

مقاومت فشاری و کششی بتن دارای مواد افزودنی معدنی پس از قرار گرفتن در معرض دمای بالا

محمد حسین محمودی^۱، محمدرضا داودی^۲، حسین یوسف پور^{۳*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی

۲- دانشیار فقید دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی

* hyousefpour@nit.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۴۰۰/۰۸/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۵

چکیده

قرارگیری بتن در معرض دمای بالا در شرایط مختلفی اتفاق می افتد که از جمله آن ها می توان به آتش سوزی در ساختمان ها و یا کاربرد بتن در سازه هایی مانند نیروگاه ها اشاره نمود. در چنین شرایطی، تخمین مقاومت پسماند بتن پس از آتش سوزی و یا دستیابی به نوعی از بتن که با تجربه سیکل های متعدد دمایی دچار تغییرات کمی در مشخصات شود اهمیت کاربردی فراوان دارد. هدف از مطالعه حاضر بررسی آزمایشگاهی اثر کاربرد میکروسیلیس و خاکستر بادی به عنوان دو ماده افزودنی معدنی روی مقاومت پسماند بتن پس از قرار گرفتن در معرض حرارت بالا است. با کاربرد ۱۹ طرح اختلاط، مجموعه ای از ۵۷۰ نمونه استوانه ای با نسبت های آب به سیمان بین ۰٫۳۵ و ۰٫۶۵، درصد جایگزینی سیمان بین ۰ و ۱۵ برای میکروسیلیس و بین ۰ و ۳۰ برای خاکستر بادی ساخته شد. این نمونه ها در کوره الکتریکی قرار گرفته و مقاومت فشاری و کششی آن ها در شرایط کنترل و بعد از قرارگیری در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه در زمان بندی های مختلف ۲ ساعته، ۱۲ ساعته و ۲۴ ساعته ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری و کششی نمونه های قرار گرفته در معرض دمای ۲۰۰ درجه دچار افت مقاومت قابل توجهی نشد، ولی کاهش مقاومت در اثر قرارگیری در معرض دمای ۴۰۰ درجه و ۶۰۰ درجه به وضوح مشاهده شد. کاربرد میکروسیلیس منجر به تغییر محسوسی در مقاومت فشاری پسماند نمونه ها نشد ولی مقاومت پسماند کششی نمونه ها را کاهش داد. کاربرد خاکستر بادی نیز در جایگزینی نزدیک به ۳۰ درصد منجر به افزایش مقاومت فشاری پسماند شده اما مقاومت کششی پسماند نمونه ها را کاهش داد.

واژگان کلیدی: میکروسیلیس، خاکستر بادی، آتش، حرارت بالا، مقاومت پسماند.

۱- مقدمه

بسیاری از سازه‌های مهندسی به صورت روزانه در سطح دنیا در معرض آتش‌سوزی قرار می‌گیرند. مهمترین اثری که آتش‌سوزی بر روی سازه‌ها می‌گذارد، افزایش دما می‌باشد که می‌تواند در آتش‌سوزی‌های متعارف ساختمانی تا حد بیش از ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد باشد [1]. دماهای بالای ناشی از آتش‌سوزی علاوه بر ایجاد تنش‌ها و تغییر شکل‌های حرارتی، مشخصات مکانیکی مصالح از جمله سختی و مقاومت آن‌ها را تحت الشعاع قرار داده و در نتیجه ممکن است تحمل نیروها توسط اجزای سازه را به مخاطره انداخته و یا حتی منجر به فروریزش سازه شود؛ به طوری که در موارد متعدد فروریزش کامل سازه‌های فولادی و بتن مسلح در سطح جهان مشاهده و گزارش شده است. با این وجود، بخش قابل توجهی از سازه‌های بتن مسلح قرار گرفته در معرض آتش‌سوزی حتی با تجربه دماهای قابل توجه دچار صدمه ظاهری چندانی نشده و همچنان ایستایی خود را حفظ می‌کنند. در این شرایط، تعیین مقاومت این سازه‌ها پس از خاتمه آتش‌سوزی برای ارزیابی قابلیت کاربری بعدی آن‌ها ضروری است.

علاوه بر شرایط آتش‌سوزی، که منجر به قرارگیری سازه‌ها یا عضو بتنی در دمای نسبتاً بالا برای مدتی کوتاه می‌شوند، در بسیاری از موارد اجزای بتنی ممکن است در سیکل‌های متعدد دمایی طولانی در معرض قرارگیری در دمای بالا باشند. به عنوان نمونه، در سازه‌های صنعتی مرتبط با صنایع فولاد، ریخته‌گری و یا هر کاربردی که در آن قصد بر کاربرد یک سازه بتن مسلح در مجاورت کوره و یا هر منشأ دمای بالا وجود داشته باشد، امکان ایجاد دماهای بالا در بتن وجود دارد. در این شرایط، هدف دستیابی به نوعی از بتن است که دارای قابلیت تاب‌آوری مناسبی در برابر حرارت بوده و بتواند با وجود تجربه دماهای قابل توجه، دچار تغییرات کمتری در مشخصات شود.

نسل امروزی بتن‌های مورد استفاده، به صورت گسترده‌ای از

مواد افزودنی معدنی^۱ بهره می‌گیرند. این مواد افزودنی، با یکی از دو سازوکار واکنش‌های سیمانی^۲ (واکنش مستقیم با آب) یا پوزولانی^۳ (واکنش ثانویه با محصولات اولیه هیدراتاسیون سیمان) منجر به ایجاد ترکیبات سختی در بتن می‌شود که مشخصات مکانیکی و پارامترهای مربوط به دوام بتن را بهبود می‌دهند. از مهمترین مواد افزودنی معدنی مورد استفاده در جهان برای ساخت بتن می‌توان به خاکستر بادی^۴ اشاره نمود. این ماده افزودنی معدنی که از ضایعات نیروگاه‌های تولید برق زغال‌سنگی تولید می‌شود، در بخش عمده‌ای از بتن‌های نسل جدید در کشورهایی همچون ایالات متحده آمریکا در درصدهای جایگزینی سیمان کمتر از ۳۰ درصد به کار می‌رود. ذرات پودر خاکستر بادی دارای اندازه ابعادی نزدیک به ابعاد ذرات سیمان بوده و با توجه به شکل منظم کروی، منجر به کاهش مصرف سیمان، کارایی بهتر برای بتن تازه، مقاومت درازمدت بالاتر و نفوذپذیری کمتر برای بتن سخت‌شده می‌شود [2]. بسته به ترکیب شیمیایی این ماده افزودنی معدنی، ممکن است خاکستر بادی در یکی از دو دسته سیمانی (کلاس C) و یا پوزولانی (کلاس F) قرار بگیرد.

از سوی دیگر، یکی از موثرترین مواد افزودنی بتن در سطح جهان دوده سیلیس یا میکروسیلیس است. این ماده افزودنی معدنی به عنوان ضایعات فراوری شده صنایع فروسیلیس محسوب شده و در سطح کشور با قیمت مناسب در دسترس است. میکروسیلیس به عنوان یک ماده پوزولانی بسیار موثر، بیشتر در درصدهای جایگزینی سیمان کمتر از ۱۰ درصد در بتن به کار می‌رود، ولی کاربرد آن توأم با فوق‌روان‌کننده تا ۱۵ درصد جایگزینی نیز مرسوم است. این ماده، با دارا بودن درصد قابل توجهی از سیلیس واکنش‌پذیر، می‌تواند با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان وارد واکنش شده و ترکیبات سخت سیلیکات کلسیم هیدراته^۶ (CSH) جدید در بتن ایجاد نماید. میکروسیلیس همچنین دارای ابعادی بسیار کوچکتر از

4. Fly ash

5. Silica fume

6. Calcium Silicate Hydrate (C-S-H)

1. Supplementary Cementitious Materials (SCMs)

2. Cementitious

3. Pozzolanic

نرخ‌ی در حدود ۰,۳ تا ۰,۵ درجه سلسیوس بر دقیقه رخ می‌دهد [۶].

مرسی^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۲ با آزمایش روی رفتار سیمان آمیخته حاوی متاکائولن در دمای بالا نیز پس از مشاهده یک افزایش اولیه در مقدار مقاومت فشاری در دمای ۲۵۰ درجه، کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها را گزارش کردند [۷].

کائور^۷ و سیدیکو^۸ در سال ۲۰۱۲ با آزمایش بتن حاوی روباره متوجه شدند تا دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد کاهش وزن ناچیز است، ولی بیش از ۱۰۰ درجه کاهش وزن محسوس بوده و دما بر مدول الاستیسیته اثرگذار است. در بین نمونه‌های حاوی روباره، نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد روباره یا GGBFS بیشترین مقاومت فشاری در دمای ۲۷ درجه و همین‌طور پایان آزمایش و در دمای ۳۵۰ درجه دارند، در این دماها بتن فاقد GGBFS مقاومت فشاری بیشتری را از خود نشان می‌دهد. در بین نتایج حاصل افزایش در مقاومت فشاری نمونه‌ها با وجود افزایش دما توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. [8]

شاه^{۱۰} و همکاران در سال ۲۰۱۳ رفتار بتن مقاومت بالا حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس را در درجه حرارت بالا بررسی کردند. نمونه‌های ساخته شده در معرض دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت. بیشترین کاهش مقاومت در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس رخ داد. [9]

در سال ۲۰۱۴ مطالعات آزمایشگاهی توسط حسین^{۱۱} و همکاران راجع به عملکرد بتن حاوی مخلوط ژئوپلیمر و خاکستر بادی در دمای بالا انجام شد. نمونه‌های ساخته شده تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد در معرض حرارت قرار گرفتند سپس نتایج با هم مقایسه شدند. بتن حاوی مواد افزودنی بررسی شده در مقایسه با

ذرات سیمان بوده و کاربرد آن در بتن می‌تواند اثر ریزپرکنندگی^۱ باشد. در نتیجه کاربرد میکروسیلیس، مشخصات ناحیه انتقال^۲ بین سنگدانه و خمیر سیمان به شکل قابل ملاحظه‌ای بهبود پیدا کرده و مشخصات مکانیکی و دوام بتن در برابر نفوذ عوامل مخرب بسیار بهتر می‌شود [3 و 4].

استفاده از هر دو ماده افزودنی معدنی موضوع تحقیقات متعدد در سطح دنیا بوده و به طور خاص در مورد آثار کاربرد میکروسیلیس بر خواص بتن در دمای بالا تحقیقاتی پیش از این انجام شده است. در سال ۱۹۹۲، هرتز^۳ اثر میکروسیلیس را روی رفتار بتن در دمای بالا مورد بررسی قرار داد و نشان داد حضور میکروسیلیس ممکن است پدیده پوسته‌اندازی^۴ را تشدید نموده و منجر به رخداد پوسته‌اندازی به صورت انفجاری در نرخ‌های افزایش حرارتی بسیار کمتر در مقایسه با شرایط بتن بدون میکروسیلیس شود. وی همچنین مشاهده نمود که حضور الیاف فولادی ممکن است این پدیده را تشدید نماید. در عین حال، گزارش شد که افزایش گازهای سمی ناشی از حرارت دیدن فوق‌روان‌سازهای مورد استفاده برای تولید بتن دارای میکروسیلیس ممکن است موجب نگرانی باشد [5]

در سال ۱۹۹۸، فلیسیتی و گامبارووا^۵ مقاومت فشاری پسماند بتن‌های با مقاومت بالا را پس از تجربه حرارت‌هایی بین ۱۰۰ و ۵۰۰ درجه بررسی نمودند. مشاهده شد که پس از تجربه یک سیکل حرارتی طاق‌ت نمونه‌های بتنی افزایش پیدا می‌کند ولی مقاومت و سختی نمونه‌ها دچار کاهش می‌شود؛ در عین حال، رفتار فشاری بتن، قسمت بعد از نقطه‌ی پیک ملایم‌تری پیدا می‌نماید. در این مطالعه همچنین بیان شد که در نیروگاه‌های هسته‌ای، در شرایط گرمایش بیش از اندازه هسته، رسیدن به دماهایی در حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه در سطح داخلی پوسته محافظ بتنی نیروگاه بسیار محتمل است؛ البته این افزایش دما با

7.Kaur

8.Siddique

9.Ground Granulated Blast Furnace Slag

10.Shah

11.Hussin

1.Microfiller Effect

2.Interfacial Transition Zone (ITZ)

3.Hertz

4.Spalling

5.Felicetti and Gambarova

6.Morsy

برای تخمین مقاومت فشاری و کششی پسماند بتن پس از تجربه دمای بالا، در سال ۲۰۰۶، چنگ و همکاران پس از انجام آزمایش‌هایی روی آزمون‌های استوانه‌ای بتنی، معادلات (۱) و (۲) را پیشنهاد نمودند.

$$\frac{f'_{cr}}{f'_c} = \begin{cases} 1.01 - 0.00055 T & 20^\circ < T \leq 200^\circ \\ 1.15 - 0.00125 T & 200^\circ < T \leq 800^\circ \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{f'_{tr}}{f'_t} = \begin{cases} 1.05 - 0.0025 T & 20^\circ < T \leq 100^\circ \\ 0.8 & 100^\circ < T \leq 200^\circ \\ 1.02 - 0.0011 T & 200^\circ < T \leq 800^\circ \end{cases} \quad (2)$$

در این معادلات، f'_{cr} و f'_{tr} مقاومت فشاری و کششی پسماند، f'_c و f'_t مقاومت فشاری و کششی در شرایط پیش از تجربه دمای T بیشینه دمای تجربه شده توسط نمونه‌ها هستند.

بررسی اثر سیکل‌های دمایی طولانی مدت روی رفتار بتن موضوع مطالعات بسیار محدودی در گذشته بوده است. در سال ۲۰۱۶، ماتسوزاوا و همکاران رفتار بتن‌های قرار گرفته در معرض دمای ۱۷۵ درجه سلسیوس به مدت طولانی (۱۰ تا ۹۰ روز) را برای بررسی رفتار سازه‌های محافظ نیروگاه هسته‌ای مورد بررسی قرار دادند و کاهش جرم، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن را اندازه‌گیری نمودند. مشاهده شد که هم بیشینه دما و هم مدت زمان قرارگیری در معرض دما روی کاهش جرم نمونه‌ها و مشخصات مکانیکی آن‌ها در محدوده دمایی بررسی شده اثرگذار است [۱۳]. در سال ۲۰۲۰، شیل و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی روی ۴۵ آزمون استوانه‌ای به بررسی مقاومت پسماند بتن معمولی فاقد مواد افزودنی پس از قرارگیری در معرض سیکل‌های متعدد حرارتی توأم با مایعات هیدروکربنی پرداختند. در سیکل‌های حرارتی مزبور که برای شبیه‌سازی شرایط باند فرودگاهی در نظر گرفته شده بود، دما سرعت زیادی به حد ۱۷۵ درجه سلسیوس رسانده شده و سپس به مدتی در حدود ۴ دقیقه در این دما نگهداری شدند و پس از آن آزمون‌ها خنک شدند. نتایج نشان داد که با شرایط مزبور، مقاومت فشاری

بتن حاوی سیمان معمولی عملکرد بهتری در برابر حرارت از خود نشان داد [۱۰].

در سال ۲۰۲۱ دباغی و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی رفتار پسماند بتن سبک دارای مقادیر مختلف میکروسیلیس پس از قرارگیری در دمای بالا پرداختند. مجموعه ۲۴۰ آزمون استوانه‌ای با مقادیر مختلف سنگدانه‌های سبک و میکروسیلیس ساخته شده و تحت حرارت در دماهای ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و نتایج مقاومت فشاری، کششی، و مدول الاستیسیته آزمون‌ها اندازه‌گیری شده و با نتایج معادلات آیین‌نامه‌های امریکا و استرالیا مقایسه شد. نتایج نشان داد که کاربرد درصد جایگزینی بالاتر برای سنگدانه سبک می‌تواند منجر به بهبود مقاومت پسماند شود [۱۱].

شکل ۱. تغییرات مقاومت بتن در دمای بالا بر اساس یوروکد ۲

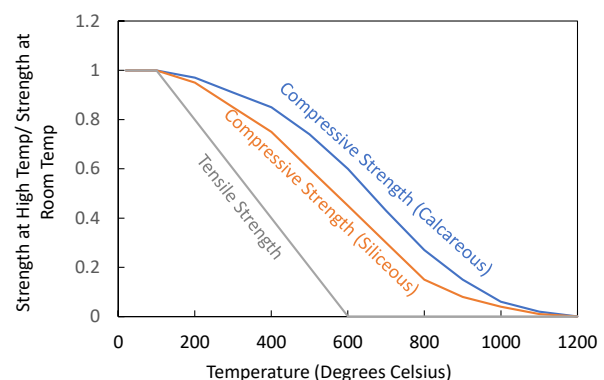


Fig. 1. Changes in mechanical properties of concrete at elevated temperatures according to Euro Code 2

مقاومت فشاری و کششی بتن در دمای بالا در آیین‌نامه‌های متعددی مورد توجه قرار گرفته است، که از جمله مهمترین و پرکاربردترین آن‌ها باید به آیین نامه یوروکد ۱۲ [۱۲] اشاره نمود. البته این آیین‌نامه، به مقاومت فشاری و کششی در دمای بالا و نه مقاومت فشاری و کششی پسماند بعد از تجربه دمای بالا تمرکز دارد. در این آیین‌نامه، تغییرات مقاومت فشاری و کششی بتن بر اساس دما مطابق شکل (۱) توصیه شده است.

جدول ۱. ترکیب سیمان، میکروسیلیس و خاکستر بادی بر اساس اعلام تولید کننده

Chemical Compound	Weight %		
	Portland Cement	Fly Ash	Silica Fume
SiO ₂	20.8	33.8	94.6
Al ₂ O ₃	5.24	8.5	1.3
Fe ₂ O ₃	3.6	0.6	0.9
CaO	64	39	0.3
MgO	1.63	10.5	0.2
Other	<5	<8	<5

Table 1. Chemical compositions of cement, silica fume, and fly ash according to the manufacturer

از شن و ماسه با منشاء آهکی برای ساخت بتن استفاده شد که تحت آزمایش دانه‌بندی مطابق ASTM C136 قرار گرفتند [۱۵]. دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در شکل (۲) نمایش داده شده است. شن مورد استفاده در محدوده مجاز دانه‌بندی شماره ۵۶ بر اساس ASTM C33 [۱۶] قرار گرفته و بیشینه اندازه اسمی سنگدانه‌ها برابر با ۲۵ میلی‌متر تعیین شد. به صورت مشابه، ماسه در محدوده مجاز دانه‌بندی بوده و مدول نرمی آن برابر با ۲٫۷ تعیین شد.

علاوه بر اجزای ذکر شده، از آب شرب شهری و فوق روان کننده نسل سوم بر پایه پلی‌کربوکسیلات‌های اصلاح شده استفاده شد. مقدار فوق‌روان‌ساز برای تمامی طرح اختلاط‌ها برابر با ۱ درصد وزن مجموع مواد سیمانی در نظر گرفته شد.

۲-۲- طرح اختلاط

برای طرح اختلاط‌های مورد استفاده در این پژوهش، پارامترهای زیر به عنوان متغیر در نظر گرفته شد: نسبت آب به سیمان برابر با مقادیر ۰٫۳۵، ۰٫۵، و ۰٫۶۵ در نظر گرفته شد؛ درصد جایگزینی میکروسیلیس برابر با مقادیر ۰، ۵، ۱۰، و ۱۵ درصد وزن کل سیمان در نظر گرفته شد؛ و درصد جایگزینی خاکستر بادی که برابر با مقادیر ۰، ۱۰، ۲۰، و ۳۰ درصد در نظر گرفته شد. طراحی اختلاط بر اساس این متغیرها، به صورت سازگار با ACI 211 [۱۷] انجام شد که جزئیات آن در جدول (۲) ارائه شده است. از آنجایی که کاربرد مواد افزودنی معدنی در بتن‌های توانمند مرسوم است، طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰٫۶۵ با مواد

نمونه‌ها تا ۴۰ درصد و مقاومت کششی دونیم شدن آن‌ها تا حدود ۲۷ درصد دچار کاهش شدند. همچنین در نمونه‌های با نسبت آب به سیمان کمتر، درصد کاهش مقاومت بیشتری مشاهده شد [۱۴].

با مرور ادبیات فنی مشخص می‌شود که مطالعات قابل توجهی در مورد بتن دارای خاکستر بادی پس از قرارگیری در معرض حرارت بالا انجام نشده و مطالعات انجام شده روی بتن دارای میکروسیلیس نیز نسبتاً محدود و بیشتر با تمرکز بر روی پدیده پوسته‌اندازی بتن بوده است، به طوری که تفاوت رفتار بتن دارای مواد افزودنی معدنی و بتن فاقد این مواد به صورت جامعی مورد شناسایی قرار نگرفته است؛ به ویژه برای شرایط دمایی بالای طولانی مدت که ممکن است کاربری صنعتی نیز داشته باشد. در این مقاله، تلاش می‌شود تا اثر کاربرد این دو ماده افزودنی بر روی مشخصات مکانیکی بتن پس از قرارگیری در معرض دمای بالا به صورت کوتاه مدت (مانند شرایط آتش‌سوزی) و بلندمدت (مانند کاربری صنعتی) به صورت جامعی مورد بررسی قرارگیرد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این مطالعه، با کاربرد ۱۹ طرح اختلاط، مجموعه‌ای از ۵۷۰ آزمون استوانه‌ای بتنی ساخته شدند که دارای مقادیر مختلفی از سیمان، میکروسیلیس، خاکستر بادی و یا هر دو به صورت اختلاط سه‌گانه بوده‌اند.

۲-۱- مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده در این پژوهش برای ساخت بتن شامل درشت دانه (شن)، ریزدانه (ماسه)، آب، سیمان پرتلند تیپ ۲، میکروسیلیس، خاکستر بادی، و فوق روان کننده است که در ادامه به معرفی هر کدام با جزئیات پرداخته می‌شود. سیمان پرتلند، میکروسیلیس، و خاکستر بادی مورد استفاده دارای مشخصات شیمیایی مطابق جدول (۱) بودند.

از استخر آب خارج شده و سطح آن‌ها خشک شد. سپس هر آزمونه به مدت زمان ۲۴ ساعت در معرض خشک شدن طبیعی در دمای محیط قرار گرفت. در گام بعدی، وزن آزمونه‌ها با کاربرد ترازوی دیجیتال ثبت شده و سپس آزمونه برای آزمایش در کوره الکتریکی بزرگ مقیاس آزمایشگاه قرار داده شد. این کوره دارای ظرفیت ۲۴۰۰ لیتر و قابلیت اعمال دمای بیشینه ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد بوده و آزمونه‌ها به صورت منظم و با فاصله‌های یکسان و در یک تراز ارتفاعی، درون کوره قرار گرفتند. چیدمان

آزمونه‌ها در کوره در شکل (۳) نشان داده شده است برای پایش دقیق‌تر دما، علاوه بر ترموکوپل‌های اصلی کوره، از یک ترموکوپل در تراز قرارگیری آزمونه‌ها نیز استفاده شد. با توجه به مشابه بودن شرایط قرارگیری آزمونه‌ها، هدف مقایسه‌ای طرح‌های اختلاط مختلف بدون نیاز به کاربرد ترموکوپل‌های مدفون در آزمونه‌های بتنی تامین شد. جزئیات سیکل‌های حرارتی اعمال شده به نمونه‌ها در جدول (۳) نشان داده شده- است.

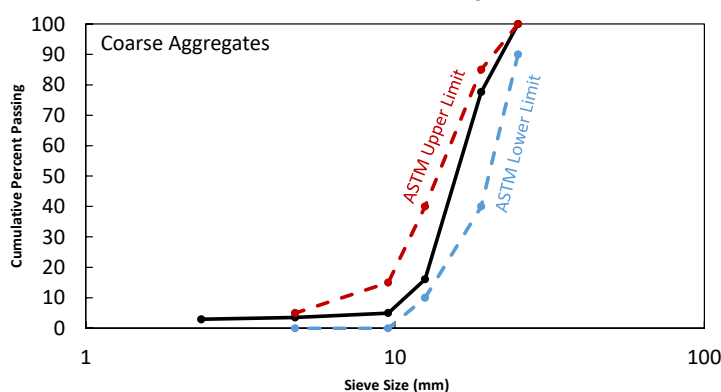
افزودنی معدنی ساخته نشد. شایان ذکر است که مقایسه ملاحظات اقتصادی و محلی در انتخاب طرح‌های اختلاط ملاک قرار نگرفته است. به عنوان نمونه، طرح‌های دارای ۳۰ درصد جایگزینی خاکستر بادی و ۱۰ درصد جایگزینی میکروسیلیس ممکن است در کشورهای دارای صنایع زغال‌سنگ دارای توجیه اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی باشند ولی در کشورهای واردکننده خاکستر بادی مانند ایران اقتصادی و اجرایی محسوب نمی‌شوند.

برای اطمینان از رطوبت یکنواخت مصالح، شن و ماسه در تمامی مدت ساخت در فضای سرپوشیده نگهداری شده و به صورت یکنواختی خشک شدند. برای هر طرح اختلاط انتخاب شده، حداقل ۳۰ آزمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر مطابق استاندارد ASTM C192 ساخته شد [۱۸].

۳-۲- قرارگیری در دمای بالا

هر آزمونه پس از ساخت به مدت زمان ۵۶ روز در استخر آب نگهداری شد. عمل‌آوری آزمونه‌ها به مدت ۵۶ روز به جای ۲۸ روز به منظور تامین زمان کافی برای عملکرد مواد افزودنی بوده است [۲]. با فرا رسیدن زمان آزمایش، ابتدا آزمونه‌های مورد نظر

شکل ۲. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها



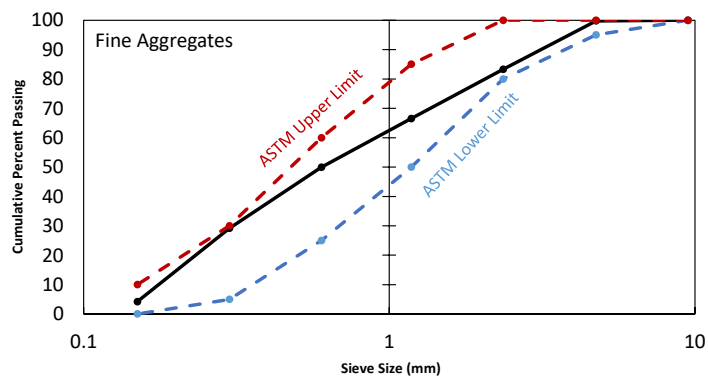


Fig. 2. Aggregate grading

جدول ۲. طرح‌های اختلاط مورد بررسی

No.	Mix ID	Mass per cubic meter (kg)						
		Water	Cement	Silica Fume	Fly Ash	Coarse Aggregate	Fine Aggregate	HRWR
1	1	190	380	0	0	1008	767	3.8
2	2	190	292	0	0	1008	855	2.9
3	3	190	543	0	0	1008	604	5.4
4	1-SF10	190	342	38	0	1008	767	3.8
5	1-FA20	190	304	0	76	1008	767	3.8
6	1-SF10-FA10	190	304	38	38	1008	767	3.8
7	1-SF15	190	323	57	0	1008	767	3.8
8	1-SF5	190	361	19	0	1008	767	3.8
9	1-FA10	190	342	0	38	1008	767	3.8
10	1-FA30	190	266	0	114	1008	767	3.8
11	1-SF10-FA30	190	228	38	114	1008	767	3.8
12	3-SF5	190	516	27	0	1008	604	5.4
13	3-SF10	190	489	54	0	1008	604	5.4
14	3-SF15	190	461	81	0	1008	604	5.4
15	3-FA10	190	489	0	54	1008	604	5.4
16	3-FA20	190	434	0	109	1008	604	5.4
17	3-FA30	190	380	0	163	1008	604	5.4
18	3-SF10-FA10	190	434	54	54	1008	604	5.4
19	3-SF10-FA30	190	326	54	163	1008	604	5.4

Table 2. Concrete mixture designs

شکل ۳. چیدمان آزمون‌ها در داخل کوره



Fig. 3. Specimen arrangement inside the furnace

جدول ۳. جزئیات سیکل‌های حرارتی اعمال شده

Cycle ID	Operations
200-1	- Reaching 200 degrees - Maintaining 200 degrees for 2 hrs - Shut down
200-2	- Reaching 200 degrees - Maintaining 200 degrees for 12 hrs - Shut down
200-3	- Reaching 200 degrees - Maintaining 200 degrees for 12 hrs - Shut down for 12 hrs - Reaching 200 degrees - Maintaining 200 degrees for 12 hrs - Shut down
400-1	- Reaching 400 degrees - Maintaining 400 degrees for 2 hrs - Shut down
400-2	- Reaching 400 degrees - Maintaining 400 degrees for 12 hrs - Shut down
400-3	- Reaching 400 degrees - Maintaining 400 degrees for 12 hrs - Shut down for 12 hrs - Reaching 400 Degrees - Maintaining 400 degrees for 12 hrs - Shut down
600	- Reaching 600 degrees - Maintaining 600 degrees for 2 hrs - Shut down

Table 3. Details of heating cycles

۳- نتایج و بحث

شکل (۴) نتایج مقاومت فشاری و مقاومت کششی دونیم شدن نمونه‌ها را پیش از دمای بالا نشان می‌دهد. شایان ذکر است که نتایج ذکر شده به عنوان هر نمونه، متوسط نتایج دو آزمون آزمایش شده است. مقاومت فشاری این نمونه‌ها بین ۱۷٫۴ و ۳۱٫۷ مگاپاسکال بوده است. در بین طرح اختلاط‌های بدون مواد افزودنی معدنی، طرح اختلاط شماره ۳ با توجه به نسبت آب به سیمان کمتر، مقاومت فشاری بالاتری را کسب نموده و مقاومت فشاری طرح اختلاط شماره ۲ با توجه به نسبت آب به سیمان بالا کمترین بوده است. مقاومت کششی دونیم شدن نمونه‌ها نیز بین ۲٫۴۱ و ۴٫۴۳ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. البته الگوی تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها بر اثر کاربرد مواد افزودنی

شایان ذکر است که سیکل‌های حرارتی 200-3 و 400-3 برای شبیه‌سازی کاربرد صنعتی بتن در دمای بالا (و نه در معرض آتش‌سوزی) مورد استفاده قرار گرفتند؛ چرا که قرارگیری در معرض چنین سیکل‌های حرارتی در سازه‌های نیروگاهی و تجهیزات آب‌شیرین‌کن رایج است.

برای پیش‌گیری از انباشت بخار آب و پوسته‌اندازی انفجاری بتن، کلیه آزمون‌ها ابتدا در معرض یک سیکل پیش گرمایش قرار گرفتند که در طی آن دمای کوره در مدت ۳۰ دقیقه به ۱۰۰ درجه سلسیوس رسیده و سپس به مدت ۲۴ ساعت در این دما ثابت نگه داشته شد. در طول این فرایند، دریچه‌های سقف کوره بازنگه داشته شد تا آب آزاد تبخیر شده و پتانسیل انفجار ناشی از فرار ناگهانی بخار آب به حداقل برسد. پس از خاتمه پیش گرمایش، دمای کوره با نرخ ثابت ۱٫۵ درجه سلسیوس بر دقیقه افزایش داده شد تا به دمای هدف برسد.

بعد از این که آزمون‌ها از کوره خارج شدند، به صورت دقیق وزن شدند و ۲۴ ساعت بعد در معرض بارگذاری برای تعیین مقاومت فشاری و مقاومت کششی دونیم شدن (برزلی) به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM C39 [۱۹] و ASTM C496 [۲۰] قرار گرفتند. برای هر آزمایش، حداقل دو آزمون استوانه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته و میانگین مقاومت به دست آمده از آن‌ها به عنوان نتیجه نهایی نمونه ثبت شد. با در نظر گرفتن تفاوت مدت زمان سیکل‌های حرارتی، سن آزمون‌ها در زمان آزمایش بین ۵۹ و ۶۱ روز بوده است.

مقایسه با آزمون‌های پیش‌گرمایش شده مشاهده نشد. آزمون‌های قرارگرفته در معرض دمای ۴۰۰ درجه در بسیاری از آزمون‌ها عاری از ترک بوده‌اند، البته در برخی از این آزمون‌ها ترک‌های مویی مشاهده شد. آزمون‌های قرار گرفته در معرض سیکل دمایی ۶۰۰ درجه دچار ترک خوردگی بسیار قابل توجهی شدند که عمیق و عریض و در ظاهر آزمون کاملاً مشهود بوده‌اند. وضعیت صدمه ظاهری آزمون‌ها دارای همبستگی قابل توجهی با طرح اختلاط به کار رفته و یا مدت زمان قرارگیری در معرض دما نبوده و بیشتر تابعی از بیشینه دمای تجربه شده بوده است.

شکل ۵. وضعیت ظاهری آزمون‌های طرح SF-5-1 پس از قرارگیری در معرض دمای بالا



Fig. 5. Appearance of SF-5-1 specimens after heat exposure

۳-۲- نگهداری مقاومت فشاری

به منظور ارزیابی بهتر آثار حرارتی، مقاومت فشاری متوسط هر طرح اختلاط بعد از قرارگیری در معرض حرارت به مقاومت آن پیش از قرارگیری در معرض حرارت تقسیم شد تا ضریبی با عنوان «ضریب نگهداری مقاومت فشاری» مطابق رابطه ۳ تعیین شد.

$$CSR = \frac{f'_c(\text{Post Heat})}{f'_c(20^\circ\text{C})} \quad (3)$$

شکل (۶) مقادیر ضریب حفظ مقاومت فشاری نمونه‌ها را بعد از قرارگیری در سیکل‌های مختلف حرارتی با دمای بیشینه ۲۰۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. در این شکل، مقدار مورد انتظار

معدنی با تغییرات مقاومت فشاری مشابهت ندارد؛ به طوری که کاربرد مواد افزودنی معدنی در تمام طرح‌های اختلاط باعث افزایش مقاومت کششی دونیم شدن نمونه‌ها گردیده است.

شکل ۴. مقاومت فشاری و کششی دونیم شدن پیش از قرارگیری در معرض حرارت

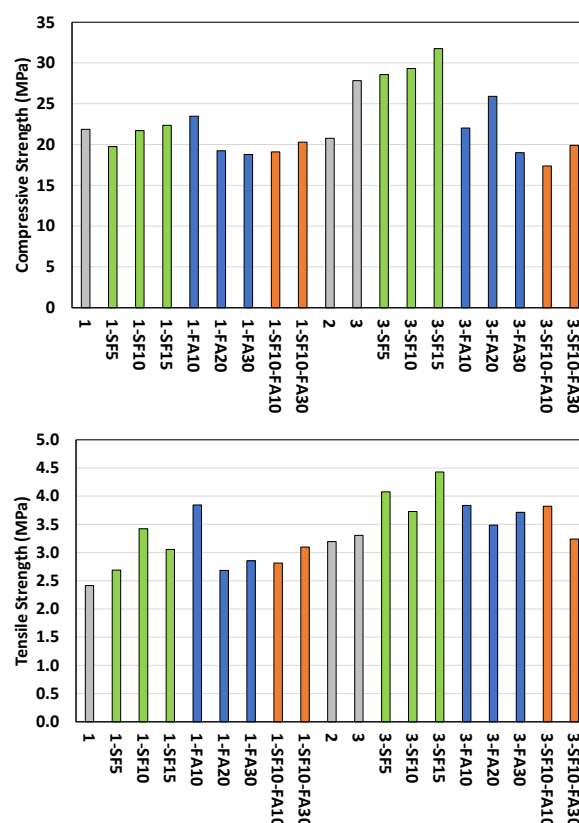


Fig. 4. Compressive and splitting tensile strengths before heat exposure

۳-۱- مشاهدات ظاهری

شکل (۵) به عنوان نمونه، وضعیت آزمون‌های استوانه‌ای طرح 1-SF5 را پس از رژیم‌های حرارتی ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه نشان می‌دهد.

به طور کلی، آزمون‌های قرارگرفته در معرض پیش‌گرمایش به دلیل از دست دادن آب سطحی به رنگ روشن‌تری در مقایسه با آزمون‌های حرارت ندیده دست یافتند. با این وجود، در ظاهر آزمون‌های قرارگرفته در دمای ۲۰۰ درجه در هیچ‌یک از سیکل‌های 200-1، 200-2، و 200-3 تفاوت محسوسی در

شکل ۷. حفظ مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از قرارگیری در سیکل‌های حرارتی با دمای بیشینه ۴۰۰ درجه سلسیوس

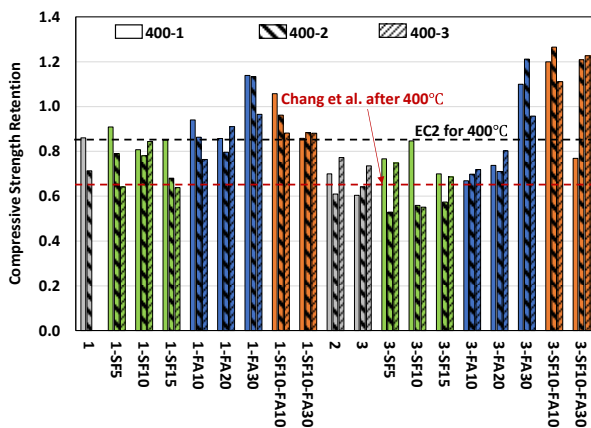


Fig. 7. Compressive strength retention after exposure to 400-degrees heating cycles

در موارد متعدد، مشاهده می‌شود که پیش‌بینی معادلات یوروکد ۲ و معادله چنگ و همکاران برای مقاومت پسماند نمونه‌ها محافظه‌کارانه نیست؛ این مسئله در مورد نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰٫۳۵، محتوای زیاد میکروسیلیس، و همچنین در شرایط قرارگیری در سیکل درازمدت شدیدتر بوده است.

در شکل (۷) مقادیر ضریب حفظ مقاومت فشاری نمونه‌ها بعد از قرارگیری در سیکل‌های با دمای بیشینه ۴۰۰ درجه سلسیوس نمایش داده شده است. کاهش مقاومت فشاری در این حالت در مقایسه با حالت تجربه ۲۰۰ درجه در بیشتر نمونه‌ها بارز است. با این وجود، در برخی موارد از جمله در طرح‌های اختلاط دارای ۳۰ درصد خاکستر بادی، و طرح‌های اختلاط سه-گانه با نسبت آب به سیمان ۰٫۳۵، ضریب حفظ مقاومت همچنان بالاتر از یک است و افزایش دما تا ۴۰۰ درجه منجر به افزایش مقاومت پسماند نمونه‌ها شده است. شکل (۷) همچنین نشان می‌دهد که کاربرد معادله یوروکد در موارد بتن فاقد مواد افزودنی برآوردهای غیرمحافظه‌کارانه‌ای را از مقاومت پسماند نمونه‌ها به دست خواهد داد؛ در حالی که در بیشتر موارد کاربرد معادله چنگ و همکاران منجر به تخمین محافظه‌کارانه‌ای از مقاومت نمونه‌ها می‌شود. با این وجود در حالت کاربرد میکروسیلیس و نسبت آب به سیمان ۰٫۳۵، میزان افت مقاومت بیش از پیش‌بینی‌های معادله چنگ و همکاران است.

مقاومت در زمان قرارگیری در حرارت بالا براساس آیین‌نامه یوروکد ۲ [۱۲] و مقدار به دست آمده بر اساس معادله پیشنهادی توسط چنگ و همکاران [۲۱] برای مقاومت پسماند پس از قرارگیری در معرض دمای بالا ارائه شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمونه‌ها دارای افت مقاومت نسبتاً کمی پس از قرارگیری در دمای ۲۰۰ درجه بوده‌اند. در نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰٫۵، در حالت‌های کاربرد ۱۰ درصد میکروسیلیس، ۳۰ درصد خاکستر بادی، و مخلوط سه‌گانه ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد خاکستر بادی، مقاومت نمونه پس از تجربه دمای ۲۰۰ درجه در مقایسه با شرایط اولیه افزایش یافته است. در نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰٫۳۵، مقاومت نمونه‌ها در صورت کاربرد ۳۰ درصد خاکستر بادی و یا کاربرد مخلوط‌های سه‌گانه در حالت تجربه سیکل حرارتی بیش از حالت اولیه بوده است. در مجموع به نظر می‌رسد کاربرد مواد افزودنی معدنی مقاومت پسماند نمونه‌ها را در مقایسه با حالت عدم کاربرد این مواد افزایش داده است.

شکل ۶. حفظ مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از قرارگیری در سیکل‌های حرارتی با دمای بیشینه ۲۰۰ درجه سلسیوس

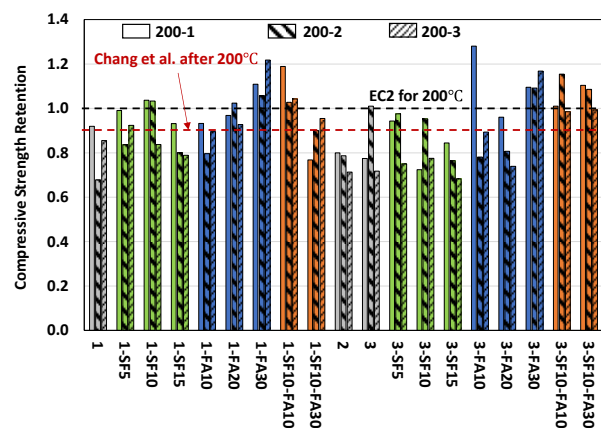


Fig. 6. Compressive strength retention after exposure to 200-degrees heating cycles

شکل ۸. حفظ مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از قرارگیری در سیکل‌های حرارتی با دمای بیشینه ۶۰۰ درجه سلسیوس

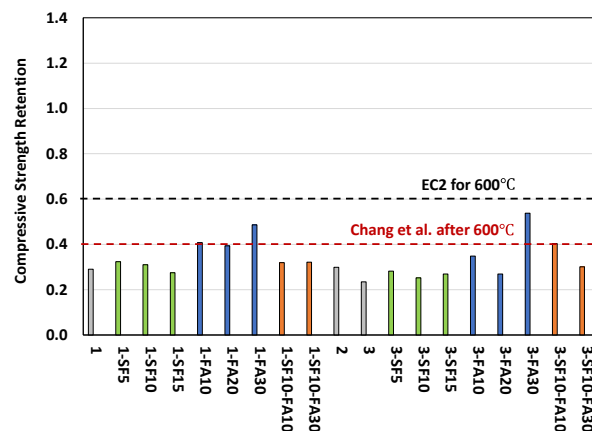


Fig. 8. Compressive strength retention after exposure to 600-degrees heating cycles

شکل ۹. حفظ مقاومت کششی دونیم‌شدن نمونه‌ها پس از قرارگیری در سیکل‌های حرارتی با دمای بیشینه ۲۰۰ درجه سلسیوس

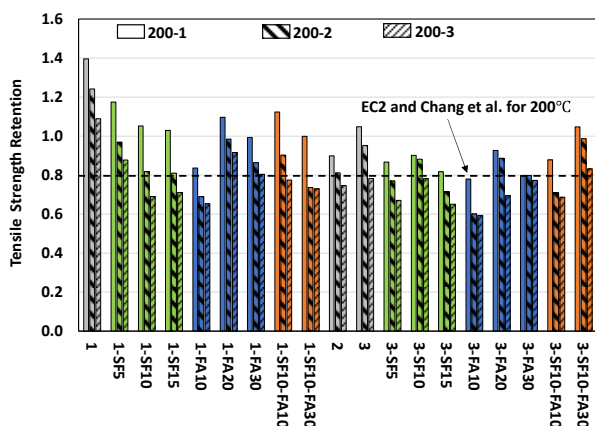


Fig. 9. Splitting tensile strength retention after exposure to 200-degrees heating cycles

شکل نشان می‌دهد که مقدار مقاومت کششی دونیم‌شدن نمونه‌ها در تمامی طرح‌های اختلاط به صورت منظمی با افزایش مدت زمان قرارگیری در معرض حرارت کاهش پیدا می‌کند. البته کاهش مقاومت کششی با افزایش زمان از ۲ به ۱۲ ساعت در بیشتر موارد بسیار بیشتر از حالت افزایش زمان از ۱۲ به ۲۴ ساعت بوده است. البته بخش قابل توجهی از نمونه‌ها، به ویژه نمونه‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰٫۵، در اثر تجربه حرارت ۲۰۰ درجه به مدت ۲ ساعت دچار افزایش مقاومت کششی پسماند شدند.

شکل (۹) همچنین نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های آیین‌نامه یوروکد ۲ و مطالعات چنگ و همکاران، تخمین‌های محافظه‌کارانه‌ای از مقاومت کششی دونیم‌شدن پسماند تمامی طرح‌های اختلاط پس از قرارگیری دو ساعته در معرض دمای ۲۰۰ درجه به دست داده‌اند؛ با این وجود، مدت زمان قرارگیری بیشتر در معرض دمای بالا منجر به کاهش قابل توجه مقاومت کششی دونیم‌شدن پسماند نمونه‌ها به میزانی کمتر از تخمین این مراجع شده است.

شکل (۱۰) مقادیر ضریب حفظ مقاومت کششی دونیم‌شدن نمونه‌ها را بعد از قرارگیری در سیکل‌های مختلف حرارتی با دمای بیشینه ۴۰۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کاهش مقاومت کششی در مقایسه با سیکل‌های ۲۰۰ درجه بسیار واضح است. در بیشتر موارد همچنین مشاهده

شکل (۸) اطلاعاتی مشابه دو شکل قبل را برای حفظ مقاومت فشاری نمونه‌ها بعد از قرارگیری در سیکل دمای بیشینه ۶۰۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. به طور کلی این شکل نشان می‌دهد که دمای ۶۰۰ درجه تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی مقاومت فشاری نمونه‌ها گذاشته و باربری آن‌ها را به شدت خدشه‌دار نموده است؛ البته میزان حفظ مقاومت در این حالت در صورت کاربرد خاکستر بادی (به ویژه به میزان ۳۰ درصد) بهتر از سایر طرح‌های اختلاط بوده است. همچنین مشاهده می‌شود که هر دو معادله یوروکد و چنگ و همکاران تخمین‌های غیرمحافظه-کارانه‌ای از مقاومت پسماند نمونه‌ها به دست می‌دهند.

۳-۳- نگهداری مقاومت کششی دونیم‌شدن

مشابه مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم‌شدن هر طرح اختلاط پس از قرارگیری در معرض حرارت به مقاومت آن پیش از قرارگیری در معرض حرارت تقسیم شدند تا ضریبی با عنوان «ضریب نگهداری مقاومت کششی تعیین شود.

در شکل (۹) ضریب حفظ مقاومت کششی دونیم‌شدن بعد از سیکل‌های حرارتی با دمای بیشینه ۲۰۰ درجه سلسیوس با مقدار مورد انتظار در حرارت بالا براساس آیین‌نامه یوروکد ۲ [۱۲] و مقدار به دست آمده بر اساس معادله پیشنهادی توسط چنگ و همکاران [۲۱] برای مقاومت پسماند مقایسه شده است.

به سیمان ۰,۵ و بدون مواد افزودنی معدنی در مقایسه با سایر نمونه‌ها بهتر بوده است. کمترین مقاومت پسماند کششی نیز در نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰,۳۵ و دارای میکروسیلیس مشاهده شد.

شکل ۱۱. حفظ مقاومت کششی دونیم‌شدن نمونه‌ها پس از قرارگیری در سیکل‌های حرارتی با دمای بیشینه ۶۰۰ درجه سلسیوس

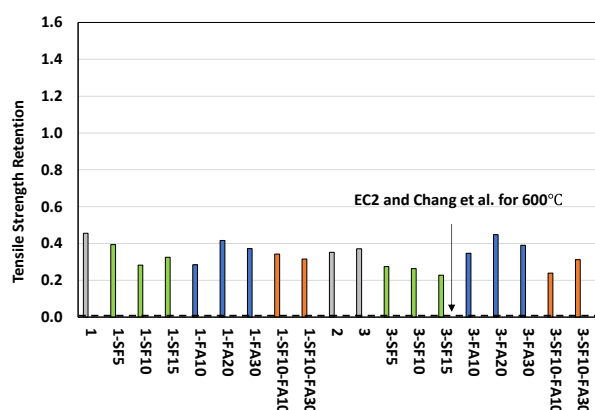


Fig. 11. Splitting tensile strength retention after exposure to 600-degrees heating cycles

الگوی مشاهده شده در تغییرات مقاومت کششی دونیم‌شدن نمونه‌ها به طور کلی نتایج با پراکندگی کمتری را در مقایسه با نتایج مقاومت فشاری به دست داده است. بنابراین به نظر می‌رسد برای بررسی میزان آسیب وارد بر سازه‌ها، کاربرد مقاومت کششی دونیم‌شدن نمونه‌ها و یا مغزه‌های بتنی شاخص قابل اعتمادتری باشد. به ویژه از آنجایی که مقاومت کششی دونیم‌شدن نمونه‌ها می‌تواند به شکل مناسبی برای بررسی مقاومت برشی به کار رود، انجام این نوع آزمایش‌ها برای ارزیابی ساختمان‌های قرارگرفته در معرض آتش‌سوزی به نظر قابل توصیه‌تر می‌رسد.

۳-۴- رابطه بین مقاومت فشاری و کششی پسماند

با توجه به مقادیر مقاومت فشاری و کششی دونیم‌شدن نمونه‌ها در این مطالعه، می‌توان به بررسی اعتبار رابطه تجربی بین این دو متغیر برای شرایط تجربه حرارت بررسی نمود. این مقایسه در شکل (۱۲) ارائه شده است. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد، رابطه بین مقاومت فشاری و کششی دونیم‌شدن نمونه‌ها چندان به طرح اختلاط و تجربه حرارت آن‌ها حساس نیست؛ به طوری که برای همه نقاط به دست آمده در تمامی طرح اختلاط‌ها

می‌شود که افزایش مدت زمان قرارگیری در معرض حرارت به کاهش بیشتر مقاومت کششی منجر شده است.

شکل ۱۰. حفظ مقاومت کششی دونیم‌شدن نمونه‌ها پس از قرارگیری در سیکل‌های حرارتی با دمای بیشینه ۴۰۰ درجه سلسیوس

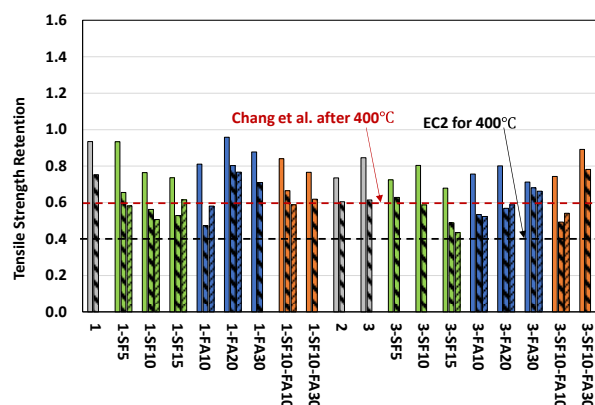


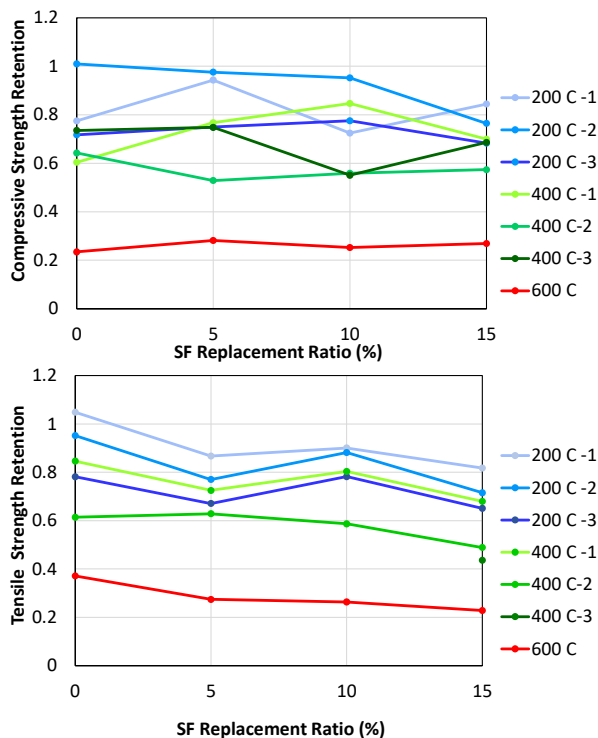
Fig. 10. Splitting tensile strength retention after exposure to 400-degrees heating cycles

شکل ۱۰ همچنین نمایانگر عملکرد محافظه‌کارانه‌ی معادله‌ی یوروکد ۲ در تخمین مقاومت کششی پسماند نمونه‌ها در تمامی حالت‌ها است. معادله پیشنهادی چنگ و همکاران نیز در تمامی حالت‌های قرارگیری در سیکل‌های ۲ ساعته عملکرد محافظه‌کارانه‌ای داشته ولی واقع‌بینانه‌تر از معادله یوروکد عمل نموده است. تنها در حالت کاربرد طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰,۳۵ و ۱۵ درصد میکروسیلیس، این معادله تخمین‌های غیر محافظه‌کارانه‌ای از مقاومت پسماند نمونه‌ها در سیکل‌های ۲۴ ساعته داشته است.

شکل (۱۱) اطلاعاتی مشابه دو شکل قبل را برای حفظ مقاومت کششی نمونه‌ها بعد از قرارگیری در سیکل دمای بیشینه ۶۰۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، هر دو معادله یوروکد و چنگ و همکاران مقاومت کششی نمونه‌ها را برابر با صفر در نظر می‌گیرند؛ در حالی که نمونه‌ها همگی بیش از ۲۰ درصد مقاومت کششی دونیم‌شدن خود در دمای محیط را حتی پس از قرارگیری در این حرارت حفظ نموده‌اند. بنابراین تخمین هر دو روش بسیار محافظه‌کارانه است. در برخی موارد، حتی بیش از ۴۰ درصد مقاومت کششی نمونه‌ها پس از تجربه دمای بالا همچنان حفظ شده بود. میزان حفظ مقاومت کششی در نمونه‌های با نسبت آب

Fig. 12. Relationship between residual compressive and tensile strengths

شکل ۱۳. اثر میکروسیلیس بر حفظ مقاومت فشاری (بالا) و کششی (پایین) نمونه های بتنی با نسبت آب به سیمان ۰,۳۵ پس از تجربه ی حرارت

**Fig. 13.** Effect of silica fume on compressive (top) and tensile (bottom) strength retention for specimens with w/c=0.35

همانطور که در شکل مشاهده می گردد، حفظ مقاومت فشاری پس از دمای ۶۰۰ درجه به طور کلی به کاربرد میکروسیلیس حساس نمی باشد. در سایر رژیم های حرارتی نیز کاربرد میکروسیلیس اثر مثبت یا منفی منظمی بر روی حفظ مقاومت فشاری نمونه ها بعد از تجربه ی حرارت نداشته است؛ به طوری که نوسانات را می توان به تغییرپذیری ذاتی نمونه های بتنی بیشتر مرتبط دانست. از سوی دیگر، تغییرات ضریب حفظ مقاومت کششی نمونه ها با میزان میکروسیلیس نماینگر اثر کلی نامطلوب میکروسیلیس می باشد. برای قرار گرفتن در معرض ۲۰۰ درجه و یا در معرض ۴۰۰ درجه به صورت کوتاه مدت، عملکرد نمونه های دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس از نمونه های دارای ۵ درصد میکروسیلیس به مقداری جزئی بهتر بوده است.

و تمامی رژیم های حرارتی، رابطه مقاومت فشاری و مقاومت کششی الگوی یکسانی دارد.

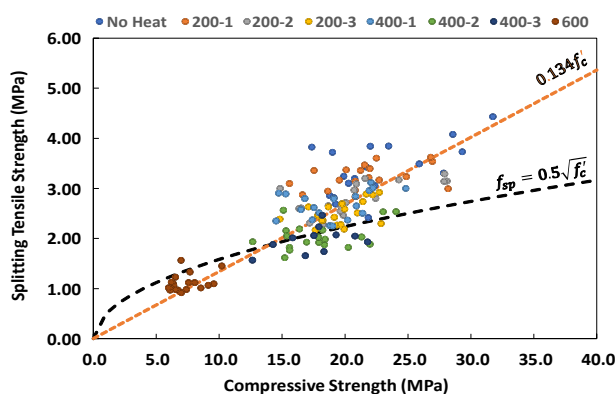
برای تخمین مقاومت کششی دومین شدن از روی مقاومت فشاری، در ادبیات فنی به صورت گسترده ای عبارت $0.5\sqrt{f'_c}$ در واحد مگاپاسکال مورد استفاده قرار می گیرد [۲۲]. شکل (۱۲) نشان می دهد که فارغ از نوع طرح اختلاط و رژیم حرارتی تجربه شده، این معادله می تواند به منظور به دست آوردن یک تخمین نسبتاً محافظه کارانه استفاده شود. با این وجود، مشاهده شد که مقاومت کششی دومین شدن را برای نمونه های آزمایش شده در این پژوهش می توان از یک معادله خطی که دارای ضریب همبستگی بزرگ ۰,۹۷ است تخمین زد. شایان ذکر است که اعتبار این معادله محدود به مشاهدات این مطالعه بوده و کاربرد این معادله برای طرح های اختلاط دیگر اعتباری نخواهد داشت.

۳-۵- بررسی مقایسه ای اثر مواد افزودنی

در این قسمت اثر کاربرد هر یک از مواد افزودنی و رژیم حرارتی تجربه شده روی وضعیت حفظ مقاومت نمونه ها پس از تجربه دمای بالا بررسی می شود تا با تفکیک عوامل موثر و مقایسه نمونه ها با شرایط مشابه در همه پارامترها به جز یکی، اثر آن پارامتر به صورت مجزا مشاهده شده و ارزیابی شود.

شکل (۱۳) اثر میزان میکروسیلیس را روی حفظ مقاومت فشاری نمونه های بتن با نسبت آب به سیمان ۰,۳۵ پس از تجربه دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد در رژیم های حرارتی مختلف نشان می دهد.

شکل ۱۲. رابطه بین مقاومت فشاری و کششی نمونه ها



بنابراین به نظر می‌رسد کاربرد مقادیر نسبتاً بالای خاکستر بادی به حفظ مقاومت فشاری بتن کمک می‌کند. همان‌گونه که در قسمت پایین شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، کاربرد خاکستر بادی در بیشتر موارد اثری نامطلوب روی مقاومت کششی در مقایسه با حالت عدم کاربرد آن داشته است؛ البته عملکرد نمونه‌های دارای ۲۰ درصد خاکستر بادی در مقایسه با نمونه‌های دارای ۱۰ و ۳۰ درصد خاکستر بادی بهتر بوده است. بیشترین میزان کاهش مقاومت کششی نیز در حالت کاربرد ۱۰ درصد خاکستر بادی مشاهده شد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- وضعیت صدمه ظاهری آزمونه‌ها در اثر دما دارای همبستگی قابل توجهی با طرح اختلاط به کار رفته و یا مدت زمان قرارگیری در معرض دما نبوده و بیشتر تابعی از پیشینه دمای تجربه شده بوده است.

۲- قرارگیری در معرض دمای ۲۰۰ درجه منجر به افت نسبتاً کمی در مقاومت نمونه‌ها می‌شود. در صورت کاربرد مواد افزودنی معدنی، مقاومت نمونه پس از تجربه دمای ۲۰۰ درجه در مقایسه با شرایط اولیه حتی تا حدودی افزایش یافته است. قرارگیری در دماهای ۴۰۰ درجه و ۶۰۰ درجه افت محسوس مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها را در پی داشته است.

۳- در موارد متعدد مشاهده شد که پیش‌بینی معادلات یوروکد ۲ و معادله چنگ و همکاران برای مقاومت پسماند فشاری نمونه‌ها محافظه‌کارانه نیست؛ این مسئله در مورد نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰٫۳۵، محتوای زیاد میکروسیلیس، و همچنین در شرایط قرارگیری در سیکل درازمدت شدیدتر بوده است. البته پیش‌بینی‌های این دو مرجع به طور کلی تخمین‌های محافظه‌کارانه‌ای از مقاومت کششی پسماند به دست داده‌اند؛ در مورد دمای ۲۰۰ درجه، زمان قرارگیری طولانی در معرض دمای بالا منجر به کمتر شدن مقاومت کششی پسماند نمونه‌ها از تخمین این مراجع شده است.

نتایج کلی مشابهی برای حفظ مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان ۰٫۵ مشاهده شد؛ البته کاهش ضریب حفظ مقاومت کششی نمونه‌ها با افزایش کاربرد میکروسیلیس در این حالت با نظم بیشتری مشاهده گردید. شکل ۱۴، اثر خاکستر بادی بر حفظ مقاومت فشاری (بالا) و کششی (پایین) نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان ۰٫۳۵ پس از تجربه‌ی حرارت

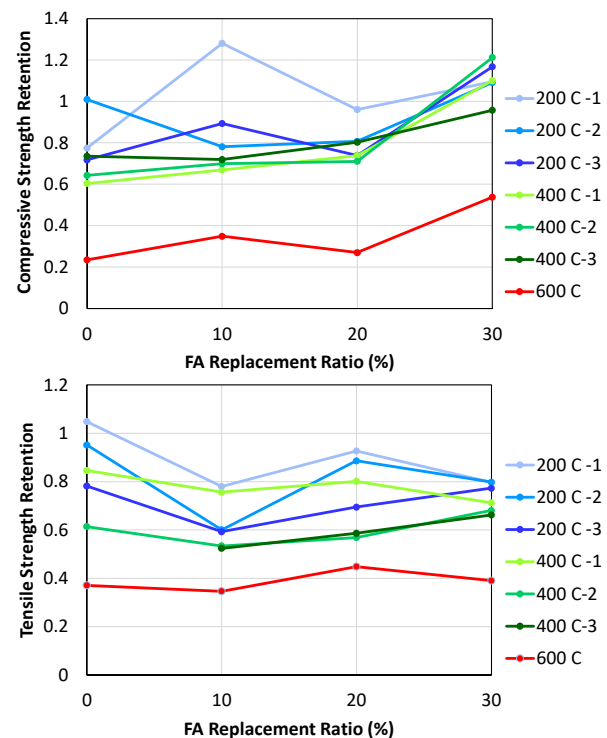


Fig. 14. Effect fly ash on compressive (top) and tensile (bottom) strength retention for specimens with $w/c=0.35$

شکل (۱۴) نشان‌دهنده اثر میزان مصرف خاکستر بادی بر حفظ مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان ۰٫۳۵ در رژیم‌های مختلف حرارتی است. در این شکل مشاهده می‌شود که الگوهای تغییر از نظم کمتری برخوردارند ولی کاربرد خاکستر بادی به میزان ۱۰ یا ۲۰ درصد در مقایسه با حالت عدم کاربرد خاکستر بادی عملکرد بتن را در حفظ مقاومت بدتر می‌نماید. در سایر موارد، کاربرد خاکستر بادی عموماً اثر مثبتی بر حفظ مقاومت فشاری پس از تجربه حرارت داشته است. همچنین در تمامی حالت‌های بررسی شده، بیشترین حفظ مقاومت مشاهده شده در حالت کاربرد خاکستر بادی به میزان ۳۰ درصد بوده است.

- ۴- معادله $0.5\sqrt{f'_c}$ می‌تواند به عنوان یک تخمین محافظه‌کارانه از مقاومت کششی دونیم‌شدن بر اساس مقاومت فشاری (بر حسب واحد مگاپاسکال) بتن حرارت دیده استفاده شود.
- ۵- میکروسیلیس تا ۱۵ درصد وزن سیمان تاثیر مثبت یا منفی قابل توجهی بر حفظ مقاومت فشاری پس از تجربه دمای بالا ندارد؛ ولی منجر به کاهش نسبت مقاومت کششی پسماند نمونه‌ها می‌شود. اثر نامطلوب کاربرد میکروسیلیس بر مقاومت کششی دونیم شدن پسماند با افزایش میزان میکروسیلیس تشدید می‌شود. با افزایش دمای بیشینه تجربه شده، میزان حساسیت نتایج به محتوای میکروسیلیس کاهش پیدا می‌کند.
- ۶- خاکستر بادی تا ۳۰ درصد وزن سیمان به طور کلی اثر مثبتی روی میزان حفظ مقاومت فشاری نمونه‌ها دارد و هرچه مقدار کاربرد این ماده افزودنی بیشتر باشد، نتایج مثبت مشاهده شده مشهودتر است؛ با این وجود، افزایش مقدار خاکستر بادی تاثیر نامطلوبی روی مقاومت پسماند کششی دونیم‌شدن نمونه‌ها داشته و تقریباً تمامی نمونه‌های دارای خاکستر بادی در مقایسه با نمونه‌های فاقد این ماده، عملکرد بدتری از خود نشان دادند. این اثر نامطلوب در مورد نمونه‌های قرار گرفته در معرض دمای ۲۰۰ درجه محسوس‌تر است.
- نتایج گزارش شده در این مقاله از نخستین نتایج آزمایشگاهی در خصوص عملکرد بتن دارای کاربرد خاکستر بادی و خاکستر بادی توام با میکروسیلیس پس از قرارگیری در دمای بالا و همچنین آثار قرارگیری درازمدت بتن در معرض دمای بالا بوده و می‌تواند برای دستیابی به بتن دارای دوام بالاتر در برابر حرارت به صورت کاربردی بسیار مفید واقع شود.
- ### ۵-مراجع
- [1] Buchanan A. and A. Abu. 2017. Structural Design for Fire Safety, West Sussex, U.K.: John Wiley & Sons.
- [2] Neville A. 2012. Properties of Concrete, London: Wiley.
- [3] Hooton, R.D., 1993. Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity. *ACI Materials Journal*, 90(2), pp.143-151.
- [4] Iravani, S., 1996. Mechanical properties of high-performance concrete. *ACI Materials Journal*, 93(5), pp.416-426.
- [5] Hertz, K.D., 1992. Danish investigations on silica fume concretes at elevated temperatures. *ACI Materials Journal*, 89(4), pp.345-347.
- [6] Felicetti, R. and Gambarova, P.G., 1998. Effects of high temperature on the residual compressive strength of high-strength siliceous concretes. *ACI Materials Journal*, 95, pp.395-406.
- [7] Morsy, M.S., Al-Salloum, Y.A., Abbas, H. and Alsayed, S.H., 2012. Behavior of blended cement mortars containing nano-metakaolin at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 35, pp.900-905.
- [8] Siddique, R. and Kaur, D., 2012. Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures. *Journal of Advanced Research*, 3(1), pp.45-51.
- [9] Shah, A.H., Sharma, U.K., Roy, D.A. and Bhargava, P., 2013. Spalling behaviour of nano SiO₂ high strength concrete at elevated temperatures. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 6, p. 01009). EDP Sciences.
- [10] Hussin, M.W., Bhutta, M.A.R., Azreen, M., Ramadhansyah, P.J. and Mirza, J., 2015. Performance of blended ash geopolymers concrete at elevated temperatures. *Materials and Structures*, 48(3), pp.709-720.
- [11] Dabbaghi, F., Dehestani, M., Yousefpour, H., Rasekh, H. and Navaratnam, S., 2021. Residual compressive stress-strain relationship of lightweight aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 298, p.123890.
- [12] British Standard. 2004. Eurocode 2: Design of Concrete Structures- Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design, Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- [13] Matsuzawa, K., Kitsutaka, Y., Abe, M., Kasami, H., Tayama, T. and Nishi, H., 2016. Effects of Exposure Term on the Strength and Elasticity of Concrete Subjected to Elevated Temperature up to 175 C. In *Key Engineering Materials* (Vol. 711, pp. 519-524). Trans Tech Publications Ltd.
- [14] Shill, S.K., Al-Deen, S., Ashraf, M. and Hossain, M.M., 2020. Residual properties of conventional concrete repetitively exposed to high thermal shocks and hydrocarbon fluids. *Construction and Building Materials*, 252, p.119072.

- [20] ASTM International. 2011. ASTM C496: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken, PA: ASTM.
- [21] Chang, Y.F., Chen, Y.H., Sheu, M.S. and Yao, G.C., 2006. Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures. *Cement and concrete research*, 36(10), pp.1999-2005.
- [22] Wight J. 2015. Reinforced Concrete: Mechanics and Design (7th Edition), Hoboken, New Jersey: Pearson.
- [23] 23. Chan, S.Y.N., Peng, G.F. and Anson, M., 1999. Fire behavior of high-performance concrete made with silica fume at various moisture contents. *ACI Materials Journal*, 96(3), pp.405-40
- [15] ASTM International. 2019. ASTM C136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, West Conshohocken, PA: ASTM.
- [16] ASTM International. 2018. ASTM C33: Standard Specification for Concrete Aggregates, Conshohocken, PA: ASTM.
- [17] American Concrete Institute. 2002. ACI 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, Farmington Hills, MI: ACI.
- [18] ASTM International. 2007. ASTM C192: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, West Conshohocken, PA: ASTM.
- [19] ASTM International. 2012. ASTM C39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens , West Conshohocken, PA: ASTM.

Residual Compressive and Tensile Strength of Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials after Exposure to Elevated Temperatures

Mohammad Hossein Mahmoudi¹, Mohammad Reza Davoodi², Hossein Yousefpour^{3*}

1- M.Sc. in Structural Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

2- Associate Professor (Deceased), Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

3- Assistant Professor, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

* hyousefpour@nit.ac.ir

Abstract

A significant number of engineering structures around the world are exposed to fire on a daily basis. The most important effect of fire on the structure is elevated temperatures, which may reach more than 1000 degrees Celsius and cause not only thermal stresses and deformations but also diminished mechanical properties of materials comprising the structure. Fire-related collapses have been observed in numerous structural fires. However, many reinforced concrete structures exposed to fire do not demonstrate notable apparent damage and survive despite having experienced elevated temperatures before the fire is put out. Estimating the residual strength of such structures is of critical importance when deciding whether such structures can be safely used after fire. Moreover, in many industrial applications, there is a need to concrete that can withstand repeated long-term cycles of elevated temperatures without diminished mechanical properties. The objective of this paper is to investigate the effects of silica fume and fly ash as two widely used supplementary cementitious materials on the residual strength of concrete exposed to elevated temperatures and evaluate while such materials can be of benefit in improving the strength retention in case of heat exposure. Using 19 mix designs, a series of 570 concrete cylinders was fabricated using different water to cement ratios (0.35, 0.5, and 0.65), silica fume replacement ratios (0, 10, and 15 percent), and fly ash replacement ratios (0, 10, 20, and 30 percent). The specimens were cured in water for 56 days, after which they were placed in a rate-controlled large-scale electrical furnace, and their residual compressive and tensile strengths were measured before heat, and after heat exposure for 2-, 12-, and 24-hour heating cycles with temperatures reaching 200, 400, and 600 degrees Celsius. To eliminate the risk of explosive spalling, all specimens were preheated at a temperature of 100 degrees for 24 hours before the main heating cycle. Results showed that the compressive and tensile strengths did not reduce noticeably after exposure to 200 degrees but demonstrated a significant drop after exposure to 400- and 600-degree cycles. In many cases, the residual compressive and tensile strengths of specimens were found to be smaller than those predicted in previous studies. The square root equation widely used in the literature was found to provide a reasonable lower-bound estimate of the residual splitting tensile strength of concrete from the residual compressive strength; however, a linear trend was identified to provide a more accurate estimate for the results of this study. Moreover, due to less scatter, the splitting tensile strength was found to be a better indicator of heat damage in the structure than the compressive strength. The use of silica fume did not result in a meaningful trend in the residual compressive strength but reduced the residual tensile strength of specimens. Fly ash, on the other hand, could increase the residual compressive strength of the specimens but reduces the residual tensile strength. The results suggest that generally, and with few exceptions, these two supplementary cementitious materials are not recommendable choices for improving the strength retention of concrete in case of heat exposure.

Keywords: Silica fume, Fly ash, Fire, Elevated temperature, residual strength.