوبت در زمان خنک سازی نمونه‌ها دچار انبساط می‌شوند.



شکل ۱۰: الف) جدا شدگی موضعی و انتشار ترک در بتن معمولی ب) جدا شدگی موضعی و انتشار ترک در بتن مقاومت بالا ج) قطعه قطعه شدگی بتن فوق توانمند

<sup>2</sup> Ordinary Portland Cement

جدول ۸: نتایج آزمایش XRF شن و ماسه معدن میشو مورد استفاده در بتن‌های NSC و HSC بدون حرارت دیدگی و بعد از حرارت دیدگی

	معدن میشو- قبل حرارت دیدگی	معدن میشو- بعد حرارت دیدگی	ماسه سیلیسی شهر بابک
Ca	۳۷۳/۵ KCps ۴۲/۰ %	۹۷۹/۳ KCps ۶۵/۳ %	۲۲/۸ KCps ۴/۱۹ %
Si	۷۵/۹ KCps ۱۷/۶ %	۴/۳ KCps ۰/۶۷۶ %	۳۶۱/۹ KCps ۷۹/۳ %
Mg	۵۶/۹ KCps ۱۳/۹ %	۲۰۹/۹ KCps ۲۹/۸ %	- -
C	۰/۸ KCps ۹/۴۱ %	- -	- -
Fe	۱۵۲/۵ KCps ۸/۸۷ %	۱۵/۰ KCps ۰/۶۴۴ %	۱۹/۹ KCps ۰/۹۰۹ %
Na	۴/۳ KCps ۲/۴۴ %	- -	۴/۸ KCps ۲/۳۳ %
S	- -	۷/۰ KCps ۰/۴۶۶ %	- -
K	۲۳/۵ KCps ۲/۳۰ %	۱/۸ KCps ۰/۰۹۶۱ %	۳۶/۰ KCps ۶/۴۴ %
Al	۴/۴ KCps ۱/۳۱ %	۰/۹ KCps ۰/۱۶۶ %	۱۷/۵ KCps ۳/۶۳ %
Ti	۷/۵ KCps ۱/۰۶ %	- -	۰/۷ KCps ۰/۰۸۷۷ %
Cu	۳/۸ KCps ۰/۵۰۸ %	- -	۴/۳ KCps ۰/۳۹۴ %
Zn	۶/۴ KCps ۰/۱۶۸ %	- -	۷/۳ KCps ۰/۱۲۵ %
Mn	۱/۹ KCps ۰/۱۶۴ %	۰/۶ KCps ۰/۰۳۹۰ %	۲/۴ KCps ۰/۵۰۹ %
P	۰/۴ KCps ۰/۰۷۹۰ %	- -	- -
Sr	۵/۵ KCps ۰/۰۶۲۸ %	۳/۴ KCps ۰/۰۲۴۲ %	۴/۸ KCps ۰/۰۳۴۷ %
Zr	۶/۵ KCps ۰/۰۶۱۶ %	- -	۳/۱ KCps ۰/۰۱۶۰ %
Rb	۳/۰ KCps ۰/۰۳۴۰ %	- -	۴/۰ KCps ۰/۰۲۹۰ %
compton	۰/۳۹	۰/۵۳	۰/۵۱
Rayleigh	۰/۸۱	۰/۸۹	۱/۰۶
Norm	۱۰۰/.	۱۰۰/.	۱۰۰/.

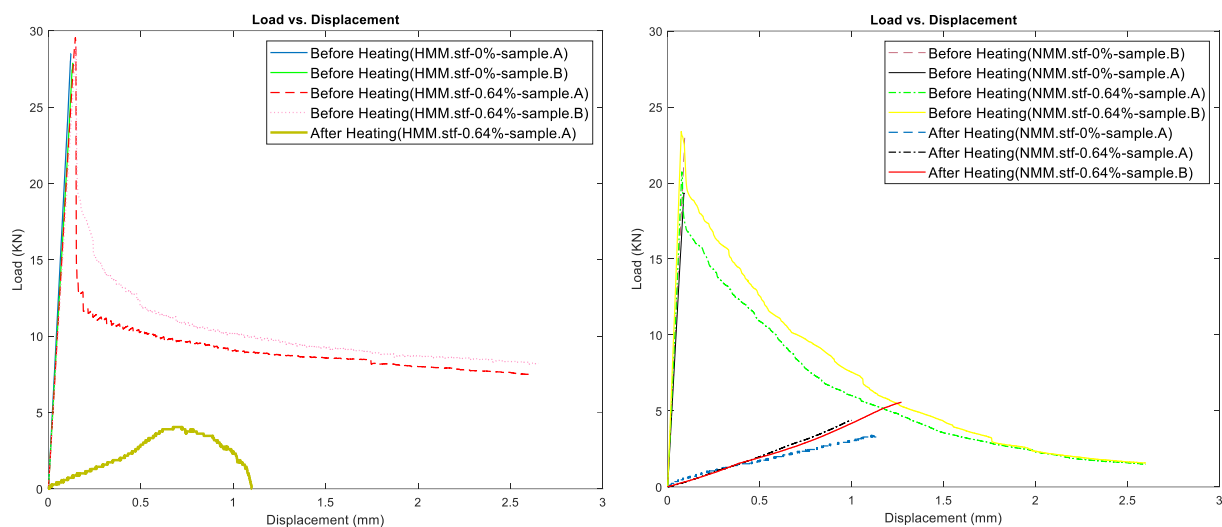
## ۴-۶- نتایج مقاومت خمشی

بر اساس نتایج جدول ۹ از میان طرح اختلاط‌های مورد بررسی، بیشترین مقاومت خمشی قبل از حرارت دیدگی برابر ۱۳/۲۰ مگاپاسکال و مربوط به بتن UHPC می‌باشد. همچنین در این طرح با بکارگیری ۶۴ درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی، مقاومت خمشی برابر ۱۴/۱۵ مگاپاسکال و ۶/۷۱ درصد بهبود یافت. بعد از حرارت دیدگی در دمای  $20 \pm 900^\circ\text{C}$  به ترتیب در بتن‌های NSC، UHPC، HSC بیشترین مقاومت خمشی بعد از حرارت دیدگی حاصل گردید. همانند نتایج مقاومت فشاری، در بتن NSC به ویژه در طرح بتن معمولی الیافی، با توجه به تخلیه سریع تر فشار منفذی بهترین عملکرد خمشی حاصل گردید.

جدول ۹: نتایج آزمون خمش نمونه‌های تیری

طرح اختلاط‌ها	میانگین مقادیر مقاومت خمشی حداکثر (MPa)		درصد کاهش مقاومت خمشی قبل و بعد از حرارت دیدگی		مقاومت خمشی باقی مانده در خمیز $\frac{L}{600}$ (MPa)		مقاومت خمشی باقی مانده در خمیز $\frac{L}{150}$ (MPa)		چقرمگی خمشی (جذب انرژی) (J)
	بدون حرارت دیدگی	بعد از حرارت دیدگی	قبل و بعد از حرارت دیدگی	بعد از حرارت دیدگی	بدون حرارت دیدگی	بعد از حرارت دیدگی	بدون حرارت دیدگی	بعد از حرارت دیدگی	
NMM.stf-0%	۶/۳۵	۰/۵۴	۹۱/۴۹	-	-	-	-	-	-
NMM.stf-0.64%	۶/۶۰	۱/۴۸	۷۷/۵۷	۳/۵۲	۰/۵۸	۰/۶۹	-	۱۵/۸۵	۲/۷۲
HMM.stf-0%	۸/۴۰	۰	۹۲/۸۵	-	-	-	-	-	-
HMM.stf-0.64%	۸/۷۵	۰	۱۰۰	۳/۳۴	-	۲/۵۰	-	۲۰/۸۸	۳/۶۵
RS.stf-0%	۱۳/۲۰	۰	۱۰۰	-	-	-	-	-	-
RS.stf-0.64%	۱۴/۱۵	۱/۲۷	۹۱/۰۲	۱۰/۳۱	۱/۱۳	۷/۹۲	-	۵۹/۰۷	۷/۶۳

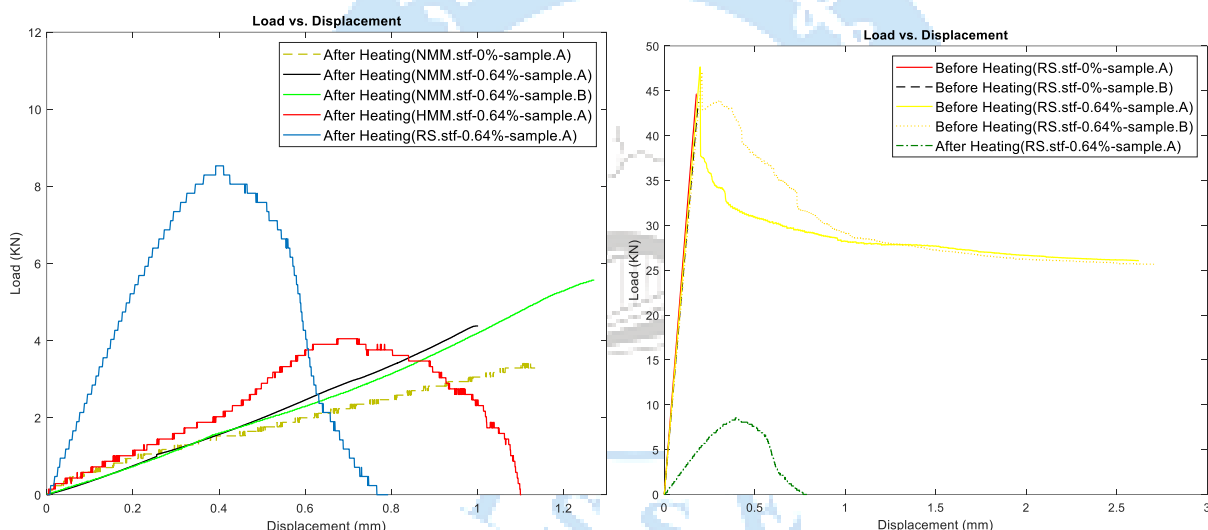
بر اساس نمودارهای نیرو-تغییر مکان نشان داده شده در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ قبل از حرارت دیدگی با استفاده از الیاف، علاوه بر افزایش حداکثر بار خمشی قابل تحمل نمونه‌های تیری، جذب انرژی افزایش چشم‌گیری داشته و بعد از شکست در نمونه‌های مربوطه ظرفیت باربری ادامه یافت. ریزدانه بودن و چسبندگی بیشتر در بتن‌های فوق توانمند موجب جفت و بست بهتر الیاف و ماتریس بتنی گردید و به موجب آن دررفتگی الیاف کاهش و اکثراً بعد از ترک خوردگی بتن تحت پارگی قرار گرفتند در نتیجه حداکثر جذب انرژی ۵۹/۰۷ ژول در بتن الیافی UHPC حاصل شد. بر اساس شکل (۱۲-ب) بعد از حرارت دیدگی در دمای  $20 \pm 900^\circ\text{C}$  از میان طرح اختلاط‌های غیر مسلح، تنها طرح NMM.stf-0% مقاومت خمشی داشته است. از میان طرح اختلاط‌های الیافی با توجه به چسبندگی بهتر الیاف با ماتریس بتنی بعد از حرارت دیدگی بتن UHPC عملکرد بهتری داشته و جذب انرژی ۷/۶۳ ژول حاصل شد.



(ب)

(الف)

شکل ۱۱: نمودار نیرو-تغییر مکان (الف) بتن معمولی (ب) بتن مقاومت بالا (در دو حالت بدون حرارت دیدگی و بعد از حرارت دیدگی)



(ب)

(الف)

شکل ۱۲: نمودار نیرو-تغییر مکان (الف) بتن معمولی در دو حالت بدون حرارت دیدگی و بعد از حرارت دیدگی (ب) تمامی نمونه‌ها بعد از حرارت دیدگی

## ۵- نتیجه گیری

در مقایسه کارهای انجام شده در این تحقیق با پژوهش‌های سایر محققین می‌توان گفت؛ به علت نفوذپذیری پایین بتن‌های HSC و UHPC تخلیه فشار داخلی صورت نگرفته و تحت دماهای بالا متلاشی می‌گردند. همچنین عملکرد مناسب انواع الیاف در کاهش اثرات تخریبی آتش به اثبات رسیده. در این تحقیق در هر سه نوع بتن NSC, HSC و UHPC طرح اختلاط‌های مناسبی برای عملکرد در برابر حرارت معرفی و از نظر مقاوت فشاری، خمشی، مدول الاستیسیته، خواص ظاهری و کارایی با یکدیگر تحت مقایسه قرار گرفتند. همچنین تاثیرات الیاف فولادی بازیافتی مورد بررسی واقع شد. از طرف دیگر تغییرات صورت گرفته در سنگ‌دانه‌های بکارگرفته شده بعد از حرارت دیدگی و آثار

آن مورد بررسی قرار گرفت. لازم به توضیح است که تنها در تحقیقات محدودی عملکرد برخی از بتن ها تا دمای بالای ۹۰۰ سنجیده شده بود که در این تحقیق هر سه نوع بتن فوق در دو حالت غیر مسلح و مسلح شده در این محدوده دمایی مورد بررسی قرار گرفتند.

و در نهایت به صورت خلاصه با توجه به نتایج آزمون های انجام گرفته، می توان به موارد زیر تحت عنوان نتایج اصلی این تحقیق اشاره کرد.

۱- بر اساس نتایج، در بتن های معمولی (NSC)، با مقاومت بالا (HSC) و فوق توانمند (UHPC) به ترتیب با ۲۰/۵، ۱۱/۵ و ۶/۵ درصد میانگین مقاومت فشاری باقیمانده بعد از حرارت دیدگی در دمای  $900 \pm 20^{\circ}\text{C}$  (ناشی از شعله‌ی مستقیم آتش) بهترین عملکرد مقاومت فشاری حاصل گردید.

۲- استفاده از  $50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  الیاف فولادی بازیافتی (۶۴ درصد حجمی) به ترتیب باعث افزایش ۷ و ۱ درصدی مقاومت فشاری باقیمانده در NSC و UHPC بعد از حرارت دیدگی گردید. البته به کارگیری الیاف موجب تاثیر مثبت در بتن HSC نگردید.

۳- در بتن UHPC کاهش سریع مقاومت فشاری در دمای بیش از  $480^{\circ}\text{C}$  و همچنین تغییرات غیر خطی ضریب انبساط حرارتی (CTE) نمونه‌ها از  $0.85 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$  در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  تا  $2.76 \times 10^{-5} \text{C}^{-1}$  در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  با توجه به سنگدانه‌های سیلیسی به کار گرفته شده در این بتن، موجب عملکرد فشاری ضعیف تر بتن فوق توانمند در مقایسه با بقیه طرح‌ها گردید [۲۵].

۴- بر اساس نتایج آزمون مدول الاستیسیته در بتن های فوق توانمند، با مقاومت بالا و بتن معمولی به ترتیب با ۹، ۸ و ۴/۵ درصد میانگین مدول الاستیسیته باقیمانده بعد از حرارت دیدگی، بهترین عملکرد حاصل شد.

۵- با افزودن  $50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  الیاف فولادی بازیافتی (۶۴ درصد وزنی فولاد) به ترتیب افزایش ۹، ۴ و ۱۸ درصدی مدول الاستیسیته باقیمانده بعد از حرارت دیدگی در دمای  $900 \pm 20^{\circ}\text{C}$  در طرح اختلاط های بتن معمولی، بتن با مقاومت بالا و بتن فوق توانمند حاصل گردید.

۶- فرآیند آب زدایی C-S-H (تجزیه محصولات هیدراتاسیون) در حین حرارت دیدگی و از طرفی از بین رفتن خاصیت چسبندگی و اتصال مواد سیمانی باعث درشت تر شدن (افزایش حجم) ریزساختار، افزایش نفوذپذیری و کاهش دوام مرتبط با نفوذپذیری است.

۷- درجه حرارت های بالا باعث تغییرات فیزیکی و شیمیایی و به طبع آن اتساع حرارتی بتن گردید که به موجب آن تاثیرات مخرب ساختاری مختلف در نمونه های بتنی حاصل شد [۲۷].

۸- بر اساس نتایج تست خمش، بتن UHPC به ترتیب با جذب انرژی  $59/07$  و  $7/63$  ژول مربوط به دو حالت بدون حرارت و بعد از حرارت دیدگی از نظر مقاومت خمشی عملکرد بهتری از خود نشان داد.

۹- از محدودیت های این تحقیق می توان به نبود کوره آزمایشگاهی با توان و ابعاد مورد نیاز اشاره کرد. در بکارگیری کوره صنعتی پخش حرارت بر روی تمامی نمونه ها به صورت یکسان نبوده که با اصلاح چینش نمونه ها برای پخش یکنواخت حرارت، خطاهای احتمالی کاهش یافت. همچنین به علت عدم وجود تجهیزات مناسب، بررسی تغییرات نمونه ها در حین حرارت دیدگی میسر نگردید

۱۰- برای علاقه مندان این زمینه پیشنهاد می شود، استفاده از مواد سیمانی ثانویه با منشأ متفاوت همچون: خاکستر بادی، خاکستر آتشفشانی، سرباره کوره های آهن گدازی یا سرباره به همراه گچ را به جای پوزولان میکروسیلیس مورد بررسی قرار دهند. همچنین بررسی سنگدانه هایی با ترکیبات شیمیایی و کانی شناسی مختلف مانند: گرانیت، دولومیت، بازالت و . . . در طرح اختلاط های مربوطه موثر خواهد بود. با توجه به بهبود عملکرد حرارتی بتن در حین بکارگیری الیاف، بررسی تاثیر انواع و

دوزهای بالاتر الیاف بدون افت کارایی بتن موثر خواهد بود. در نهایت بررسی استفاده از مواد افزودنی همچون هوازا بر روی خواص حرارتی بتن پیشنهاد می‌گردد.

## مراجع

- [1] Bird, M. I. (1995). Fire, prehistoric humanity, and the environment. *Interdisciplinary Science Reviews*, 20(2), 141–154. <https://doi.org/10.1179/isr.1995.20.2.141>
- [2] Pierorazio, A., Cherolis, N.E., Lowak, M. et al. (2022). Assessment of Damage to Structures and Equipment Resulting from Explosion, Fire, and Heat Events. *J Fail. Anal. and Preven.* 22, 139–153. <https://doi.org/10.1007/s11668-021-01330-4>
- [3] Anderson, A., Ezekoye, O.A. (2018). Quantifying Generalized Residential Fire Risk Using Ensemble Fire Models with Survey and Physical Data. *Fire Technoly*, 54, 715–747. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0709-z>
- [4] Manzoor, T., Bhat, J. A., & Shah, A. H. (2024). Performance of geopolymers concrete at elevated temperature– A critical review. *Construction and Building Materials*, 420, 135578.
- [5] Dauji, S., Kulkarni, A. (2021). Fire Resistance and Elevated Temperature in Reinforced Concrete Members: Research Needs for India. *J. Inst. Eng. India Ser. A* 102, 315–333. <https://doi.org/10.1007/s40030-021-00513-4>
- [6] Johnson, W. H., & Parsons, W. H. (1944). *Thermal expansion of concrete aggregate materials*. Washington, DC, USA: US Government Printing Office, (p. 32).
- [7] Phan, L. T., & Carino, N. J. (2002). Effects of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures. *ACI Materials Journal*, 99(1), 54-66.
- [8] Cheng, F. P., Kodur, V. K. R., & Wang, T. C. (2004). Stress-strain curves for high strength concrete at elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(1), 84-90.
- [9] Lau, A., & Anson, M. (2006). Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete. *Cement and concrete research*, 36(9), 1698-1707.
- [10] Ali, S. I. A., & Lublóy, E. (2022). Effect of elevated temperature on the magnetite and quartz concrete at different W/C ratios as nuclear shielding concretes. *Nuclear Materials and Energy*, 33, 101234.
- [11] Malik, M., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V. (2021). Microstructural changes in concrete: Postfire scenario. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(2), 04020462.
- [12] Benjeddou, O., Katman, H. Y., Jedidi, M., & Mashaan, N. (2022). Experimental investigation of the high temperatures effects on self-compacting concrete properties. *Buildings*, 12(6), 729.
- [13] Felicetti, R., Gambarova, P. G., & Bamonte, P. (2013). Thermal and mechanical properties of light-weight concrete exposed to high temperature. *Fire and Materials*, 37(3), 200-216.
- [14] Khan, M., Lao, J., Ahmad, M. R., & Dai, J. G. (2024). Influence of high temperatures on the mechanical and microstructural properties of hybrid steel-basalt fibers based ultra-high-performance concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, 411, 134387.
- [15] Wang, Y., Nejati, F., Edalatpanah, S. A., & Goudarzi Karim, R. (2024). Experimental study to compare the strength of concrete with different amounts of polypropylene fibers at high temperatures. *Scientific Reports*, 14(1), 8566.
- [16] Wang, D., Luo, B., Deng, J., Feng, Q., Zhang, W., Deng, C., ... & Das, O. (2024). Optimized fire resistance of alkali-activated high-performance concrete by steel fiber. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-13.
- [17] Adamczak-Bugno, A., Lipiec, S., Koteš, P., Bahleda, F., & Adamczak, J. (2024). Detection of Destructive Processes and Assessment of Deformations in PP-Modified Concrete in an Air-Dry State and Exposed to Fire Temperatures Using the Acoustic Emission Method, Numerical Analysis and Digital Image Correlation. *Polymers*, 16(8), 1161.
- [18] Ali, M., Elsayed, M., Tayeh, B. A., Maglad, A. M., & El-Azim, A. A. (2024). Effect of hybrid steel, polypropylene, polyvinyl alcohol, and jute fibers on the properties of ultra-high performance fiber reinforced concrete exposed to elevated temperature. *Structural Concrete*, 25(1), 492-505.
- [19] EN, B. S., (2011). *197-1, Cement-Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. London: European Committee For Standardisation.

- [20] Astm, A. S. T. M., (2014). *Standard specification for silica fume used in cementitious mixtures*. USA: West Conshohoken, PA, ASTM International.
- [21] Standard, A. S. T. M., (2018). *ASTM C33/C33M-18 Standard Specification for Concrete Aggregates*. USA: West Conshohocken, PA.
- [22] Afshin, H., Ahmadian, Mh. Kh., Emami, M., Alilo, Y., & Sharif, G. G. (2024). Evaluation of the use of micro recycled steel fibers in shotcrete used to stabilize surface and underground excavations. *Civil & Project*, 51-75. 10.22034/cpj.2024.453407.1273
- [23] En, B. S. (2002). *12390-3, Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens*. London: British Standards Institution.
- [24] Standard, A. S. T. M. (2010). *Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression*. *ASTM Stand. C*, 469.
- [25] Ghannam, M. (2019). Proposed models for concrete thermal expansion with different aggregate types and saturation conditions. *SN Applied Sciences*, 1(5), 425.
- [26] Malik, M., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V. (2021). Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures: A review. *Construction and Building Materials*, 270, 121398.
- [27] Crook, D. N., & Murray, M. J. (1970). Regain of strength after firing of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 22(72), 149-154.

