

# Compressive Strength of Fibrous Concrete Containing Crumb Rubber Under Fire

*Shayan Fakhrian*<sup>1\*</sup>, *Shayan Mashhadi*<sup>2</sup>, *Hamid Behbahani*<sup>3</sup>

*M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Maziar University, Royan, Iran*

*M.Sc. Graduate, Department of Petroleum Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran*

*Professor, Department of Road and Transportation, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran*

## **Abstract**

Using waste rubber materials such as crumb tires in the concrete mix is regarded as one of the efficient ways to recycle these waste materials. Given that the presence of waste aggregate in concrete degrades its properties, adding fibers to the concrete mix has been shown to improve mechanical performance. In this study, the compressive strength of the concrete reinforced with steel fibers and containing recycled crumb rubber aggregate was evaluated after exposure to fire. Here, a total of nine mix designs were prepared, with the test variables being the volume percentage of tire rubber (0, 5, and 10%), the volume fraction of steel fibers (0, 0.5, and 1%), and temperature (20, 200, 400, and 600 °C). Moreover, the compressive strength values were compared with those predicted by the ACI 216 and EN 1994-1-2 codes. The results showed that adding steel fibers together with tire rubber aggregate in the concrete mix led to a decrease in the compressive strength of the heated and unheated concrete specimens. Also, as temperature increased, the compressive strength of all the concrete specimens saw a considerable reduction. In this regard, after exposure to 600 °C, the compressive strength loss rate was higher compared to that after exposure to other temperatures, such that the compressive strength of the reference specimen and those containing tire aggregate and fibers decreased by 59.5-76.9% relative to that of the corresponding specimens at ambient temperature. ACI 216 and EN 1994-1-2 provide a relatively good estimation for the normalized compressive strength of all the concrete specimens containing tire rubber and steel fibers at 200 and 400 °C; however, they give an overestimation for the reference concrete. Besides, the above codes give a relatively good prediction for the normalized compressive strength of the specimens exposed to 600 °C (except for specimens ST0TR10, ST0.5TR10, and ST1.0TR5).

**Keywords:** Compressive Strength, Steel Fiber, Crumb Rubber, Fire Resistance.

# مقاومت فشاری بتن الیافی حاوی خرده لاستیک تحت آتش

دریافت مقاله: ۱۳۹۹-۰۲-۲۵

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹-۰۴-۱۴

شایان فخریان\*

دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازیار، رویان، ایران

شایان مشهدی

دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

حمید بهبهانی

استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

## چکیده

استفاده از ضایعات لاستیکی از جمله خرده لاستیک در مخلوط بتن به عنوان یکی از روش های موثر جهت کاهش مواد زائد می باشد. علاوه بر این، امروزه استفاده از مواد ضایعاتی به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه های طبیعی در بتن، راه حلی موثر برای رفع مشکلات زیست محیطی است که با توجه به تنزل خصوصیات بتن حاصل ناشی از حضور مواد ضایعاتی، افزودن الیاف به مخلوط بتن، می تواند عملکرد مکانیکی آن را بهبود بخشد. از این رو در این مطالعه، مقاومت فشاری بتن مسلح شده به الیاف فولادی حاوی خرده لاستیک بازیافتی پس از قرارگیری در دماهای بالا به طور آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مجموع ۹ طرح مخلوط در طول آزمایش ساخته شد و متغیرهای آزمایش شامل درصد حجمی لاستیک تایر بازیافتی جایگزین ماسه طبیعی (۰، ۵ و ۱۰٪)، درصد حجمی الیاف فولادی (۰، ۰،۵ و ۱٪)، و دمای آتش (۲۵، ۴۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه) می باشند. علاوه بر این، مقاومت فشاری با مقادیر پیش بینی آیین نامه های ACI 216، EN 1994-1-2 مقایسه شدند. نتایج نشان می دهد که افزودن الیاف فولادی به حجم بتن و اضافه کردن لاستیک تایر جایگزین ماسه به مخلوط بتن منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه های بتنی حرارت دیده و حرارت ندیده می شود. همچنین، با افزایش درجه حرارت، مقاومت فشاری کلیه نمونه های بتنی با یک افت قابل توجهی رو به رو شده است. از این رو، در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد، نرخ افت مقاومت فشاری نمونه ها در مقایسه با سایر دماها بیشتر بود به طوری که مقاومت فشاری نمونه مرجع و نمونه های بتنی حاوی تایر و الیاف نسبت به مقاومت نمونه متناظر در دمای محیط، با کاهش مقاومت در محدوده ۵۹،۵ - ۷۶،۹٪ رو به رو شدند. همچنین، پیش بینی آیین نامه ها، نتایج مقاومت فشاری بتن حرارت دیده را اندکی دست بالا تخمین می زنند.

کلمات کلیدی: مقاومت فشاری، الیاف فولادی، خرده لاستیک، مقاومت برابر آتش.

بتن ساده به دلیل مزایایی مانند هزینه کم و در دسترس همه بودن، به طور گسترده در ساختار اصلی بیشتر سازه‌ها استفاده می‌شود. اما در کنار این مزایا، دارای معایبی از جمله رفتار شکننده، مقاومت کششی کم و ظرفیت کرنش اندک می‌باشد. با پیشرفت تکنولوژی و توسعه علم مهندسی سازه، تقاضا برای ساخت انواع جدیدی از بتن‌ها که باید دارای خصوصیات بهبود یافته‌ای باشند، افزایش یافت. یکی از این نوع بتن‌ها، بتن الیافی می‌باشد که نسبت به بتن معمولی دارای رفتار شکل پذیرتر با کنترل رشد و انتشار ترک و قابلیت باربری بعد از ترک خوردگی می‌باشد [۱]. امروزه، ثابت شده است که استفاده از الیاف در مخلوط بتن علاوه بر بهبود خواص مکانیکی از قبیل مقاومت فشاری، کششی و خمشی، رفتار شکننده بتن را کاهش داده و رشد و انتشار ترک‌ها را از طریق مکانیزم پل انداختگی الیاف کنترل می‌کند [۲].

با پیشرفت صنعت و تکنولوژی و رشد جمعیت انسانی، تولید زباله‌های جامد جهانی در حال تسریع است. در حال حاضر، دفع لاستیک‌های استفاده شده به دلیل عدم تجزیه پذیری آنها یک چالش جهانی است [۳]. در بیشتر کشورها لاستیک تایر به عنوان مواد ضایعاتی می‌باشد که به دلیل افزایش استفاده از اتومبیل به عنوان وسیله اصلی حمل و نقل باعث رشد چشم گیر تولید تایر

شده است که بخش بزرگی از زباله‌های شهری را به خود اختصاص داده‌اند. بطور کلی، سه روش برای دفع چنین مواد زائدی در طبیعت مثل دفن، سوزاندن و بازیافت وجود دارد، که بازیافت تایرهای فرسوده به یک راه حل بالقوه برای مدیریت چنین پسماند تبدیل شده است [۴]. در این بین محققان در زمینه بازیافت مواد زائد و استفاده آنها در مهندسی عمران، تلاش‌های زیادی انجام داده‌اند. یکی از روش‌های موثر جهت بازیافت ضایعات لاستیکی از جمله تایرها، استفاده از آنها در بتن می‌باشد که علاوه بر آن که مانع برگرداندن مستقیم ضایعات تایر به محیط زیست، می‌شود به عنوان یک جایگزین برای سنگدانه‌های طبیعی در مخلوط بتن به حساب می‌آید. استفاده از لاستیک تایر به عنوان مواد بازیافتی و جایگزین سنگدانه‌های طبیعی در بتن باعث بهبود برخی از خواص مکانیکی و فیزیکی بتن از جمله کاهش چگالی، افزایش مقاومت در برابر ضربه، افزایش جذب انرژی می‌گردد [۴]. هر چند، بر روی برخی از خواص مکانیکی بتن مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی و سختی اثرات منفی دارد [۵،۶]. علاوه بر این، برای بهبود خصوصیات افت کرده بتن ناشی از افزودن لاستیک تایر بازیافتی، افزودن الیاف به مخلوط بتن می‌تواند موثر واقع شود.

امروزه به دلیل قرار گرفتن سازه‌های بتنی در برابر آتش سوزی، طراحی سازه‌ها بر مبنای عملکرد مقاومتی در معرض دماهای بالا مورد توجه قرار گرفتند. بنابراین، برای بررسی نحوه پاسخ سازه در دماهای بالا، ابتدا لازم است نحوه تغییر مشخصات مصالح با افزایش دما مشخص گردد. از جمله خصوصیات مکانیکی بتن متاثر از حرارت بالا، مقاومت فشاری است که تنزل آنها ناشی از ایجاد تنش‌های داخلی، ایجاد ریز ترک‌ها و تجزیه ترکیبات شیمیایی خمیر سیمان در طی فرایند حرارت دهی می‌باشد [۷،۸].

گوا و همکاران [۹] در مطالعه خود مقاومت فشاری بتن سازه‌ای حاوی سنگدانه‌ی بازیافتی، لاستیک تایر و الیاف فولادی در معرض دماهای بالا را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آنها نشان داد که مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی

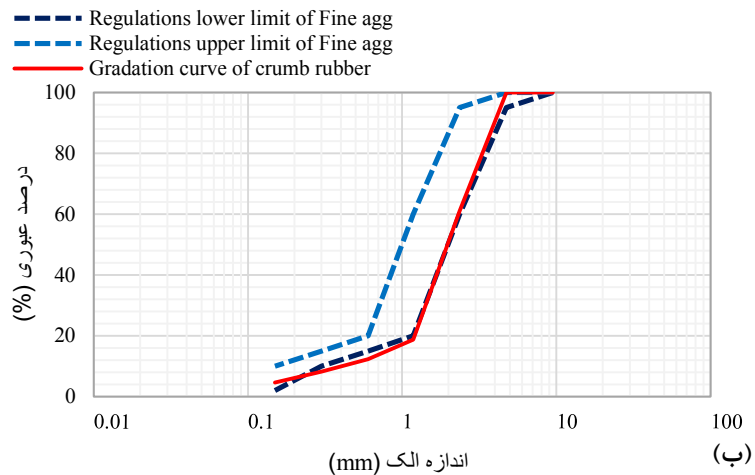
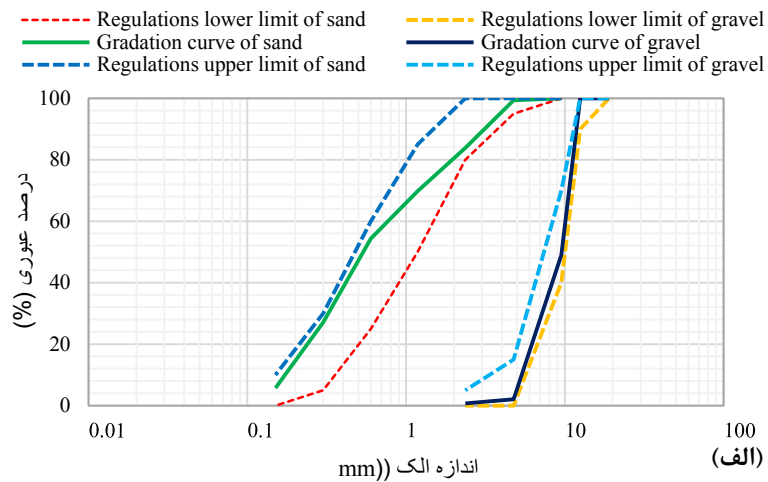
بعد از قرار گرفتن در دماهای بالا کاهش یافت، و نیز جایگزینی بالاتر ریزدانه‌های لاستیک منجر به مقاومت فشاری و سختی کمتر شد. با این وجود، تایر بازیافتی به طور قابل توجهی ظرفیت جذب انرژی و مقاومت در برابر پوسته شدن ناگهانی را بهبود دادند. علاوه بر تحقیقات انجام شده توسط محققین ذکر شده و سایر تحقیقات در این زمینه [۱۰-۱۵] به ندرت عملکرد بتن الیافی حاوی خرده لاستیک مورد بررسی قرار گرفته است.

این تحقیق با هدف بررسی مقاومت فشاری فشاری بتن حاوی خرده لاستیک و الیاف فولادی پس از قرار گرفتن در معرض آتش، انجام شد. متغیرهای آزمایش شامل درصد حجمی خرده لاستیک جایگزین ماسه، درصد حجمی الیاف فولادی، و دمای هدف می‌باشند. از آنجایی که لاستیک تایر بازیافتی در مخلوط بتن عمدتاً موجب کاهش دوام و مقاومت بتن می‌شود [۵،۶]، از الیاف فولادی به منظور بهبود این خواص استفاده شد. برای این هدف، پارامتر موثر بر مقاومت فشاری بتن الیافی حاوی تایر خرده تحت درجه حرارت‌های ۲۵، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، مقاومت فشاری با مقادیر پیش بینی آیین نامه‌های EN 1994-1-2 و ACI 216 مقایسه شدند.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح و نمونه‌ها

در این مطالعه، از سیمان پرتلند تیپ ۱، ماسه شکسته به عنوان ریزدانه با مدول نرمی، چگالی و جذب آب به ترتیب ۲،۹، ۲،۴۳ و ۲،۲٪ و سنگ شکسته به عنوان درشت‌دانه با چگالی، جذب آب و حداکثر اندازه اسمی به ترتیب ۲،۵۳، ۰،۸٪ و ۱۲،۵ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، از خرده لاستیک به عنوان جایگزین ریزدانه با چگالی ۰،۸۹ و حداکثر اندازه اسمی ۴،۷۵ میلی‌متر و بدون جذب آب در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. برای تایر مصرف شده، ۴۷ درصد وزنی مصالح بین الک‌های ۴،۷۵ و ۲،۳۶ و ۳۶ درصد آنها بین الک‌های ۲،۳۶ و ۱،۱۸ قرار دارند و مابقی دانه‌ها ریزتر بودند. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی در شکل ۱ نشان داده شده است. الیاف فولادی با طول ۳۰ میلی‌متر و نسبت ظاهری ۶۰ در ۳ درصد حجمی مختلف ۰،۵، ۰ و ۱٪ استفاده شد. خواص مکانیکی و فیزیکی الیاف فولادی در جدول ۱ ارائه شده است. تصاویر خرده لاستیک و الیاف فولادی در شکل ۲ نشان داده شده است. در این تحقیق، از یک فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر با نام تجاری ناب با محتوای جامد ۴۲٪ و چگالی ۱،۰۹ در تمام مخلوط‌های بتن مورد استفاده قرار گرفت. فوق روان کننده برای کمک به پراکندگی الیاف در بتن، و رسیدن به کارایی خوب بتن می‌باشد.



شکل ۱- دانه بندی (الف) سنگدانه های طبیعی و (ب) خرده لاستیک



شکل ۲- خرده لاستیک و الیاف فولادی مورد استفاده

جدول ۱- خواص مکانیکی و فیزیکی الیاف فولادی

نوع الیاف	شکل الیاف	طول (mm)	قطر (mm)	نسبت ظاهری	چگالی ( $g/cm^3$ )	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	دمای ذوب ( $^{\circ}C$ )
فولادی	دو سر قلاب	۳۰	۰,۵	۶۰	۷,۸۵	۱۱۰۰	۲۰۰	۱۵۱۶

در این تحقیق، به طور کلی ۳۶ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر ساخته شدند تا مقاومت فشاری بتن الیافی حاوی لاستیک تایر بازیافتی پس از قرارگیری در دماهای بالا مورد بررسی قرار گیرد. ضمناً، از هر گروه آزمایش، ۳ نمونه مشابه جهت کاهش خطا انتخاب شده و میانگین نتایج آنها گزارش شدند.

## ۲-۲- نسبت مخلوطها

نسبت مخلوطها برای بتن حاوی لاستیک تایر و الیاف فولادی با استفاده از ACI 211.4R [۱۶] برای حجم یک متر مکعب در جدول ۲ ارائه شده است. در این مطالعه، ۹ سری طرح مخلوط با نسبت آب به مواد سیمانی ثابت و برابر با ۰٫۳۵، برای تمام طرح مخلوطها در نظر گرفته شد. خرده لاستیک به عنوان مصالح بازیافتی بر اساس جایگزینی درصد حجمی ماسه در مخلوطهای بتن مورد استفاده قرار گرفت. نسبت‌های جایگزینی حجمی لاستیک به صورت ۰، ۵ و ۱۰٪ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که مقدار فوق روان کننده مصرفی به صورت درصد وزنی سیمان می‌باشد و مقدار آب داخل فوق روان کننده نیز در نسبت آب به سیمان لحاظ شده است. لازم به ذکر است در این مطالعه، مقاومت فشاری ۶۰ مگاپاسکال به عنوان مقاومت هدف در نظر گرفته شد. برای نامگذاری نمونه‌ها ST و TR، به ترتیب نشان دهنده حضور الیاف فولادی و لاستیک تایر در مخلوط بتن و عدد پس از آنها بیانگر درصد حجمی آنها است. به عنوان مثال ST0.5TR5 به معنی نمونه بتنی حاوی لاستیک تایر بازیافتی به میزان ۵٪ جایگزینی با حجم ماسه به همراه ۰٫۵٪ حجمی الیاف فولادی می‌باشد.

## ۲-۳- نحوه ساخت و آماده‌سازی نمونه‌ها

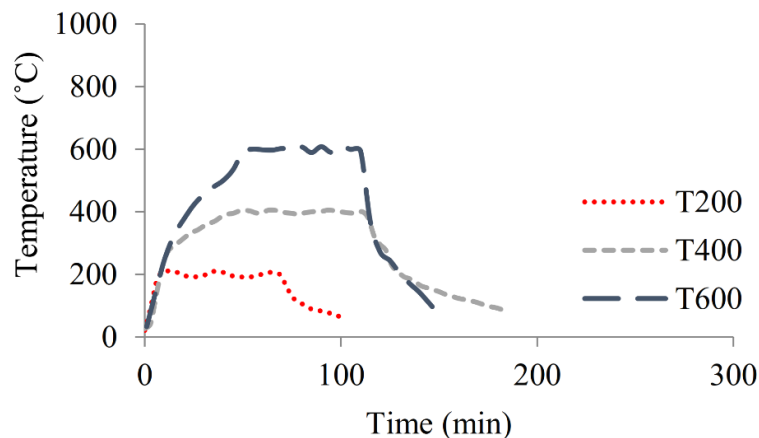
برای ساخت بتن حاوی الیاف و خرده لاستیک، ابتدا مصالح سنگی شامل شن و ماسه همراه با لاستیک تایر در درون میکسر به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شد. سپس سیمان اضافه شد تا به مدت ۱ دقیقه درون میکسر مخلوط شد. پس از آن مخلوطی از فوق روان کننده و آب که شامل آب لازم برای رساندن رطوبت سنگدانه‌ها به وضعیت اشباع با سطح خشک نیز می‌باشد، به آرامی درون میکسر ریخته شد و تا مدت ۲ دقیقه هم زده شد. نهایتاً، الیاف مورد استفاده به مخلوط اضافه شد و تا ۲ دقیقه دیگر در داخل میکسر هم خورد. پس از اختلاط بتن، برای تعیین کارایی بتن تازه، آزمایش اسلامپ مخلوطهای بتنی مطابق با ASTM C143 [۱۷] اندازه گیری شد که مقدار آن در جدول ۲ ذکر شده است. پس از ریختن بتن تازه در قالب، به منظور تراکم و کاهش مقدار حباب‌های هوا از میز لرزه استفاده شد. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب بیرون آورده شده و در مخزن آب آهک به مدت حداقل ۲۸ روز در دمای استاندارد ۲۰ درجه سانتی گراد، اشباع و عمل آوری شدند.

جدول ۲- نسبت طرح مخلوطها

شماره	شناسه طرح	آب	سیمان	لاستیک	ماسه	شن	الیاف	فوق روان کننده	اسلامپ
		$(kg/m^3)$						$(mm)$	
۱	ST0TR0	۱۹۲٫۵	۴۹۵	۰	۶۱۳٫۸	۹۰٫۲	۰	۰٫۶۸	۸٫۹
۲	ST0TR5	۱۹۲٫۵	۴۹۵	۱۰٫۹	۵۸۳٫۳	۹۰٫۲	۰	۰٫۷۴	۸٫۶
۳	ST0TR10	۱۹۲٫۵	۴۹۵	۲۱٫۸	۵۵۲٫۷	۹۰٫۲	۰	۰٫۷۷	۸٫۱
۴	ST0.5TR0	۱۹۲٫۵	۴۹۵	۰	۶۱۳٫۸	۹۰٫۲	۳۹٫۲	۰٫۸۴	۸٫۷
۵	ST0.5TR5	۱۹۲٫۵	۴۹۵	۱۰٫۹	۵۸۳٫۳	۹۰٫۲	۳۹٫۲	۰٫۸۸	۸٫۰
۶	ST0.5TR10	۱۹۲٫۵	۴۹۵	۲۱٫۸	۵۵۲٫۷	۹۰٫۲	۳۹٫۲	۰٫۹۰	۹٫۳
۷	ST1.0TR0	۱۹۲٫۵	۴۹۵	۰	۶۱۳٫۸	۹۰٫۲	۷۸٫۵	۰٫۹۱	۸٫۵
۸	ST1.0TR5	۱۹۲٫۵	۴۹۵	۱۰٫۹	۵۸۳٫۳	۹۰٫۲	۷۸٫۵	۰٫۹۴	۸٫۹
۹	ST1.0TR10	۱۹۲٫۵	۴۹۵	۲۱٫۸	۵۵۲٫۷	۹۰٫۲	۷۸٫۵	۰٫۹۷	۹٫۳

#### ۴-۲- دستورالعمل آزمایشگاهی

در این مطالعه ۴ دسته حرارتی شامل ۲۵، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد بر هر گروه از نمونه‌های بتنی اعمال شد که دمای ۲۵ درجه سانتیگراد به عنوان دمای محیط و بقیه به عنوان دماهای بالا در نظر گرفته شدند. کلیه نمونه‌ها تحت حرارت‌های ۲۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد، قبل از رسیدن به دماهای هدف تحت دمای تحت دمای ۶۰ درجه (برای خشک کردن و از بین بردن رطوبت سطحی نمونه‌ها) به مدت ۲۴ ساعت مطابق ISO 834 [۱۸] قرار گرفتند. نمونه‌های تحت حرارت‌های بالا در یک کوره الکتریکی قرار گرفتند و پس از رسیدن دمای نمونه‌ها به دمای هدف، به مدت ۱ ساعت در کوره در آن دما باقی ماندند تا دمای مرکز نمونه‌ها با دمای محیط کوره کمترین اختلاف را داشته باشند. دمای داخل کوره توسط ترموکوپل‌های داخلی قرائت شده و نمونه‌ها بتنی پس از اتمام بارگذاری حرارتی تا رسیدن به دمای محیط در کوره باقی ماندند. جهت اطمینان از رسیدن دمای داخلی نمونه‌ها به دمای محیط پس از بارگذاری حرارتی، کلیه تست‌های آزمایشگاهی ۷ روز پس از اعمال حرارت به نمونه‌ها انجام شدند. پس از رسیدن نمونه‌ها بتنی به دمای محیط عملیات بارگذاری فشاری در دمای محیط اعمال شد. رژیم گرمایی برای نمونه‌های بتنی تحت حرارت در شکل ۳ نشان داده شده است. آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی پس از حداقل ۲۸ روز از مراقبت و نگهداری بر اساس استاندارد ASTM C39 [۱۹] انجام شد. سرعت بارگذاری در آزمایش فشاری نمونه‌های بتن استوانه‌ای  $100 \times 200$  میلیمتر برای نمونه‌های تحت دمای محیط برابر با  $1 \frac{mm}{min}$  و برای نمونه‌های تحت حرارت برابر  $0.5 \frac{mm}{min}$  انتخاب شد. همچنین، سطوح بالا و پایین هر یک از نمونه‌ها، تخته‌های نازک چوبی قرار داده شد تا بار فشاری بطور یکنواخت بر کل سطح انتهایی اعمال شود و از تمرکز تنش ناشی از ناهمواری سطح، جلوگیری شود.



شکل ۳- رژیم گرمایی داخل کوره الکتریکی برای نمونه‌های بتنی

#### ۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های بتنی در جدول ۳ و در شکل ۴ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های حرارت ندیده بین ۳۵،۳ تا ۵۷،۱ مگاپاسکال می‌باشد. با حجم ثابت الیاف فولادی در بتن از شکل ۴-الف می‌توان مشاهده کرد که مقاومت فشاری بتن با جایگزینی لاستیک تایر به جای ماسه طبیعی، کاهش پیدا کرده است. علت این کاهش این است که ذرات تایر نرم‌تر و انعطاف پذیرتر از ریزدانه‌های طبیعی می‌باشد. از این رو، در نمونه‌های بتنی حاوی لاستیک تایر، کاهش چسبندگی بین ذرات نرم تایر و خمیر سیمان باعث عدم پیوستگی بین آنها و ضعف لایه مرزی شده که منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن می‌گردد. علاوه بر این، میزان آب ملات اطراف ذرات لاستیک بدلیل عدم جذب آب توسط این ذرات، افزایش یافته که خود موجب ضعف بیشتر لایه مرزی و افت بالاتر مقاومت فشاری می‌شود. از شکل ۴-ب همچنین مشاهده می‌-



شود که افزودن الیاف فولادی به بتن حاوی تایر و فاقد تایر باعث کاهش مقاومت فشاری بتن نسبت به بتن فاقد الیاف شده است. همچنین، نمونه‌های بتنی ST0.5TR10، ST0.5TR5، ST0.5TR0، ST0TR10، ST0TR5، ST1.0TR10، ST1.0TR5، ST1.0TR0 به ترتیب با یک کاهش مقاومت ۱۹، ۲۸، ۵، ۳۳، ۳، ۳۸، ۲، ۱۹، ۳، ۳۰، ۲ و ۳۱، ۸٪ نسبت به نمونه مرجع (ST0TR0) در دمای محیط، رو به رو شدند.

جدول ۳- مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حرارت دیده و حرارت ندیده

$\Delta f_{600}/f_{20}^a$		$\Delta f_{400}/f_{20}^a$		$\Delta f_{200}/f_{20}^a$		$f_{20}$		شناسه طرح
(۰،۰)	۵۹،۵	(۰،۰)	۳۱،۶	(۰،۰)	۲۰،۳	(۰،۰)	۵۷،۱	ST0TR0
(۲۱،۹)	۶۱،۰	(۸،۵)	۲۲،۶	(۳،۵)	۵،۰	(۱۹،۰)	۴۶،۲	ST0TR5
(۵۴،۳)	۷۴،۱	(۱۷،۶)	۲۱،۰	(۱۲،۲)	۲،۱	(۲۸،۵)	۴۰،۸	ST0TR10
(۱۰،۵)	۶۱،۷	(۲،۷)	۲۹،۵	(۶،۴)	۱۰،۳	(۵،۵)	۵۴،۰	ST0.5TR0
(۳۸،۰)	۶۲،۳	(۱۸،۸)	۱۶،۵	(۲۳،۱)	۸،۱	(۳۳،۳)	۳۸،۱	ST0.5TR5
(۶۴،۶)	۷۶،۹	(۲۵،۱)	۱۷،۱	(۲۵،۹)	۴،۵	(۳۸،۲)	۳۵،۳	ST0.5TR10
(۲۸،۷)	۶۴،۳	(۱،۶)	۱۶،۵	(۰،۷)	۲،۰	(۱۹،۳)	۴۶،۱	ST1.0TR0
(۴۶،۲)	۶۸،۸	(۱۲،۴)	۱۴،۱	(۲۲،۸)	۱۱،۸	(۳۰،۲)	۳۹،۸	ST1.0TR5
(۴۱،۱)	۶۵،۱	(۱۹،۵)	۱۹،۲	(۱۸،۶)	۴،۹	(۳۱،۸)	۳۸،۹	ST1.0TR10

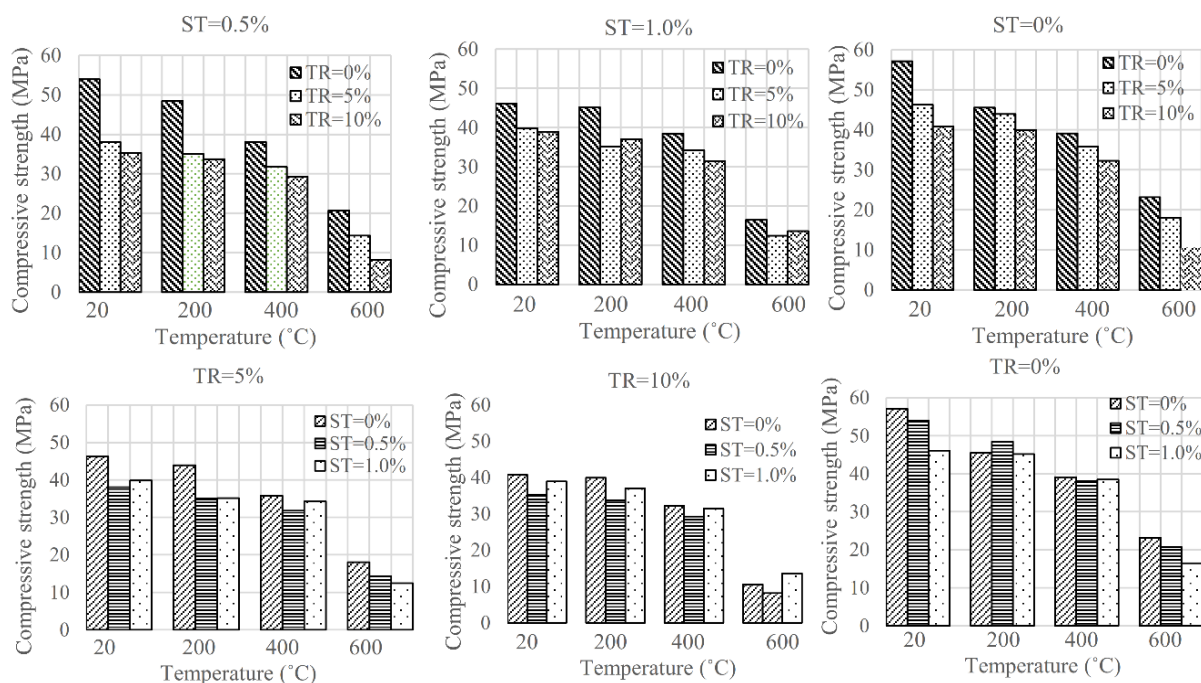
نکته: نماد  $f$  بیانگر مقاومت فشاری بتن است. نماد  $\Delta f$  بیانگر تفاضل مقدار مقاومت فشاری از مقدار مقاومت فشاری مرجع است به عنوان مثال  $\Delta f_{600}$  بیانگر  $f_{600} - f_{20}$  می‌باشد. نماد  $20^a$  بیانگر بتن مرجع است به عنوان مثال  $\Delta f_{600}/f_{20}^a$  بیانگر نسبت مقاومت فشاری بتن در دمای  $600^\circ\text{C}$  به مقاومت فشاری بتن مرجع می‌باشد. اعداد داخل پرانتز بیانگر میزان درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به بتن ST0TR0 در همان دما می‌باشد.

با افزایش درجه حرارت، مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در گروه‌های مختلف، کاهش قابل توجهی پیدا کرد. در دمای  $200^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد، مقاومت فشاری بتن مرجع (ST0TR0)  $20,3\%$  نسبت به مقاومت نمونه متناظر در دمای محیط کاهش یافت. همچنین، نمونه‌های بتنی ST0.5TR10، ST1.0TR0، ST1.0TR5، ST1.0TR10 به ترتیب با یک کاهش مقاومت ۵، ۲، ۱، ۳، ۱۰، ۱، ۸، ۴، ۵، ۲، ۱۱، ۸ و ۴، ۹ نسبت به مقاومت نمونه متناظر در دمای محیط روبرو شدند. نتایج نشان دهنده افت کمتر مقاومت در این دما نسبت به دمای  $20^\circ\text{C}$  درجه برای نمونه‌های بتنی حاوی تایر در مقایسه با بتن معمولی می‌باشد. به طور کلی افت مقاومت فشاری نمونه‌ها در این دما می‌تواند ناشی از خروج آب محفوظ شده شیمیایی در ژل سیلیکات کلسیم هیدراته در طی فرایند حرارت دهی باشد که منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود [۷].

علاوه بر این شکل ۴-الف نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بتن با جایگزینی لاستیک تایر به جای ماسه طبیعی، کاهش پیدا کرده است. در بتن‌های حاوی ۰،۵ و ۱ درصد الیاف فولادی در مقایسه با بتن فاقد الیاف، کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها حاوی لاستیک تایر بازیافتی نسبت به نمونه بدون تایر بازیافتی بیشتر می‌باشد. همچنین از شکل ۴-ب می‌توان دریافت که افزودن الیاف فولادی به بتن حاوی تایر و فاقد تایر باعث کاهش مقاومت فشاری بتن نسبت به بتن فاقد الیاف شده است؛ هر چند افزودن ۰،۵ درصد الیاف فولادی در بتن فاقد تایر بازیافتی باعث افزایش مقاومت فشاری به میزان  $6,4\%$  شده است. با افزایش دما و رسیدن آن به  $400^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد، بتن مرجع (ST0TR0) با یک افت مقاومت  $31,6\%$  نسبت به مقاومت نمونه متناظر در دمای محیط مواجه شد. علت این کاهش، تجزیه و تبخیر آب شیمیایی موجود در سیلیکات کلسیم هیدراته در طی فرایند حرارت دهی می‌باشد که منجر به ایجاد ریز ترک‌های سطحی و تنش‌های داخلی و در نهایت تنزل مقاومت می‌شود [۷، ۲۰]. همچنین با توجه



به جدول ۳ نمونه‌های بتنی ST1.0TR0, ST0.5TR10, ST0.5TR5, ST0.5TR0, ST0TR10, ST0TR5 به ترتیب با یک کاهش مقاومت ۲۲,۶، ۲۱، ۲۹,۵، ۱۶,۵، ۱۷,۱، ۱۶,۵، ۱۴,۱ و ۱۹,۲ نسبت به مقاومت نمونه متناظر در دمای محیط روبرو شدند.

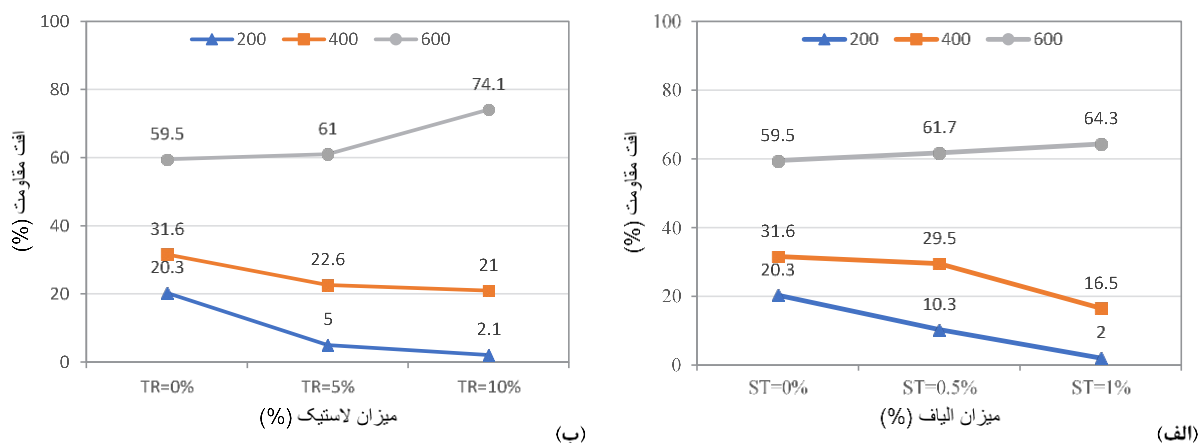


شکل ۴- مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی بر حسب دما؛ الف) متغیر لاستیک، ب) متغیر الیاف

علاوه بر این شکل ۴-الف نشان می‌دهد که افزودن لاستیک تایر بازیافتی به جای ماسه در بتن، مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی نسبت به نمونه بتنی فاقد تایر کاهش یافته است که علت اصلی این افت، تجزیه شدن لاستیک تایر در این دما می‌باشد. با توجه به اینکه نقطه تنزل یا شروع دمای تجزیه برای لاستیک تایر بازیافتی حدوداً ۳۶۰ درجه سانتیگراد بدست آمده است، افت جرم لاستیک تایر در دمای ۴۰۰ درجه عامل مهم دیگری برای افت مقاومت نمونه بتنی حرارت دیده می‌باشد. شکل ۴-ب نشان می‌دهد که افزودن الیاف فولادی به بتن حاوی تایر و فاقد تایر باعث کاهش غیر قابل توجه (ناچیز) مقاومت فشاری بتن نسبت به بتن فاقد الیاف شده است. علاوه بر این، از شکل ۴-ب می‌توان دریافت که افزودن ۱٪ الیاف فولادی نسبت به ۰,۵٪ الیاف به بتن باعث افت کمتر مقاومت فشاری شده است.

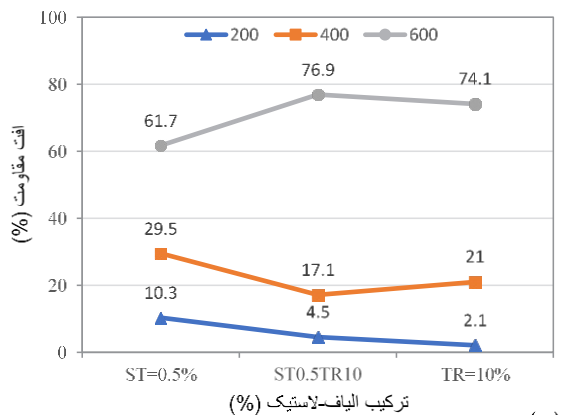
در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد، نرخ افت مقاومت فشاری نمونه‌ها در مقایسه با سایر دماها بیشتر بود به طوری که مقاومت فشاری نمونه مرجع با کاهش ۵۹,۵٪ نسبت به نمونه متناظر در دمای محیط رو به رو شد. همچنین، نمونه‌های بتنی ST1.0TR5, ST1.0TR0, ST0.5TR10, ST0.5TR5, ST0.5TR0, ST0TR10, ST0TR5 به ترتیب با کاهش مقاومت ۲۱,۹، ۵۴,۳، ۱۰,۵، ۳۸، ۶۴,۶، ۲۸,۷، ۴۶,۲ و ۴۱,۱ نسبت به نمونه مرجع (ST0TR0) در دمای ۶۰۰ درجه، مواجه شدند. علت افت شدید مقاومت نمونه در این دما، از یک طرف افت جرم قابل توجه لاستیک تایر بازیافتی می‌باشد که باعث تخلخل و افزایش انتقال حرارت بیشتر در نمونه شده و در نتیجه منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه حاوی تایر بازیافتی می‌شود و از طرف دیگر به علت تجزیه و تخییر آب شیمیایی موجود در کریستال‌های کلسیم هیدروکسید (CH) می‌باشد که به پدیده دهیدراسیون معروف است [۷,۲۱]. در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد، شکل ۴-الف نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بتن با جایگزینی لاستیک تایر به جای ماسه طبیعی، کاهش پیدا کرده است. همچنین از شکل ۴-ب می‌توان دریافت که افزودن الیاف فولادی

به بتن حاوی تایر و فاقد تایر باعث کاهش مقاومت فشاری بتن نسبت به بتن فاقد الیاف شده است؛ هر چند افزودن ۱ درصد الیاف فولادی در بتن فاقد تایر باز یافتی ۲۸,۳٪ شده است.

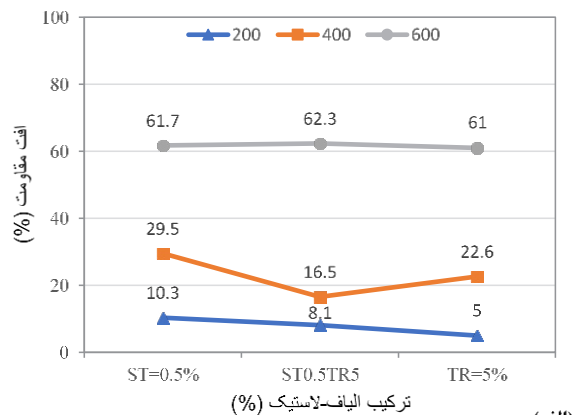


**شکل ۵- الف) افت مقاومت در اثر حرارت؛ الف) متغیر الیاف، ب) متغیر لاستیک**

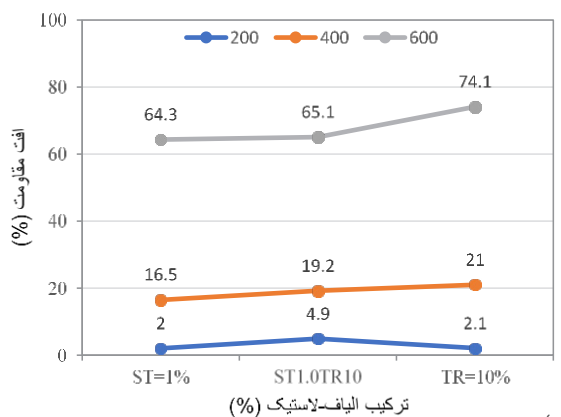
افت مقاومت فشاری بتن در اثر حرارت برای نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و خرده لاستیک (در مقایسه با نمونه شاهد) در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل ۵- الف افت مقاومت در اثر حرارت برای دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد نسبت به دمای محیط در نمونه‌های حاوی ۰,۵، ۰ و ۱ درصد الیاف فولادی را نشان می‌دهد. این شکل بیانگر آن است که با افزایش میزان الیاف، مقدار افت مقاومت فشاری در دماهای ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه کاهش یافته است. برای مثال با اضافه کردن ۱ درصد الیاف فولادی، افت مقاومت از ۲۰,۳ درصد در نمونه شاهد به ۲ درصد (در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد) تقلیل می‌یابد. البته در دمای ۶۰۰ درجه تفاوت چشمگیری بین نمونه شاهد و نمونه‌های الیافی وجود ندارد (حدود ۵ درصد). در شکل ۵- ب افت مقاومت در اثر حرارت در دماهای مورد مطالعه نسبت به دمای محیط در نمونه‌های حاوی ۵، ۰ و ۱۰ درصد ذرات لاستیک باز یافتی نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد با افزایش میزان خرده لاستیک، میزان افت مقاومت فشاری در دماهای ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه کاهش یافته است. برای مثال با اضافه کردن ۱۰ درصد لاستیک باز یافتی، افت مقاومت از ۳۱,۶ درصد در نمونه شاهد به ۲۱ درصد (در دمای ۴۰۰ درجه) تقلیل می‌یابد. البته در دمای ۶۰۰ روندی دیگر رخ داده است که دلیل آن می‌تواند از یک طرف کاهش جرم قابل توجه لاستیک تایر باز یافتی باشد که باعث تخلخل و افزایش انتقال حرارت بیشتر در نمونه شده و در نتیجه منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه حاوی تایر باز یافتی می‌شود و از طرف دیگر به علت تجزیه و تبخیر آب شیمیایی موجود در کریستال‌های کلسیم هیدروکسید (CH) باشد.



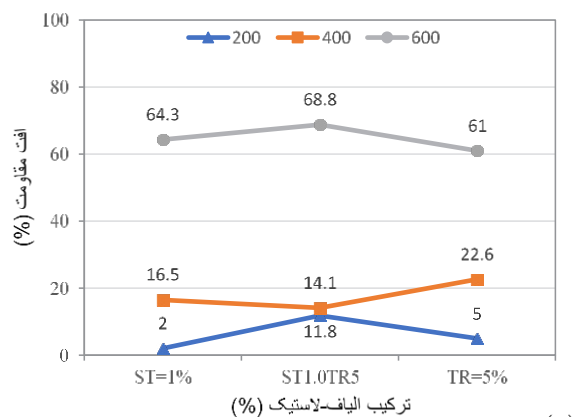
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۶- افت مقاومت در اثر حرارت برای نمونه‌های حاوی الیاف و لاستیک؛ (الف)  $ST0.5TR5$ ، (ب)  $ST0.5TR10$ ، (ج)  $ST1.0TR5$ ، (د)  $ST1.0TR10$

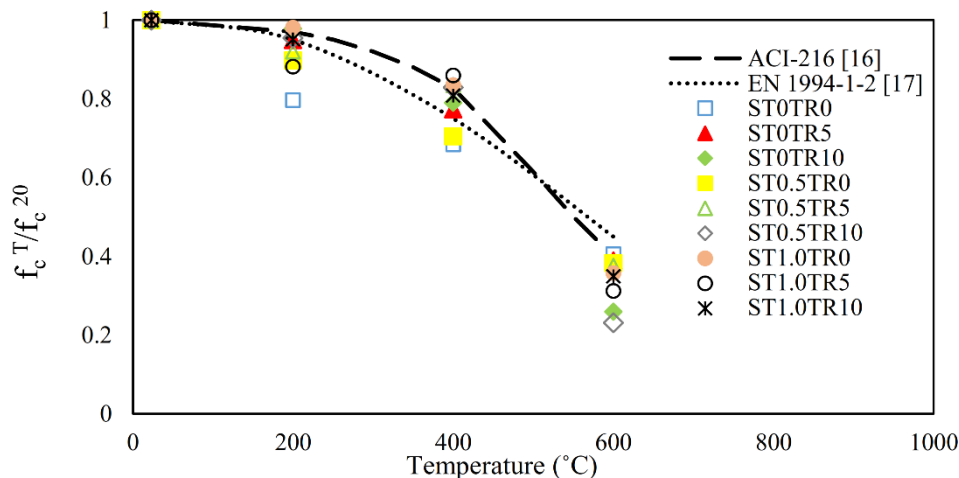
شکل ۶ افت مقاومت فشاری بتن در اثر حرارت برای نمونه‌های حاوی ترکیب الیاف فولادی و خرده لاستیک (در مقایسه با نمونه‌های حاوی الیاف فولادی یا ذرات لاستیک) در اثر حرارت بالا نشان می‌دهد. نمونه ترکیبی ۰٫۵ درصد الیاف فولادی و ۵ درصد لاستیک (شکل ۶-الف)، رفتاری در حد واسط نمونه‌های بتنی حاوی ۰٫۵ درصد الیاف و ۵ درصد لاستیک در دمای ۲۰۰ درجه نشان می‌دهد. این نمونه در دمای ۴۰۰ درجه افت مقاومت کمتری نسبت به دو نمونه مورد مقایسه داشته است و در دمای ۶۰۰ درجه رفتاری تقریباً یکسان را نشان می‌دهد. همچنین، در نمونه  $ST0.5TR10$  (شکل ۶-ب) رفتاری بینابینی در دماهای ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه مشاهده شد. این نمونه در دمای ۶۰۰ افت مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های بتنی حاوی ۰٫۵ درصد الیاف فولادی و ۱۰ درصد خرده لاستیک داشته است. در حالت حضور توامان ۱ درصد الیاف فولادی و ۵ درصد لاستیک ضایعاتی (شکل ۶-ج)، افت مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های مورد مقایسه، در دماهای ۲۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد، داشته است. البته در دمای ۴۰۰ درجه رفتاری مغایر با سایر دماها مشاهده شد. نمونه  $ST1.0TR10$  رفتاری متوسط نسبت به نمونه‌های بتنی حاوی ۱ درصد الیاف و ۱۰ درصد لاستیک داشته است (شکل ۶-د). از این مشاهدات می‌توان دریافت که با افزایش میزان الیاف فولادی و خرده لاستیک، میزان افت مقاومت، در مقایسه با نمونه شاهد، کاهش یافته است و در حالت ترکیبی دارای رفتاری متوسط می‌باشد.

نسبت مقاومت فشاری در دمای هدف  $f_c^T$  به مقاومت در دمای محیط  $f_c^{20}$  معروف به مقاومت فشاری نرمالایز، بر حسب دما برای نمونه‌های مختلف بتنی در شکل ۷ نشان داده شده است. علاوه بر این، مقاومت فشاری نرمالایز برای بتن با سنگدانه‌های سیلیسی در مقابل دما، پیشنهاد شده توسط آیین‌نامه‌های ACI 216 [۲۲] و EN 1994-1-2 [۲۳] (روابط ۱ و ۲) در شکل ۷ ارائه شده است. از شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد که آیین‌نامه‌های ACI 216 و

EN 1994-1-2 نتایج آزمایشگاهی مقاومت فشاری نرمالایز کلیه نمونه‌های بتن حاوی لاستیک تایر و الیاف فولادی را در دماهای ۲۰۰ (به جز بتن مرجع)، ۴۰۰ و ۶۰۰ (به جز برای نمونه‌های ST0.5TR10، ST0TR10) درجه سانتیگراد نسبتاً خوب تخمین می‌زنند.

$$\frac{f_c^T}{f_c^{20}} = 1 - 2.5 \times 10^{-6} T^2 + 4.7 \times 10^{-4} T \quad (1)$$

$$\frac{f_c^T}{f_c^{20}} = 1 - 1.6 \times 10^{-6} T^2 + 2.6 \times 10^{-5} T \quad (2)$$



شکل ۷- مقاومت فشاری نرمالایز شده نمونه‌های بتنی بر حسب دما

#### ۴- نتیجه گیری

بر اساس کار آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق، نتایج زیر حاصل شد: افزودن الیاف فولادی به حجم بتن و اضافه کردن لاستیک تایر جایگزین ماسه منجر به کاهش مقاومت فشاری اکثر نمونه‌های بتنی حرارت دیده و حرارت ندیده شد. از طرفی با افزایش درجه حرارت، مقاومت فشاری کلیه نمونه‌های بتنی با یک افت قابل توجهی رو به رو شد.

در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد، نرخ افت مقاومت فشاری نمونه‌ها در مقایسه با سایر دماها بیشتر بود به طوری که مقاومت فشاری نمونه‌ها با یک کاهش مقاومت در حدود ۶۰ تا ۷۵٪ نسبت به مقاومت نمونه متناظر در دمای محیط روبرو شدند.

آیین نامه‌های EN 1994-1-2 و ACI 216 نتایج آزمایشگاهی مقاومت فشاری نرمالایز کلیه نمونه‌های بتن حاوی لاستیک تایر و الیاف فولادی را در دماهای ۲۰۰ (به جز بتن مرجع)، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد (به جز نمونه‌های حاوی ۰ و ۰٫۵٪ الیاف فولادی همراه با ۱۰٪ خرده لاستیک) نسبتاً خوب تخمین می‌زنند.

#### تقدیر و تشکر

کلیه آزمایش‌های این تحقیق با همکاری آزمایشگاه بتن دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه مازیار انجام شده است. نویسندگان این مقاله بدین وسیله از همکاری عوامل یاد شده تقدیر و تشکر می‌نمایند.

#### مراجع

- [1] Rashiddadash, P., Ramezani-pour, A. A., & Mahdikhani, M. (2014). Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice. *Construction and Building Materials*, 51, 313-320.
- [2] Shah, A. A., & Ribakov, Y. (2011). Recent trends in steel fibered high-strength concrete. *Materials & Design*, 32(8-9), 4122-4151.

- [3] Samarakoon, S. S. M., Ruben, P., Pedersen, J. W., & Evangelista, L. (2019). Mechanical performance of concrete made of steel fibers from tire waste. *Case Studies in Construction Materials*, e00259.
- [4] Gupta, T., Sharma, R. K., & Chaudhary, S. (2015). Impact resistance of concrete containing waste rubber fiber and silica fume. *International Journal of Impact Engineering*, 83, 76-87.
- [5] Toutanji, H. A. (1996). The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 18(2), 135-139.
- [6] Ganjian, E., Khorami, M., & Maghsoudi, A. A. (2009). Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1828-1836.
- [7] Hertz, K. D. (2005). Concrete strength for fire safety design. *Magazine of Concrete Research*, 57(8), 445-453.
- [8] Arioz, O. (2007). Effects of elevated temperatures on properties of concrete. *Fire safety journal*, 42(8), 516-522.
- [9] Guo, Y. C., Zhang, J. H., Chen, G. M., & Xie, Z. H. (2014). Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre, subjected to elevated temperatures. *Journal of cleaner production*, 72, 193-203.
- [10] Han, Q., Yang, G., Xu, J., Fu, Z., Lacidogna, G., & Carpinteri, A. (2019). Acoustic emission data analyses based on crumb rubber concrete beam bending tests. *Engineering Fracture Mechanics*, 210, 189-202.
- [11] Adeboje, A. O., Kupolati, W. K., Sadiku, E. R., Ndambuki, J. M., & Kambole, C. (2020). Experimental investigation of modified bentonite clay-crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 233, 117187.
- [12] Janmangwong, M., & Sukontasukkul, P. (2019). Use of Surfactant to Improve Properties of Crumb Rubbers in Concrete Products. In *Rheology and Processing of Construction Materials* (pp. 27-35). Springer, Cham.
- [13] Abd-Elaal, E. S., Araby, S., Mills, J. E., Youssf, O., Roychand, R., Ma, X., ... & Gravina, R. J. (2019). Novel approach to improve crumb rubber concrete strength using thermal treatment. *Construction and Building Materials*, 229, 116901.
- [14] Abd-Elaal, E. S., Araby, S., Mills, J. E., Youssf, O., Roychand, R., Ma, X., ... & Gravina, R. J. (2019). Novel approach to improve crumb rubber concrete strength using thermal treatment. *Construction and Building Materials*, 229, 116901.
- [15] Guo, Q., Zhang, R., Luo, Q., Wu, H., Sun, H., & Ye, Y. (2019). Prediction on damage evolution of recycled crumb rubber concrete using quantitative cloud image correlation. *Construction and Building Materials*, 209, 340-353.
- [16] ACI Committee 211, *Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials ACI 211.4R-08*, American Concrete Institute, Farmington Hills (MI), 2008.
- [17] ASTM C143/C143M-98, (2010). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete*. Annual Book of ASTM Standards.
- [18] International Organization for Standardization. (2012). *Fire-resistance Tests: Elements of Building Construction. Commentary on Test Method and Guide to the Application of the Outputs from the Fire-resistance Test*. ISO834.
- [19] ASTM C39/C39M. (2012). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. Annual Book of ASTM Standards.
- [20] Behnood, A., & Ghandehari, M. (2009). Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures. *Fire Safety Journal*, 44(8), 1015-1022.
- [21] Yesilata, B., Isiker, Y., & Turgut, P. (2009). Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1878-1882.
- [22] ACI Committee 216. *Guide for determining the fire endurance of concrete elements (ACI 216R-89)*. American Concrete Institute; 1989, Detroit.
- [23] Eurocode 4, EN 1994-1-2:2004. *Design of composite steel and concrete structures—Part 1-2: General rules for structural fire design*.