

بررسی آزمایشگاهی ویژگی‌های فیزیکی و رفتار مکانیکی بتن‌های حاوی الیاف و دوده سیلیسی بعد از آتش‌سوزی

امیر ساعدی داریان *

استادیار، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

مهران بختیاری

دانشجوی کارشناسی، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

پویا قاسمی

دانشجوی کارشناسی، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده

در این تحقیق خصوصیات فیزیکی و رفتار مکانیکی بتن‌های حاوی افزودنی‌هایی نظیر الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن و دوده سیلیسی بعد از تجربه حرارت بالا مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته اند. بدین منظور، از ۶ طرح اختلاط مختلف و ۶ تراز مختلف حرارتی استفاده شده است. نحوه حرارتی دهی نمونه‌ها نیز در کوره الکتریکی براساس منحنی با نرخ افزایش $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ حرارت دهی شده اند تا به دمای هدف رسیده و پس از آن بصورت طبیعی فاز خنک شدگی نمونه‌ها به انجام رسیده است. در ادامه و پس از بازگشت دمای نمونه‌ها به دمای اتاق، آزمایش مقاومت فشاری و کششی بر روی تمامی نمونه‌ها انجام شده است و رفتار این نمونه‌ها بعد از تجربه تراز های مختلف حرارتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده افت شدید مقاومت فشاری و کششی در دمای بالای 700°C درجه و قله کن شده آن‌ها بوده و در دمای 900°C درجه می توان عنوان کرد که تمامی نمونه‌ها مقاومت خود را از دست می دهند. همچنین با مقایسه عملکرد افزودنی‌های مختلف، بتن حاوی الیاف فولادی عملکرد موثرتری در دماهای بالا از خود نشان داده است و روند کاهش مقاومت در آن نسبت به سایر افزودنی‌ها بهتر بوده است. در انتها نیز با توجه به گستردگی تعداد آزمایشات بر اساس نتایج حاصله روابط متفاوتی جهت تعیین خواص مکانیکی طرح اختلاط های مختلف در تراز های متفاوت حرارتی ارائه شده است که از دقت مناسبی برخوردار هستند.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات مکانیکی، استاندارد بتن ایران، آتش‌سوزی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی.

۱- مقدمه

دماهای بالا را در سال ۲۰۱۳ ارائه کرده‌اند. نتیجه تحقیقات اوزاوا و موریموتو [۱۲] در سال ۲۰۱۴، نشان از افزایش ۱۲ برابری نفوذپذیری بتن پرمقاومت ۷۲ مگاپاسکالی با ۰٫۱۵ درصد حجمی الیاف پلی پیلن در حرارت ۵۰۰ درجه می‌دهد. در سال ۲۰۱۶ سرانو و همکاران [۱۳]، بتن‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن و الیاف فولادی را تحت آتش‌سوزی طبیعی در دمای حداکثر ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار دادند که نتایج حاکی از عملکرد مناسب این بتن‌ها نسبت به بتن‌های سنتی بوده و با به تأخیر انداختن ورقه ورقه شدن بتن، مقاومت بتن در آتش‌سوزی را بهبود بخشیده‌اند. در سال ۲۰۱۷، درژیمالا و همکاران [۱۴] خصوصیات مکانیکی بتن‌های هوادهی شده و بتن‌های با الیاف پلی پروپیلن با کارایی بالا در دماهای بالا تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفته و مقاومت فشاری، خمشی و مدول الاستیسیته آن‌ها مورد آزمایش قرار گرفت. در تحقیق جالب دیگری در سال ۲۰۱۷، یرماک و همکاران [۱۵] اثرات مقادیر مختلف الیاف‌های فولادی و پلی پروپیلن بصورت همزمان و جداگانه بر روی رفتار بتن‌های پرمقاومت ۷۰ مگاپاسکالی در دماهای بالا مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی پدیده ورقه ورقه شدن بتن و خصوصیات مکانیکی آن از جمله مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق می‌باشد در تحقیق دیگری در سال ۲۰۱۷، علی و همکاران [۱۶] اثرات نوع سنگدانه، سایز سنگ‌دانه و سایز نمونه بتنی در قلوه کن شدن بتن در دمای بالا مورد بررسی قرار گرفت. پاچیده و قلهکی [۱۷] در سال ۲۰۱۸، به ارزیابی بتن‌های حاوی الیاف در دماهای مختلف پرداخته‌اند. اصلانی و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۹ به بررسی عملکرد بتن‌های خود تراکم سنگین و بتن‌های پرمقاومت سنگین در شرایط آتش پرداخته‌اند. در این مقاله، از سنگ‌دانه‌های سنگین مگنتیت با نسبت جایگزینی ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که طرح بتن خودتراکم با درصد جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه مگنتیت دارای بهترین عملکرد به لحاظ مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در دماهای بالا نسبت به سایر طرح‌ها دارد.

در سال ۲۰۲۰ تحقیقات در مورد بررسی تأثیر افزایش دما بر روی بتن‌های حاوی فرفری باز یافتی و مقایسه با الیاف‌های رایج به انجام رسید که نتایج حاکی از آن است که استفاده از مقدار ۰٫۲ درصد فرفر در بتن باعث بهبود مقاومت فشاری و کششی بتن تا

در سالیان اخیر به دلیل ضعف فولاد در دماهای بالا و حوادث آتش‌سوزی گوناگون رخ داده بر ساختمان‌های فولادی، تحقیقات بسیاری بر روی رفتار سازه‌های فولادی و جزئیات آن نظیر اتصالات در آتش‌سوزی انجام شده است [۱-۴]. اگرچه دمای بالا بر روی عملکرد بتن نیز تأثیر بسزایی گذاشته و موجب کاهش مقاومت و در ادامه با قلوه کن شدن بتن نیز می‌شود ولیکن تحقیقات کاربردی اندکی بر روی سازه‌های بتنی انجام شده است. هرگز [۱۱] در سال ۱۹۸۴ به بررسی بتن‌های چگال و در سال ۱۹۹۱ به بررسی بتن‌های سیلیکا فوم در آتش پرداخته است [۱۲]. در سال ۱۹۹۰ نیز کاستیلو و همکاران [۵] اثر گذرای آتش بر روی مقاومت بتن‌های پرمقاومت را مورد ارزیابی قرار دادند. در سال ۱۹۹۶ فلیسیتی و همکاران [۶] خواص مکانیکی بتن‌های با مقاومت بالا در دماهای بالا را مورد بررسی قرار داده‌اند. در سال ۲۰۰۲، فان و کارینو [۷] به بررسی اثر دمای بالا بر روی خواص مکانیکی و قابلیت ایجاد ورقه ورقه شدن بتن با مقاومت بالا پرداختند. در این آزمایش خواص مکانیکی نمونه‌های بتنی استوانه‌ای با مقاومت بالا با افزایش حرارت تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شده است.

در سال ۲۰۰۶ نیز مقاومت فشاری و خمشی بتن‌های پرمقاومت و معمولی تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج نشان داد که افت مقاومت بتن‌های معمولی بسیار بیشتر از بتن‌های پرمقاومت در دماهای بالا می‌باشد [۸]. در طی تحقیق دیگر در سال ۲۰۰۸، بهنود و همکاران [۹] اثرات اضافه کردن سیلیکا فوم و نسبت آب به سیمان در بتن‌های پرمقاومت در دماهای بالا و تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفته که نتایج نشان از درصد بهینه ۶ برای سیلیکا فوم و نسبت بهینه ۰٫۳۵ برای نسبت آب به سیمان می‌بایست در این شرایط در نظر گرفته شود. طی تحقیق در سال ۲۰۱۱، بسطامی و همکاران [۱۰] عملکرد بتن‌های با مقاومت بین ۶۵ الی ۹۳ پاسکال را تحت دمای ۲۰ الی ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار داده و مقادیر افت مقاومت فشاری و جرم بتن و همچنین پوسته شدن بتن مورد بررسی قرار گرفته و اثرات پارامترهایی نظیر نسبت آب به سیمان، نسبت شن، نسبت سیلیکا فوم و ... نیز بررسی شد.

کاورزان و همکاران [۱۱] اهمیت حساسیت پوسته شدن بتن‌های پرمقاومت بین ۹۰ تا ۱۱۰ مگاپاسکال شامل الیاف فولادی در

انتخاب شده و در ۶ دمای هدف ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین باتوجه به تعدد تست‌های صورت گرفته، روابط ریاضی مشخصی بر پایه مبانی آمار و احتمال با میزان دقت قابل قبول جهت ارائه مقاومت فشاری و کششی این بتن‌ها در دماهای مختلف ارائه می‌شود.

۲- برنامه آزمایش

در این تحقیق شش طرح اختلاط مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این بتن‌ها از لحاظ خصوصیات مکانیکی و مشخصات شیمیایی و همچنین پروسه ساخت و قالب بندی دقیقاً بر اساس روش ملی طرح مخلوط ایران [۲۰] ساخته شده‌اند.

نکته حائز اهمیت در انتخاب طرح اختلاط‌ها، این است که این طرح‌ها با بررسی ساخت و سازهای انجام شده و همچنین تحقیقات گوناگون و مقالات مختلف صورت گرفته در این زمینه، انتخاب شده‌اند و در نتیجه هم از نظر علمی و تحقیقات انجام شده در دنیا و هم از جنبه تجربه مهندسان در ساخت و ساز بسیار پر کاربرد و کارآمد می‌باشد مشخصات این طرح اختلاط‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. شایان ذکر است که در این طرح‌ها از سیمان پرتلند تیپ دو تهیه شده از کارخانه سیمان تهران استفاده شده است و مصالح سنگی (شن و ماسه) از معادن شهریار در جنوب غرب تهران، الیاف فولادی از شرکت صنایع مفتولی زنجان و دوده سیلیسی از کارخانه صنایع فروآلیاژ ایران تهیه شده است.

حدود ۳ برابر نمونه شاهد شده، اما هرچه میزان استفاده از آن در بتن افزایش یابد از مقاومت آن نیز کاسته می‌شود [۱۹].

همانطور که در تحقیقات قبل اشاره شده، اثرات آتش بر بتن در دو حوزه قابل بررسی است. حوزه اول اثرات ذاتی همچون کاهش مدول الاستیسیته، مقاومت و همچنین تغییرات سایر خصوصیات مادی بتن اعم از ضریب انبساط حرارتی، گرمای ویژه، هدایت گرمایی و ... می‌باشد. حوزه دوم نیز اثرات ظاهری می‌باشند که در سه دسته خردشدن مصالح سنگی و از هم پاشیدگی دانه‌ها، شکست توام با انفجار و ورقه ورقه شدن قابل دسته‌بندی هستند.

همانطور که مشاهده می‌شود در اغلب تحقیقات انجام شده، بتن‌های خاص و با کاربرد ویژه در حوزه آتش مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل نیز فقط در شرایط خاصی قابل استفاده می‌باشند و قابلیت بسط دادن به ساخت و سازهای معمول را ندارند. بنابراین بررسی رفتار بتن‌هایی با طرح اختلاط‌ها و افزودنی‌های مختلف و مطابق با بتن مصرفی معمول در ساخت و سازهای فعلی با در نظر گرفتن مواد افزودنی که امروزه در تحقیقات مورد استفاده قرار می‌گیرد، در هر دو حوزه اثرات ذاتی و ظاهری آتش، لازم و ضروری می‌باشد برای رفع این محدودیت‌ها، در تحقیق حاضر مطالعه آزمایشگاهی کاملی بر روی عملکرد بتن در آتش سوزی انجام گرفته است. ۶ طرح اختلاط که ترکیبی از طرح اختلاط‌های پرکاربرد و معمول در ساخت و ساز براساس استاندارد بتن ایران و همچنین مصالح و افزودنی‌های بهبود دهنده رفتار بتن می‌باشند،

جدول ۱- طرح اختلاط‌های انتخاب شده برای این تحقیق

طرح حاوی ۱۵٪	طرح حاوی ۲٪	طرح حاوی ۱٪	طرح حاوی ۰٫۱۵٪	طرح حاوی ۰٫۳٪	طرح حاوی ۰٫۱۵٪	طرح حاوی ۰٫۳٪
مصالح مورد استفاده	وزنی دوده	وزنی دوده	سیلیسی	سیلیسی	جایگزین سیمان	جایگزین سیمان
سیمان	۲۹۷٫۵	۳۲۳٫۷۵	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰
آب	۱۸۲	۱۸۲	۱۸۲	۱۸۲	۱۸۲	۱۸۲
شن بادامی	۴۷۶	۴۷۸	۴۷۴	۴۶۷	۴۸۱	۴۸۱
شن نخودی	۳۰۳	۳۰۴	۳۰۲	۲۹۷	۳۰۶	۳۰۶
ماسه	۹۵۲	۹۵۷	۹۴۸	۹۳۴	۹۶۱	۹۶۱
الیاف pp	-	-	-	-	۱٫۳۶۵	۲٫۷۳
الیاف فولادی	-	-	۷۸	۱۵۶	-	-
دوده سیلیسی	۵۲٫۵	۲۶٫۲۵	-	-	-	-

مقادیر فوق برای ۱ متر مکعب بتن در نظر گرفته شده است

۳- روش آزمایش

در آزمایش مقاومت فشاری، مطابق با استاندارد ۳۲۰۶ ایران [۲۱]، از نمونه های مکعبی (۱۰ × ۱۰ سانتی متر مربع) استفاده شده و سرعت بار وارد بر نمونه در محدوده ۰/۲ الی ۰/۴ مگاپاسکال بر ثانیه می باشد که نمونه این آزمایش در شکل ۳ ارائه شده است. در آزمایش مقاومت کششی نیز مطابق با استاندارد ۶۰۴۷ ایران [۲۲]، از نمونه های استوانه ای (۱۰ × ۲۰ سانتی متر مربع) استفاده شده و سرعت بار وارده ۷۰۰ تا ۱۴۰۰ کیلوپاسکال بر دقیقه می باشد که در شکل ۴ نمونه ای از این آزمایش ارائه شده است. همچنین مقاومت کششی دو نیم شدن نمونه مطابق رابطه ۱ محاسبه می شود:

$$T = \frac{2F}{\pi Ld} \quad (1)$$

که در آن T مقاومت کششی دو نیم شدن، F حداکثر بار اعمال شده، L طول نمونه و d قطر نمونه می باشد.

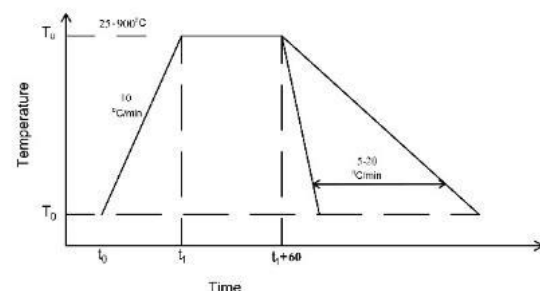
از یک کوره الکتریکی، با تنظیم دستی قدرت برای حرارت دهی نمونه ها استفاده شد. در شکل ۱ تصویری از کوره نشان داده شده است. دو ترموکوپل نوع K روی نمونه و کوره، دمای نمونه و کوره را ثبت می کردند. همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، نمونه ها از دمای محیط به دماهای هدف با سرعت ۱۰ درجه در دقیقه حرارت داده شدند.



شکل ۱- کوره الکتریکی



شکل ۳- نمونه آزمایش مقاومت فشاری انجام شده



شکل ۲- پروسه حرارت دهی و خنک شدن نمونه های آزمایشگاهی



شکل ۴- نمونه آزمایش مقاومت کششی (شکافت برزلی) انجام شده

شش دمای هدف (Tu) ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه انتخاب شد. پس از رسیدن به دمای هدف، دما به مدت ۶۰ دقیقه ثابت نگه داشته شده است تا شرایط پایداری حرارت در نمونه ها ایجاد شده و از توزیع یکنواخت دما در نمونه های بتن اطمینان حاصل شود. سپس کوره خاموش شده است و فاز خنک شدگی نمونه ها شروع شده است. دمای نمونه های بتن، به طور طبیعی و با نرخ حدود ۵ تا ۲۰ درجه بر دقیقه کاهش پیدا کرده تا به دمای اتاق برسد. پس از اتمام این مرحله، آزمون های مقاومت کششی و فشاری روی نمونه بتن ها در دمای محیط انجام شده است. سه آزمون تکراری برای هر نمونه بتن تحت شرایط یکسان برای اطمینان از تکرار پذیری نتایج انجام شده است.

۴- نتایج آزمایش

بر اساس اطلاعات حاصل از آزمایشات، مقاومت فشاری و کششی نمونه ها در طرح اختلاط های مختلف پس از تجربه شرایط حرارت بالا به دست آمده اند.

۴-۱- مقاومت فشاری نمونه‌ها

دما	نمونه قبل از حرارت	نمونه بعد از حرارت	نمونه بعد از شکست فشاری
۵۰۰			
۷۰۰			-
۹۰۰			
طرح حاوی دوده سیلیسی جایگزین سیمان			
۵۰۰			
۷۰۰			
۹۰۰			
طرح حاوی حجمی الیاف فولادی			
۵۰۰			
۷۰۰			
۹۰۰			
طرح حاوی حجمی الیاف پلی پروپیلن			

شکل ۵- شکل نمونه‌ها قبل و بعد از قرار گیری در درجه حرارت‌های مختلف

نمونه‌ها قبل و بعد از حرارت ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه و بعد از شکست فشاری در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج مقاومت فشاری ارائه شده برای هر نمونه در حقیقت میانگین نتایج سه نمونه از همان طرح اختلاط و در همان رده حرارتی می باشد.

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود، با افزایش دما مقاومت فشاری کاهش یافته و در دماهای ۷۰۰ به بالا با توجه به قله کن شدن نمونه‌ها، این افت مقاومت بشدت افزایش می یابد. این افت مقاومت تا جایی ادامه می یابد که در در دمای ۹۰۰ درجه تمامی مقاومت فشاری خود را از دست داده و بتن بطور کامل از هم گسیخته می شود. در نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی، با افزایش درصد دوده سیلیسی عملکرد بتن در برابر حرارت ضعیف تر می گردد که این در دمای ۷۰۰ درجه منجر به اختلاف ۲۰ درصدی مقاومت فشاری بتن می گردد.

در نمونه‌های با الیاف فولادی با افزایش درصد الیاف تغییر چندانی در مقاومت فشاری بتن حاصل نشده است اما در نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن با افزایش درصد این الیاف مقاومت بتن در دماهای ۵۰۰ درجه بهبود مناسبی یافته است.

همچنین در شکل ۷ نیز نحوه کاهش مقاومت فشاری هر طرح اختلاط در دماهای مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است. در این بین با بررسی رفتار طرح اختلاط‌ها، طرح اختلاط حاوی ۷٫۵ درصد دوده سیلیسی و طرح حاوی ۲ درصد الیاف فولادی کاهش مقاومت کمتری نسبت به سایر طرح‌ها داشته و طرح حاوی ۰٫۱۵ درصد الیاف پلی پروپیلن نیز بیشترین افت مقاومت را داشته است. همچنین طرح حاوی ۲ درصد الیاف فولادی و طرح حاوی ۰٫۱۵ درصد الیاف پلی پروپیلن به ترتیب بیشترین و کمترین مقاومت فشاری در حین افزایش دما را از خود بجای گذاشته اند.

لازم به ذکر است در شکل‌های فوق‌الذکر، حرف S نماد دوده سیلیسی، حرف M نماد الیاف فولادی، حرف P نماد الیاف پلی پروپیلن و اندیس C نشان دهنده مقاومت فشاری می باشد. در شکل ۸ نیز، تغییرات و کاهش جرم نمونه‌های مکعبی در دماهای مختلف نشان داده شده است. تبخیر آب بتن تا دمای ۵۰۰ درجه و لب پریدگی نمونه‌ها و قله کن شدن آنها در دمای بالاتر از ۵۰۰ درجه از جمله عوامل تاثیرگذار در این کاهش جرم می باشد به نحوی که در دمای ۹۰۰ درجه به ۲۰ الی ۳۰ درصد کاهش می‌رسد.

دما	نمونه قبل از حرارت	نمونه بعد از حرارت	نمونه بعد از شکست فشاری
۵۰۰			
۷۰۰			
۹۰۰			

طرح حاوی دوده سیلیسی جایگزین سیمان

دما	نمونه قبل از حرارت	نمونه بعد از حرارت	نمونه بعد از شکست فشاری
۵۰۰			
۷۰۰			
۹۰۰			

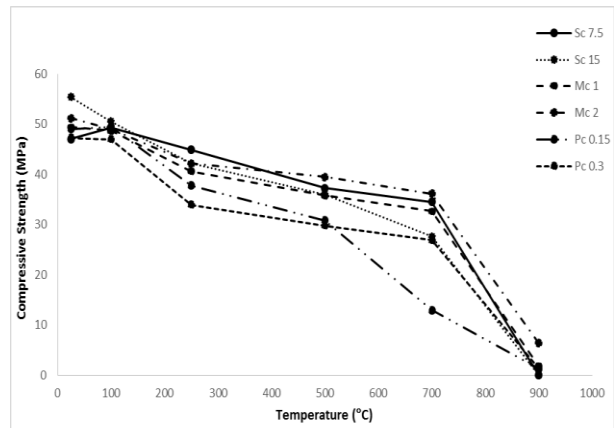
طرح حاوی حجمی الیاف فولادی

دما	نمونه قبل از حرارت	نمونه بعد از حرارت	نمونه بعد از شکست فشاری
۵۰۰			
۷۰۰			
۹۰۰			

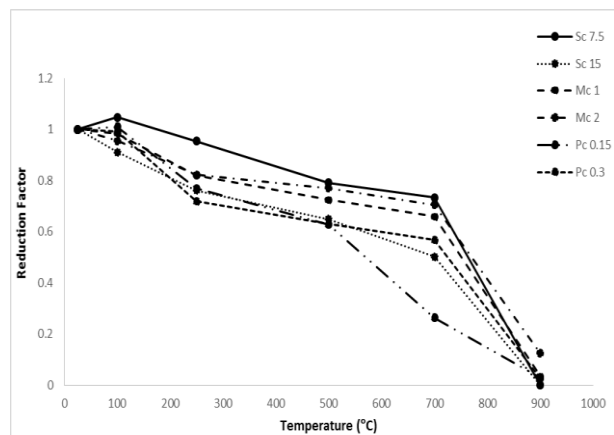
طرح حاوی حجمی الیاف پلی پروپیلن

شکل ۹- شکل نمونه ها قبل و بعد از قرار گیری در درجه

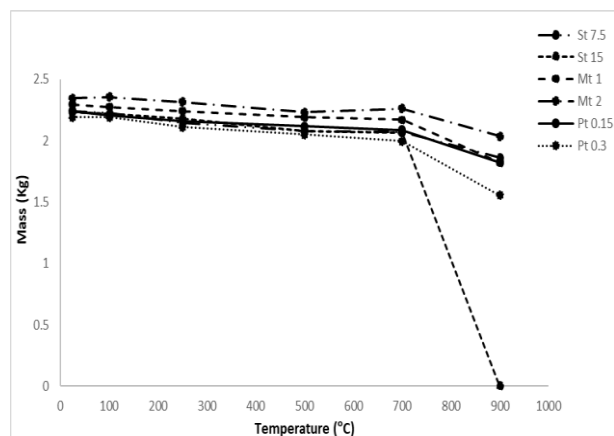
حرارت های مختلف



شکل ۶- مقایسه مقاومت فشاری طرح اختلاط ها تحت دماهای مختلف



شکل ۷- نحوه کاهش مقاومت فشاری طرح اختلاط ها تحت دماهای مختلف



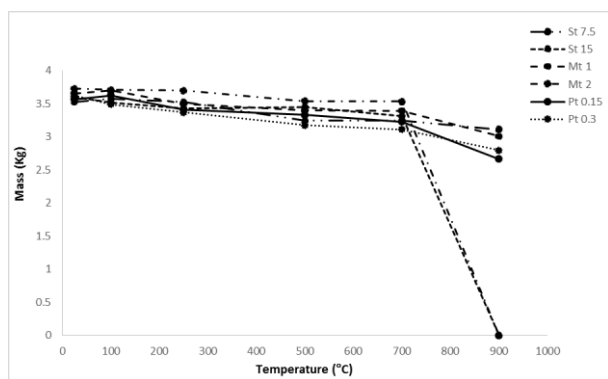
شکل ۸- نحوه تغییرات جرم نمونه های مکعبی در طرح های مختلف

۴-۲- مقاومت کششی نمونه ها

نمونه ها قبل و بعد حرارت و بعد از شکست کششی در شکل ۹ نشان داده شده است.

لازم به ذکر است در شکل‌های فوق، حرف S نماد دوده سیلیسی، حرف M نماد الیاف فولادی، حرف P نماد الیاف پلی پروپیلن و اندیس t نشان دهنده مقاومت کششی می باشد.

همانطور که در شکل ۱۲ نیز مشاهده می شود، روند کاهش جرم نمونه‌های استوانه‌ای با افزایش دما نیز همانند نمونه‌های مکعبی بوده و دلایل رویداد آن نیز همچون نمونه‌های مکعبی می باشد.



شکل ۱۲: نحوه تغییرات جرم نمونه‌های استوانه‌ای طرح‌های مختلف

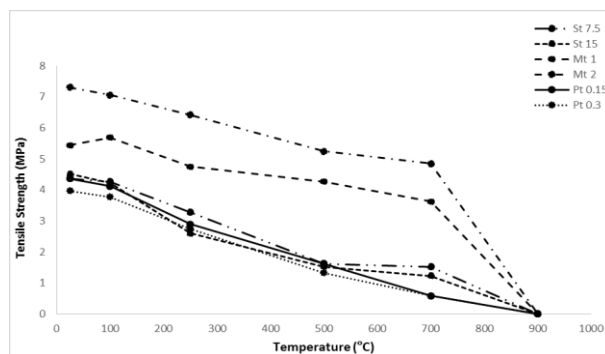
با بررسی مقاومت فشاری و کششی طرح اختلاط‌های مختلف، طرح اختلاط حاوی ۲ درصد الیاف فولادی در مجموع عملکرد بسیار بهتری در دماهای بالا از خود نشان می‌دهد که از جمله ضعف‌های این طرح وزن سنگین تر نسبت به باقی طرح‌ها می باشد.

۴-۳- اثرات ظاهری بتن

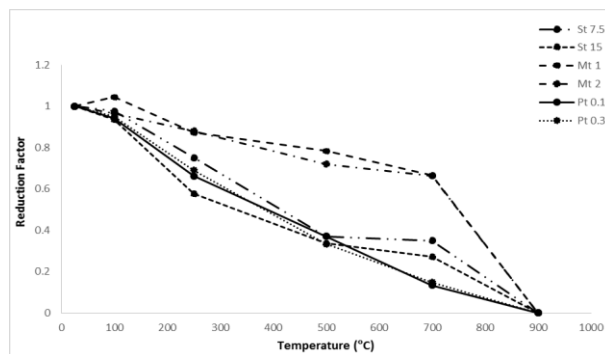
در خصوص بررسی عملکرد بتن در شرایط آتش سوزی و تحلیل وضعیت بتن به کار رفته در سازه یکی از موارد راه گشا و کاربردی توانایی قضاوت بر اساس وضعیت ظاهری نمونه‌ها می باشد. این توانایی بالاخص در شرایطی که نیاز به قضاوت مهندسی سریع تا پیش از دستیابی به نتایج آزمایشگاهی لازم است بسیار مفید فایده می باشد. بر این اساس بر مبنای نتایج آزمایشات صورت گرفته در این تحقیق وضعیت اعری نمونه‌ها و روند تغییرات آنها گزارش شده است. شروع ترک خوردگی‌ها در تمامی طرح‌ها و در هر دو نمونه استوانه‌ای و مکعبی از دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد آغاز شده است. و نمونه‌ها در ترازهای حرارتی قبلی اثری از ترک خوردگی از خود نشان نداده‌اند. این ترک خوردگی‌ها بعد از تراز ۵۰۰ درجه همزمان با افزایش دما گسترش یافته و نهایتاً در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد به نهایت خود رسیده‌اند تا جاییکه پایداری

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با افزایش دما مقاومت کششی کاهش یافته و در دماهای ۵۰۰ به بالا، این افت مقاومت افزایش یافته و در دماهای بالای ۷۰۰ درجه به حداکثر افت خود می‌رسند. این افت مقاومت تا جایی ادامه می‌یابد که در در دمای ۹۰۰ درجه تمامی مقاومت کششی خود را از دست داده و بتن بطور کامل از هم گسیخته می‌شود. همچنین در شکل ۱۱ نحوه کاهش مقاومت کششی هر طرح اختلاط در دماهای مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است.

در این بین با بررسی رفتار بتن در طرح اختلاط‌های مختلف، طرح‌های حاوی الیاف فولادی بدلیل عملکرد مناسب الیاف فولادی در کشش، کاهش مقاومت کمتری نسبت به سایر طرح‌ها داشته و هر طرح حاوی الیاف پلی پروپیلن و دوده سیلیسی نیز افت مقاومت زیادی داشته‌اند. این عملکرد در مورد بیشترین و کمترین مقاومت کششی در دمای بالا نیز سازگار بوده و طرح‌های حاوی الیاف فولادی عملکرد مناسب‌تری از خود نشان داده‌اند. در مورد مقایسه کارایی درصد افزودنی‌های بتن با یکدیگر نیز در الیاف فولادی برخلاف مقاومت فشاری، با افزایش درصد الیاف مقاومت کششی در دماهای بالا بهبود پیدا کرده است اما در مورد الیاف پلی پروپیلن و دوده سیلیسی تفاوت مشهودی مشاهده نشده است.



شکل ۱۰- مقایسه مقاومت کششی طرح اختلاط‌ها در دماهای مختلف



شکل ۱۱- نحوه کاهش مقاومت کششی طرح اختلاط‌ها در دماهای مختلف

ظاهری نمونه را نیز بر هم زده اند. مساله دیگر بحث پوسته شدن بتن می باشد. این مساله از تراز ۷۰۰ درجه شروع شده و همراه با صدا و پرتاب قطعات کوچک سنگدانه می باشد. متناسب با بالاتر بودن مقاومت نمونه بتنی (بسته به طرح اختلاط اولیه) این صدا بیشتر و قطعات پرت شده سریع تر و شدیدتر می باشند.

استفاده از نتایج به صورت خام برای محققین دیگر میسر نیست لذا در این تحقیق با انجام بهترین رگرسیون ممکنه نتایج حاصله در قالب تغییرات مقاومت فشاری و کششی به صورت تابعی از دمای هدف در جدول ۲ ارائه شده است.

تغییرات مقاومت فشاری ($f_{c,pf}$) و مقاومت کششی ($f_{T,pf}$) پس از قرار گرفتن در معرض دماهای بالا را می توان از طریق ضرایب R_c و R_t نشان داد.

$$R_c = \frac{f_{c,pf}}{f_c} \quad (۲)$$

$$R_t = \frac{f_{T,pf}}{f_t} \quad (۳)$$

۵- روابط خواص مکانیکی پس - آتش

استفاده از نتایج آزمایش های صورت گرفته بر روی نمونه های بتن جهت ارزیابی عملکرد سازه های بتنی بسیار حائز اهمیت می باشد. بررسی خواص مکانیکی نمونه ها نشان دهنده ی تفاوت بسیار زیاد رفتار پس از آتش آن ها نسبت به دمای طبیعی می باشد. از انجاییکه

جدول ۲- روابط خواص مکانیکی پس از آتش برای طرح اختلاط های مختلف بتن

دمای هدف (C)	رابطه	طرح اختلاط	خصوصیات مکانیکی
$25 \leq T_u < 900$	$R_t = (4 \times 10^{-7})T_u^2 - (15 \times 10^{-4})T_u + 1.0497$	Pt	مقاومت کششی
	$R_t = (-2 \times 10^{-6})T_u^2 - (5 \times 10^{-4})T_u + 0.949$	Mt	
	$R_t = (6 \times 10^{-7})T_u^2 - (17 \times 10^{-4})T_u + 1.0739$	St	
$25 \leq T_u < 700$ $700 \leq T_u$	$R_c = (10^{-7})T_u^2 - (7 \times 10^{-4})T_u + 1.0281$ $R_c = -(31 \times 10^{-4})T_u + 2.7788$	Pc	مقاومت فشاری
$25 \leq T_u < 700$ $700 \leq T_u$	$R_c = (5 \times 10^{-7})T_u^2 - (9 \times 10^{-5})T_u + 1.0289$ $R_c = -(3 \times 10^{-3})T_u + 2.7953$	Mc	
$25 \leq T_u < 700$ $700 \leq T_u$	$R_c = (2 \times 10^{-7})T_u^2 - (10^{-3})T_u + 1.0441$ $R_c = -(19 \times 10^{-4})T_u + 1.7758$	Sc	

خطای نسبی مناسبی می باشند. این میزان دقت شرایط استفاده ایمن از نتایج را در تحقیقات بعدی فراهم می نماید. مطابق با فرضیات آمار و احتمال، برای ایجاد روابط کاربردی بین داده ها، مواردی مختلفی نظیر تعداد داده، نحوه انجام رگرسیون، میزان ضریب همبستگی، خطاهای آماری و غیره می بایست در نظر گرفته شود.

اگر چه تحقیقات در حوزه رفتار پس از آتش سازه های بتنی به دلیل تازگی بسیار اندک هستند ولیکن با این وجود در این تحقیق سعی شده پرکاربردترین طرح های اختلاط مورد توجه قرار گیرند و هم تعداد مناسب نمونه ها بررسی شوند تا نتایج ضمن افزایش دقت نتایج گستردگی قابل قبول برای استفاده توسط طراحان و محققین این حوزه را داشته باشند. روابط فوق دارای میانگین

های با الیاف فولادی بمقدار کمتری دچار قله کن شدن و پدیده (Spalling) شده‌اند.

- روند شروع ترک خوردگی در تمامی طرح‌ها از دمای ۵۰۰ درجه شروع شده است و در دماهای زیر ۵۰۰ درجه، نمونه‌ها بدون ایجاد ترک خوردگی مشهودی مشاهده شدند.

- با استفاده از نتایج بدست آمده از تست فشار و کشش، روابطی در جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری و کششی بتن حاوی افزودنی‌های الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن و دوده سیلیسی جایگزین سیمان بصورت جداگانه ارائه شده است که دارای خطای کم و دقت مناسبی می‌باشد.

- در تحقیقات آینده نویسندگان از الگوریتم‌های فراابتکاری و روش‌های عددی بمنظور بهبود و ارتقای روابط ارائه شده و همچنین گسترش نتایج بدست آمده در این تحقیق استفاده خواهند کرد.

۷- منابع

- [1] A. Saedi Daryan, H. Bahrampoor, Behavior of Khorjini connections in fire, Fire safety journal, 44(4) (2009) 659-664.
- [2] A. Saedi Daryan, M. Yahyai, Behaviour of welded top-seat angle connections exposed to fire, Fire safety journal, 44(4) (2009) 603-611.
- [3] A. Saedi Daryan, M. Yahyai, Behavior of bolted top-seat angle connections in fire, Journal of Constructional Steel Research, 65(3) (2009) 531-541.
- [4] K. Hertz, Heat-induced explosion of dense concretes, Institute of Building Design. Technical University of Denmark. Report, (166) (1984).
- [5] C. Castillo, Effect of transient high temperature on high-strength concrete, Doctoral dissertation, Rice University, 1987.
- [6] R. Felicetti, P.G. Gambarova, G. Rosati, F. Corsi, G. Giannuzzi, Residual mechanical properties of high-strength concretes subjected to high-temperature cycles, in: 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, 1996.
- [7] L.T. Phan, N.J. Carino, Effects of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures, ACI Materials Journal, 99(1) (2002) 54-66.
- [8] M. Husem, The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete, Fire Safety Journal, 41(2) (2006) 155-163.

در این مقاله نیز تلاش شده است تا حد ممکن روابط ارائه شده شرایط ذکر شده را داشته باشند که برخی از آنها به شرح ذیل است:

- ۱- برای مدلسازی از تعداد قابل قبولی داده استفاده شده است.
- ۲- با توجه به نوع افزودنی و نوع آزمایش، دسته‌بندی مناسبی برای روابط در نظر گرفته شده است.
- ۳- در رگرسیون انجام گرفته، داده‌ها به ۲ دسته Learning و Validation تقسیم شده‌اند که دسته اول برای مدلسازی و دسته دوم برای صحت‌سنجی روابط مورد استفاده قرار گرفته‌اند.
- ۴- ضریب همبستگی تمامی روابط ارائه شده نیز بالاتر از ۰٫۸ می‌باشد که محدوده‌ای مورد قبول در آمار و احتمال می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ۶ طرح اختلاط مختلف که براساس استاندارد بتن ایران (آبا)، مطابق با آخرین تحقیقات انجام شده و از جمله پرکاربردترین موارد در ساخت و ساز می‌باشد، بررسی شده‌اند. در این طرح‌ها از ۳ نوع افزودنی الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن و دوده سیلیسی جایگزین سیمان استفاده شده است و در ۶ دمای هدف ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و با ۳ آزمون تکرار مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن به شرح ذیل می‌باشد:

- تست مقاومت فشاری و مقاومت کششی برای تمامی نمونه‌ها به انجام رسید و نحوه کاهش مقاومت بتن با افزودنی‌های مختلف در دماهای متفاوت حاصل گردید.

- کاهش مقاومت که با گسترش ترک خوردگی و قله‌کن شدن نمونه‌ها نیز همراه بوده است، از دمای ۷۰۰ درجه به بالا تشدید شده به نحوی که در دمای ۹۰۰ درجه بتن به انهدام کامل رسیده است و مقاومت فشاری و کششی اغلب نمونه پس از دمای ۹۰۰ بطور کامل از دست رفته است.

- با مقایسه طرح‌های مختلف، طرح بتنی شامل الیاف فولادی با میانگین بازیابی مقاومت فشاری و کششی به ترتیب ۷۰ درصد و ۶۵ درصد در دمای ۷۰۰ درجه بهترین عملکرد را نشان داده است.

- در مقایسه جرم حجمی طرح‌های مختلف نیز طرح‌های دارای الیاف فولادی دارای بیشترین جرم حجمی در دمای ۹۰۰ درجه نسبت به سایر طرح‌ها می‌باشند. این نتیجه نشان می‌دهد که نمونه

- [20] Iranian concrete code of practice, ABA, in, Management and Planning Organization of I.R. Iran, In Persian, 2001.
- [21] ISIRI 3206, Specification for Concrete – determination of compressive strength of test specimens, in, Institute of Standards and Industrial Research of Iran, In Persian.
- [22] ISIRI 6047, Specification for Concrete – splitting tensile strength, in, Institute of Standards and Industrial Research of Iran, In Persian.
- [9] A. Behnood, H. Ziari, Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures, *Cement and Concrete Composites*, 30(2) (2008) 106-112.
- [10] M. Bastami, A. Chaboki-Khiabani, M. Baghbadrani, M. Kordi, Performance of high strength concretes at elevated temperatures, *Scientia Iranica*, 18(5) (2011) 1028-1036.
- [11] A. Caverzan, E. Cadoni, M. di Prisco, Dynamic tensile behaviour of high performance fibre reinforced cementitious composites after high temperature exposure, *Mechanics of Materials*, 59 (2013) 87-109.
- [12] M. Ozawa, H. Morimoto, Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-performance concrete, *Construction and Building Materials*, 71 (2014) 83-92.
- [13] R. Serrano, A. Cobo, M.I. Prieto, M. de las Nieves González, Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers, *Construction and building materials*, 122 (2016) 302-309.
- [14] T. Drzymała, W. Jackiewicz-Rek, M. Tomaszewski, A. Kuś, J. Gałaj, R. Šukys, Effects of high temperature on the properties of high performance concrete (HPC), *Procedia Engineering*, 172 (2017) 256-263.
- [15] N. Yermak, P. Pliya, A.-L. Beaucour, A. Simon, A. Noumowé, Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: Spalling, transfer and mechanical properties, *Construction and Building Materials*, 132 (2017) 240-250.
- [16] Mohd Ali, A. Z., Sanjayan, J., & Guerrieri, M. (2018). Specimens size, aggregate size, and aggregate type effect on spalling of concrete in fire. *Fire and Materials*, 42(1), 59-68.
- [17] Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2019). An experimental study on the effects of adding steel and polypropylene fibers to concrete on its resistance after different temperatures. *Journal of Testing and Evaluation*, 47(2), 1606-1620.
- [18] Aslani, F., Hamidi, F., & Ma, Q. (2019). Fire performance of heavyweight self-compacting concrete and heavyweight high strength concrete. *Materials*, 12(5), 822.
- [19] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshtagh, A. (2020). Performance of concrete containing recycled springs in post-fire conditions. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 173(1), 3-16.

Experimental study of the physical properties and mechanical behavior of concretes containing steel fiber, polypropylene fiber and silica fume after fire

Amir Saedi Daryan *

Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Mehran Bakhtiari

BSc Student, Faculty of Civil Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Pouya Ghasemi

BSc Student, Faculty of Civil Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Abstract

In this paper, physical properties and mechanical behavior of concretes containing steel fiber, polypropylene fiber and silica fume have been experimentally investigated after experiencing high temperatures. For this purpose, six different mix designs and six different target temperatures (25, 100, 250, 500, 700 and 900 °C) were selected. Samples were heated in the electric furnace based on the curve with a rate of increase of 10 oC/min to reach the target temperature and then the cooling phase of the samples is performed naturally. In the following, after returning the temperature of the samples to the room temperature, compressive and tensile strength tests were performed on all of the samples and their behavior was evaluated after experiencing different target temperatures. The results show a strong drop in compressive and tensile strength at temperatures above 700 °C. It can be noted at 900 °C all specimens lost their strength. Also, by comparing the behavior of different admixtures, concrete containing steel fibers has shown more effective performance at high temperatures and the process of reducing its strength has been better than other admixtures. Finally, thanks to the large number of experiments, different relationships are presented based on the results to determine the mechanical properties of different mix designs at different temperature levels.

Keywords: Structural concrete, Iranian concrete standard, fire, compressive strength, tensile strength.

* Corresponding Author: amir_saedi_d@yahoo.com

