

بهینه سازی مقاومت فشاری بتن حاوی لاستیک تایر بازیافتی همراه با الیاف فولادی در معرض دماهای بالا

مهدی نعمت زاده^{۱*}، رضا ذبیحی^۲

۱. دانشیار گروه عمران، دانشگاه مازندران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و فنون بابل

*m.nematzadeh@umz.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۲۹

چکیده

استفاده از ضایعات لاستیکی از جمله لاستیک تایر بازیافتی در مخلوط بتن به عنوان یکی از روش های موثر برای بازیافت مواد زائد است. 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 ویژگی های 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 لاستیک تایر بازیافتی پس از قرارگیری در دماهای بالا به طور آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مجموع ۹ طرح اختلاط در طول آزمایش ساخته شد و متغیرهای آزمایش شامل درصد حجمی لاستیک تایر بازیافتی جایگزین ماسه طبیعی (۰، ۵٪ و ۱۰٪)، کسر حجمی الیاف فولادی (۰٪، ۰/۵٪ و ۱٪)، و دما (۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه) می باشند. علاوه بر این، مقاومت فشاری با مقادیر پیش بینی آیین نامه های EN 1994-1-2، ACI 216، 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 روبه رو شده است. از این رو، در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد، نرخ افت مقاومت فشاری نمونه ها در مقایسه با سایر دماها بیشتر بود بطوریکه 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٪ روبرو شدند. همچنین، پیش بینی آیین نامه ها، نتایج مقاومت فشاری بتن حرارت دیده را اندکی دست بالا تخمین می زنند. در نهایت،

با بکار بردن روش سطح پاسخ^۱ (RSM)، یک راه حل بهینه برای پارامترهای طراحی با به حداکثر رساندن مقاومت فشاری بتن حاوی تایر بازیافتی و الیاف فولادی، در دماهای مختلف ارائه شد.

واژگان کلیدی: دماهای بالا، الیاف فولادی، لاستیک تایر بازیافتی، مقاومت فشاری، بهینه سازی.

۱- مقدمه

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 است. با پیشرفت تکنولوژی و توسعه علم مهندسی سازه، تقاضا برای ساخت انواع جدیدی از بتن‌ها که باید دارای ویژگی‌های بهبود یافته‌ای باشند، افزایش یافت. یکی از این نوع بتن‌ها، بتن الیافی است که نسبت به بتن معمولی دارای رفتار شکل‌پذیرتر با کنترل رشد و انتشار ترک و قابلیت باربری بعد از ترک خوردگی است [1]. 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 سازوکار پل انداختگی الیاف کنترل می‌کند [2, 3].

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 [4]. در بیشتر کشورها لاستیک تایر به عنوان مواد ضایعاتی است که به دلیل افزایش استفاده از اتومبیل به عنوان وسیله اصلی حمل و نقل باعث رشد چشمگیر 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 مانند دفن، سوزاندن و بازیافت وجود دارد، که بازیافت تایرهای فرسوده به یک راه حل بالقوه برای مدیریت چنین پسماند تبدیل شده است [5]. در این بین پژوهشگران در زمینه بازیافت مواد زائد و استفاده

آن‌ها در مهندسی عمران، تلاش‌های زیادی انجام داده‌اند. یکی از روش‌های موثر برای بازیافت ضایعات لاستیکی از جمله تایرها، استفاده از آن‌ها در بتن است 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 می‌شود [5]. هر چند، روی برخی از خواص مکانیکی بتن مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی و سختی آثار منفی دارد [6, 7]. علاوه بر این، برای بهبود ویژگی‌های 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 چگونگی پاسخ سازه در دماهای بالا، ابتدا لازم است چگونگی تغییر مشخصات مصالح با افزایش دما مشخص شود. از جمله ویژگی‌های مکانیکی بتن متأثر از حرارت بالا، مقاومت فشاری است که تنزل آن‌ها ناشی از ایجاد تنش‌های داخلی، ایجاد میکرو ترک‌ها و تجزیه ترکیبات شیمیایی خمیر سیمان در طی فرایند حرارت دهی است [8, 9].

گوا و همکاران [10] در مطالعه خود مقاومت فشاری بتن سازه‌ای حاوی سنگدانه بازیافتی، لاستیک تایر و الیاف فولادی در معرض دماهای بالا را بررسی کردند. 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

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح و نمونه ها

در این مطالعه، از سیمان پرتلند تیپ ۱ (CEM-I 42.5 N)، 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 میلی متر استفاده شد. همچنین، میکروسیلیس با نسبت جایگزینی ۱۰٪ وزنی سیمان در مخلوط بتن استفاده شده است که هدف از آن بالا بردن مقاومت بتن نمونه مرجع و دست یابی به یک بتن مقاومت بالا بود. علاوه بر این، از لاستیک تایر بازیافتی به عنوان جایگزین ریزدانه با چگالی ۰/۸۹ و حداکثر اندازه اسمی ۴/۷۵ میلی متر و بدون جذب آب در این مطالعه استفاده شد. برای تایر مصرف شده، ۴۷ درصد وزنی مصالح بین الک های ۴/۷۵ و ۲/۳۶ میلی متر و ۳۶ درصد آن ها بین الک ها ۲/۳۶ و ۱/۱۸ قرار دارند و مابقی دانه ها ریزتر بودند. همچنین، با انجام آنالیز گرانشی حرارتی (TGA) برای لاستیک تایر نقطه تنزل یا دمای تجزیه آن حدوداً ۳۶۰ درجه سانتی گراد بدست آمد. الیاف فولادی با طول ۳۰ میلی متر و نسبت ظاهری ۶۰ در ۳ درصد حجمی مختلف ۰/۰، ۰/۵ و ۱٪ استفاده شد. خواص مکانیکی و فیزیکی الیاف فولادی در جدول (۱) ارائه شده است. در این پژوهش، از یک فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر با نام تجاری SPC10 با محتوای جامد ۴۲٪ و چگالی ۱/۰۹ در تمام مخلوط های بتن استفاده شده است. فوق روان کننده برای کمک به پراکندگی الیاف در بتن، و رسیدن به کارایی خوب بتن است.

در این پژوهش، به طور کلی ۳۶ نمونه استوانه ای به قطر ۱۰۰ میلی متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی متر ساخته شدند تا مقاومت فشاری بتن الیافی حاوی لاستیک تایر بازیافتی پس از قرارگیری در دماهای بالا بررسی شود. ضمناً، از هرگروه آزمایش، ۳ نمونه مشابه برای کاهش خطا انتخاب شده و میانگین نتایج آن ها گزارش شدند.

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. موسوی مهر و نعمت زاده [11] در مطالعه خود به پیش بینی رفتار پس از حرارت بتن حاوی لاستیک تایر پرداخته اند. در این پژوهش، رفتار تنش-کرنش پسماند بتن حاوی لاستیک تایر جایگزین حجمی ماسه طبیعی (۰، ۱۵ و ۳۰٪) تحت فشار محوری، پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا (۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی گراد) بررسی شد. نتایج آن ها نشان داد که با افزایش حجم ضایعات لاستیکی یک تنزل در ویژگی های فیزیکی و مکانیکی نمونه های بتنی رخ می دهد که افزایش دما این روند را شدت می بخشد. علاوه بر این، یک مقایسه میان نتایج آزمایشگاهی با مقادیر پیش بینی آیین نامه های ACI 216 و EN 1994-1-2 انجام شد. علاوه بر پژوهش های انجام شده توسط پژوهشگران ذکر شده، به ندرت عملکرد بتن الیافی حاوی لاستیک تایر بازیافتی با طراحی بهینه بررسی شده است.

این پژوهش با هدف بهینه سازی مقاومت فشاری فشاری بتن حاوی لاستیک تایر و الیاف فولادی پس از قرار گرفتن در معرض دماهای بالا، انجام شد. متغیرهای آزمایش شامل درصد حجمی لاستیک تایر بازیافتی جایگزین ماسه، کسر حجمی الیاف فولادی، و دمای هدف هستند. از آنجایی که لاستیک تایر بازیافتی در مخلوط بتن بیشتر موجب کاهش دوام و مقاومت بتن می شود، از الیاف فولادی به منظور بهبود این خواص استفاده شد. برای این هدف، پارامتر موثر بر مقاومت فشاری بتن الیافی حاوی تایر خرد شده تحت درجه حرارت های ۲۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد بررسی شد. علاوه بر این، مقاومت فشاری با مقادیر پیش بینی آیین نامه های EN 1994-1-2 و ACI 216 مقایسه شدند. در نهایت، با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)، یک راه حل بهینه برای پارامترهای طراحی با به حداکثر رساندن مقاومت فشاری بتن حاوی لاستیک تایر و بازیافت آن از محیط زیست، در دماهای مختلف ارائه شد.

جدول ۱. خواص مکانیکی و فیزیکی الیاف فولادی

Type of fiber	Shape of fiber	L_f (mm)	d_f (mm)	Aspect ratio (L_f/d_f)	Density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Melting point (°C)
Steel (ST)	Hooked-end	30	0.5	60	7.85	1100	200	1516

Table 1. Physical and mechanical properties of steel fibers

۲-۲- نسبت های اختلاط

نسبت مخلوط ها برای بتن حاوی لاستیک تایر و الیاف فولادی با استفاده از ACI 211.4R [12] برای حجم یک متر مکعب در جدول (۲) ارائه شده است. در این مطالعه، ۹ سری طرح اختلاط با نسبت آب به مواد سیمانی ثابت و برابر با ۰/۳۵ برای تمام طرح های اختلاط در نظر گرفته شد. لاستیک تایر به عنوان مصالح بازیافتی بر اساس جایگزینی درصد حجمی ماسه در مخلوط های بتن استفاده شد. نسبت های جایگزینی حجمی لاستیک تایر بازیافتی به صورت ۰/۰، ۰/۵ و ۱/۰ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که مقدار فوق روان کننده مصرفی به صورت درصد وزنی کل مواد سیمان است و مقدار آب داخل فوق روان کننده نیز در نسبت آب به سیمان لحاظ شده است. برای نامگذاری نمونه ها، ST و TR به ترتیب نشان دهنده حضور الیاف فولادی و لاستیک تایر در مخلوط بتن و عدد پس از آن ها بیانگر درصد حجمی آن ها است. به عنوان نمونه ST0.5TR5 به معنی نمونه بتنی حاوی لاستیک تایر بازیافتی به میزان ۰/۵ جایگزینی با حجم ماسه به همراه ۰/۰۵ حجمی الیاف فولادی است.

۲-۳- چگونگی ساخت و آماده سازی نمونه ها

برای ساخت بتن حاوی الیاف و تایر بازیافتی، ابتدا مصالح سنگی شامل شن و ماسه همراه با لاستیک تایر در درون میکسر به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شد. سپس سیمان با پوزولان استفاده شده (میکروسیلیس) ترکیب شده و به مخلوط 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 سنگدانه ها به

وضعیت اشباع با سطح خشک نیز می باشد، به آرامی درون میکسر ریخته شد و تا مدت ۲ دقیقه هم زده شد. در پایان، الیاف مورد استفاده طرح 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 مخلوط های بتنی مطابق با ASTM C143 [13] 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 حباب های هوا از میز لرزش استفاده شد. نمونه ها 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.

۲-۴- دستورالعمل آزمایشگاهی

در این مطالعه ۴ دسته حرارتی شامل ۲۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد بر هر گروه از نمونه های بتنی اعمال شد که دمای ۲۰ درجه سانتی گراد به عنوان دمای محیط و بقیه به عنوان دماهای بالا در نظر گرفته شدند. کلیه نمونه ها تحت حرارت های ۲۰۰ تا ۶۰۰ °C، قبل از رسیدن به دماهای هدف تحت دمای ۶۰۰ °C (برای خشک کردن و از بین بردن رطوبت سطحی نمونه ها) به مدت ۲۴ ساعت مطابق ISO 834 [14] قرار گرفتند. نمونه های تحت حرارت های بالا در یک کوره الکتریکی قرار گرفتند و پس از رسیدن دمای نمونه ها به دمای هدف، به مدت ۱ ساعت در کوره در آن دما باقی ماندند تا دمای مرکز نمونه ها با دمای محیط کوره کمترین اختلاف را داشته باشند. دمای داخل کوره توسط ترموکوپل های داخلی قرائت شده و نمونه ها بتنی پس از اتمام بارگذاری حرارتی تا رسیدن به دمای محیط در کوره باقی ماندند.

نشان داده شده است. آزمایش مقاومت فشاری نمونه های بتنی پس از حداقل ۲۸ روز از مراقبت و نگهداری بر اساس استاندارد ASTM C39 [15] انجام شد. سرعت بارگذاری در آزمایش فشاری نمونه های بتن استوانه ای 100×200 میلی متر برای نمونه های تحت دمای محیط

برای اطمینان از رسیدن دمای داخلی نمونه ها به دمای محیط پس از بارگذاری حرارتی، کلیه تست های آزمایشگاهی ۷ روز پس از اعمال حرارت به نمونه ها انجام شدند. پس از رسیدن نمونه ها بتنی به دمای محیط عملیات بارگذاری فشاری در دمای محیط اعمال شد. رژیم گرمایی برای نمونه های بتنی تحت حرارت در شکل (۱)

جدول ۲. نسبت مخلوط های بتن

Mix no	Specimen ID	w/c	Water*	Cement	Tire rubber	Silica Fume	Fine Agg.	Coarse Agg.	Steel fiber	SP (%)	Slump (mm)
(kg)**											
1	ST0TR0	0.35	192.5	495	0	55	613.8	902	0	0.68	89
2	ST0TR5	0.35	192.5	495	10.89	55	583.3	902	0	0.74	86
3	ST0TR10	0.35	192.5	495	21.79	55	552.7	902	0	0.77	81
4	ST0.5TR0	0.35	192.5	495	0	55	614.3	902	39.2	0.84	87
5	ST0.5TR5	0.35	192.5	495	10.90	55	583.7	902	39.2	0.88	80
6	ST0.5TR10	0.35	192.5	495	21.80	55	553.08	902	39.2	0.90	93
7	ST1.0TR0	0.35	192.5	495	0	55	614.5	902	78.5	0.91	85
8	ST1.0TR5	0.35	192.5	495	10.91	55	583.9	902	78.5	0.94	89
9	ST1.0TR10	0.35	192.5	495	21.81	55	553.2	902	78.5	0.97	93

* Table 2. Mix proportions of concrete

شامل آب موجود در روان کننده می شود

** وزن در ۱ متر مکعب برای بتن های غیرالیافی و وزن در $(1+V_f/100)$ متر مکعب برای بتن های الیافی.

شکل ۱. رژیم گرمایی داخل کوره الکتریکی برای نمونه های بتنی

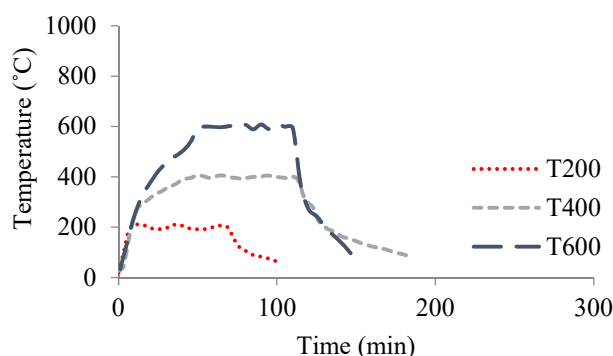


Fig. 1. Thermal regime applied to concrete specimens inside electric furnace

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمایش فشاری

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه های بتنی در جدول (۳) و در شکل (۲) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود، مقادیر مقاومت فشاری نمونه های حرارت ندیده بین $35/3 - 57/1$ مگاپاسکال

برابر با $1 \frac{mm}{min}$ و برای نمونه های تحت حرارت برابر $0.5 \frac{mm}{min}$

انتخاب شد [16]. همچنین، سطوح بالا و پایین هر یک از نمونه ها، تخته های 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.

است. با حجم ثابت الیاف فولادی در بتن از شکل (۲-الف) می توان 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 نرم تر و انعطاف پذیرتر از ریزدانه های طبیعی است. از این رو، در نمونه های بتنی حاوی لاستیک تایر، کاهش چسبندگی بین ذرات نرم تایر و خمیر سیمان باعث عدم پیوستگی بین آن ها و ضعف لایه مرزی شده که منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن می شود. علاوه بر این، w/c در ملات اطراف ذرات لاستیک به دلیل عدم جذب آب توسط این ذرات، افزایش یافته که خود موجب ضعف بیشتر لایه مرزی و افت بالاتر مقاومت فشاری می شود. از شکل (۲-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، نمونه های بتنی $ST0.5TR10$ ، $ST0.5TR5$ ، $ST0.5TR0$ ، $ST0TR10$ ، $ST0TR5$ ، $ST1.0TR10$ ، $ST1.0TR5$ ، $ST1.0TR0$ به ترتیب با یک کاهش مقاومت 19% ، 28% ، 5% ، 33% ، 38% ، 19% ، 30% و 31% نسبت به نمونه مرجع ($ST0TR0$) در دمای محیط، روبرو شدند.

با افزایش درجه حرارت، مقاومت فشاری نمونه های بتنی در گروه های مختلف، کاهش قابل توجهی پیدا کرد. در دمای 200°C درجه سانتی گراد، مقاومت فشاری بتن مرجع ($ST0TR0$) 20% نسبت به مقاومت نمونه متناظر در دمای محیط کاهش یافت. همچنین، نمونه های بتنی $ST0.5TR10$ ، $ST0.5TR5$ ، $ST0.5TR0$ ، $ST0TR10$ ، $ST0TR5$ ، $ST1.0TR10$ ، $ST1.0TR5$ ، $ST1.0TR0$ به ترتیب با یک کاهش مقاومت 5% ، 12% ، 13% ، 18% ، 45% ، 2% ، 11% و 49% نسبت به مقاومت نمونه متناظر در دمای محیط روبرو شدند. نتایج نشان دهنده افت کمتر مقاومت در این دما نسبت به دمای 20°C درجه برای نمونه های بتنی حاوی تایر در مقایسه با بتن معمولی است. به طور کلی افت مقاومت فشاری نمونه ها در این دما می تواند 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 می شود [8]. علاوه بر این شکل (۲-الف) نشان می دهد که مقاومت فشاری بتن با جایگزینی لاستیک تایر به جای ماسه طبیعی، کاهش پیدا کرده است. در بتن های حاوی 0% و 1% الیاف فولادی در مقایسه با بتن فاقد الیاف، کاهش مقاومت فشاری نمونه ها

حاوی لاستیک تایر بازیافتی نسبت به نمونه بدون تایر بازیافتی بیشتر است. همچنین از شکل (۲-ب) می توان 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 0% الیاف فولادی در بتن فاقد تایر بازیافتی باعث افزایش مقاومت فشاری به میزان 6% شده است. با افزایش دما و رسیدن آن به 400°C درجه سانتی گراد، بتن مرجع ($ST0TR0$) با یک افت مقاومت 31% 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 است که منجر به ایجاد میکروترک ها سطحی و تنش های داخلی و در نهایت تنزل مقاومت می شود [8، 17]. همچنین با توجه به جدول (۳)، نمونه های بتنی $ST0.5TR5$ ، $ST0TR10$ ، $ST0.5TR0$ ، $ST1.0TR10$ ، $ST1.0TR5$ ، $ST1.0TR0$ به ترتیب با یک کاهش مقاومت 22% ، 21% ، 29% ، 16% ، 17% ، 16% و 14% و 19% نسبت به مقاومت نمونه متناظر در دمای محیط روبرو شدند.

علاوه بر این شکل (۲-الف) نشان می دهد که افزودن لاستیک تایر بازیافتی به جای ماسه در بتن، مقاومت فشاری نمونه های بتنی نسبت به نمونه بتنی فاقد تایر کاهش یافته است که علت اصلی این افت، تجزیه شدن لاستیک تایر در این دما است. با توجه به اینکه نقطه تنزل یا شروع دمای تجزیه برای لاستیک تایر بازیافتی حدوداً 360°C درجه سانتی گراد بدست آمده است، افت جرم لاستیک تایر در دمای 400°C درجه عامل مهم دیگری برای افت مقاومت نمونه بتنی حرارت دیده است. شکل (۲-ب) نشان می دهد 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 (۲-ب) می توان دریافت که افزودن 1% الیاف فولادی نسبت به 0% الیاف به بتن باعث افت کمتر مقاومت فشاری شده است.

در دمای 600°C درجه سانتی گراد، نرخ افت مقاومت فشاری نمونه ها در مقایسه با سایر دماها بیشتر بود بطوریکه مقاومت فشاری نمونه مرجع با یک کاهش 59% نسبت به نمونه متناظر در دمای محیط رو به رو شد. همچنین، نمونه های بتنی $ST0.5TR5$ ، $ST0TR10$ ، $ST0.5TR0$ ، $ST1.0TR10$ ، $ST1.0TR5$ ، $ST1.0TR0$ به

میزان f_c^T ۲۸/۳٪ شده است. نسبت مقاومت فشاری در دمای هدف f_c^T به مقاومت در دمای محیط f_c^{20} ، معروف به مقاومت فشاری نرمالایز، برحسب دما برای نمونه‌های مختلف بتنی در شکل (۳) نشان داده شده است. علاوه براین، مقاومت فشاری نرمالایز برای بتن با سنگدانه‌های سیلیسی در مقابل دما، پیشنهاد شده توسط آیین‌نامه‌های ACI 216 [19] و EN 1994-1-2 [20] در شکل (۳) ارائه شده است. از شکل (۳) 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 ST0TR10، ST0.5TR10) درجه سانتی‌گراد نسبتاً خوب تخمین می‌زنند.

ترتیب با یک 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 باز یافتی هست 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) است که به پدیده دهیدراسیون معروف است [8, 18]. در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، شکل (۲-الف) نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بتن با جایگزینی لاستیک تایر به جای ماسه طبیعی، کاهش پیدا کرده است. همچنین از شکل (۲-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٪ الیاف فولادی در بتن فاقد تایر باز یافتی باعث افزایش مقاومت فشاری به

جدول ۳. نتایج آزمایشگاهی مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حرارت دیده و حرارت ندیده

Specimen ID	P20* (MPa)	$\Delta P200/P20$ (%)	$\Delta P400/P20$ (%)	$\Delta P600/P20$ (%)
ST0TR0	57.1 (0.0)**	-20.3 (0.0)**	-31.6 (0.0)**	-59.5 (0.0)**
ST0TR5	46.2 (-19.0)	-5.0 (-3.5)	-22.6 (-8.5)	-61.0 (-21.9)
ST0TR10	40.8 (-28.5)	-2.1 (-12.2)	-21.0 (-17.6)	-74.1 (-54.3)
ST0.5TR0	54.0 (-5.5)	-10.3 (+6.4)	-29.5 (-2.7)	-61.7 (-10.5)
ST0.5TR5	38.1 (-33.3)	-8.1 (-23.1)	-16.5 (-18.8)	-62.3 (-38.0)
ST0.5TR10	35.3 (-38.2)	-4.5 (-25.9)	-17.1 (-25.1)	-76.9 (-64.6)
ST1.0TR0	46.1 (-19.3)	-2.0 (-0.7)	-16.5 (-1.6)	-64.3 (-28.7)
ST1.0TR5	39.8 (-30.2)	-11.8 (-22.8)	-14.1 (-12.4)	-68.8 (-46.2)
ST1.0TR10	38.9 (-31.8)	-4.9 (-18.6)	-19.2 (-19.5)	-65.1 (-41.1)

Table 3. Experimental results of compressive strength of the unheated and heated concrete specimens

* نماد P بیانگر ویژگی مقاومت فشاری بتن و عدد بعد از آن دمای در معرض است. همچنین، نماد ΔP بیانگر تفاضل مقدار مقاومت فشاری از مقدار مقاومت فشاری مرجع می‌باشد به عنوان مثال، $\Delta P600$ بیانگر P600-P20 می‌باشد و نیز $\Delta P600/P20$ بیانگر نسبت مقاومت فشاری بتن در دمای ۶۰۰°C به مقاومت فشاری بتن مرجع است.

** اعداد داخل پرانتز بیانگر میزان درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به بتن ST0TR0 در همان دما می‌باشد.

شکل ۲. مقاومت فشاری نمونه های بتنی بر حسب دما؛ الف) متغیر تایر، ب) متغیر الیاف

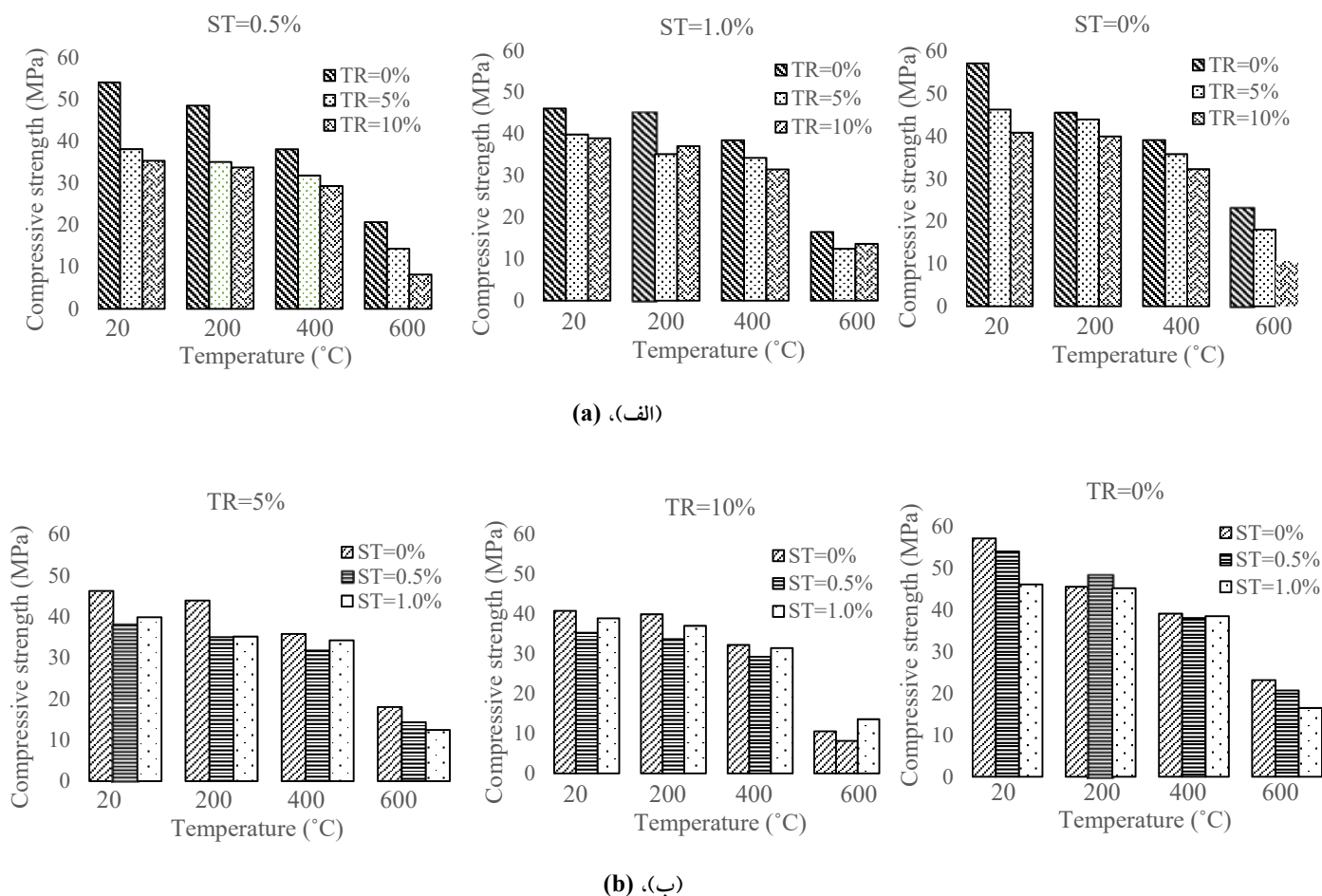


Fig. 2. Compressive strength of the concrete specimens in terms of temperature; (a) tire variable, (b) fiber variable

شکل ۳. مقاومت فشاری نرمالایز شده نمونه های بتنی بر حسب دما

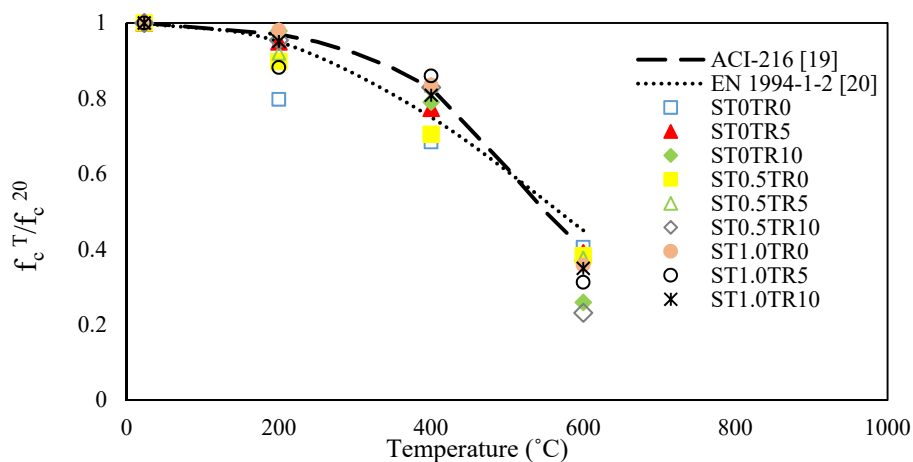


Fig. 3. Normalized compressive strength of the concrete specimens in terms of temperature

۲-۳- بهینه سازی

یکی از پارامترهایی مورد نیاز در پژوهشها و آمار، ایجاد یک رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته است. در صورتی که به توان به شکل ریاضی یک فرمول بین متغیر وابسته و متغیر مستقل ایجاد کرد، به راحتی می توان با استفاده از آن، روند تغییرات و مقادیر ماکسیمم و مینیمم را پیش بینی کرد. روش سطح پاسخ^۱ (RSM) و روش شبکه عصبی^۲ (NNM) به عنوان دو مورد از مهم ترین روش های بهینه سازی و تجزیه و تحلیل داده ها در حالتی که تعداد متغیرها بیش از یک متغیر باشد، استفاده می شود. از بین این دو روش، روش سطح پاسخ به دلیل سهولت در بدست آوردن معادلات مربوط به پاسخ ها بر حسب چند متغیر و نیز سهولت در ارائه داده های مربوط به شرایط بهینه، بیشتر مورد توجه قرار می گیرد و همچنین پژوهشگران بسیاری از جمله نعمت زاده و فلاح [21] و Köksal و همکاران [22] از این روش برای یافتن شرایط بهینه آزمایش های خود استفاده کرده اند. در این مطالعه، از تکنیک بهینه سازی همزمان چند مولفه ای با استفاده از روش سطح پاسخ به عنوان یک مبنا برای یافتن بهترین راه حل استفاده شد. برای این منظور از نرم افزار تجاری Design-Expert [23] استفاده شد. برنامه آزمایشی سطح پاسخ مشتری که در اینجا برای یافتن معادلات پاسخ و تعیین مقادیر بهینه داده ها مورد استفاده قرار گرفت شامل ۳ متغیر (T ، r و V_f) و به صورت طرح آزمایشگاهی فاکتوریل کامل است. متغیرهای مستقل این پژوهش، در ابتدا دما (T) که دارای ۴ تراز ۲۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد، سپس لاستیک تایر (r) جایگزین حجمی ماسه که مقادیر ۰، ۵ و ۱۰٪ را دارد و در نهایت درصد حجمی الیاف فولادی (V_f) که دارای ۳ تراز ۰، ۵/۰ و ۱٪ است. برازش داده ها توسط روش آنالیز واریانس^۳ (ANOVA) انجام شد که هدف آن، بدست آوردن یک مدل ریاضیاتی به صورت چند جمله ای بر مبنای متغیرها و سطوح تعریف شده برای تعیین پاسخ مقاومت فشاری (f_c) می باشد. برازش مدل رگرسیون برای پاسخ مقاومت فشاری

نمونه های بتنی حاوی تایر بازیافتی و الیاف فولادی، در معادله (۱)

$$f_c = 54.7 + (0.007 \times T) - (2.35 \times r) - (15.6 \times V_f) + (8.1 \times 10^{-4} \times T \times r) + (6.66 \times 10^{-3} \times T \times V_f) + (0.4 \times r \times V_f) - (1.0 \times 10^{-4} \times T^2) + (0.089 \times r^2) + (7.95 \times V_f^2)$$

(۱)

نتایج آماری حاصل از رگرسیون داده ها، نشان از ضریب همبستگی مناسب آن ها دارد بطوری که این ضریب برای معادله (۱)، ۰/۹۶ بدست آمد. سطح پاسخ برای مدل رگرسیون بدست آمده از معادله (۱) در شکل (۴) ارائه شده است.

یک روش بهینه سازی عددی مبتنی بر توابع مطلوبیت در این نرم افزار وجود دارد که با بکار بردن آن مناسب ترین مقادیر متغیرها و پاسخ ها به عنوان مقادیر بهینه به طور همزمان به دست می آیند. تابع مطلوبیت (d_j) پارامتری است که مقداری از صفر تا یک دارد و بدیهی است که هرچه این مقدار به سمت یک میل کند، شرایط بهینه ی پیشنهاد شده، مطلوب تر و مناسب تر است. یک مسئله بهینه سازی چند هدفه برای حل شدن نیاز به استفاده از عبارت ارائه شده در معادله (۱) دارد که به آن پاسخ مطلوبیت (DR) گویند و از متوسط هندسی توابع مطلوبیت بدست می آید (n تعداد توابع مطلوبیت است).

$$DR = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_n)^{(1/n)} \quad (2)$$

محدوده پارامترهای متغیر در این پژوهش به صورت زیر هستند:

$$0\% \leq r \leq 10\% \quad (3)$$

$$20^\circ \text{C} \leq T \leq 600^\circ \text{C} \quad (4)$$

$$0\% \leq V_f \leq 1\% \quad (5)$$

داشتن یک بتن با بالاترین ظرفیت تحمل بار در مقابل دماهای بالا بسیار مورد توجه است. همچنین، زمانی که نگرانی از طراحی

با حل این مسئله بهینه سازی چند هدفه توسط نرم افزار با $n=4$ و $DR = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times d_4)^{(1/4)}$ ، مقادیر بهینه ی توابع مطلوبیت ذکر شده ($d_1 = f_c$ ، $d_2 = r$ ، $d_3 = T$ و $d_4 = V_f$) تعیین می شود که نتایج بدست آمده برای بتن های حاوی تیر بازیافتی و الیاف فولادی در معرض دمای بالا در جدول های (۴ تا ۷) ارائه شده است.

برای بررسی درستی مدل پیشنهادی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی این پژوهش و نتایج سایر پژوهش ها، شکل (۵) ارائه شده است. از شکل می توان دریافت که مدل پیشنهادی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی از هماهنگی خوبی برخوردار است.

مقرون به صرفه وجود دارد، هزینه الیاف فولادی استفاده شده در تولید مواد مرکب نیز حائز اهمیت است. علاوه براین در این مطالعه، اهمیت بحث ضایعات و محیط زیست بسیار قابل توجه است. بنابراین، برای رسیدن به یک شرایط مطلوب و بهینه در طراحی بتن حاوی لاستیک تیر و الیاف فولادی در معرض دمای بالا، برای هر دما (T) شرایطی تعیین شده است که مطابق آن باید مقدار لاستیک تیر (r)، ماکسیمایز در نظر گرفته شود و ضریب اهمیت متناظر با آن در نرم افزار، ۵ (از میان ۱ تا ۵) انتخاب شود و همچنین، کسر حجمی الیاف فولادی (V_f)، مینیمایز در نظر گرفته شود و ضریب اهمیت متناظر با آن در نرم افزار، ۵ (از میان ۱ تا ۵) انتخاب شود و در نهایت، مقاومت فشاری (f_c) ماکسیمایز در نظر گرفته شده، ضریب اهمیت متناظر با آن، ۵ انتخاب شده و ضریب وزنی برای حد پایینی مقاومت فشاری، ۰/۵ (از میان ۰ تا ۱) لحاظ شود.

شکل ۴. سطح پاسخ برای مدل بدست آمده از معادله (۱)

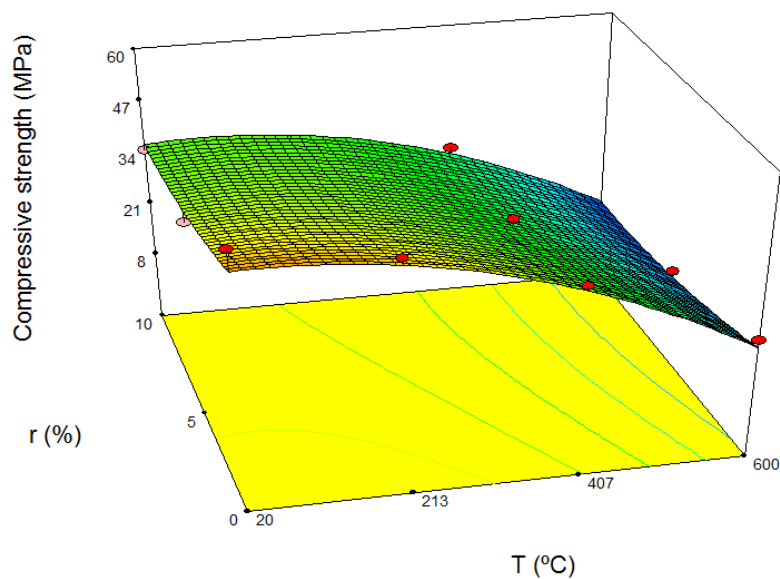


Fig. 4. Response surfaces for the models obtained from Eq. (1)

شکل ۵. مقایسه نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر و تحقیق دیگران با معادله پیشنهاد شده

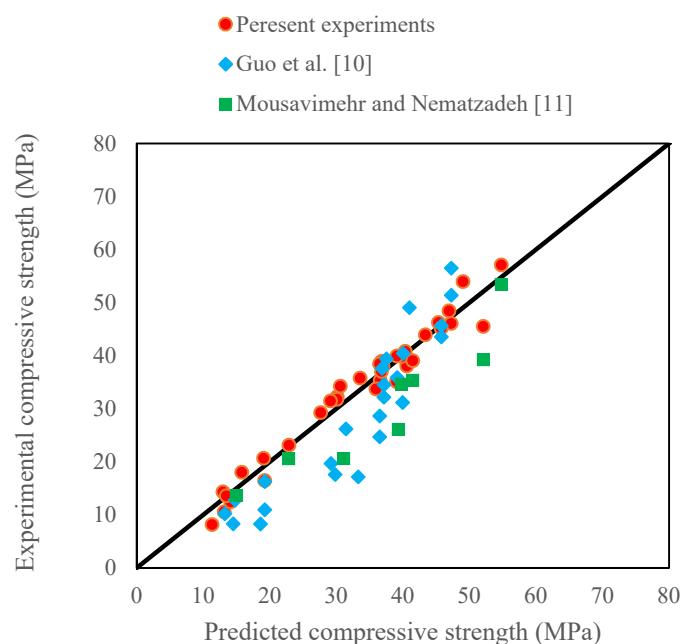


Fig. 5. Comparison of experimental results of present and other studies with proposed equation

جدول ۴. راه حل بهینه برای بتن های حاوی تایر بازیافتی و الیاف تحت دمای ۲۰ درجه سانتیگراد

Name	Target	Limits		Optimum solution
		Lower	Upper	
T (°C)	is equal to 20 °C	20	600	20
r (%)	Maximum	0	10	10
v_f (%)	Minimum	0	1	0
Compressive strength (f_c), MPa	Maximum	8.2	57.1	40
Desirability, %	Maximum	0	100	93

Table 4. Optimal solution for concrete containing recycled tire and fiber at 20 °C

جدول ۵. راه حل بهینه برای بتن های حاوی تایر بازیافتی و الیاف تحت دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد

Name	Target	Limits		Optimum solution
		Lower	Upper	
T (°C)	is equal to 200 °C	20	600	200
r (%)	Maximum	0	10	10
v_f (%)	Minimum	0	1	0
Compressive strength (f_c), MPa	Maximum	8.2	57.1	39
Desirability, %	Maximum	0	100	93

Table 5. Optimal solution for concrete containing recycled tire and fiber at 200 °C

جدول ۶. راه حل بهینه برای بتن های حاوی تایر بازیافتی و الیاف تحت دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد

Name	Target	Limits		Optimum solution
		Lower	Upper	
T (°C)	is equal to 400 °C	20	600	400
r (%)	Maximum	0	10	10
v_f (%)	Minimum	0	1	0
Compressive strength (f_c), MPa	Maximum	8.2	57.1	30
Desirability, %	Maximum	0	100	87

Table 6. Optimal solution for concrete containing recycled tire and fiber at 400 °C

جدول ۷. راه حل بهینه برای بتن های حاوی تایر بازیافتی و الیاف تحت دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد

Name	Target	Limits		Optimum solution
		Lower	Upper	
T (°C)	is equal to 600 °C	20	600	600
r (%)	Maximum	0	10	10
v_f (%)	Minimum	0	1	0
Compressive strength (f_c), MPa	Maximum	8.2	57.1	13
Desirability, %	Maximum	0	100	70

Table 7. Optimal solution for concrete containing recycled tire and fiber at 600 °C

۴- نتیجه گیری

بر اساس کار آزمایشگاهی انجام شده در این پژوهش، نتایج زیر حاصل شد:

- افزودن الیاف فولادی به حجم بتن و اضافه کردن لاستیک تایر جایگزین ماسه منجر به کاهش مقاومت فشاری بیشتر نمونه های بتنی حرارت دیده و حرارت ندیده شد. از طرفی با افزایش درجه حرارت، مقاومت فشاری کلیه نمونه های بتنی با یک افت قابل توجهی روبه رو شد.

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

- آیین نامه های EN 1994-1-2 و ACI 216 نتایج آزمایشگاهی مقاومت فشاری نرمالایز کلیه نمونه های بتن حاوی لاستیک تایر و الیاف فولادی را در دماهای ۲۰۰ (به جز بتن مرجع)، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد (به جز نمونه های حاوی ۰ و ۵٪ الیاف فولادی همراه با ۱۰٪ تایر)

نسبتاً خوب تخمین می زنند.

- نتایج حاصل از بهینه سازی نشان داد که با جایگزین کردن درصد مناسب لاستیک تایر بازیافتی به جای درصدی از حجم ماسه و افزودن الیاف فولادی در حجم بتن (۱۰٪ لاستیک تایر بازیافتی و ۰٪ الیاف فولادی برای دمای ۲۰ تا ۶۰۰ درجه) می توان به مقاومت فشاری بهینه و مطمئن برای بتن سخت شده در کنار مزایای زیست محیطی دست یافت.

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.

- [8] Hertz, K. D. 2005 Concrete strength for fire safety design. *Magazine of Concrete Research*, 57(8), 445-453.
- [9] Arioz, O. 2007 Effects of elevated temperatures on properties of concrete. *Fire safety journal*, 42(8), 516-522.
- [10] 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.
- [11] Mousavimehr, M., & Nematzadeh, M. 2019 Predicting post-fire behavior of crumb rubber aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 229, 116834.
- [12] 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.
- [13] ASTM C143/C143M-98, 2010 Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*.
- [14] 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.
- [15] ASTM C39/C39M. 2012 Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. *Annual Book of ASTM Standards*.
- [16] Nematzadeh, M., & Mousavimehr, M. 2019 Residual Compressive Stress-Strain Relationship for Hybrid Recycled PET-Crumb Rubber Aggregate Concrete after Exposure to Elevated Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(8), 04019136.
- [17] 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.
- [3] Fallah, S., & Nematzadeh, M. 2017 Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and building materials*, 132, 170-187.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Toutanji, H. A. 1996 The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 18(2), 135-139.
- [7] 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.
- [18] 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.
- [19] ACI Committee 216. Guide for determining the fire endurance of concrete elements (ACI 216R-89). *American Concrete Institute*; 1989, Detroit.
- [20] Eurocode 4, EN 1994-1-2, 2004 Design of composite steel and concrete structures-Part 1-2: General rules for structural fire design.
- [21] Nematzadeh, M., & Fallah-Valukolaee, S. 2017 Erosion resistance of high-strength concrete containing forta-ferro fibers against sulfuric acid attack with an optimum design. *Construction and Building Materials*, 154, 675-686.
- [22] Köksal, F., Şahin, Y., Gencil, O., & Yiğit, İ. 2013 Fracture energy-based optimisation of steel fibre reinforced concretes. *Engineering Fracture Mechanics*, 107, 29-37.
- [23] Design-Expert (R) 8 software, Stat-Ease, Inc., Minneapolis, MN, USA 2012.

Optimizing compressive strength of concrete containing recycled tire rubber together with steel fiber exposed to high temperatures

Mahdi Nematzadeh^{1*}, Reza Zabihi²

1. Associate professor, University of Mazandaran

2. Graduate student, Mazandaran University of Science and Technology

* m.nematzadeh@umz.ac.ir

Abstract

In Iran, thousands of tons of plastic and rubber materials are discarded as wastes each year. The accumulation of these wastes around metropolitan areas has become a major environmental problem for cities and countries across the globe. Thus, many efforts have been made in recent years to find ways to recycle waste plastic materials and eliminate them from the environment. In this regard, reusing recycled materials is a strategy to deal with this problem. Since these waste materials do not have a proper quality to be used for usual life purposes such as household items, thus the best application for these materials is to use them as aggregates in the construction industry. Furthermore, using waste rubber materials such as scrap tires in the concrete mix is regarded as one of the efficient ways to recycle these waste materials. In addition, substituting a fraction of natural aggregates in the concrete mix by waste materials is a promising strategy to deal with environmental problems associated with these materials. Given that the presence of waste aggregate in concrete degrades its properties, adding fibers to the concrete mix has been shown to improve the mechanical performance. Therefore, in the present study, the compressive strength of the concrete reinforced with steel fibers and containing recycled scrap tire rubber aggregate was evaluated after exposure to high temperatures through an experimental program. Here, a total of nine mix designs were prepared for the experimental phase, with the test variables being the volume percentage of tire rubber aggregate as a replacement for natural sand (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. In addition, 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. In addition, 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). Finally, by employing the response surface method (RSM), an optimum solution was proposed for the design parameters in which the compressive strength of the fiber-reinforced concrete containing recycled tire aggregate was maximized at different temperatures.

Keywords: Elevated temperatures, Steel fiber, Recycled tire rubber, Compressive Strength, Optimization