

## مطالعه آزمایشگاهی رفتار پس از آتش بتن‌های حاوی الیاف فولادی، پلی پروپیلن و فبر فلزی بازیافتی

امین مشتاق

مریی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه گرمسار، گرمسار، ایران

قاسم پاچیده

دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

مجید قلهکی\*

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

محمدعلی کافی فلاورجانی

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### چکیده

استفاده از الیاف در بتن، باعث بهبود مقاومت، شکل پذیری و دوام بتن می‌شود. بتن دارای خواص ضد حریق بوده اما بیشترین نگرانی از سازه‌های بتن آرمه در زمان آتش‌سوزی مربوط به میلگردهاست. لذا یکی از پیشنهادات به منظور کاهش خطرات فوق، استفاده از مصالح جای‌گزین نظیر الیاف است. در این مقاله به مطالعه آزمایشگاهی اثر دماهای مختلف بر روی مشخصات مکانیکی بتن‌های حاوی الیاف فولادی، پلی پروپیلن و فبرهای فلزی بازیافتی با قطر حفره ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از فبر فلزی در بتن، مقاومت پس از حرارت آن را ۳۸ درصد افزایش می‌دهد. از بین کلیه مواد اضافه شده به بتن، موثرترین ماده برای بهبود مقاومت فشاری و کششی به ترتیب فبر با قطر حفره ۱۲ میلی‌متر و الیاف فولادی می‌باشد. همچنین دمای آستانه ی افت شدید مقاومت برای نمونه‌ها، دمای ۵۰۰ درجه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بتن الیافی، الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن، فبر فلزی بازیافتی، آتش.

\* نویسنده مسئول: mgholhaki@semnan.ac.ir

## ۱- مقدمه

می باشد [۹]. سهاماران و همکاران در سال ۲۰۱۰ خواص مکانیکی و ریزساختار بتن مقاومت بالای کامپوزیتی سیمانی آسیب دیده از افزایش حرارت را بررسی کردند. نتایج نشان داد مقاومت فشاری بتن کامپوزیتی بیشتر از بتن‌های معمولی حاوی الیاف می باشد. [۱۰].

ژائو و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی بتن‌های GGBS حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن تحت دماهای بالا پرداختند. آن‌ها برای بتن‌هایی که در دماهای بالای ۸۰۰ درجه قرار می‌گیرند، مقاومتی را پیشنهاد دادند [۱۱].

امروزه استفاده از الیاف پلی پروپیلن به علت وزن کم، قیمت پایین، غیرمغناطیس بودن و غیر مخرب بودن کاربرد فراوانی در بتن دارد. عربی و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی تأثیر افزودن الیاف پلی پروپیلن بر خصوصیات ترموگراویمتریک بتن‌های SCC تحت اثر دماهای بالا (۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد) پرداختند. طرح مخلوط استفاده شده شامل سیمان، آب، خاکستر بادی، ماسه طبیعی، شن و فوق روان کننده با افزودن الیاف پلی پروپیلن به مقادیر حجمی ۰٪، ۰/۰۵٪، ۰/۱٪ و ۰/۱۵٪ می باشد. بر طبق نتایج به دست آمده، بهترین حالت استفاده از الیاف پلی پروپیلن در بتن‌های SCC برابر ۰/۰۵٪ حجم کل بتن می باشد [۱۲].

باتوجه به مطالعات چندین سال اخیر، محققان به این نکته دست یافتند که مقاومت، هندسه و شکل پذیری الیاف، عوامل کلیدی در بهبود مقاومت، شکل پذیری و ظرفیت جذب انرژی بتن الیافی هستند. Xu و همکاران آزمایشاتی را بر روی بتن‌های حاوی ۷ نوع الیاف انجام دادند. نتایج نشان داد که بتن حاوی الیاف فبری فولادی به مقدار ۱٪ حجمی، مقاومت و جذب انرژی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد [۱۳]. استفاده از فتر در بتن به دلیل عملکرد سه بعدی و محصور شدگی مناسب بین سنگ‌دانه‌ها و خمیر سیمان، مقاومت و شکل پذیری بیشتری نسبت به سایر الیاف‌ها از خود نشان داد [۱۴]. طبق تحقیقات Lankard در سال ۱۹۷۲ اگر مقدار استفاده فتر در بتن از حدود ۱۰۰ کیلوگرم در مترمکعب بیشتر شود، کارایی و همگن بودن بتن زیر سؤال می‌رود و باید تدابیر خاصی برای اختلاط آن در بتن فراهم نمود [۱۵].

«پارک» و همکاران در سال ۲۰۱۵ با افزودن الیاف‌های فولادی و پلی پروپیلن به بتن ساخته شده از خرده‌های لاستیک، رفتار بتن را بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است که با افزودن هم‌زمان

در دهه ۱۹۴۰ با آغاز مطالعات بر روی رفتار سیمان، ملات، نمونه‌های بتنی و اعضای بتن مسلح، گامی مؤثر برای تعیین ضوابط و توصیه‌های بسیاری از آیین‌نامه‌ها جهت بررسی مقاومت بتن در برابر آتش و حرارت برداشته شد. با گذشت نزدیک به ۴ دهه نتایج این مطالعات نشان داد که با افزایش دما، بتن حالت پوسته شدگی و انفجاری به خود گرفته و به شدت از مقاومت و مدول الاستیسیته آن کاسته می‌شود [۱].

«هرتز» در سال‌های ۱۹۸۴ و ۱۹۹۱ با انجام دو سری آزمایش با مقادیر مختلف دما بر روی بتن، با اندازه نمونه استوانه‌ای و درصد الیاف فولادی به منظور کاهش خطر انفجار انجام داد. در سری اول آزمایشات، تعداد ۱۵ نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۲۰\*۱۰ سانتی‌متر با مقدار میکروسیلیس ۱۴ الی ۲۰ درصد مطابق روش آزمایش مقاومت پسماند بررسی شد [۳و۲].

دیدریکس و همکاران در سال ۱۹۸۸ با انجام آزمایش بر روی بتن با مقاومت بالا به بررسی اثر آتش بر مشخصات مکانیکی آن پرداختند. آن‌ها چهار نوع بتن را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش مقدار درشت‌دانه در بتن، مقاومت پس از آتش آن بهبود بخشیده می‌شود [۴].

«فلیستی» و همکاران در سال ۱۹۹۶ با آزمایشاتی خواص بتن‌های با مقاومت بالا پس از قرارگیری در معرض آتش را بررسی کردند. روشی که در این مطالعه برای بررسی خواص بتن مورد ارزیابی قرار گرفت، روش مقاومت پسماند بود. بتن‌های مورد آزمایش با سیلیکافوم ساخته و دارای مقاومت ۷۲ و ۹۵ مگاپاسکال بودند [۵]. «فان» و «کارینو» در سال ۲۰۰۲ طی یک برنامه آزمایشگاهی به بررسی اثر دمای بالا بر روی خواص مکانیکی و قابلیت ایجاد پوسته شدگی در بتن با مقاومت بالا پرداختند. در این آزمایش خواص مکانیکی نمونه‌های بتنی استوانه‌ای با مقاومت بالا با افزایش حرارت تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش دمای بتن به ۶۰۰ درجه سانتی گراد، مقاومت فشاری بتن کاهش شدیدی داشته و پوسته شدن سطح بتن نیز افزایش می‌یابد [۶].

زیاری و بهنود در سال ۲۰۰۸ به بررسی مقاومت پسماند بتن با مقاومت بالا حاوی الیاف فولادی در برابر افزایش حرارت پرداختند. نتایج نشان داد که بهترین درصد استفاده از الیاف فولادی برابر ۶ درصد بوده و نسبت آب به سیمان مناسب برابر ۰/۳۵

اندازه های مختلف تحت دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی گراد بررسی می شود. الیاف ها و فبرهای به کار رفته در بتن به میزان ۰/۶ درصد حجم کل بتن بکار می روند. همچنین علاوه بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی، نحوه رشد ترک ها در آزمایش فشار و کشش در هر آزمایش بررسی گردید. در نهایت با ارائه روابط ریاضی، فرمول هایی جهت محاسبه مقاومت فشاری و کششی بتن الیافی در شرایط پس از آتش پیشنهاد گردیده است.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

در این مطالعه تعداد ۲۱۰ عدد نمونه استوانه ای بتن حاوی ۰/۶ درصد حجمی از الیاف فولادی و پلی پروپیلن و فبرهای فلزی مختلف جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی ساخته و تحت دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتیگراد مورد آزمایش قرار گرفتند. با توجه به این که طبق آزمایشات انجام شده در این پژوهش، معمولاً استفاده بیش از مقدار ۰/۶ درصد از فنر در بتن احتمال در هم پیچیدگی آن در بتن رخ داده لذا استفاده از مقدار ۰/۶ درصد از فنر به عنوان درصد بهینه در نظر گرفته شد. الیاف فولادی و پلی پروپیلن نیز با توجه به شرایطی که هر یک دارند، می توان مقدار ۰/۶ درصد حجمی بتن را بعنوان درصدی مناسب لحاظ نمود [۲۱].

## ۲-۱- مشخصات مصالح طرح اختلاط

جدول ۱ مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت بتن های مورد آزمایش را نشان می دهد. همچنین مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف های فولادی، پلی پروپیلن و فنر فلزی (که توسط دستگاه کشش آزمایشگاه مهندسی مواد دانشگاه سمنان انجام شد) در جدول ۲ آورده شده است. همچنین شکل ۱ تصویر الیاف های فولادی، پلی پروپیلن و فنر مصرفی در این مطالعه را نشان می دهد.

جدول ۱- مشخصات مصالح مصرفی در بتن

نوع روان کننده	آب	ماسه	شن	سیمان
ابر روان ساز	آب شرب شهر	دوبار شور	ریزدانه و درشت دانه (گوهر)	تیپ ۲ (شاهرود)
کربوکسیلاتی	تهران			

الیاف های فولادی و پلی پروپیلن مقاومت بتن بیشتر از حالتی است که تنها از یک نوع الیاف در بتن استفاده شود [۱۶ و ۱۷].

«سرانو» و همکاران در سال ۲۰۱۶ تحقیقاتی را در زمینه بتن های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن تحت آتش انجام دادند. آن ها تست فشار و کشش روی نمونه های استوانه ای انجام دادند. آزمایش آتش روی این نمونه ها داخل کوره الکتریکی بوده، بلکه در معرض مستقیم آتش بود. نتایج نشان داد که افزودن الیاف در بتن حدود ۱۱ الی ۲ درصد مقاومت را افزایش داده اما پس از رسیدن به مقاومت ماکزیمم، شکل پذیری آن ها کم می شود [۱۸].

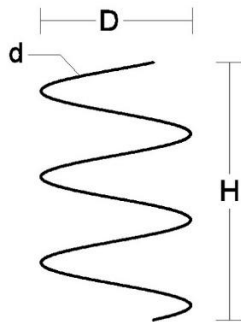
«یرماک» و همکاران در سال ۲۰۱۷ اثر دماهای بالا بر بتن های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن را بررسی کردند. نوع بتن مورد استفاده از نوع بتن های با مقاومت بالا (HSC) بوده و تحت چندین دمای مختلف آزمایشات انجام شد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش حرارت، رسانایی الکتریکی بتن کم شده و با سرد شدن تدریجی نمونه ها، این مقدار افزایش می یابد [۱۹]. آلبرتی و همکاران در سال ۲۰۱۷ طی تحقیقاتی دیگر، به بررسی رفتار بتن-های حاوی الیاف های ترکیبی پلی پروپیلن و فولادی حفره دار پرداختند. آن ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از الیاف به صورت ترکیبی، جذب انرژی و انعطاف پذیری بالاتری نسبت به حالتی که به صورت جداگانه استفاده شوند، دارند [۲۰]. قلهکی و همکاران در سال ۱۳۹۶ به بررسی اثر آتش بر بتن-های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن پرداختند. آن ها دو طرح اختلاط با عیارهای سیمان ۴۰۰ و ۷۰۰ و نسبت حجمی ۰/۶ درصد کل بتن از الیاف استفاده کردند. نتایج نشان داد که در شرایط پس از آتش، مقاومت فشاری بتن های حاوی الیاف فولادی حدود ۴۰ درصد بیشتر از مقاومت فشاری بتن های حاوی الیاف پلی پروپیلن می باشد [۲۱].

با توجه به مطالعات انجام شده، در این مقاله خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن های حاوی الیاف فولادی، پلی پروپیلن و فنر فلزی در

جدول ۲- خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف های مصرفی

نام الیاف	مقطع	طول (mm)	قطر (mm)	قطر/طول	مقاومت کششی (MPa)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیسیته (GPa)
الیاف فولادی	دایره	۵۰	۰/۸	۶۲/۵۰	>۱۲۰۰	۷۸۵۰	۱۶۰
الیاف پلی پروپیلن	دایره	۱۲	بسیار ناچیز	-	۴۰۰	۹۱۰	۳/۵ - ۳/۹
فنر فلزی	دایره	۲۵	۰/۸	۳۱/۲۵	>۱۲۰۰	۷۸۵۰	۱۶۰

فترهای به کار رفته در این پژوهش، از جنس گالوانیزه بوده و از بازیافت فترهای مورد استفاده در صنعت لوازم التحریر استفاده شده است. قابل ذکر است که خصوصیات گالوانیزه از جمله مقاومت حرارتی، مدول الاستیسیته، چگالی و... تقریباً با خصوصیات فولاد برابر بوده و رفتار مشابهی دارند. جزئیات هندسی نمای فتر فلزی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- جزئیات هندسی فتر استفاده شده در بتن

که در آن، D قطر ه حفره ی فتر ( در این پژوهش برابر ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ میلی متر)، d قطر مفتول فتر که برابر ۸ دهم میلی متر و H طول فتر (۲/۵ سانتی متر) می باشد. همچنین بر روی مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت بتن، در آزمایشگاه مکانیک خاک معدن شن و ماسه ی تیغاب ورامین آزمایش دانه بندی انجام شد. بنابراین طبق این پژوهش، به ذرات کوچکتر از ۵ میلی متر ماسه، بین ۵ الی ۱۸ میلی متر شن ریزدانه



الف- الیاف فولادی



ب- الیاف پلی پروپیلن



ج- فتر فلزی

شکل ۱- الیاف ها و فتر بکار رفته در بتن

گردید. پس از مدت ۲۴ ساعت قالب ها باز و داخل حوضچه ی آب (دمای ۲۵ درجه ی سانتی گراد) قرار داده و نمونه ها پس از مدت ۲۸ روز از داخل حوضچه ی آب، به خارج و سپس در کوره الکتریکی قرار داده شد.

پس از عمل آوری نمونه ها، دماهای انتخابی برای انجام آزمایش در کوره ی الکتریکی به ترتیب ۲۵ - ۱۰۰ - ۲۵۰ - ۵۰۰ - ۷۰۰ درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفت. نرخ افزایش درجه حرارت تا رسیدن به دمای مورد نظر برابر ۵ درجه سانتیگراد بر هر دقیقه انتخاب گردید.

سپس نمونه ها به مدت یک ساعت، پس از رسیدن دمای داخلی کوره به دمای مورد نظر، به منظور این که قسمت درونی بتن نیز به دمای مدنظر برسد و تمام نمونه هم دما شود، در همان دما باقی ماندند. به دلیل این که کاهش دمای نمونه ها به آرامی صورت پذیرد، کوره به مدت یک ساعت نیز در حالت خاموش قرار گرفته و سپس درب کوره باز شده و پس از چند دقیقه نمونه ها خارج شدند. این فرآیند، مانع از ایجاد شوک دمایی به نمونه ها هنگام سرد شدن می گردد.

پس از انجام عملیات حرارتی، کلیه نمونه ها در زیر جک، تحت آزمایش مقاومت فشاری و کششی قرار گرفتند. سرعت بارگذاری دستگاه ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه بر طبق استاندارد EN-12390-13 [۲۳] انتخاب گردید.

در شکل ۳، تصاویر برخی از نمونه ها پس از انجام عملیات حرارتی نشان داده شده است. نحوه نام گذاری نمونه ها مطابق جدول ۴ می باشد.

(نخودی) و به ذراتی که قطرشان ۱۸ الی ۳۲ میلی متر می باشد شن درشت دانه (بادامی) اطلاق می شود. در نتیجه از هر سایزی از مصالح به نسبت مناسبی استفاده شده است.

## ۲-۲- طرح اختلاط بتن مصرفی

مطابق جدول ۳، نسبت آب به سیمان مورد استفاده در این پژوهش برابر با ۰/۵۵ در نظر گرفته شد. همچنین از مجموع کل سنگ دانه ها ( شن و ماسه)، ۴۸٪ شن (درشت دانه - ریزدانه) و ۵۲٪ ماسه استفاده و نحوه اختلاط الیاف فولادی، پلی پروپیلن و فتر به نسبت حجمی کل بتن صورت گرفت. کلیه ی مراحل اختلاط، ساخت و عمل آوری نمونه های استوانه ای، در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه گرمسار انجام شد.

جدول ۳ - نسبت طرح اختلاط مصالح مصرفی در بتن

شن ریزدانه	شن درشت دانه	ماسه	سیمان	آب
۰/۵۸	۰/۳۵	۱	۰/۴۲	۰/۲۳

## ۳-۲- روش آزمایش

عمل آوری نمونه ها مطابق استاندارد ISIRI581 [۲۲] و بر روی بتن های ۲۸ روزه اعمال گردید. ابتدا به میزان مورد نظر (طرح اختلاط) مخلوط بتن به همراه الیاف و ابر روان کننده ساخته، سپس نمونه گیری بتن ها در نمونه های استوانه ای ۲۰\*۱۰ سانتیمتر به تعداد مجموعاً ۲۱۰ عدد (برای هر دما و هر تست، ۳ عدد نمونه ساخته شد) انجام شد. هر قالب، در سه مرحله بتن ریزی و در هر بار ویریه



پ: رشد ترک در نمونه ی PPF



ب: رشد ترک در نمونه ی SF



الف: رشد ترک در نمونه ی S16

شکل ۳ - نحوه ی رشد ترک در نمونه ها پس از خارج شدن از کوره در دمای ۷۰۰ درجه ی سانتی گراد

### ۳-۱- مقاومت فشاری

شمای کلی نحوه ی انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های استوانه ای که توسط جک هیدرولیک با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن و سرعت بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه انجام شد، در شکل ۴ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴ - آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها. الف: نحوه ی قرارگیری نمونه در زیر جک، ب: نحوه ی شکست نمونه ها پس از تست مقاومت فشاری

همانطور که از شکل ۴-الف مشخص است، برای انجام تست مقاومت فشاری، نمونه ها بین دو فک که به فاصله ۲۰ سانتی متر از یکدیگر قرار دارند، قرار داده شده و با سرعت مناسب تحت فشار قرار می گیرند. شکل ۴-ب نحوه ی ایجاد ترک هنگام وقوع شکست نمونه ها در زیر جک را نشان می دهد. همانطور که پیداست نمونه ها به صورت ترک های عمیق قطری شکسته می شوند.

شکل ۵ نمودارهای مقاومت فشاری نمونه ها با توجه به تغییرات دمایی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، نمی توان به طور قطعی بیان کرد که کدام یک از نمونه ها بیشترین مقاومت را دارد. چرا که در دماهای مختلف، روند تغییر در مقاومت فشاری نمونه ها متفاوت است. اما در رابطه با نمونه های حاوی PPF می توان گفت که در همه ی دماها از همه ی نمونه های دیگر مقاومت

به دلیل مقاومت و تحمل سنگ دانه ها، تقریباً در همه نمونه ها تا دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد، تغییر شکل ظاهری چندانی در نمونه ها مشاهده نشد. اما با افزایش دما تا ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه ی سانتی گراد، ترک های سطحی و بر روی نمونه ها ظاهر شد. همانطور که از شکل ۳ مشاهده می شود، نمونه های حاوی فبر و الیاف فولادی تقریباً حالت مشابهی در سطح ظاهری شان رخ داد. بطوری که نحوه ی رشد و ایجاد ترک در آن ها یکسان می باشد. اما در نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن، ترک های مویی زیادی رخ داده و به تقریباً کل سطح ظاهری نمونه را فرا گرفته است. بنابراین با افزایش دما آسیب بیشتری نسبت به بتن حاوی فبر الیاف فولادی به سطح ظاهری بتن وارد می شود. بنابراین با وجود چنین ترک های زیادی، سطح ظاهری نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن حالت زبری به خود می گیرد و ممکن است پوسته پوسته شود.

جدول ۴- نحوه ی نامگذاری نمونه ها

نماد	مفهوم
A	بتن بدون الیاف (نمونه شاهد)
S8	بتن حاوی فبر با قطر حفره ی ۸ میلی متر
S12	بتن حاوی فبر با قطر حفره ی ۱۲ میلی متر
S16	بتن حاوی فبر با قطر حفره ی ۱۶ میلی متر
S20	بتن حاوی فبر با قطر حفره ی ۲۰ میلی متر
SF	بتن حاوی الیاف فولادی
PPF	بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن

همانطور که از جدول ۴ مشاهده می شود، نمونه شاهد (نمونه ای که هیچ گونه الیاف یا فبری در آن به کار نرفته باشد) با حرف A و نمونه های حاوی فبر فلزی با حرف S نشان داده شده اند. اعداد مقابل حرف S نمایانگر قطر حفره فبر بر حسب میلی متر می باشند. همچنین الیاف های فولادی و پلی پروپیلن به ترتیب با نام های SF و PPF نام گذاری شده اند.

### ۳- انجام آزمایش و بررسی نمونه ها

پس از گذشت ۴۸ تا ۷۲ ساعت از پایان عملیات حرارتی، مقاومت فشاری و کششی نمونه ها اندازه گیری شد.

جدول ۵- مقاومت فشاری نمونه ها در دماهای مختلف (مگاپاسکال)

درجه	۲۵	۱۰۰	۲۵۰	۵۰۰	۷۰۰
A	۲۳/۷	۲۸/۴	۳۰	۲۰/۳	۱۰
S8	۲۵/۳	۳۴/۹	۳۲/۳	۱۷/۱	۱۱
S12	۳۲	۴۰	۲۲/۸	۲۴/۸	۱۱/۸
S16	۴۴/۳	۳۱/۸	۲۲/۶	۱۷	۷/۴
S20	۴۲/۳	۳۹	۲۹/۹	۲۵/۱	۱۱/۳
SF	۳۴/۷	۳۶/۹	۳۵/۹	۲۳/۹	۱۱/۳
PPF	۲۲/۴	۲۰/۵	۲۲/۷	۱۲/۴	۵/۶

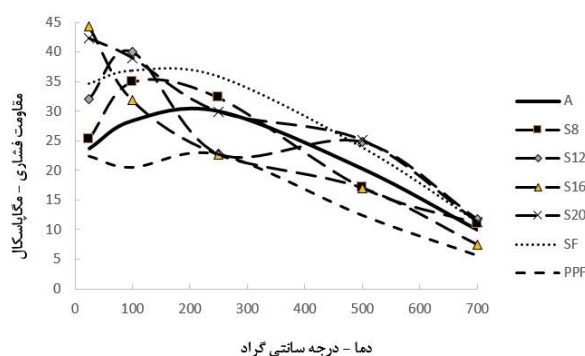
### ۲-۳- مقاومت کششی

برای انجام آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها، از روش کشش غیر مستقیم یا روش برزیلی استفاده شد. روش انجام آزمایش بدین صورت است که نمونه به صورت افقی یا خوابیده در زیر جک قرار گرفته به طوری که هیچ گونه انحرافی در راستای خود ندارد. سپس جک هیدرولیک مورد نظر با اعمال نیرو، منجر به شکست نمونه می شود. جک هیدرولیک مورد استفاده، دارای ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن بوده و با سرعت ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه بار را اعمال می کند.

شکل ۶ نحوه ایجاد ترک در نمونه‌ها پس از آزمایش مقاومت کششی را نشان می دهد. همانطور که پیداست، کلیه ی ترک ها در نواحی نزدیک به قطر مقطع رخ داده و از ابتدا تا انتهای آن را در بر گرفته است. اما با مقایسه ی مقدار عرض ترک در نمونه ها می توان بیان کرد که بیشترین عرض ترک در نمونه ی شاهد و نمونه ی حاوی الیاف فولادی می باشد. همچنین ترک در نمونه های حاوی الیاف فولادی بصورت گسترده و شاخه ای رخ داده و بصورت قطری از دو سطح، ترک خورده است. از آنجایی که نقش اصلی الیاف های پلی پروپیلن در بتن، پل زدن بین سنگ دانه ها بوده و باعث می شود ترک های عمیق در بتن رخ ندهد، در اینجا نیز چنین مسأله ای به وضوح قابل مشاهده می باشد. نمونه هایی که در آن ها فر فلزی بکار رفته رفتاری مشابه با الیاف پلی پروپیلن داشته و از وقوع ترک های گسترده و عمیق جلوگیری کرده است. مزیتی که نمونه های حاوی فتر نسبت به دیگر نمونه ها دارند این است که هم ترک ها بصورت عمیق نبوده و هم اینکه تحت فشارهای زیاد به یک باره خرد نمی شوند و امکان اینکه بتوان آن ها را مجدداً مقاوم سازی نمود، وجود دارد.

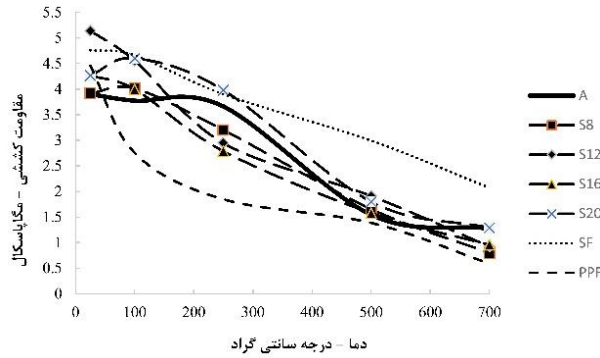
فشاری کمتری دارد. در دمای ۲۵ درجه نمونه‌های حاوی S16 و S20 افزایش مقاومت نسبت به نمونه ی شاهد، ۷۵ الی ۸۵ درصد می باشد، که این مطلب نشان از عملکرد بسیار مناسب فتر با این سائز در این دما می باشد. در دمای ۱۰۰ درجه، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های حاوی S12 و S20 بوده که مقاومت نمونه شاهد را در حدود ۴۰ درصد افزایش می دهند. در دمای ۲۵۰ درجه، بیشترین مقاومت مربوط به نمونه‌های حاوی الیاف فولادی (SF) بوده که در حدود ۲۰ درصد باعث افزایش مقاومت می شود. در دمای ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه، بیشترین مقاومت مربوط به نمونه های حاوی S12 بوده که در حدود ۲۰ درصد باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می شود.

بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها، می توان گفت که فنرهای فلزی می توانند جایگزین مناسبی برای سایر الیاف ها از جمله الیاف فولادی در بتن شوند. یکی از مهمترین مزایای فنرهای بکار رفته در این پژوهش، استفاده از فنرهای بازیافتی بوده که باعث صرفه جویی اقتصادی می شود. همواره برای استفاده از الیاف فولادی در بتن، باید آن را از کارخانجات مربوطه تهیه نمود، لذا پیمانکاران و کارفرمایان متحمل هزینه ای می شوند. اما با بکار بردن فنرهای فلزی بازیافت شده که مقاومت بسیار مشابه فولاد دارند، علاوه بر مزایای مقاومتی و فنی که نسبت به سایر الیاف های موجود در بازار دارند، به لحاظ اقتصادی نیز کاملاً مقرون به صرفه بوده و بعلاوه اینک فرآیند تولید مجدد ندارند، کمترین آسیب را به محیط زیست می رساند. اما پیش از استفاده از فتر در بتن، شناخت دقیق رفتار هر نوع فتر و نحوه ی عملکرد آن ها در هنگام اختلاط با بتن، امری ضروری است. همچنین خلاصه‌ای از نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها در شرایط پس از حرارت، در جدول ۵ آورده شد.



شکل ۵- مقاومت فشاری بر حسب افزایش دما

مقاومت‌ها مربوط به نمونه های حاوی SF و S20، در دمای ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه نمونه های حاوی SF می باشد.



شکل ۷- مقاومت کششی بر حسب افزایش دما

همچنین خلاصه ای از نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه ها در شرایط پس از حرارت، در جدول ۶ آورده شد.

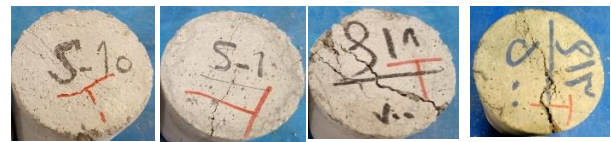
جدول ۶- مقاومت کششی نمونه ها در دماهای مختلف (مگاپاسکال)

	۷۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۱۰۰	۲۵	
	درجه	درجه	درجه	درجه	درجه	
A	۱/۲۷	۱/۵۴	۳/۶۶	۳/۷۷	۳/۹	
S8	۰/۷۹	۱/۶۵	۳/۲	۴/۰۱	۳/۹۲	
S12	۰/۹۲	۱/۹۱	۲/۹۴	۴/۵۵	۵/۱۴	
S16	۰/۹۵	۱/۵۸	۲/۷۹	۳/۹۹	۴/۲۷	
S20	۱/۲۹	۱/۷۹	۳/۹۸	۴/۶	۴/۲۷	
SF	۲/۰۷	۲/۹۹	۳/۹	۴/۶۶	۴/۷۶	
PPF	۰/۵۹	۱/۳۸	۱/۸۵	۲/۷۵	۴/۴۶	

#### ۴- بررسی و تفسیر نتایج آزمایشات

باتوجه به انجام آزمایش های آتش و مقاومت فشاری و کششی بر روی نمونه ها، نتایج بدست آمده بصورت زیر مقایسه می شود.

۴-۱- مقایسه مقاومت‌ها در برابر حرارت‌های مختلف  
باتوجه به نتایج به دست آمده از آزمایش آتش، مقاومت فشاری و مقاومت کششی نمونه‌ها، خلاصه‌ای از نتایج مهم در جدول ۷ آورده شده است. لازم به ذکر است، از آنجایی که در برخی دماها، مقادیر مقاومت ها نزدیک به هم بوده لذا فقط بیشترین مقدار در جدول آورده شده است.



شکل ۶- رشد ترک در نمونه ها

شکل ۷ روند تغییرات مقاومت کششی نمونه ها با توجه به تغییرات دما را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود در حالت کلی نمونه های حاوی الیاف فولادی پلی پروپیلن به ترتیب بیشترین و کمترین مقاومت کششی را دارند. اما با نگاهی جزئی تر می توان گفت که در دمای ۲۵ درجه، بیشترین مقاومت کششی مربوط به نمونه های حاوی فیر ۱۲ (S12) می باشد که نسبت به نمونه ی شاهد تقریباً ۲۷ درصد مقاومت بیشتری دارد. سپس بیشترین مقاومت کششی مربوط به نمونه های حاوی الیاف فولادی (SF) بوده که حدود ۲۰ درصد مقاومت کششی بیشتری نسبت به نمونه ی شاهد دارد. در دمای ۱۰۰ درجه، نمونه های حاوی SF، S20 و S12 میزان افزایش مقاومتی که نسبت به نمونه ی شاهد ایجاد کردند تقریباً با یکدیگر برابر بوده و حدود ۲۳ درصد می باشد. لازم به ذکر است که در این دما کمترین میزان مقاومت برای نمونه های PPF بوده و حتی مقاومتی کمتر از نمونه های شاهد دارند. دلیل این امر این است که هنگامی که بتن تحت حرارت قرار می گیرد، بخشی از آب موجود در بتن، بسته به میزان حرارت وارده، تبخیر شده و باعث می شود یک شکافی بین سنگ‌دانه‌ها و الیاف پلی پروپیلن رخ دهد، که نه تنها کمکی به بهبود مقاومت بتن نکرده لذا باعث ممانعت ارتباط بین سنگ‌دانه ها شده و به یکباره منجر به کاهش مقاومت بتن می گردد. در دمای ۲۵۰ درجه بیشترین



جدول ۷ - خلاصه ی نتایج آزمایشات

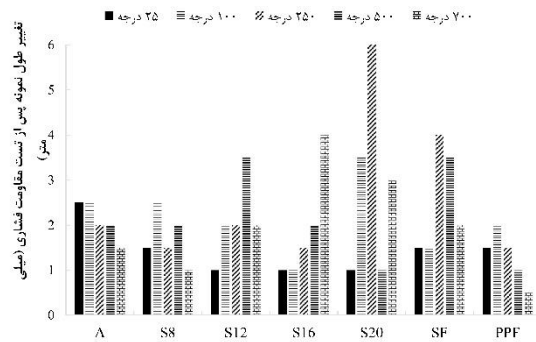
PPF	SF	S20	S16	S12	S8	A	نام نمونه
			*				بیشترین مقاومت فشاری در دمای ۲۵ درجه
				*			بیشترین مقاومت فشاری در دمای ۱۰۰ درجه
	*						بیشترین مقاومت فشاری در دمای ۲۵۰ درجه
				*			بیشترین مقاومت فشاری در دمای ۵۰۰ درجه
				*			بیشترین مقاومت فشاری در دمای ۷۰۰ درجه
				*			بیشترین مقاومت کششی در دمای ۲۵ درجه
	*						بیشترین مقاومت کششی در دمای ۱۰۰ درجه
		*					بیشترین مقاومت کششی در دمای ۲۵۰ درجه
	*						بیشترین مقاومت کششی در دمای ۵۰۰ درجه
	*						بیشترین مقاومت کششی در دمای ۷۰۰ درجه

باتوجه به نتایج جدول ۷ می توان با تقریب مناسبی بهترین نمونه در کششی آن صرف نظر می شود، می توان نتیجه گرفت که نمونه های آزمایش مقاومت فشاری و کششی را به ترتیب نمونه های حاوی S12 و SF دانست. حال باتوجه به این که اصولاً در مباحث بتنی، در جدول ۸ مقایسه ای دیگر از نحوه ی عملکرد نمونه ها در برابر مقاومت فشاری بتن مد نظر است و حتی در برخی مواقع از مقاومت کششی آن صرف نظر می شود، می توان نتیجه گرفت که نمونه های حاوی فنر S12 عملکرد بهتری در برابر آتش از خود نشان می دهند. در جدول ۸ مقایسه ای دیگر از نحوه ی عملکرد نمونه ها در برابر مقاومت فشاری بتن مد نظر است و حتی در برخی مواقع از مقاومت کششی آن صرف نظر می شود، می توان نتیجه گرفت که نمونه های حاوی فنر S12 عملکرد بهتری در برابر آتش از خود نشان می دهند.

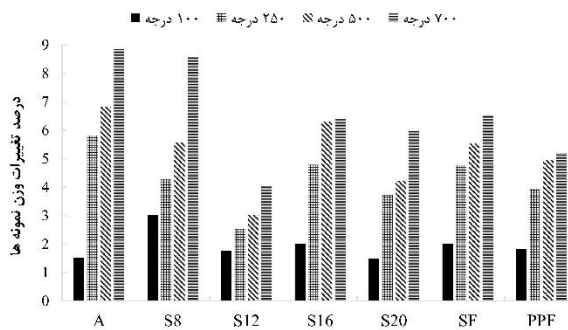
جدول ۸ - مقایسه ی دماهای بیشینه و کمینه

نام نمونه	دمایی که بیشترین مقاومت را دارد. (درجه)	دمایی که کمترین مقاومت را دارد. (درجه)	دمای آستانه ی افت مقاومت شدید نمونه (درجه)
A	۲۵۰	۷۰۰	۵۰۰
S8	۱۰۰	۷۰۰	۵۰۰
S12	۱۰۰	۷۰۰	۵۰۰
S16	۲۵	۷۰۰	۵۰۰
S20	۲۵	۷۰۰	۵۰۰
SF	۱۰۰	۷۰۰	۵۰۰
PPF	۲۵	۷۰۰	۵۰۰
A	۲۵	۷۰۰	۲۵۰
S8	۱۰۰	۷۰۰	۵۰۰
S12	۲۵	۷۰۰	۵۰۰
S16	۲۵	۷۰۰	۲۵۰
S20	۱۰۰	۷۰۰	۲۵۰
SF	۲۵	۷۰۰	۵۰۰
PPF	۲۵	۷۰۰	۵۰۰

همانطور که در جدول ۸ مشاهده می شود، بیشترین مقاومت فشاری و کششی نمونه ها در دماهای ۲۵ و ۱۰۰ درجه رخ می دهد. با توجه به اینکه وقوع آتش باعث تبخیر آب درون بتن شده و باعث پوکی یا به اصطلاح کریستال شدن بتن می شود، بنابراین معمولاً دمای اتاق (۲۵ درجه) بیشترین مقاومت را برای هر نمونه دارد. علت اینکه برخی نمونه ها در دمای ۱۰۰ درجه به بیشترین حد مقاومت خود رسیدند اینست که در این دما، سنگدانه ها گرم می شوند و باعث چسبندگی بیشتر در بین آن ها می شود. دمای ۱۰۰ درجه دمایی نیست که بخواهد سنگدانه ها و سیمان و الیاف را منفعل و یا دچار تغییرات حجمی شدید کند. همچنین با توجه به اینکه در دماهای بسیار زیاد از جمله ۷۰۰ درجه، بخش زیادی از آب بتن خشک شده و بتن پوک می شود، لذا کمترین مقاومت فشاری و کششی برای همه نمونه ها در این دما اتفاق می افتاد. معیار دیگری که برای مقایسه نمونه ها در نظر گرفته شد، معیار دمایی است که نمونه در آستانه افت شدید مقاومت قرار می گیرد. با توجه به این موضوع، در همه ی نمونه ها و طرح ها دمای آستانه ی افت شدید مقاومت فشاری، دمای ۵۰۰ درجه بوده و از این دما به بعد در مقاومت افت در همه ی نمونه هایی که آزمایش مقاومت فشاری گرفته شده یکسان بوده و در حدود ۵۰ درصد می باشد.



شکل ۸- درصد تغییر طول نمونه پس از تست مقاومت فشاری



شکل ۹- درصد تغییرات وزنی نمونه ها

باتوجه به شکل ۸ از آنجایی که الیاف فولادی و فیر ۲۰ (S20) خاصیت ارتجاعی بیشتری نسبت به بقیه دارند، لذا مقادیر تغییر طول آن ها نیز بیشتر می باشد. نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن به دلیل توانایی کم در تحمل فشار، کمترین میزان تغییر طول را نسبت به بقیه دارند. همچنین باتوجه به مقادیر حاصل از شکل ۹، هرچه میزان افزایش دما بیشتر باشد مقدار کاهش وزن نمونه در اثر تبخیر سیمان و آب داخل بتن بیشتر می شود. از این رو بیشترین و کمترین تغییرات کاهش وزن در اثر افزایش دما به ترتیب مربوط به نمونه های شاهد (A) و S12 می باشد. همانطور که در قسمت های قبل توضیح داده شد، بهترین ماده برای بهبود مقاومت فشاری بتن، استفاده از فیر S12 بود.

۴-۳- روابط پیشنهادی جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی  
باتوجه به این که مقادیر به دست آمده از این پژوهش، از پیوستگی مناسبی برخوردار بوده، با برازش منحنی های درجه دوم برای هر نمودار، روابطی جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی بتن های حاوی الیاف و فیر در جدول ۹ پیشنهاد شده است.

۴-۲- مقایسه ی تغییرات ابعادی و وزنی نمونه ها  
باتوجه به اعمال آتش و حرارت بر روی نمونه های بتنی و در نتیجه تبخیر بخشی از سیمان و آب موجود در بتن، تغییراتی در طول نمونه و وزن آن رخ می دهد. از آنجایی که الیاف و فیرهای متفاوتی در نمونه ها استفاده شده، بنابراین این تغییرات در هر نمونه متفاوت می باشد. اشکال ۸ و ۹ میزان تغییر طول نمونه پس از تست مقاومت

هدف اصلی از استفاده الیاف یا هر ماده ی افزودنی در بتن، بهبود خواص مکانیکی بتن بوده اما در آزمایش مقاومت کششی، بتن اندکی رفتار متفاوت نسبت به آزمایش مقاومت فشاری دارد. لذا در نمونه های حاوی A، S16 و S20 دمای آستانه ی افت شدید مقاومت کششی برابر ۲۵۰ درجه و در نمونه های S8، S12، SF و PPF دمای آستانه ی افت شدید مقاومت کششی برابر ۵۰۰ درجه می باشد. که از میان کل نمونه ها، نمونه ی شاهد (A) و نمونه ی حاوی الیاف پلی پروپیلن (PPF) بیشترین کاهش مقاومت را دارند.

#### ۴-۲- مقایسه ی تغییرات ابعادی و وزنی نمونه ها

۹۰ / تحقیقات بتن، سال یازدهم، شماره دوم

جدول ۹- روابط پیشنهادی جهت پیش بینی مقاومت نمونه ها بر حسب دما و نوع الیاف

نوع آزمایش	تابع رگرسیون	ضریب رگرسیون ( $R^2$ )
A	$F'_c = -9E-05T^2 + 0.0404T + 24.077$	0.96
S8	$F'_c = -7E-05T^2 + 0.0211T + 29.022$	0.83
S12	$F'_c = -2E-05T^2 - 0.0198T + 35.332$	0.75
S16	$F'_c = 6E-05T^2 - 0.0883T + 43.302$	0.95
S20	$F'_c = -1E-05T^2 - 0.0353T + 42.357$	0.97
SF	$F'_c = -8E-05T^2 + 0.0179T + 35.162$	0.99
PPF	$F'_c = -4E-05T^2 + 0.0047T + 21.942$	0.96
A	$F_T = -1E-06T^2 - 0.0037T + 4.1589$	0.92
S8	$F_T = -1E-06T^2 - 0.004T + 4.2121$	0.98
S12	$F_T = 6E-06T^2 - 0.0102T + 5.3963$	0.99
S16	$F_T = 4E-06T^2 - 0.0079T + 4.571$	0.99
S20	$F_T = -2E-06T^2 - 0.0038T + 4.7076$	0.93
SF	$F_T = -8E-07T^2 - 0.0035T + 4.9081$	0.99
PPF	$F_T = 9E-06T^2 - 0.011T + 4.277$	0.92

استفاده از فنر فلزی در بتن، از وقوع ترک های عمیق و گسترده پس از شرایط آتش جلوگیری می کند. اما وجود الیاف فولادی در بتن باعث ایجاد ترک های شاخه ای و عمیق می شود. همچنین الیاف پلی پروپیلن در بتن، باعث ایجاد ریز ترک های بسیاری بصورت شاخه ای در سطح بتن می شود.

در آزمایش مقاومت فشاری و کششی بتن های حاوی الیاف های فولادی و پلی پروپیلن و فنر با سایزهای حفره ی ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ میلی متر، دمای آستانه ی افت شدید مقاومت بتن تقریباً ۵۰۰ درجه ی سانتی گراد می باشد.

در آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها پس از قرار گرفتن در کوره در دماهای مختلف، تغییر طول نمونه های حاوی فنر با قطر حفره ی ۲۰ میلی متر و الیاف فولادی به ترتیب برابر ۶ و ۴ میلی متر بوده که بیشترین مقدار در بین تمامی نمونه ها می باشد.

بطور کلی بهترین مواد برای بهبود مقاومت فشاری و کششی بتن در شرایط پس از آتش به ترتیب عبارتند از: فنر فلزی با قطر حفره ۱۲ میلی متر و الیاف فولادی که برای فنر به ترتیب روابط  $F'_c = -9E-05T^2 + 0.0404T + 24.077$  و  $F_T = -1E-06T^2 - 0.0037T + 4.1589$  و برای الیاف فولادی به ترتیب روابط  $F'_c = -2E-05T^2 - 0.0198T + 35.332$  و  $F_T = 6E-06T^2 - 0.0102T + 5.3963$  و بهترین عملکرد را در تست مقاومت فشاری نسبت به سایر فنرها و الیاف ها (الیاف فولادی و پلی پروپیلن) دارد.

همانطور که مشاهده می شود، ضریب رگرسیون تمامی روابط نزدیک به ۱ بوده، لذا روابط پیشنهادی از دقت مناسبی برخوردارند. در این روابط  $F'_c$  و  $F_T$  مقاومت فشاری و کششی نمونه ها و  $T$  پارامتر مربوط به دما بر حسب درجه سانتیگراد می باشد. روابط فوق برای طرح اختلاط موجود در این مقاله بوده، لذا جهت ارائه روابط بیشتر در آینده قابل ارائه است.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، تعداد ۲۱۰ عدد نمونه استوانه ای به ابعاد ۲۰\*۱۰ سانتی متر بتن الیافی در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه ی سانتی گراد تحت عملیات حرارتی قرار گرفته و آزمایش مقاومت فشاری و کششی بر روی آن ها انجام شد. نمونه های بتن ساخته شده حاوی الیاف های فولادی، پلی پروپیلن و فنر فلزی با اندازه های مختلف به مقدار ۰/۶ درصد حجم بتن به کار رفته و نتایج زیر به دست آمد:

به طور کلی فنرهای فلزی باز یافتی به کار رفته در بتن، باعث افزایش مقاومت فشاری بتن در شرایط پس از آتش در حدود ۱/۳ برابر شده که در این بین، فنر S12 (فنر با قطر حفره ی ۱۲ میلی متر) بهترین عملکرد را در تست مقاومت فشاری نسبت به سایر فنرها و الیاف ها (الیاف فولادی و پلی پروپیلن) دارد.

## ۶- مراجع

- concrete material with different fibres. *Material and Design*. 33:42–55. 2012.
- [14] Xu Z, Hao H, Li HN. Dynamic tensile behaviour of fibre reinforced concrete with spiral fibres. *Material and Design* 42:72–88. 2012.
- [15] Lankard DR. Prediction of the flexural strength properties of steel fibrous concrete. In: *Proceedings of the CERL conference on fibrous concrete, construction engineering research laboratory, Champaign*. p. 101–23. 1972.
- [16] Park, Y., Abolmaali, A., Mohammadagha, M. and Lee, S. “Flexural Characteristics of Rubberized Hybrid Concrete Reinforced with Steel and Synthetic Fibers”, *Advances in Civil Engineering Materials (ASTM)*, 3(1), pp. 495-508. 2014.
- [17] Park, Y., Abolmaali, A., Mohammadagha, M. and Lee, S. “Structural performance of dry-cast rubberized concrete pipes with steel and synthetic fibers”, *Construction and Building Materials*, 77, pp. 218-226. 2015.
- [18] Serrano, Ruben. Cobo, Alfonso. Prieto, Maria Isabel. Gonzalez, Maria de las Nieves. “Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers”. *Construction and Building Materials*. Volume122, pages 302-309. 2016
- [19] Yermak, N. Pliya, P. Beaucour, A-L. Simon, A. Noumowe, A. “Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: Spalling, transfer and mechanical properties”, *Construction and Building Materials*, Volume 132, pages 240-250. 2017.
- [20] Alberti, M.G., Enfedaque, A., Gálvez, J.C., (2017). “Fibre reinforced concrete with a combination of polyolefin and steel-hooked fibres”, *Composite Structures*, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.03.033>. 2017.
- [21] Gholhaki, M. Pachideh, GH. Rezaeefar, O. (2017). “Experimental Study on Mechanical Properties of Concrete Containing Steel Fibres, and Polypropylene in high temperatures”, *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*. DOI: 10.22065/jsce.2017.77392.1072.
- [22] INSO581, concrete-making curing concrete test specimens in the laboratory- code of practice, 2<sup>nd</sup>.revision. 2015.
- [23] NF EN 12390-13 AFNOR, Testing hardened concrete, in: *Determination of Secant Modulus of Elasticity in Compression*, pages 18–455. 2013.
- [1] Metin, H. “The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high performance concrete” *Fire Safety Journal*, Volume 41, issue2, March 2006, pages 155-163. 2006.
- [2] Hertz, K. “Heat Induced Explosion of Dense Concretes” Report No. 166, Institute of Building Design, Technical University of Denmark. 1984.
- [3] Hertz, K. “Danish Investigations on Silica Fume Concretes at Elevated Temperatures” *Proceedings, ACI Spring Convention, Beton, MA*. Volume88, number4, pages 345-347. 1991.
- [4] Diederichs, U., Jumppanen, U.M. and Penttala, V. “Material Properties of High Strength Concrete at Elevated Temperatures” *IABSE 13th Congress, Helsinki*. 1988.
- [5] Felicetti, R., Gambarova, P.G., Rosati, G.P., Corsi, F., and Giannuzzi, G. “Residual Mechanical Properties of High-Strength Concrete Subjected to High-Temperature Cycles” *Proceedings, 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-performance Concrete, Paris, France*. 1996.
- [6] Phan, L.T., and Carino, N.J. “Effects of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures,” *ACI Materials Journal*, Volume99 (1), pp 54-66. 2002.
- [9] Behnood, A., and Ziari, H. “Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures,” *Cement & Concrete Composites*, Volume30, pages 106–112. 2008.
- [10] Sahmaran, M., Lachemi, M., and Li, V.C. “Assessing Mechanical Properties and Microstructure of Fire-Damaged Engineered Cementitious Composites,” *ACI Materials Journal*, Volume107, pages 297-304. 2010.
- [11] Gao, Danying. Yan, Dongming. Li, Xiangyu. “Splitting strength of GGBFS concrete incorporating with steel fiber and polypropylene fiber after exposure to elevated temperatures”, *Fire Safety Journal*, Volume54, November 2012, pages 67-73. 2012.
- [12] Arabi N. S. AL Qadi, Kamal Nasharuddin Bin Mustapha, Sivakumar Naganathan, Qahir N. S. AL-Kadi. Effect of polypropylene fibers on thermogravimetric properties of self-compacting concrete at elevated temperatures. *Fire and materials*. DOI: 10.1002/fam.2123. 2012.
- [13] Xu Z, Hao H, Li HN. Experimental study of dynamic compressive properties of fibre reinforced

## **Experimental Study on Post-fire Behaviour of Concrete Containing Steel and Polypropylene Fiber and Recycled Metal Spring**

**A. Moshtagh**

Educator, Faculty of Civil Engineering, Garmsar University, Garmsar, Iran

**G.H. Pachideh**

Phd Candidate, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

**M. Gholhaki\***

Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

**M.A. Kafi Felaverjani**

Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

### **Abstract**

The use of fibre causes to improve resistance, ductility and durability of concrete. Concrete has fire-resistant properties, but the most concern is for rebars when the reinforced concrete structures are exposed to fire. For resolving this issue, fibre, as an alternative material, has been proposed to reduce mentioned risks. In this paper, an experimental study was conducted to assess the effect of different temperatures on the mechanical properties of concrete containing steel fibre, polypropylene and recycled steel springs with a hole diameters of 8, 12, 16 and 20 mm. The results showed that the use of metal springs led to an increase in the resistance of concrete up to 38%. Of all materials, added to the concrete, the most effective material for improving the compressive and tensile strength of concrete was the spring with a hole diameter of 12 mm and then steel fibre. Furthermore, the threshold temperature was 500 ° C which led to a severe reduction in the strength of samples.

**Keywords:** fibre concrete, steel fibre, polypropylene fibre, recycled metal spring, fire.

---

\* Corresponding Author: mgholhaki@semnan.ac.ir

