

نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

بررسی تأثیر افزایش دما بر روی بتن‌های حاوی فنر فلزی بازیافتی و مقایسه با الیاف‌های رایج

مجید قلهکی*^۱، قاسم پاچیده^۲

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

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

چکیده

استفاده از الیاف یا مواد بازیافتی در بتن، باعث بهبود مقاومت، شکل‌پذیری و دوام بتن می‌شود. بتن دارای خواص ضد حریق بوده لکن بیشترین نگرانی از سازه‌های بتن‌آرمه در زمان آتش‌سوزی مربوط به میگردها است. لذا یکی از پیشنهادات به منظور کاهش خطرات فوق، استفاده از مصالح جایگزین نظیر فنر فلزی بازیافتی می‌باشد. در این مقاله به مطالعه‌ی آزمایشگاهی عملکرد بتن‌های حاوی فنر فلزی بازیافتی با بکار بردن درصدهای حجمی ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ تحت دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد پرداخته شد. پس از سرد شدن نمونه‌ها، مقاومت فشاری و کششی بهینه‌ترین درصد اختلاط فنر در بتن، با بتن حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن مقایسه شد. نتایج حاکی از آن است که استفاده از مقدار ۰/۲ درصد فنر در بتن با باعث بهبود مقاومت فشاری و کششی بتن تا حدود ۳ برابر نمونه‌ی شاهد شده، اما هرچه میزان استفاده از آن در بتن افزایش یابد از مقاومت آن نیز کاسته می‌شود. همچنین مقاومت فشاری بتن با درصد بهینه‌ی فنر در دماهای مختلف حدود ۲ الی ۳ برابر بتن حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن بوده و مقاومت کششی آن نیز تا حدودی نزدیک به مقاومت الیاف فولادی می‌باشد. همچنین وجود فنر در بتن، عرض ترک‌های بوجود آمده پس از انجام تست مقاومت کششی را تا ۳ برابر کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی: بتن فنی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، فنر فلزی بازیافتی، الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن، دماهای بالا

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

10.22065/JSCE.2018.93911.1278	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2018.93911.1278	۱۳۹۸/۰۶/۰۱	۱۳۹۶/۱۱/۱۶	۱۳۹۶/۱۱/۱۶	۱۳۹۶/۰۹/۲۲	۱۳۹۶/۰۵/۰۸

مجید قلهکی

*نویسنده مسئول:

mgholhaki@semnan.ac.ir

پست الکترونیکی:

Assessing Effect of Temperature Rise on the Concrete Containing Recycled Metal Spring and Its Comparison with Ordinary Fibres

Madjid Gholhaki^{1*}, Ghasem Pachideh

1- Associate professor, Faculty of Civil Engineering, University of Semnan, Semnan, Iran

2- Ph.D Student in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Semnan, Semnan, Iran

ABSTRACT

Fibre or recycled material used in the concrete improves resistance, ductility, and durability of concrete. Concrete has fire-resistant properties but the most worrying thing about reinforced concrete structures during the fire is related to rebars. Therefore, there is a suggestion about use of alternative materials such as recycled metal spring in order to reduce above mentioned risks. In this paper, we conduct laboratory study to assess performance of concrete containing recycled metal spring while using volumetric amounts of 0.2, 0.4 and 0.6% at temperatures of 25, 100, 250, 500, 700 and 900 degrees Celsius. Furthermore, compressive strength and tensile strength of the most optimal combination of spring in the concrete are compared with concrete containing steel fibre and polypropylene. The results show that spring used in the concrete improves compressive strength and tensile strength. But the more the spring is used in the concrete, the more the resistance is reduced. Therefore, if the spring with 0.2 volume percent that is considered as the most optimal combination percentage is increased by 3 times, it increases compressive strength and tensile strength. Furthermore, the optimal compressive strength of spring in different temperatures is about 2 – 3 times of steel fibre and polypropylene and its tensile strength is close to strength of steel fibre. Fibre used in concrete reduces width of the cracks created after the test by 3 times.

ARTICLE INFO

Received: 30/07/2017

Revised: 13/12/2017

Accepted: 05/02/2018

Keywords:

Spring concrete,
Compressive strength,
Tensile strength,
Recycled metal spring,
Steel fibre,
Polypropylene fibre,
High temperatures.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.93911.1278

*Corresponding author: Madjid Gholhaki
Email address: mgholhaki@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از مواد ساختمانی مهم بتن است که به علت قدرت فشرده‌سازی بالا، عمر طولانی و هزینه کم به طور گسترده‌ای در جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، بتن دارای معایب ذاتی از جمله قدرت کششی کم و مقاومت پایین در برابر ترک است. برای بهبود نقاط ضعف این مواد، مطالعات متعدد بر روی بتن تقویت شده با الیاف انجام شده است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد بتن تقویت شده با الیاف کوتاه پلاستیکی عملکرد بتن را به طور قابل توجهی بهبود بخشیده و ضعف‌های آن از قبیل قدرت کششی کم، انعطاف‌پذیری پایین و ظرفیت جذب انرژی کم را از بین می‌برد [۷-۱].

لیمباچیا و همکاران در سال ۲۰۰۰ با مطالعه بر روی بتن‌های بازیافتی، به این نتیجه رسیدند که مقاومت فشاری بتن بازیافتی بستگی به نوع سنگدانه‌ها و خصوصیات آن دارد. نسبت آب به سیمان، درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی بجای سنگدانه‌های طبیعی و میزان چسبندگی ملات از جمله مهمترین عوامل موثر بر مقاومت فشاری بتن بازیافتی هستند [۸].

اجداکیویچ و کلیژویچ در سال ۲۰۰۲ به مطالعه‌ی تأثیر افزودن سنگدانه‌های بازیافتی به بتن‌های با مقاومت بالا پرداختند. بتن‌های بکار رفته با عمر ۲ تا ۷ سال با مقاومت متوسط و بالا بوده که خصوصیات مکانیکی آن‌ها با یکدیگر مقایسه گردید [۹].

کارنیرو و همکاران در سال ۲۰۰۸ به بررسی جایگزینی مصالح بازیافتی با ترکیبی از ۵۵ درصد ملات، ۲۰ درصد بتن و ۲۵ درصد آجر پرداختند. نتایج نشان داد که با جایگزینی ۲۵ درصد سنگدانه‌های بازیافتی بجای سنگدانه‌های طبیعی، مقاومت بتن افزایش می‌یابد. علت این افزایش مقاومت، چسبندگی بهتر سنگدانه‌های بازیافتی با خمیر سیمان می‌باشد [۱۰].

خالو و همکاران در سال ۲۰۱۰ به بررسی عملکرد بتن‌های خودتراکم متشکل از درشت‌دانه‌های بازیافتی پرداختند. طبق این پژوهش، آن‌ها با بکارگیری سنگدانه‌های بازیافتی به عنوان درشت‌دانه با درصدهای جایگزینی مختلف نسبت به درشت‌دانه‌ی طبیعی (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) به این نتیجه رسیدند که بکارگیری سنگدانه‌های بازیافتی موجب افت خواص رئولوژیک بتن‌های خودتراکم شده و دستیابی به خواص خودتراکمی را دشوار می‌سازد. همچنین جایگزینی ۲۵٪ درشت‌دانه‌ی بازیافتی با درشت‌دانه‌ی غیربازیافتی (طبیعی) بهترین حالت ممکن برای ساخت بتن خودتراکم بازیافتی می‌باشد [۱۱]. کیم و همکاران در سال ۲۰۱۰ به بررسی عملکرد بتن‌های مسلح شده با الیاف پلی‌استر (PET) بازیافتی پرداختند. بدین منظور با مقادیر ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد به بتن افزوده شده و با سایر الیاف‌های موجود، از جمله الیاف پلی‌پروپیلن مقایسه شد. نتایج نشان داد که هرچه مقدار PET بازیافتی در بتن کمتر شود، مقاومت فشاری و مدول الاستیک بتن افزایش یافته که نسبت به وجود الیاف پلی‌پروپیلن در بتن، عملکرد بهتری دارد [۱۲].

چوی و یان در سال ۲۰۱۲ به مطالعه‌ی تأثیر استفاده‌ی همزمان از درشت‌دانه و ریزدانه‌ی بازیافتی بر مقاومت بتن پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده‌ی همزمان از درشت‌دانه و ریزدانه‌ی بازیافتی باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود. یکی از دلایل این افزایش مقاومت، چسبندگی بالاتر درشت‌دانه‌های بازیافتی و خمیر سیمان می‌باشد [۱۳].

صدرممتازی و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از روش‌های غیرمخرب به بررسی خصوصیات بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی بتن پرداختند. در این پژوهش با بکار بردن الیاف پلی‌پروپیلن به طول ۶ میلی‌متر و با درصدهای حجمی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ در بتن که با جایگزینی ریزدانه و درشت‌دانه‌ی بازیافتی با درصدهای ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ ساخته شده، به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن در بتن بازیافتی، سرعت امواج فراصوتی و درصد جذب آب بتن کاهش و مقاومت الکتریکی افزایش یافت [۱۴].

احمدی و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی تأثیر افزودن الیاف فلزی بازیافتی از لاستیک خودرو بر بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی پرداختند. درصد جایگزینی این نوع سنگدانه‌ها با درشت‌دانه‌های طبیعی به میزان ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد و میزان الیاف بکار رفته ۰/۵ درصد حجم بتن می‌باشد. نتایج نشان داد که با افزودن الیاف فلزی بازیافتی به بتن با سنگدانه‌های بازیافتی، کمبود مقاومت این نوع بتن‌ها جبران می‌گردد [۱۵].

مستعلی و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی خصوصیات مکانیکی و مقاومت ضربه‌ی بتن‌های حاوی الیاف CFRP بازیافتی پرداختند. الیاف CFRP با مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد و با اندازه‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر به بتن اضافه شدند. طبق نتایج بدست آمده، با افزایش درصد و طول الیاف CFRP بازیافتی در بتن، مشخصات مکانیکی و مقاومت ضربه‌ای افزایش یافته اما کارایی بتن کاهش می‌یابد [۱۶].

شیرازی بیدآبادی و اکبری در سال ۲۰۱۷ به بررسی بتن متشکل از سنگدانه‌های بازیافتی تقویت شده با الیاف پرداختند. ابتدا تأثیر ابعاد و میزان جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی و سپس تأثیر افزودن الیاف پلی پروپیلن و فولادی در بهبود خواص مکانیکی بتن بازیافتی بررسی شد. نتایج حاکی از آن است که افزودن الیاف فولادی به بتن با سنگدانه‌های بازیافتی تأثیر بیشتری در بهبود خواص مقاومتی نسبت به الیاف پلی پروپیلن دارد [۱۷].

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 [۱۸].

پارک و همکاران در سال ۲۰۱۵ با افزودن الیاف 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 الیاف فولادی و پلی پروپیلن مقاومت بتن بیشتر از حالتی خواهد بود که تنها از یک نوع الیاف در بتن استفاده شود [۱۹ و ۲۰]. همچنین افروغ ثابت و اوزبکالوگلو در سال ۲۰۱۵ با بررسی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن‌های با مقاومت بالا و حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن به این نتیجه رسیدند که از بین درصد‌های مختلف استفاده از الیاف، بهترین حالت مربوط به استفاده از ۰/۸۵ درصد الیاف فولادی و ۰/۱۵ درصد الیاف پلی پروپیلن می‌باشد. همچنین جذب آب و دوام بتن‌های الیافی به نوع و میزان الیاف بکار رفته در بتن بستگی دارد [۲۱].

سرانو و همکاران در سال ۲۰۱۶ تحقیقاتی را در زمینه‌ی بتن‌های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن تحت آتش انجام دادند. آن‌ها تست فشار و کشش روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام دادند. آزمایش آتش روی این نمونه‌ها داخل کوره‌ی الکتریکی نبوده، بلکه در معرض آتش مستقیم بود. نتایج نشان داد که افزودن الیاف در بتن حدود ۱ الی ۲ درصد مقاومت را افزایش داده اما پس از رسیدن به مقاومت ماکزیمم، شکل‌پذیری آن‌ها کم می‌شود [۲۲].

پرماک و همکاران در سال ۲۰۱۷ اثر دماهای بالا بر بتن‌های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن را بررسی کردند. نوع بتن مورد استفاده از نوع بتن‌های با مقاومت بالا (HSC) بوده و تحت چندین دمای مختلف آزمایش شد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش حرارت، رسانایی الکتریکی بتن کم شده و با سرد شدن تدریجی نمونه‌ها، این مقدار افزایش می‌یابد [۲۳]. قلپکی و همکاران در سال ۱۳۹۶ به بررسی اثر حرارت بر بتن‌های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن پرداختند. آن‌ها 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 حرارت، مقاومت فشاری بتن‌های حاوی الیاف فولادی حدود ۴۰ درصد بیشتر از مقاومت فشاری بتن‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن می‌باشد [۲۴].

در این مقاله با توجه به مطالعات انجام شده و همچنین عدم وجود تحقیقات جدی بر روی رفتار پس از حرارت بتن‌های متشکل از مواد بازیافتی، فنر فلزی بازیافتی از جنس گالوانیزه با مقادیر ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ درصد حجمی به بتن اضافه و رفتار آن در شرایط دماهای بالا بررسی شد. دماهای انتخابی و تست‌های مورد نظر عبارت است از ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه و مقاومت فشاری و کششی. در نهایت، نحوه‌ی ایجاد ترک در نمونه‌ها در دماهای مختلف، میزان کرنش طولی نمونه‌ها و مقایسه‌ی بهترین درصد اختلاط فنر در بتن با الیاف فولادی و پلی پروپیلن بررسی شد. همچنین روابط پیشنهادی برای تعیین مقاومت فشاری و کششی بتن نیز ارائه شد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این مطالعه تعداد ۱۴۴ عدد نمونه‌ی استوانه‌ای بتن حاوی فنر فلزی بازیافتی با درصد‌های ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی ساخته و پس از قرار گرفتن در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و سپس سرد شدن آن‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند. با توجه به اینکه طبق آزمایشات از قبل انجام شده در این پژوهش، استفاده‌ی بیش از مقدار ۰/۶ درصد از فنر در بتن، احتمال درهم‌پیچیدگی و ایجاد فاصله بین سنگدانه‌ها در بتن را افزایش خواهد داد، لذا استفاده‌ی بیش از ۰/۶ درصد حجمی از فنر در بتن، پیشنهاد نمی‌شود. همچنین تعداد ۷۲ عدد نمونه‌ی دیگر حاوی الیاف فولادی (SF) و پلی پروپیلن (PPF) جهت مقایسه با عملکرد فنر در بتن ساخته شد. در جدول ۱ خلاصه‌ی طرح‌های استفاده شده در مقاله جهت تست مقاومت فشاری و کششی آورده شده است.

جدول ۱: خلاصه‌ی طرح‌ها

نام نمونه	A	S8-0.2	S8-0.4	S8-0.6	SF	PPF
بتن بدون الیاف (نمونه شاهد)	بتن حاوی فنر ۸ به	بتن حاوی فنر ۸ به	بتن حاوی فنر ۸ به	بتن حاوی فنر ۸ به	بتن حاوی الیاف فولادی به	بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن به
	مقدار ۰/۲ درصد حجمی	مقدار ۰/۴ درصد حجمی	مقدار ۰/۶ درصد حجمی	مقدار ۰/۲ درصد حجمی	مقدار ۰/۲ درصد حجمی	مقدار ۰/۲ درصد حجمی

همانطور که از جدول ۱ مشاهده می‌شود، نمونه‌ی شاهد (نمونه‌ای که هیچ‌گونه فنری در آن بکار نرفته باشد) با حرف A و نمونه‌های حاوی فنر فلزی با حرف S نشان داده شده‌اند. اعداد مقابل حرف S به ترتیب نمایانگر قطر حفره‌ی فنر بر حسب میلی‌متر (d) و درصد اختلاط آن‌ها در بتن می‌باشد.

۲-۱- مشخصات مصالح طرح اختلاط

جدول ۲ مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت بتن‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همچنین مشخصات فیزیکی و مکانیکی فنر فلزی استفاده شده که توسط دستگاه کشش آزمایشگاه مهندسی مواد دانشگاه سمنان انجام شد، در جدول ۳ آورده شده است. شکل ۱ تصویر فنر فلزی بازیافتی مصرفی در این مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مشخصات مصالح مصرفی در بتن

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

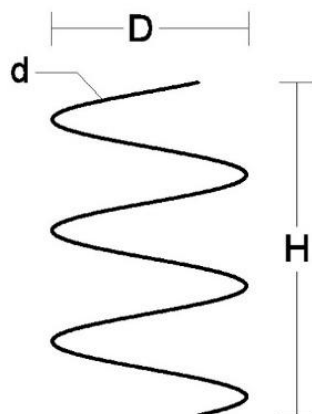
جدول ۳: خواص فیزیکی و مکانیکی فنر فلزی بازیافتی استفاده شده

نام الیاف	مقطع	طول (mm)	قطر (mm)	قطر/طول	مقاومت کششی (MPa)	چگالی (kg/m ³)	مدول الاستیسیته (GPa)
فنر فلزی	دایره	۲۵	۰/۸	۳۱/۲۵	>۱۲۰۰	۷۸۵۰	۱۶۰



شکل ۱: فنر فلزی بکار رفته در بتن

فنرهای بکار رفته در این پژوهش، از جنس گالوانیزه بوده و از بازیافت فنرهای مورد استفاده در صنعت لوازم التحریر استفاده شده است. لازم به 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 فنر فلزی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: جزئیات هندسی نمای فنر فلزی

که در آن، D قطره‌ی حفره‌ی فنر (در این پژوهش برابر ۸ میلی‌متر)، d قطر مفتول فنر که برابر ۸ دهم میلی‌متر و H طول فنر (۲/۵ سانتی‌متر) می‌باشد.

بر روی مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت بتن، در آزمایشگاه مکانیک خاک معدن شن و ماسه‌ی تیغاب ورامین آزمایش دانه‌بندی انجام شد. بر طبق این پژوهش، به ذرات کوچکتر از ۵ میلی‌متر ماسه و ذرات بین ۵ الی ۱۸ میلی‌متر شن ریزدانه (نخودی) اطلاق می‌شود. بعلاوه اینک قطر حفره‌ی فنر استفاده شده برابر ۸ میلی‌متر است، لذا از مصالح شن درشت‌دانه (بادامی) که قطر سنگدانه‌های آن بسیار بزرگ تر از قطر حفره‌ی فنر بکار رفته در این پژوهش می‌باشد و به هیچ‌وجه در داخل فنر نفوذ نمی‌کند، استفاده نشده است.

۲-۲- طرح اختلاط بتن مصرفی

مطابق جدول ۴، نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. همچنین از مجموع کل سنگدانه‌ها (شن و ماسه)، ۴۶٪ شن (ریزدانه) و ۵۴٪ ماسه و به مقدار ۱۰ درصد، از ابر روانساز پرکربوکسیلاتی به عنوان کاهنده‌ی آب و با هدف افزایش کارپذیری بتن استفاده و نحوه‌ی اختلاط فنر به نسبت حجمی کل بتن صورت گرفت. کلیه‌ی مراحل اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های استوانه‌ای، در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه سمنان انجام شد.

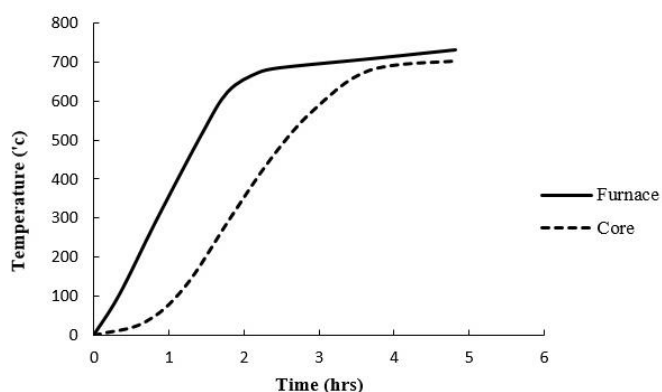
جدول ۴: نسبت طرح اختلاط مصالح مصرفی در بتن

شن ریزدانه	ماسه	سیمان	آب
۱/۱۸	۱	۰/۴۷	۰/۲۱

نحوه‌ی اختلاط مصالح برای ساخت بتن، طبق آیین‌نامه ASTM C192 انجام شد. ابتدا شن ریزدانه (نخودی) به میکسر اضافه شده، سپس حدود یک‌سوم آب به آن افزوده و میکسر روشن شد و شروع به چرخیدن کرد. در نهایت به تدریج ماسه طبیعی، سیمان و آب باقیمانده به میکسر اضافه شد. الیاف و فنر به تدریج در حدود ۲ الی ۳ دقیقه به بتن اضافه و به مدت ۳ دقیقه نیز میکسر در این حالت چرخید. پس از اینکه بتن حاوی الیاف یا فنر ساخته شد، آزمایش اسلامپ بتن طبق آیین‌نامه ASTM C143 انجام شد.

۲-۳- روش آزمایش

عمل آوری نمونه‌ها مطابق استاندارد ISIRI581 [۲۵] و بر روی بتن‌های ۲۸ روزه اعمال گردید. ابتدا به میزان مورد نظر (طبق طرح اختلاط) مخلوط بتن به همراه الیاف و فنر و ابر روان کننده ساخته، سپس فرآیند نمونه‌گیری بتن در نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰*۲۰ سانتی‌متر به تعداد مجموعاً ۱۴۴ عدد (برای هر دما و هر تست، ۳ عدد نمونه ساخته شد) انجام شد. هر قالب، در سه مرحله بتن‌ریزی و در هر بار ویبره گردید. پس از مدت ۲۴ ساعت قالب‌ها باز و داخل حوضچه‌ی آب (دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) قرار داده و نمونه‌ها پس از مدت ۲۸ روز از داخل حوضچه‌ی آب خارج و سپس در کوره‌ی الکتریکی قرار داده شد.



شکل ۳: نرخ تغییرات دمای داخل کوره و مرکز بتن نسبت به زمان



ب) فضای داخلی کوره الکتریکی



الف) نمای روبروی کوره الکتریکی



ت) طرز قرارگیری نمونه‌ها در داخل کوره الکتریکی



پ) نمای جانبی کوره الکتریکی

شکل ۴: تصاویر کوره الکتریکی مورد استفاده

پس از اتمام فرآیند عمل‌آوری نمونه‌ها، دماهای انتخابی برای انجام آزمایش در کوره‌ی الکتریکی به ترتیب ۲۵ - ۱۰۰ - ۲۵۰ - ۵۰۰ - ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. نرخ افزایش درجه حرارت تا رسیدن به دمای مورد نظر برابر ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد بر هر دقیقه انتخاب گردید.

به منظور حصول اطمینان از رسیدن تمامی قسمت‌های بیرونی و داخلی نمونه‌ها به دمای مورد نظر، برای هر دما به تعداد ۲ عدد نمونه‌ی آزمایشی ساخته و در مرکز آن ترموکوپل سری K با قابلیت رسیدن به حداکثر دمای ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، قرار داده شد. طبق نتایج بدست آمده بطور میانگین بسته به شدت دمای اعمالی به نمونه حدود ۶۰ دقیقه زمان صرف می‌شود تا تمام قسمت‌های بتن به دمای مورد نظر برسد. شکل ۳ نرخ تغییرات دمای داخل کوره و مرکز نمونه‌های بتنی را بر حسب ساعت نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، حد فاصل زمانی بین رسیدن دمای داخل کوره و مرکز بتن به دمای مورد نظر، حدود یک ساعت بطول می‌انجامد. بنابراین نمونه‌ها به مدت یک ساعت، پس از رسیدن دمای داخلی کوره به دمای مورد نظر، به منظور اینکه قسمت درونی بتن نیز به دمای مورد نظر برسد و تمام قسمت‌های نمونه هم‌دما شود، در همان دما باقی ماندند. بعلاوه اینکه کاهش دمای نمونه‌ها به آرامی صورت پذیرد، کوره به مدت یک ساعت نیز در حالت خاموش قرار گرفته و سپس درب کوره به آرامی و به تدریج باز شده و پس از چند دقیقه نمونه‌ها خارج شدند. این فرآیند، مانع از ایجاد شوک دمایی به نمونه‌ها هنگام سرد شدن می‌گردد. شکل ۴ تصاویر جهات مختلف کوره‌ی الکتریکی به همراه نمونه‌های بتنی درون آن با مشخصات مدل A160 شرکت ATBIN که بصورت سه فاز کار می‌کند را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است دهانه‌ی ورودی کوره‌ی الکتریکی به ابعاد ۴۵*۴۵ و به عمق ۶۵ سانتی‌متر با ظرفیت حدود ۴۰ عدد نمونه‌ی استوانه‌ای ۱۰*۲۰ سانتی‌متر می‌باشد که بصورت یکنواخت دما را توزیع می‌کند.

پس از اتمام عملیات حرارتی و سرد شدن کامل نمونه‌ها، کلیه نمونه‌ها 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 [۲۶] انتخاب گردید. در شکل ۵، تصاویر برخی از نمونه‌ها پس از انجام عملیات حرارتی نشان داده شده است.



ب: رشد ترک در نمونه‌ی حاوی فنر در دمای ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد



الف: رشد ترک نمونه‌ی حاوی فنر در دمای ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد

شکل ۵: نحوه‌ی رشد ترک در نمونه‌ها پس از خارج شدن از کوره

به دلیل مقاومت و تحمل سنگدانه‌ها، تقریباً در همه‌ی نمونه‌ها تا دمای ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، تغییر شکل ظاهری چندانی در نمونه‌ها مشاهده نشد. اما با افزایش دما تا ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، ترک‌های سطحی و ریز بر روی نمونه‌ها ظاهر شد. همچنین با افزایش دما و به تبع آن افزایش ترک در سطح نمونه، بتن به حالت کریستالی یا توخالی شدن درآمده و در برابر ضربه بسیار شکننده می‌شود.

۳- انجام آزمایش و بررسی نمونه‌ها

با توجه به اینکه در این مقاله رفتار پس از حرارت (دماهای بالا) نمونه‌ها بایستی بررسی شود، بنابراین هنگامی که نمونه‌ها از داخل کوره‌ی الکتریکی خارج شدند، حدود ۴۸ تا ۷۲ ساعت صبر کرده تا دمای بتن به حدود ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد رسیده و سپس مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

۳-۱- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها (پس از سرد شدن) طبق آیین‌نامه ASTM C39 انجام شد. نمای کلی نحوه‌ی انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای که توسط جک هیدرولیک با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن و سرعت بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه انجام شد، در شکل ۶ نشان داده شده است.

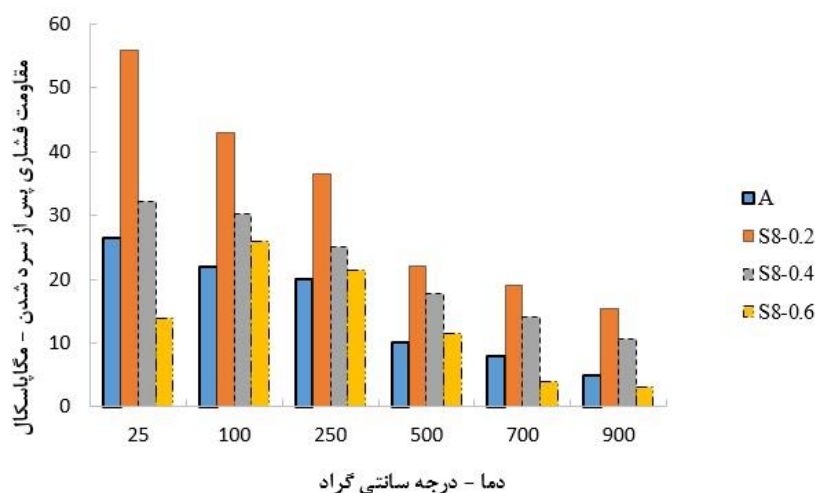


الف: نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌ها در زیر جک ب: نحوه‌ی شکست نمونه‌ها پس از تست مقاومت فشاری
شکل ۶: آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها

همانطور که از شکل ۶-الف مشخص است، برای انجام تست مقاومت فشاری، نمونه‌ها بین دو فک که به فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار دارند، قرار داده شده و با سرعت مناسب تحت فشار قرار می‌گیرند. شکل ۶-ب نحوه‌ی ایجاد ترک هنگام وقوع شکست نمونه‌ها در زیر جک را نشان می‌دهد. همانطور که پیداست نمونه‌ها بصورت ترک‌های عمیق قطری شکسته می‌شوند.

شکل ۷ نمودار مقاومت فشاری نمونه‌ها با توجه به تغییرات دمایی پس از سرد شدن را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بطور کلی استفاده از فنر در بتن با درصد‌های مختلف باعث بهبود مقاومت فشاری در دماهای مختلف می‌گردد. با توجه به درصد‌های متفاوت اختلاط که از فنر استفاده شده، با افزایش میزان استفاده از فنر در بتن از مقاومت فشاری کاسته می‌شود. بنابراین بر خلاف سایر الیاف‌های موجود همانند الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی که معمولاً در حدود یک درصد حجمی بکار می‌روند، فنر فلزی بازیافتی نه تنها با مقدار کمتری در بتن بکار می‌رود بلکه به لحاظ اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه است. به دلیل اختلاف ناچیز مقاومت فشاری نمونه‌های S8-0.6 با نمونه‌ی شاهد (A)، می‌توان گفت که رفتار آن‌ها در برابر حرارت یکسان می‌باشد. علت این پدیده این است که استفاده‌ی بیش از حد بهینه از فنر در بتن می‌تواند بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان فاصله ایجاد کرده و باعث ایجاد حفره‌هایی در داخل بتن شود، به همین دلیل مانع افزایش مقاومت بتن نسبت به حالتی که از فنر استفاده نشده، می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده، بهترین درصد استفاده از فنر در بتن به لحاظ ظرفیت مقاومت در برابر حرارت‌های بالا، فنر S8-0.2 می‌باشد که در حدود ۲ الی ۳ برابر مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌ی شاهد دارد.

بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها، می‌توان گفت که فنرهای فلزی می‌توانند جایگزین مناسبی برای سایر الیاف‌ها از جمله الیاف فولادی در بتن شوند. همواره برای استفاده از الیاف‌های مختلف در بتن، باید آن را از کارخانجات مربوطه تهیه نمود، لذا پیمانکاران و کارفرمایان متحمل هزینه‌ی زیادی خواهند شد. اما با بکار بردن فنرهای فلزی بازیافت شده که مقاومت بسیار مشابه فولاد دارند، علاوه بر مزایای مقاومتی و فنی که نسبت به سایر الیاف‌های موجود در بازار دارند، به لحاظ اقتصادی نیز کاملاً مقرون‌به‌صرفه بوده و بعلاوه این‌که فرآیند تولید مجدد ندارند، کمترین آسیب را به محیط‌زیست می‌رسانند. اما پیش از استفاده از فنر در بتن، شناخت دقیق رفتار هر نوع فنر و نحوه‌ی عملکرد آن‌ها در هنگام اختلاط با بتن، امری ضروری است.



شکل ۷: مقاومت فشاری بر حسب افزایش دما

۳-۲- 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 بصورت افقی یا خوابیده در زیر جک قرار گرفته بطوری که هیچ‌گونه انحرافی در راستای خود ندارد. سپس جک هیدرولیک مورد نظر با اعمال نیروی قائم، منجر به شکست نمونه می‌شود. جک هیدرولیک دارای ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن بوده و با سرعت ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه بار را اعمال می‌کند. مقاومت کششی بتن بر حسب نیوتن بر میلی‌متر مربع طبق رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (1)$$

که در آن P برابر است با مقدار بار وارده بر حسب نیوتن، D قطر نمونه‌ی استوانه‌ای (۱۰۰ میلی‌متر) و L طول نمونه‌ی استوانه‌ای (۲۰۰ میلی‌متر) می‌باشد.

شکل ۸ نحوه‌ی ایجاد ترک در نمونه‌ها پس از آزمایش مقاومت کششی را نشان می‌دهد. همانطور که پیداست، کلیه‌ی ترک‌ها در نواحی نزدیک به قطر مقطع رخ داده و از ابتدا تا انتهای آن را در بر گرفته است. همچنین با توجه به اینکه یکی از نقش‌های اصلی فنر در بتن، کنترل ترک در سازه است، لذا با افزایش مقدار فنر در بتن، عرض ناحیه‌ی ترک‌خوردگی کمتر شده و از عمق ترک‌ها نیز کاسته شد.



ب: نمونه S8-0.2



الف: نمونه A



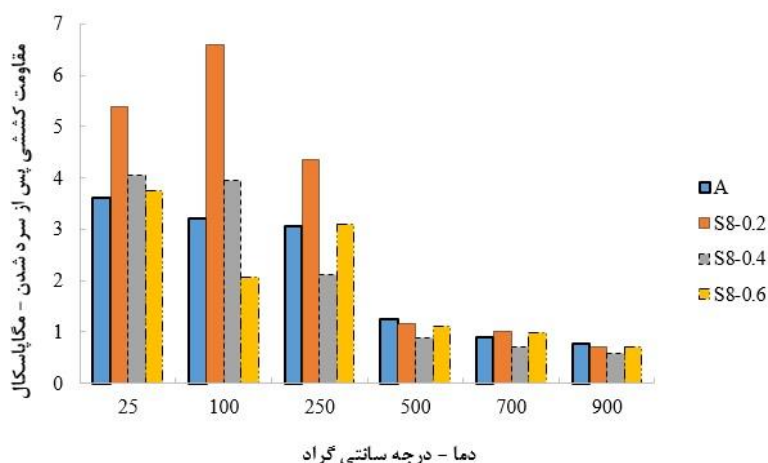
ت: نمونه S8-0.6



پ: نمونه S8-0.4

شکل ۸: رشد ترک در نمونه‌ها

شکل ۹ روند تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها با توجه به تغییرات دما پس از سرد شدن را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود از دمای ۵۰۰ درجه تا ۹۰۰ درجه مقاومت کششی نمونه‌ها تقریباً با یکدیگر برابر می‌باشد. با نگاهی دقیق تر می‌توان گفت که در این بازه از دما مقاومت کششی نمونه‌ی S8-0.4 تقریباً از بقیه کمتر بوده و مقاومت کششی نمونه‌ی S8-0.2 بیشترین مقدار را دارد. عمده ی تفاوت در مقاومت کششی نمونه‌ها در دماهای کمتر از ۵۰۰ درجه می‌باشد. مقاومت کششی نمونه‌ی S8-0.2 با اختلاف حدود ۳ برابر سایر نمونه‌ها بیشتر بوده، بطوری که در سایر نمونه‌ها اختلافات زیادی در مقادیر مقاومت مشاهده نمی‌شود. بنابراین بهترین درصد اختلاط فنر S8 در بتن برابر ۰/۲ درصد می‌باشد.



شکل ۹: مقاومت کششی بر حسب افزایش دما

۳-۳- بررسی و تفسیر نتایج آزمایشات

با توجه به انجام آزمایشات حرارتی، مقاومت فشاری و کششی بر روی نمونه‌ها، نتایج بدست آمده بصورت زیر مقایسه می‌شود.

۳-۳-۱- مقایسه‌ی مقاومت‌ها در برابر دماهای مختلف

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش حرارت، مقاومت فشاری کششی نمونه‌ها، خلاصه‌ای از نتایج مهم در جدول ۵ آورده شده است. لازم به ذکر است، از آنجایی که در برخی دماها، مقادیر مقاومت‌ها نزدیک به هم بوده لذا فقط بیشترین مقدار در جدول لحاظ شده است.

جدول ۵: مقاومت ماکزیمم در دماهای مختلف

نام نمونه	A	S8-0.2	S8-0.4	S8-0.6
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 فشاری در دمای ۹۰۰ 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	*			
بیشترین مقاومت کششی در دمای ۹۰۰ درجه	*			

با توجه به نتایج جدول ۵ می‌توان با تقریب مناسبی بهترین نمونه در آزمایش مقاومت فشاری و کششی را نمونه‌های حاوی فنر با مقدار ۰/۲ درصد (S8-0.2) دانست. حال با توجه به اینکه اصولاً در مباحث بتنی، مقاومت فشاری بتن مدنظر است و حتی در برخی مواقع از مقاومت کششی آن صرف‌نظر می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های حاوی فنر S8-0.2 عملکرد بهتری در برابر حرارت از خود نشان می‌دهند. در جدول ۶ مقایسه‌ای دیگر از نحوه‌ی عملکرد نمونه‌ها در برابر آزمایشاتی که انجام شد، آورده شده است.

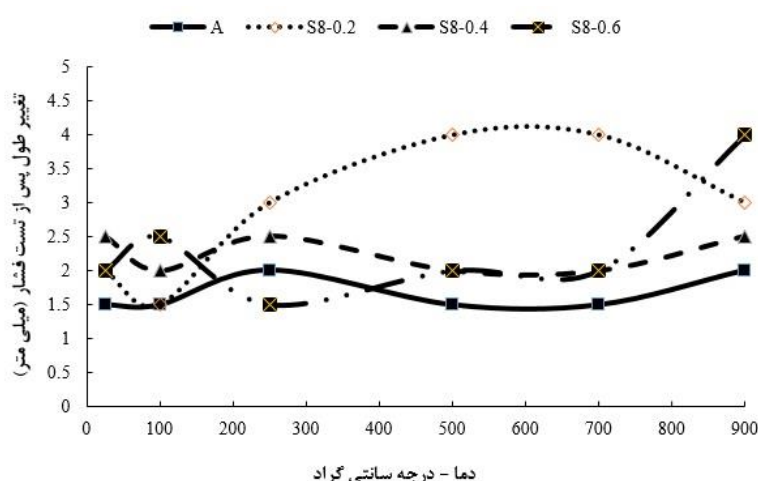
جدول ۶: مقایسه‌ی دماهای بیشینه و کمینه

نام نمونه	دمایی که بیشترین مقاومت را دارد. (درجه)	دمایی که کمترین مقاومت را دارد. (درجه)	دمای آستانه‌ی افت مقاومت شدید (درجه)
A	۲۵	۹۰۰	۲۵۰
مقاومت فشاری	S8-0.2 ۲۵	۹۰۰	۱۰۰
	S8-0.4 ۲۵	۹۰۰	۲۵۰
	S8-0.6 ۱۰۰	۹۰۰	۵۰۰
مقاومت کششی	A ۲۵	۹۰۰	۲۵۰
	S8-0.2 ۱۰۰	۹۰۰	۲۵۰
	S8-0.4 ۲۵	۹۰۰	۲۵۰
	S8-0.6 ۲۵	۹۰۰	۲۵۰

همانطور که از جدول ۶ مشاهده می‌شود، بطور کلی بیشترین مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه رخ می‌دهد. با توجه به اینکه وقوع حرارت بالا باعث تبخیر آب درون بتن شده و باعث پوکی یا به اصطلاح کریستال شدن بتن می‌شود، بنابراین معمولاً دمای اتاق (۲۵ درجه) بیشترین مقاومت را برای هر نمونه در بر خواهد داشت. علت اینکه برخی نمونه‌ها در دمای ۱۰۰ درجه به بیشترین حد مقاومت خود رسیدند اینست که در این دما، سنگدانه‌ها گرم می‌شوند و باعث چسبندگی بیشتر در بین آن‌ها خواهد شد. دمای ۱۰۰ درجه دمایی نیست که بخواهد سنگدانه‌ها و سیمان را منفعل و یا دچار تغییرات حجمی شدید کند. همچنین با توجه به اینکه در دماهای بسیار زیاد از جمله ۹۰۰ درجه، بخش زیادی از آب بتن خشک شده و بتن پوک می‌شود، لذا کمترین مقاومت فشاری و کششی برای همه ی نمونه‌ها در این دما اتفاق می‌افتد. معیار دیگری که برای مقایسه‌ی نمونه‌ها در نظر گرفته شد، معیار دمایی است که نمونه در آستانه‌ی افت شدید مقاومت قرار خواهد گرفت. با توجه به این موضوع، در آزمایش مقاومت فشاری در همه‌ی نمونه‌ها و طرح‌ها دمای آستانه‌ی افت شدید مقاومت فشاری در نمونه‌های مختلف، متفاوت بوده که از این دماها به بعد در مقاومت فشاری نمونه‌ها افت شدیدی مشاهده می‌شود. اما دمای آستانه‌ی افت مقاومت شدید در تست کشش نمونه‌ها، دمای ۲۵۰ درجه می‌باشد.

۳-۳-۲- مقایسه‌ی تغییرات طولی پس از تست فشار

با توجه به اعمال حرارت بر روی نمونه‌ها و نتیجتاً تبخیر بخشی از سیمان و آب موجود در بتن، بتن ضعیف‌تر شده و پس از انجام تست فشار هنگام سرد شدن، تغییرات طولی متفاوتی نسبت به حالت قبل از قرار گرفتن نمونه‌ها در کوره مشاهده می‌شود. شکل ۱۰ میزان تغییر طول نمونه پس از تست مقاومت فشاری بر حسب میلی‌متر را نشان می‌دهد.



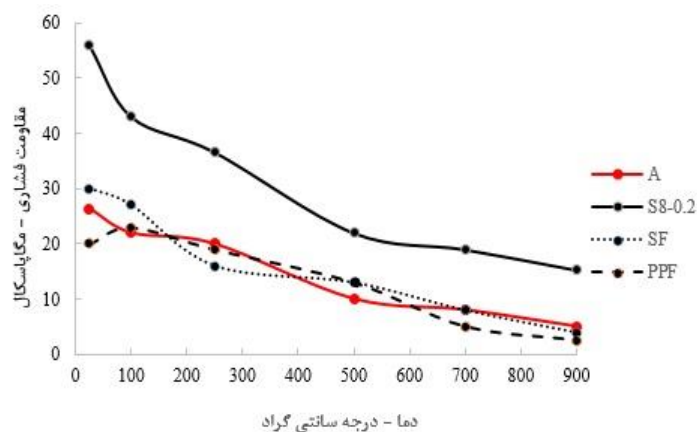
شکل ۱۰: تغییر طول نمونه پس از تست مقاومت فشاری

با توجه به شکل ۱۰ بطور کلی نمونه‌های S8-0.2 بیشترین و نمونه‌ی شاهد (A) کمترین تغییر طول را دارند. علت اینکه نمونه‌های S8-0.2 بیشترین تغییر طول را نسبت به دیگر نمونه‌ها دارند، اینست که این نمونه‌ها به عنوان بهینه‌ترین درصد اختلاط در بتن بوده به همین جهت ارتباط بین سنگدانه‌ها، خمیر سیمان و فنر به بهترین وجه ممکن صورت گرفته است، بنابراین تحت بار فشاری بیشترین انعطاف را از خود نشان داده‌اند. همچنین همانطور که مشاهده می‌شود همه‌ی نمونه‌ها تغییر طول بیشتری نسبت به نمونه‌ی شاهد دارند.

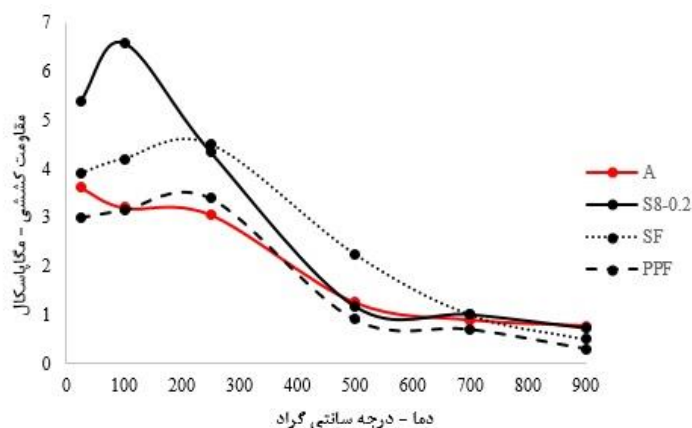
۳-۳-۳- مقایسه با الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن

به منظور ارزیابی و مقایسه‌ی بهتر عملکرد فنر فلزی بازیافتی استفاده شده در این پژوهش، نتایج بدست آمده را با حالتی که الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در بتن استفاده شده باشد مقایسه می‌شود. بدین منظور با توجه به اینکه فنر با قطر ۸ و با درصد اختلاط حجمی ۰/۲ به عنوان بهترین طرح انتخاب شد، تعداد ۷۲ عدد نمونه‌ی دیگر با همین درصد حجمی (۰/۲ درصد) از الیاف فولادی (به طول ۵۰ میلی‌متر

با انتهای قلابدار) و پلی پروپیلن (به طول ۱۲ میلی متر) ساخته شده و در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه با یکدیگر مقایسه می شود. اشکال ۱۱ و ۱۲ مقاومت فشاری و کششی نمونه های حاوی الیاف و فنر را نشان می دهد. لازم به ذکر است که نمادهای SF و PPF به ترتیب نشان دهنده الیاف فولادی و پلی پروپیلن می باشند.



شکل ۱۱: مقایسه مقاومت فشاری الیاف با فنر



شکل ۱۲: مقایسه مقاومت کششی الیاف با فنر

با توجه به شکل ۱۱، مقاومت فشاری فنر بعلت عملکرد سه بعدی آن در بتن حدود ۲ الی ۳ برابر سایر الیافها بوده و در همه دماها از عملکرد بهتری برخوردار است. همچنین مقاومت فشاری الیاف فولادی و پلی پروپیلن نسبت به نمونه ی شاهد در برخی دماها کمی بیشتر و در برخی دماها کمی کمتر است. بنابراین طبق طرح اختلاط مورد استفاده در این تحقیق و با توجه به درصد حجمی بکار رفته از الیاف و فنر می توان گفت که با شناخت صحیح از نحوه ی عملکرد فنرهای فلزی بازیافتی، می توان آن ها را جایگزین بسیار مناسبی برای الیافهای رایج در صنعت ساختمان دانست.

با توجه به شکل ۱۲، مقاومت کششی در الیاف، فنر و نمونه ی شاهد در دماهای بالاتر از ۵۰۰ درجه بسیار نزدیک به هم هستند. اما در دماهای کمتر از ۵۰۰ درجه، در برخی دماها فنر و در برخی دماها الیاف فولادی عملکرد بهتری دارند. با توجه به اینکه الیاف فولادی بنا به طرح اختلاطی که استفاده شود، ممکن است در دماهای بالا دچار انقباض حجمی شود و در نتیجه بتن منهدم شود، لذا می توان گفت استفاده از فنر در بتن از اطمینان بالاتری برخوردار می باشد.

۳-۳-۴- روابط پیشنهادی جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی

با توجه به اینکه مقادیر بدست آمده از این پژوهش، از پیوستگی مناسبی برخوردار بوده، با برازش منحنی‌های درجه دوم برای هر نمودار، روابطی جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی بتن‌های حاوی فنر در جدول ۷ پیشنهاد شده است.

جدول ۷: روابط پیشنهادی جهت پیش بینی مقاومت نمونه‌ها بر حسب دما و درصد فنر بکار رفته

ضریب رگرسیون (R^2)	تابع رگرسیون	نوع آزمایش	
0.98	$F_c = 2E-05T^2 - 0.0401T + 27.093$	A	مقاومت فشاری
0.98	$F_c = 5E-05T^2 - 0.0927 + 55.478$	S8-0.2	
0.99	$F_c = 1E-05T^2 - 0.0376T + 33.436$	S8-0.4	
0.74	$F_c = -2E-05T^2 - 0.0038T + 20.414$	S8-0.6	
0.95	$F_T = 3E-06T^2 - 0.0061T + 3.8949$	A	مقاومت کششی
0.98	$F_T = 7E-06T^2 - 0.0131T + 6.7318$	S8-0.2	
0.99	$F_T = 7E-06T^2 - 0.0106T + 4.5389$	S8-0.4	
0.78	$F_T = 2E-06T^2 - 0.0053T + 3.4851$	S8-0.6	

همانطور که مشاهده می‌شود، 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 نمونه‌ها و T پارامتر مربوط به دما بر حسب درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. روابط فوق برای طرح اختلاط موجود در این مقاله بوده، لذا جهت ارائه‌ی روابط بیشتر در آینده قابل ارائه است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تعداد ۱۴۴ عدد نمونه‌ی استوانه‌ای به ابعاد 20×10 سانتی‌متر بتن حاوی فنر فلزی بازیافتی با درصدهای حجمی $0/2$ ، $0/4$ و $0/6$ و ۷۲ عدد بتن حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن با درصد حجمی $0/2$ و دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تحت عملیات حرارتی قرار گرفته و پس از سرد شدن آزمایش مقاومت فشاری و کششی بر روی آن‌ها انجام شد. در نهایت بهترین فنر به لحاظ عملکرد انتخاب و با الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن مقایسه شد، که نتایج زیر بدست آمد:

- بهترین درصد حجمی فنر در بتن (طرح اختلاطی که در این پژوهش استفاده شد) برابر $0/2$ درصد می‌باشد. همچنین هرچه میزان استفاده از فنر در بتن بیشتر شود از مقاومت فشاری و کششی بتن کاسته می‌شود. بطور کلی بکار بردن فنر با درصدهای $0/2$ ، $0/4$ و $0/6$ حجمی بتن باعث بهبود مقاومت آن نسبت به نمونه‌ی شاهد (نمونه‌ای که بدون فنر باشد) می‌شود.

- وجود فنر در بتن از وقوع ترک‌های عمیق در شرایط پس از حرارت‌های بالا جلوگیری می‌کند و عرض ترک‌ها را تا ۳ برابر کاهش می‌دهد.

- استفاده‌ی $0/2$ درصد حجمی از فنر در بتن، در مقایسه با الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در دماهای بالا مقاومت فشاری به مراتب بیشتری دارد (حدود ۳ برابر) و مقاومت کششی آن نیز تا حد زیادی نزدیک به الیاف فولادی می‌باشد.

- با توجه به اینکه معمولاً استفاده از مواد بازیافتی در بتن، تغییر زیادی در افزایش مقاومت آن را در برابر حرارت ایجاد نمی‌کند، لذا فنر فلزی بازیافتی ساخته شده از گالوانیزه هم به لحاظ فنی و هم به لحاظ اقتصادی، بسیار توجیه‌پذیر است.

- هرچه درصد استفاده از فنر در بتن بهینه‌تر شود، به علت ایجاد ارتباط بهتر بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان، تغییر طول نمونه‌ی بتنی پس از انجام تست مقاومت فشاری افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] Banthia N, Sheng J. (1996). "Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites". *Cem Concr Comp*. 18(4):251-69.
- [2] Bayasi MZ, Zeng J. (1997). "Composite slab construction utilizing carbon fiber reinforced mortar". *ACI Struct J* 94(4):442-6.
- [3] Dwarakanath HV, Nagaraj TS. (1992). "Deformational behavior of fiber-reinforced concrete beams in bending". *J Struct Eng ASCE*;118(10):2691-8.
- [4] Mu B, Li Z, Peng J. (2000). "Short fiber-reinforced cementitious extruded plates with high percentage of slag and different fibers". *Cem Concr Res*. 30(8):1277-82.
- [5] Li VC, Kanda T. (1998). "Engineered cementitious composites for structural applications". *J Mater Civil Eng ASCE* 10(2):66-9.
- [6] Kanda T, Li VC. (1998) "Interface property and apparent strength of a high-strength hydrophilic fiber in cement matrix". *J Mater Civ Eng ASCE*;10(1):5-13.
- [7] Li VC, Horii H, Kabele P, Kanda T, Lim YM. (2000). "Repair and retrofit with engineered cementitious composites". *Eng Fract Mech*. 65(2-3):317-34.
- [8] Limbachiya, M. C., Leelawat, T., & Dhir, R. K. (2000). "Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete". *Materials and Structures*, 33, 574-580.
- [9] Ajdukiewicz, A. Kliszczewicz, A. (2002) "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HP/HPC", *Cement and Concrete Composite*. 24(2): 269-279.
- [10] C.A. Carneiro, P.R.L. Lima, M.B. Leite, R.D.T. Filho, (2008). "Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 46, pp. 886-893.
- [11] Khaloo, A. Khodavirdi, M.M. Hoseini, P. (2010). "Analysis the Building of Self-Compacting Concrete Using Coarse Recycled Grains". *Journals of Concrete Research*. Year Three, No.1, pp. 9-20.
- [12] Sung Bae Kim, Na Hyun Yi, Hyun Young Kim, Jang-Ho Jay Kim, Young-Chul Song. (2010). "Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete", *Cement & Concrete Composites*. 32, 232-240.
- [13] W.C. Choi, H.D. Yun, (2012). "Compressive behaviour of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading", *Engineering Structure*, Vol. 41, pp. 285-293.
- [14] Sadrmomtazi, A. Tahmooreesi, M.H. Nosrati, H. (2014). "Evaluation of Fiber Reinforced Containing Recycled Concrete Aggregates with Non-Destructive Methods". *Journal of Concrete Technology*. (6), Vol. 1, pp. 73-86.
- [15] Ahmadi, M. Hassani, A. Soleymani, M. (2015). "Role of Recycled Steel Fibers from Tires on Concrete Containing Recycled Aggregate from Building Waste". *Journal of Concrete Technology*. (7), Vol. 2, pp. 57-68
- [16] M. Mastali, A. Dalvand, A. Sattarifard, (2016). "The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages". *Composites*. DOI: 10.1016/j.compositesb.
- [17] Shirazi Bidabadi, M. Akbari, M. (2017). "Evaluation of Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Recycled Concrete: The Effect of Dimensions and Amount of Recycled Aggregate, Type and Amount of Fibers". *Journal of Structural engineering and construction*. Fourth Year, No.1, pp. 138-150.
- [18] Gao, Danying. Yan, Dongming. Li, Xiangyu. (2012) "Splitting strength of GGBFS concrete incorporating with steel fiber and polypropylene fiber after exposure to elevated temperatures", *Fire Safety Journal*, Volume 54, pages 67-73.
- [19] Park, Y., Abolmaali, A., Mohammadagha, M. and Lee, S. (2014). "Flexural Characteristics of Rubberized Hybrid Concrete Reinforced with Steel and Synthetic Fibers", *Advances in Civil Engineering Materials (ASTM)*, 3(1), pp. 495-508.
- [20] Park, Y., Abolmaali, A., Mohammadagha, M. and Lee, S. (2015). "Structural performance of dry-cast rubberized concrete pipes with steel and synthetic fibers", *Construction and Building Materials*, 77, pp. 218-226.
- [21] Vahid Afroughsabet a, Togay Ozbakkaloglu, (2015). "Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers", *Construction and Building Materials*, 94, 73-82.
- [22] Serrano, Ruben. Cobo, Alfonso. Prieto, Maria Isabel. Gonzalez, Maria de las Nieves. (2016). "Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers". *Construction and Building Materials*. Volume 122, pages 302-309.
- [23] Yermak, N. Pliya, P. Beaucour, A-L. Simon, A. Noumowe, A. (2017). "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.
- [24] Gholhaki, M. Pachideh, G.H. 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.
- [25] INSO581, (2015). concrete-making curing concrete test specimens in the laboratory- code of practice, 2nd. revision.
- [26] NF EN 12390-13 AFNOR, (2013). Testing hardened concrete, in: Determination of Secant Modulus of Elasticity in Compression, pages 18-455.