



مقایسه رئولوژیکی، مکانیکی، اقتصادی و محیط‌زیستی کاربرد الیاف‌های فولادی صنعتی و بازیافتی در بتن‌های خودتراکم

امیرحسین صحرایی مقدم، علیرضا میرزا گل تبار روشن*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۸
بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹

کلمات کلیدی:

الیاف فولادی صنعتی
الیاف فولادی بازیافتی
بتن خودتراکم
خصوصیات مکانیکی
بهبینه‌یابی

خلاصه: الیاف‌های فولادی صنعتی (ISF) پرکاربردترین الیاف به منظور استفاده در بتن می‌باشند. تولید صنعتی این الیاف، علاوه بر افزایش هزینه‌ها، موجب تولید مقدار قابل توجهی از گازهای گلخانه‌ای می‌شود. از این رو، تحقیق حاضر با هدف بررسی امکان جایگزینی این نوع از الیاف‌ها با الیاف‌های فولادی بازیافت شده از لاستیک‌های فرسوده وسایل نقلیه (RSF) انجام شد. به منظور تحقق این هدف، خصوصیات رئولوژیکی بتن خودتراکم تازه (آزمایش‌های رینگ L، جعبه L، جعبه U و قیف V)، خصوصیات مکانیکی بتن سخت شده (آزمایش‌های مقاومت فشاری، کشش برزیلی و خمشی)، خصوصیات محیط‌زیستی (بررسی پتانسیل گرمایش جهانی (GWP)) و خصوصیات اقتصادی مربوط به ۱۳ طرح اختلاط حاوی ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد حجمی، ISF و RSF و ترکیب آن‌ها بررسی شد. نتایج بررسی‌ها نشان دهنده عملکرد ضعیف‌تر RSF در مقایسه با ISF در بهبود خصوصیات مکانیکی بود. کاربرد ۲ درصد ISF مقاومت‌های کششی و خمشی را به ترتیب ۱۱۴ و ۸۲ درصد افزایش داد. در صورتی که همین مقدار RSF این خصوصیات را به ترتیب ۸۰ و ۴۴ درصد افزایش داد. از طرفی، RSF در خصوصیات رئولوژیکی، محیط‌زیستی و اقتصادی عملکرد بهتری در مقایسه با ISF از خود نشان داد. جایگزینی ISF با RSF در طرح‌های اختلاط حاوی ۲ درصد الیاف توانست خصوصیات رئولوژیکی، محیط‌زیستی و اقتصادی را به ترتیب ۸، ۳۰ و ۶۵ درصد بهبود بخشد. در نهایت، با توجه به نتایج بهینه‌یابی چند متغیره انجام گرفته بر روی نتایج، استفاده از RSF از لحاظ رئولوژیکی، مکانیکی، محیط‌زیستی و اقتصادی نسبت به ISF مطلوب‌تر شناخته شد.

۱- مقدمه

موجب تولید مقدار قابل توجهی می‌شود [۸]. به همین دلیل محققین در چند سال گذشته به دنبال جایگزینی مناسب برای الیاف‌های فولادی صنعتی در بتن می‌باشند.

از طرفی، تعداد لاستیک‌های فرسوده وسایل نقلیه در سرتاسر جهان در طول یک سال حدوداً به ۱ میلیارد حلقه می‌رسد [۹]. از این تعداد لاستیک فرسوده تنها ۳۳٪ وارد چرخه بازیافت شده و باقیمانده‌ی آن‌ها سوزانده و یا در طبیعت رها می‌شوند. سوزاندن یا رها کردن لاستیک‌های فرسوده در طبیعت موجب ایجاد مشکلات زیست محیطی فراوانی می‌شود که بازیافت راهی برای جلوگیری از ایجاد این مشکلات است [۱۰]. از پودر لاستیک‌های فرسوده می‌توان در تولید لاستیک‌های نو و یا قیر استفاده کرد، در صورتی که سیم موجود در این لاستیک‌ها می‌تواند در تولید بتن الیافی مورد استفاده قرار گیرد [۱۱]. بنابراین، کاربرد این الیاف‌ها بعنوان یکی از موارد جایگزین الیاف‌های فولادی صنعتی مورد توجه محققین قرار گرفته است.

بتن از پرمصرف‌ترین مواد مورد استفاده در پروژه‌های مهندسی عمران می‌باشد که در فشار عملکردی بسیار خوب و در کشش عملکردی ضعیف از خود نشان می‌دهد [۱ و ۲]. در چند دهه‌ی اخیر، استفاده از الیاف بعنوان یکی از متداول‌ترین راه‌های تقویت عملکرد بتن، خصوصاً تحت نیروهای کششی و خمشی شناخته شده است [۳]. از متداول‌ترین الیاف‌های مورد استفاده به جهت بهبود عملکرد بتن، الیاف فولادی می‌باشد [۴ و ۵]. در طول چند دهه کاربرد الیاف‌های فولادی در بتن، انواع مختلفی از این نوع الیاف تولید شده است که از لحاظ شکل، طول و قطر متفاوت می‌باشند [۶ و ۷]. سالانه بیش از ۳۰۰ هزار تن الیاف فولادی در سرتاسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد که ۹۰ درصد از این الیاف‌ها به صورت صنعتی تولید می‌شوند [۶]. این در صورتی است که تولید صنعتی الیاف‌های فولادی علاوه بر پرهزینه بودن،

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ar-goltabar@nit.ac.ir



یک بررسی جامع در مورد مقایسه نقش الیاف‌های فولادی صنعتی و بازیافتی در خصوصیات رئولوژیکی، دوام (نفوذ یون کلرید)، مکانیکی (فشار، کشش و خمش)، محیط‌زیستی (پتانسیل گرمایش جهانی) و اقتصادی بتن‌های خودتراکم توسط Simalti و Singh [۱۲] انجام شد. در این تحقیق، نمونه‌ها با مقادیر مختلف الیاف‌های فولادی صنعتی، بازیافتی و ترکیب آن‌ها مسلح شدند. نتایج بهینه‌یابی انجام گرفته در این تحقیق نشان داد که الیاف‌های فولادی بازیافتی در مقایسه با الیاف‌های فولادی صنعتی به منظور کاربرد در بتن مطلوب‌تر هستند. Sahraei Moghadam و همکاران [۱۳] به بررسی نقش الیاف‌ها در بهبود عملکرد خمشی تیرهای بتنی پرداختند. در تحقیق مذکور تیرهای بتنی با استفاده از دو نوع الیاف شامل الیاف‌های فولادی و پلاستیکی مسلح شدند. نتایج این تحقیق نشان دهنده‌ی نقش قابل توجه الیاف فولادی در مقایسه با الیاف‌های پلاستیکی بود، به نحوی که ۱ درصد حجمی الیاف فولادی موجب افزایش ۹۸ درصدی و همین مقدار الیاف پلاستیکی موجب افزایش ۱۳ درصدی مقاومت خمشی تیرهای بتنی شد. در تحقیقی دیگر نیز Sahraei Moghadam و همکاران [۱۴] با انجام آزمایش ضربه با سرعت کم و زیاد بر روی دال‌های بتنی مسلح به الیاف، به بررسی نقش الیاف‌های فولادی و پلاستیکی در افزایش مقاومت ضربه‌ای دال‌ها پرداختند. در این تحقیق، آزمایش مقاومت ضربه‌ای با سرعت زیاد بصورت شلیک گلوله و آزمایش مقاومت ضربه‌ای با سرعت ضربه وزنه افتان تکرار شونده انجام شد. نتایج تحقیقات مذکور نشان دهنده‌ی آن بود که الیاف‌های فولادی در مقایسه با الیاف‌های پلاستیکی می‌توانند با ایجاد پل بر روی ترک‌ها به میزان قابل توجهی انسجام و مقاومت دال‌های بتنی در مقابل ضربه با سرعت زیاد و کم را بهبود بخشند. Caggiano و همکاران [۱۵] مقاومت فشاری بتن‌های حاوی ترکیب الیاف‌های فولادی صنعتی و بازیافتی را بررسی کردند. ایشان گزارش کردند که الیاف‌های فولادی صنعتی را می‌توان با مقدار مشابه‌ای از الیاف‌های فولادی بازیافتی، بدون تغییر در خصوصیات مکانیکی بتن، جایگزین کرد. در تحقیقی مشابه، Sengul [۱۶] خصوصیات مکانیکی مشابه بتن‌های مسلح شده به الیاف‌های فولادی صنعتی و بازیافتی را گزارش کرد. Mastali و Dalvand [۱۷] نیز تاثیر الیاف‌های فولادی بازیافتی را بر خصوصیات مختلف بتن خودتراکم بررسی کردند. این بررسی‌ها شامل خصوصیات رئولوژیکی بتن خودتراکم تازه، خصوصیات مکانیکی (فشار، کشش و خمش) و خصوصیات ضربه‌ای بود. در این تحقیق، بتن‌های خودتراکم با استفاده از ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد الیاف فولادی بازیافتی مسلح شدند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد

که الیاف‌های بازیافتی بر خصوصیات رئولوژیکی تاثیر منفی قابل توجه و بر مقاومت کششی و خمشی تاثیر مثبت قابل توجهی دارند، در صورتی که تاثیر این الیاف‌ها در افزایش مقاومت فشاری ناچیز است. در تحقیقی دیگر، Martinelli و همکاران [۱۸] اظهار داشتند که برای کسب عملکردی مشابه، بایستی الیاف‌های فولادی صنعتی را با مقدار بیشتری از الیاف‌های فولادی بازیافتی جایگزین کرد.

این مطالعه به مقایسه جامع نقش الیاف‌های فولادی صنعتی (ISF) و بازیافتی (RSF) در رفتار بتن‌های خودتراکم می‌پردازد. این مقایسه شامل بخش‌های رئولوژیکی، مکانیکی، محیط‌زیستی و اقتصادی می‌باشد. برای این منظور، ۱۳ طرح اختلاط حاوی ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد حجمی ISF، RSF و ترکیب این دو الیاف مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، یک روش بهینه‌یابی چند متغیره برای انتخاب طرح‌های اختلاط بهینه بکار گرفته شد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

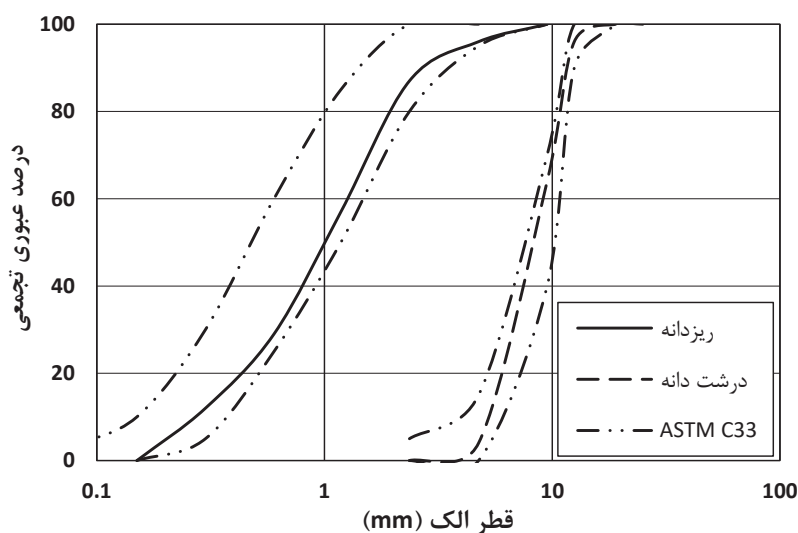
مصالح مصرفی در ساخت بتن خودتراکم: سیمان پرتلند معمولی (نوع ۲) بر اساس ASTM C150 [۱۹] در ساخت نمونه‌های این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. وزن مخصوص و سطح مخصوص سیمان مصرفی به ترتیب ۳/۱ و ۳۰۰۰ می‌باشند. ریزدانه‌های مورد استفاده از نوع شسته کوهستانی و درشت دانه مورد استفاده از نوع شن نخودی کوهستانی بودند. دانه‌بندی سنگدانه‌ها به گونه‌ای انجام شد که نمودار دانه‌بندی (به شکل ۱) نگاه کنید) در محدوده مجاز ASTM C33 [۲۰] قرار گرفت. آب مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها، آب شرب بود و برای ایجاد روانی کافی در بتن، از فوق روان کننده‌ی پلی‌کربوکسیلاتی (SP^۱) با نام تجاری Dezobuild D40 استفاده شد.

الیاف‌ها: در دهه‌های اخیر استفاده از انواع الیاف در جهت دستیابی به بتن مقاوم‌تر بصورت روزافزونی مورد توجه محققین قرار گرفته است [۲۱]. در این تحقیق از دو نوع الیاف شامل الیاف فولادی صنعتی (ISF) و بازیافتی (RSF) در تولید بتن مسلح به الیاف استفاده شد. ISF مورد استفاده از نوع دو سر قلاب با طول ۵۰ و قطر ۰/۸ میلی‌متر بود. برای تولید این نوع الیاف فولادی در سرتاسر جهان صنایع فولادی بسیاری در حال مصرف سوخت‌های فسیلی و تولید گازهای گلخانه‌ای هستند [۲۲]. تاثیرات نامطلوب تولید ISF بر محیط‌زیست موجب توجه محققین به جایگزینی این الیاف با الیاف‌های

جدول ۱. خصوصیات ISF و RSF مورد استفاده.

Table 1. Properties of ISF and RSF.

نام الیاف	روش تولید	طول (mm)	قطر (mm)	چگالی (ton/m ³)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)
ISF	صنعتی	۵۰	۰/۸	۷/۸۵	۲۰۰	۱۱۰۰
RSF	بازیافت	۵۰-۳۰	۰/۰-۲/۳	۷/۸۵	۲۰۰	۱۱۰۰



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌ها.

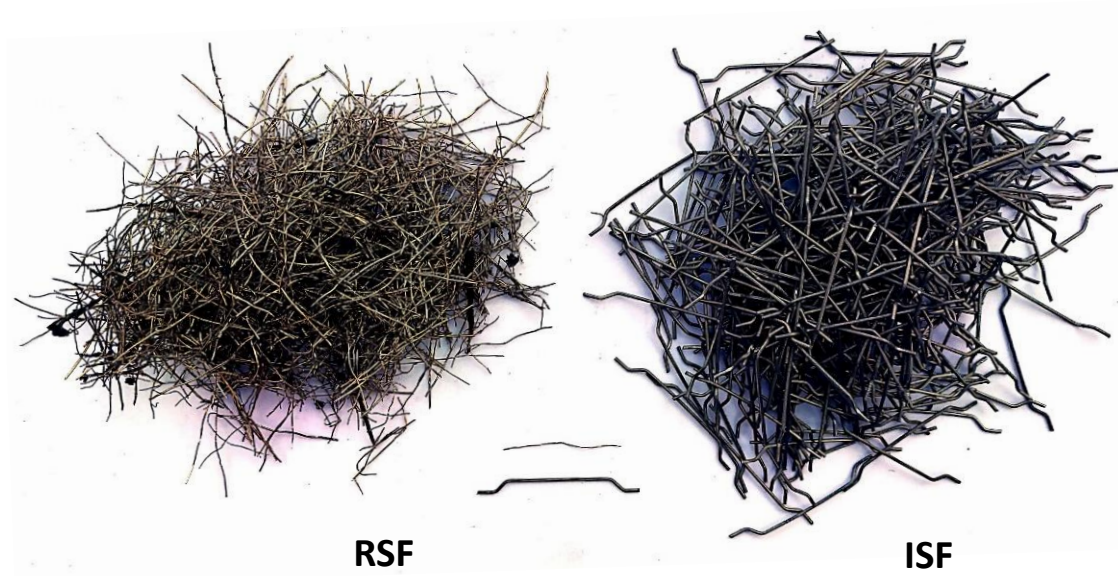
Fig. 1. Particle size distribution curves for aggregates.

مکانیکی ISF و RSF در جدول (۱) و تصویر مربوط به آن‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است.

۲-۲- طرح‌های اختلاط و ساخت نمونه‌ها

۱۳ طرح اختلاط حاوی ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد حجمی ISF، RSF و ترکیب این دو الیاف برای ساخت نمونه‌های این تحقیق در نظر گرفته شد. جزئیات طرح‌های اختلاط مورد استفاده در جدول (۲) نشان داده شده است. نامگذاری طرح‌های اختلاط به نحوی است که عدد مقابل حرف I نشان دهنده‌ی درصد ISF، عدد مقابل حرف R نشان دهنده‌ی درصد RSF و عدد مقابل IR نشان دهنده‌ی درصد ترکیب ISF و RSF موجود در طرح‌های اختلاط می‌باشد. برای هر کدام از آزمایش‌ها ۳ نمونه از هر طرح اختلاط ساخته شد. ساخت بتن با ترکیب خشک سنگدانه‌ها با سیمان در مخلوط‌کن

سازگار با محیط‌زیست شده است [۲۳]. یکی از مناسب‌ترین جایگزین‌ها برای ISF، الیاف‌های بازیافتی از لاستیک‌های فرسوده وسایل نقلیه (RSF) می‌باشند [۲۴]. بنابراین، در این تحقیق RSF بعنوان یکی دیگر از الیاف‌های مصرفی در نظر گرفته شد. خصوصیات ظاهری RSF متفاوت بود. در راستای تعیین این خصوصیات، بر روی ۲۰۰ عدد RSF اندازه‌گیری دقیقی انجام شد. این اندازه‌گیری‌ها نشان داد که بخش قابل توجهی از این الیاف‌ها دارای طولی بین ۳۰ تا ۵۰ میلی‌متر و قطری بین ۰/۲ تا ۰/۳ میلی‌متر می‌باشند. (طول ۶ درصد از الیاف‌های اندازه‌گیری شده کمتر از ۱۰ میلی‌متر، ۱۲ درصد بین ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر، ۶۴ درصد بین ۳۰ تا ۵۰ میلی‌متر و ۱۸ درصد بیشتر از ۵۰ میلی‌متر بود و همچنین، قطر ۷ درصد از الیاف‌های اندازه‌گیری شده کمتر از ۰/۱ میلی‌متر، ۱۴ درصد بین ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌متر، ۵۹ درصد بین ۰/۲ تا ۰/۳ میلی‌متر و ۲۰ درصد بزرگتر از ۰/۳ میلی‌متر بود). خصوصیات ظاهری و



شکل ۲. تصویر ISF و RSF مورد استفاده.

Fig. 2. Pictures of ISF and RSF.

جدول ۲. طرح‌های اختلاط.

Table 2. Mix proportions.

ردیف	نام طرح	سیمان (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	درشت‌دانه (kg/m ³)	ریزدانه (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	ISF (%)	RSF (%)
۱	REF	۵۵۰	۲۳۵	۷۱۵	۸۸۰	۴	۰	۰
۲	I0.5	۵۵۰	۲۳۵	۷۱۵	۸۸۰	۴	۰/۵	۰
۳	I1	۵۵۰	۲۳۵	۷۱۵	۸۸۰	۴	۱	۰
۴	I1.5	۵۵۰	۲۳۵	۷۱۵	۸۸۰	۴	۱/۵	۰
۵	I2	۵۵۰	۲۳۵	۷۱۵	۸۸۰	۴	۲	۰
۶	R0.5	۵۵۰	۲۳۵	۷۱۵	۸۸۰	۴	۰	۰/۵
۷	R1	۵۵۰	۲۳۵	۷۱۵	۸۸۰	۴	۰	۱
۸	R1.5	۵۵۰	۲۳۵	۷۱۵	۸۸۰	۴	۰	۱/۵
۹	R2	۵۵۰	۲۳۵	۷۱۵	۸۸۰	۴	۰	۲
۱۰	IR0.5	۵۵۰	۲۳۵	۷۱۵	۸۸۰	۴	۰/۲۵	۰/۲۵
۱۱	IR1	۵۵۰	۲۳۵	۷۱۵	۸۸۰	۴	۰/۵	۰/۵
۱۲	IR1.5	۵۵۰	۲۳۵	۷۱۵	۸۸۰	۴	۰/۷۵	۰/۷۵
۱۳	IR2	۵۵۰	۲۳۵	۷۱۵	۸۸۰	۴	۱	۱



شکل ۳. آزمایش رینگ J.

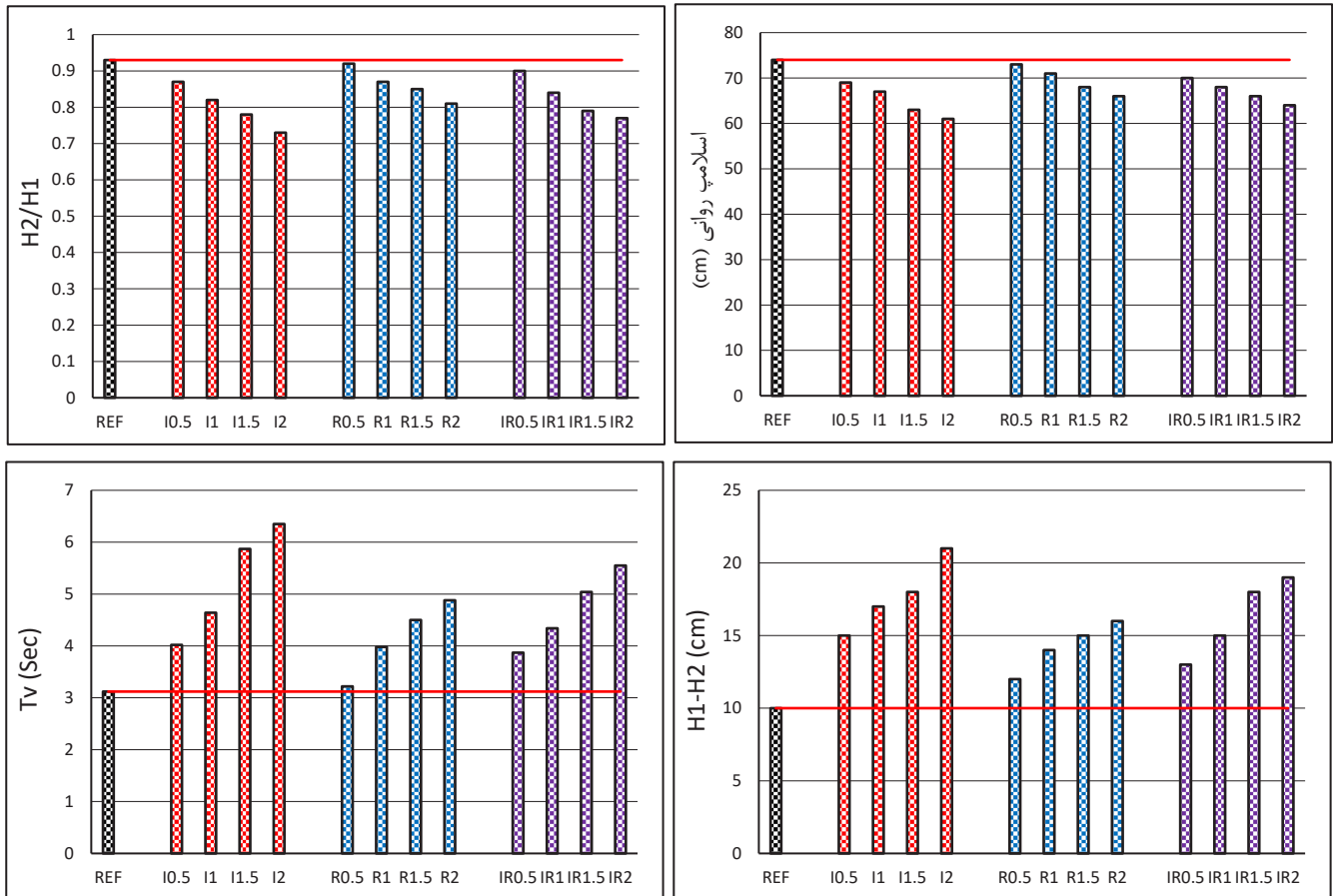
Fig. 3. Manner of J-ring test performance.

با بررسی میزان اسلامپ روانی برای طرح‌های اختلاط حاوی درصد‌های مختلف ISF و RSF شاهد تاثیر منفی هر دو نوع الیاف بر روانی بتن بودیم. استفاده از ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد ISF به ترتیب موجب کاهش ۷، ۹، ۱۵ و ۱۸ درصدی و استفاده از همین مقدار RSF موجب کاهش ۱، ۴، ۸ و ۱۱ درصدی روانی بتن شد. این نتیجه نشان دهنده‌ی روانی مطلوب‌تر طرح‌های اختلاط حاوی RSF نسبت به طرح‌های اختلاط حاوی ISF می‌باشد. نتایج مربوط به اسلامپ روانی طرح‌های اختلاط در شکل (۴ الف) نشان داده شده است. از طرفی، نتایج مربوط به پارامتر نشان دهنده‌ی تاثیر منفی هر دو نوع الیاف بر سرعت روانی بتن‌های خودتراکم بود که این تاثیر منفی برای ISF قابل توجه‌تر بود. بطوری که کاربرد ۲ درصدی ISF و RSF به ترتیب موجب افزایش ۱۴ و ۸ درصدی پارامتر نسبت به طرح اختلاط شاهد شده است. یکی از ویژگی‌های بسیار مهم در بتن‌های خودتراکم قابلیت عبور و پرکنندگی است. به منظور بررسی این ویژگی، آزمایش‌های جعبه L و جعبه U انجام شد. نسبت ارتفاع بتن در قسمت‌های افقی و قائم در آزمایش جعبه L و تفاوت ارتفاع بتن در دو قسمت قائم در آزمایش جعبه U بعنوان نتایج این آزمایش‌ها ثبت و به ترتیب در اشکال (۴ ب) و (۴ ج) نشان داده شده‌اند. نتایج این آزمایش‌ها نیز نشان دهنده‌ی کاهش قدرت عبور و پرکنندگی بتن‌های حاوی ISF و RSF می‌باشد. نتایج آزمایش جعبه L برای طرح‌های

شروع شد. بعد از گذشت ۲ دقیقه، ۹۰ درصد از آب مصرفی بصورت تدریجی به مخلوط اضافه گردید. ۱۰ درصد باقیمانده‌ی آب با SP ترکیب و سپس به مخلوط اضافه شد. برای جلوگیری از بهم چسبیدن الیاف‌ها در بتن، ISF و RSF در مرحله آخر و بصورت تدریجی به بتن اضافه شدند [۱۴]. نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در آب عمل‌آوری و سپس، آزمایش شدند.

۳- خصوصیات رئولوژیکی

خصوصیات رئولوژیکی بتن خودتراکم تازه حاوی ISF و RSF با استفاده از چهار آزمایش رینگ L، جعبه L، جعبه U و قیف V بررسی شد. هر کدام از آزمایش‌های مذکور بر روی ۳ نمونه از هر طرح اختلاط انجام گرفت. تصویری از نحوه‌ی انجام آزمایش رینگ J در شکل (۳) نشان داده شده است. در این آزمایش، دو پارامتر اسلامپ روانی و زمان مورد نیاز برای پخش شدگی بتن به میزان ۵۰ سانتی‌متر (از اهمیت بالایی برخوردار است [۲۳]). اگر در یک طرح اختلاط میزان اسلامپ روانی بیشتر از ۶۰ سانتی‌متر بدست آید، می‌توان آن را بعنوان یک طرح اختلاط خودتراکم در نظر گرفت [۲۴]. میزان اسلامپ روانی برای طرح اختلاط شاهد (فاقد الیاف) برابر با ۷۴ سانتی‌متر بدست آمد که این نتیجه نشان دهنده‌ی خاصیت خودتراکمی مطلوب طرح اختلاط مورد استفاده در ساخت نمونه‌های این تحقیق می‌باشد.



شکل ۴. نتایج آزمایش‌های خصوصیات رئولوژیکی: (الف) رینگ J، (ب) جعبه L، (ج) جعبه U و (د) قیف V.

Fig. 4. The results of rheological properties tests: (a) J-ring, (b) L-box, (c) U-box, and (d) V-funnel.

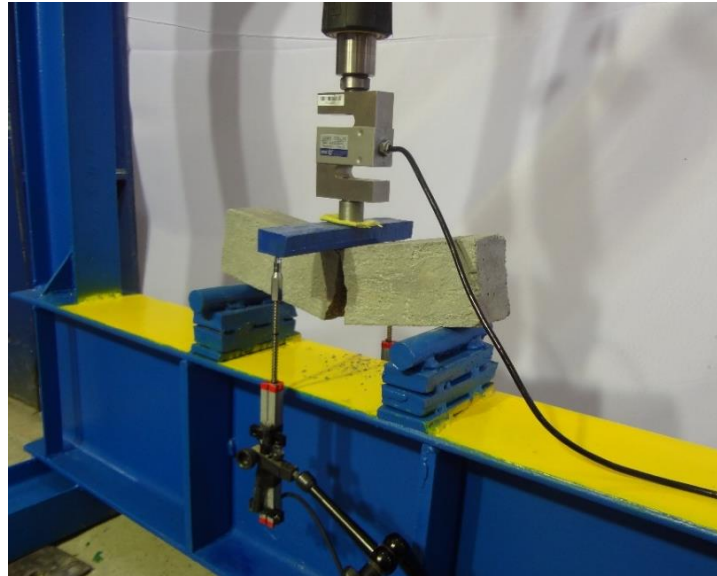
۴- خصوصیات مکانیکی

۴-۱- فشار

آزمایش مقاومت فشاری بر روی ۳ نمونه مکعبی با ضلع ۱۰ سانتی‌متر از هر طرح اختلاط انجام شد. این آزمایش با استفاده از یک دستگاه فشاری دیجیتال با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلونیوتن و با سرعت بارگذاری ۳/۴ مگاپاسکال بر ثانیه، بر اساس [۲۷] ASTM C39 انجام شد.

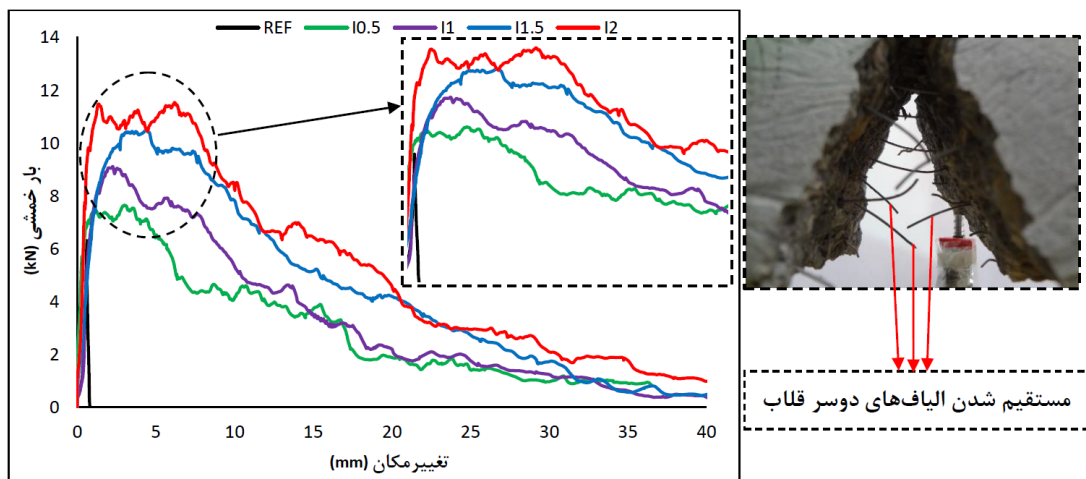
مقاومت فشاری بدست آمده برای نمونه‌ها در شکل (۷ الف) نشان داده شده است. مقاومت فشاری نمونه مرجع ۴۸/۲ مگاپاسکال بدست آمد. افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های مسلح به ISF و RSF زیر ۱۰ درصد بدست آمد که نشان دهنده‌ی تاثیر ناچیز این الیاف‌ها در افزایش مقاومت فشاری بتن است. نتایج مقاومت فشاری نشان دهنده‌ی افزایش ۲/۱، ۵/۸، و ۷/۳ درصدی مقاومت فشاری در اثر افزودن ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد ISF می‌باشد. در صورتی که افزایش میزان ISF به ۲ درصد موجب کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه حاوی ۱/۵ درصد ISF شد. این نتیجه نشان دهنده‌ی آن است که

اختلاط شاهد، I2 و R2 به ترتیب ۰/۹۳، ۰/۷۳ و ۰/۸۱ بدست آمد که نشان دهنده‌ی کاهش ۲۲ و ۱۳ درصدی قدرت عبور و پرکنندگی بتن به ترتیب در اثر افزودن ۲ درصد ISF و RSF می‌باشد. از طرفی، نتایج آزمایش جعبه U نیز بیان کننده‌ی افزایش ۱۱ و ۶ سانتی‌متری ارتفاع در دو قسمت قائم جعبه به ترتیب در اثر افزودن ۲ درصد ISF و RSF بود. بنابراین، هر دو نوع الیاف مورد استفاده موجب کاهش قدرت عبور و پرکنندگی بتن‌های خودتراکم می‌شوند، در صورتی که تاثیر منفی RSF در مقایسه با ISF کمتر است. یکی دیگر از آزمایش‌های موجود برای بررسی سرعت روانی بتن‌های خودتراکم، آزمایش قیف V می‌باشد. این آزمایش بر روی طرح‌های اختلاط انجام و نتایج مربوط به آن در شکل (۴ د) نشان داده شد. مشابه نتایج مربوط به پارامتر، در نتایج این آزمایش نیز عملکرد مناسب‌تر طرح‌های اختلاط حاوی RSF در مقایسه با طرح‌های اختلاط حاوی ISF مشاهده شد. در تحقیقات گذشته نیز نتایجی مشابه با نتایج تحقیق حاضر حاصل شده است [۲۵ و ۲۶ و ۱۷].

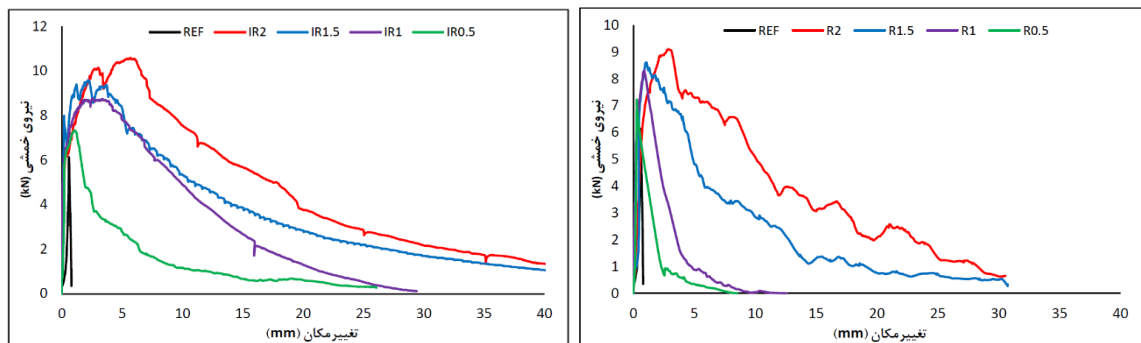


شکل ۵. نحوه انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای.

Fig. 5. Manner of three-point bending test performance.



(الف)

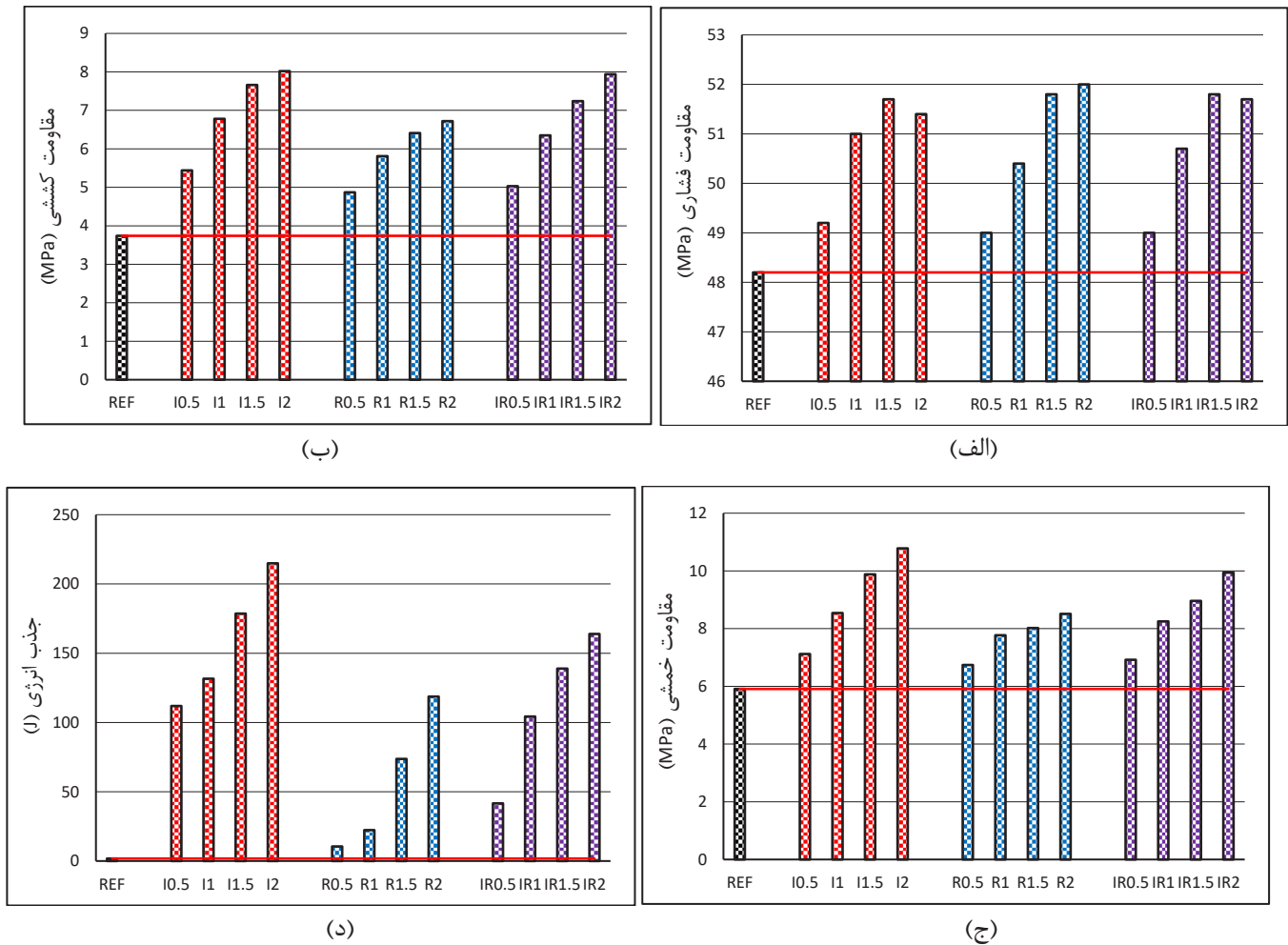


(ج)

(ب)

شکل ۶. نمودارهای بار - تغییر مکان: (الف) تیرهای حاوی ISF، (ب) تیرهای حاوی RSF و (ج) تیرهای حاوی ترکیب ISF و RSF.

Fig. 6. Load- displacement response of beams containing: (a) ISF, (b) RSF, and (c) combined ISF-RSF.



شکل ۷. نتایج آزمایش‌های خصوصیات مکانیکی: (الف) مقاومت فشاری، (ب) مقاومت کششی، (ج) مقاومت خمشی و (د) جذب انرژی خمشی.

Fig. 7. The results of mechanical properties tests: (a) compressive strength, (b) splitting tensile strength, (c) flexural strength, and (d) flexural absorbed energy.

افزایش مقاومت فشاری بتن دارد که نتایج مشابه با آن در تحقیق Maštali و همکاران [۱۷] نیز گزارش شده است.

۴-۲- کشش

آزمایش مقاومت کشش غیر مستقیم (برزیلی) بر روی ۳ نمونه استوانه‌ای با طول ۲۰ و قطر ۱۰ سانتی‌متر از هر طرح اختلاط با سرعت بارگذاری ۰/۰۵ مگاپاسکال بر ثانیه، بر اساس [۳۱] ASTM C۴۹۶ انجام گرفت. در این آزمایش مقاومت کششی بر اساس رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi.L.D} \quad (1)$$

استفاده بیش از حد ISF می‌تواند موجب کاهش مقاومت فشاری بتن شود. یکی از دلایل این موضوع افزایش تخلخل بتن در اثر استفاده از ISF می‌باشد [۲۸]. در مطالعات گذشته نیز هر دو نوع اثر افزایشی و کاهش‌ی ناشی از RSF گزارش شده است. Aslani و همکاران [۲۹] افزایش و Khaloo و همکاران [۳۰] کاهش مقاومت فشاری بتن‌های حاوی ISF نسبت به بتن بدون الیاف را گزارش کردند. بررسی مقاومت فشاری بتن‌های حاوی RSF نیز نشان داد که افزودن این الیاف در نسبت‌های پایین (۰/۵ و ۱ درصد حجم بتن) تأثیری کمتری نسبت به ISF دارد، در صورتی که استفاده از آن‌ها در نسبت‌های بالا (۱/۵ و ۲ درصد حجم بتن) موجب ایجاد عملکرد فشاری بهتری نسبت به ISF شده است. افزودن ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد RSF به ترتیب موجب افزایش ۱/۷، ۴/۶، ۷/۵ و ۷/۹ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد شده است. بنابراین، می‌توان اظهار داشت که افزودن RSF تأثیر جزئی در

در این رابطه، σ_f مقاومت خمشی، P نیروی خمشی اعمال شده، L طول دهانه (۲۴۰ میلی‌متر)، b عرض و d ارتفاع تیر می‌باشد. در این آزمایش از یک بارسنج با ظرفیت ۱۰۰ کیلو نیوتن برای تعیین بار وارده بر تیر و از یک خیزسنج به طول ۱۰ سانتی‌متر برای تعیین خیز تیر در حین آزمایش بهره گرفته شد. تصویری از نحوه انجام این آزمایش در شکل (۵) و نمودارهای بار - تغییرمکان بدست آمده از این آزمایش در شکل (۶) نشان داده شده است. در این آزمایش دو پارامتر مقاومت خمشی و جذب انرژی خمشی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج مربوط به آن‌ها ترتیب در اشکال (۷ ج) و (۷ د) نشان داده شده‌اند.

همانطور که از نتایج مشخص می‌باشد، ISF و RSF بطور قابل ملاحظه‌ای مقاومت خمشی بتن را نسبت به نمونه شاهد افزایش دادند. بعد از ایجاد ترک‌های ابتدایی در تیرها، الیاف‌های مورد استفاده با ایجاد اتصال بین دو طرف ترک‌های ایجاد شده موجب جلوگیری از گسترش آن‌ها شده و از این طریق مقاومت خمشی تیرهای بتنی را افزایش دادند [۳۶]. مقاومت خمشی تیر بتنی مرجع (فاقد الیاف) ۵/۹۱ مگاپاسکال بدست آمد که افزودن ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد ISF این عدد را به ترتیب تا ۷/۱۲، ۸/۵۴، ۹/۸۸ و ۱۰/۷۸ مگاپاسکال افزایش داد. در صورتی که همین مقدار RSF به ترتیب مقاومت خمشی ۶/۷۴، ۷/۷۷، ۸/۰۲ و ۸/۵۱ مگاپاسکال را در تیرها ایجاد نمود. بنابراین، بهترین مقاومت خمشی مربوط به نمونه حاوی ۲ درصد ISF بود که افزایش ۸۲ درصدی را نسبت به نمونه شاهد تجربه کرد. در صورتی که استفاده از همین مقدار RSF موجب افزایش ۴۴ درصدی مقاومت خمشی در مقایسه با نمونه شاهد شد. بنابراین، ISF در مقایسه با RSF عملکرد مطلوب‌تری را در افزایش مقاومت خمشی تیرها از خود نشان داده است. Ponikiewski و همکاران [۳۷] اثر دو نوع الیاف فولادی با طول‌های ۵ و ۳ سانتی‌متر را در افزایش مقاومت خمشی تیرهای بتنی خودتراکم بررسی نمودند. ایشان نتیجه گرفتند که الیاف‌های با طول بزرگتر دارای توزیع یکنواخت و الیاف‌های با طول کوتاه‌تر دارای توزیع سه بعدی در بتن هستند. نتایج این تحقیق نشان داد که هرچقدر طول الیاف بلندتر باشد، تاثیر آن در افزایش مقاومت خمشی بیشتر خواهد بود. در تحقیقی دیگر، افزایش ۴۰ و ۲۵ درصدی مقاومت خمشی تیرهای بتنی به ترتیب در اثر افزودن ۱/۵ درصد ISF و RSF توسط Mastali و همکاران [۲۴] گزارش شد.

علاوه بر مقاومت خمشی، در این آزمایش پارامتر جذب انرژی خمشی نیز بررسی گردید. جذب انرژی خمشی تیرها از طریق محاسبه مساحت زیر نمودار بار - تغییرمکان بدست آمد. ISF در افزایش جذب انرژی خمشی

در این رابطه، σ_f مقاومت کششی، P نیروی اعمال شده، D قطر و L طول نمونه استوانه‌ای می‌باشد. نتایج مربوط به این آزمایش در شکل (۷ ب) نشان داده شده است. در حین انجام این آزمایش، تاثیر قابل توجه ISF و RSF در افزایش مقاومت کششی بتن از طریق ایجاد پل بر روی ترک‌ها مشاهده شد. ISF به واسطه طول بلندتر و انتهای قلاب‌دار خود، در افزایش مقاومت کششی بتن نسبت به RSF موثرتر واقع شد. در بهترین حالت، افزودن ۲ درصد ISF توانست مقاومت کششی را از مقدار ۳/۷۴ مگاپاسکال در نمونه شاهد به ۸/۰۲ مگاپاسکال برساند، در صورتی که همین میزان RSF توانست مقاومت کششی ۶/۷۲ مگاپاسکالی را ایجاد نماید. مکانیسم شکست بتن‌های مسلح شده به الیاف‌های فولادی از الگوی ترک نسبتاً مشابهی پیروی می‌کنند که با ایجاد یک ترک مرکزی اصلی شروع و با ایجاد ترک‌های ثانویه در لبه‌های نمونه گسترش می‌یابد. تعداد و الگوی ترک‌های ثانویه تحت تاثیر مشخصات الیاف مصرفی قرار دارد [۳۲]. در این تحقیق، کاربرد ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد ISF موجب افزایش ۴۵، ۸۱، ۱۰۴، و ۱۱۴ درصدی و کاربرد همین مقدار RSF موجب افزایش ۳۰، ۵۵، ۷۱، و ۸۰ درصدی مقاومت کششی نسبت به نمونه فاقد الیاف شد. بنابراین، کاربرد ISF به منظور افزایش مقاومت کششی بتن نسبت به RSF در اولویت می‌باشد. در مطالعات پیشین نیز، نتایجی مشابه با نتایج تحقیق حاضر بدست آمده است [۲۴]. در صورتی که Aghaee و همکاران [۳۳] در تحقیق خود RSF را بعنوان جایگزین ISF، بدون تغییر در مقاومت کششی بتن، معرفی نمودند. تحقیقات گذشته طول، شکل و خصوصیات مکانیکی الیاف‌های فولادی را از جمله مشخصات تاثیرگذار این الیاف‌ها در افزایش مقاومت کششی بتن معرفی کرده‌اند [۳۴].

۴-۳- خمش

این آزمایش بصورت خمش سه نقطه‌ای (اعمال یک بار متمرکز در وسط دهانه) بر روی تیرهای کوچک بتنی به طول ۳۲، عرض ۶ و ارتفاع ۸ سانتی‌متر، بر اساس ASTM C۱۶۰۹ [۳۵] انجام گرفت. مقاومت خمشی در این آزمایش بر اساس رابطه (۲) محاسبه گردید.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2)$$

بر اساس پایگاه داده EcoInvent [۳۹] بدست آمده‌اند. همانطوری که از اطلاعات نشان داده شده در جدول (۳) مشخص است، میزان GWP برای ISF به میزان ۴/۳ برابر بیشتر از RSF است. این نتیجه حاکی از ایجاد GHG بسیار زیاد در طی تولید صنعتی الیاف فولادی می‌باشد که با تولید این الیاف از طریق بازیافت می‌توان بخش قابل توجهی از آن را کاهش داد. میزان GWP مربوط به یک متر مکعب بتن برای تمام طرح‌های اختلاط مورد استفاده محاسبه شد. مقدار GWP بدست آمده برای طرح‌های اختلاط بصورت صعودی در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطوری که از نتایج مشخص است، میزان GWP طرح‌های اختلاط تحت تاثیر نوع و مقدار الیاف مصرفی قرار دارد. طرح اختلاط حاوی ۲ درصد ISF بیشترین میزان GWP و طرح اختلاط فاقد الیاف کمترین میزان GWP را به خود اختصاص دادند. از طرفی، با مقایسه میزان GWP بدست آمده برای طرح‌های اختلاط حاوی ISF و RSF، شاهد اختلاف قابل توجه میان آن‌ها هستیم. GWP مربوط به طرح اختلاط حاوی ۲ درصد RSF در مقایسه با طرح اختلاط حاوی مقدار مشابه ISF به میزان ۳۰ درصد کاهش یافته است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که RSF از لحاظ خصوصیات محیط‌زیستی الیاف مناسب‌تری به منظور استفاده در بتن می‌باشد.

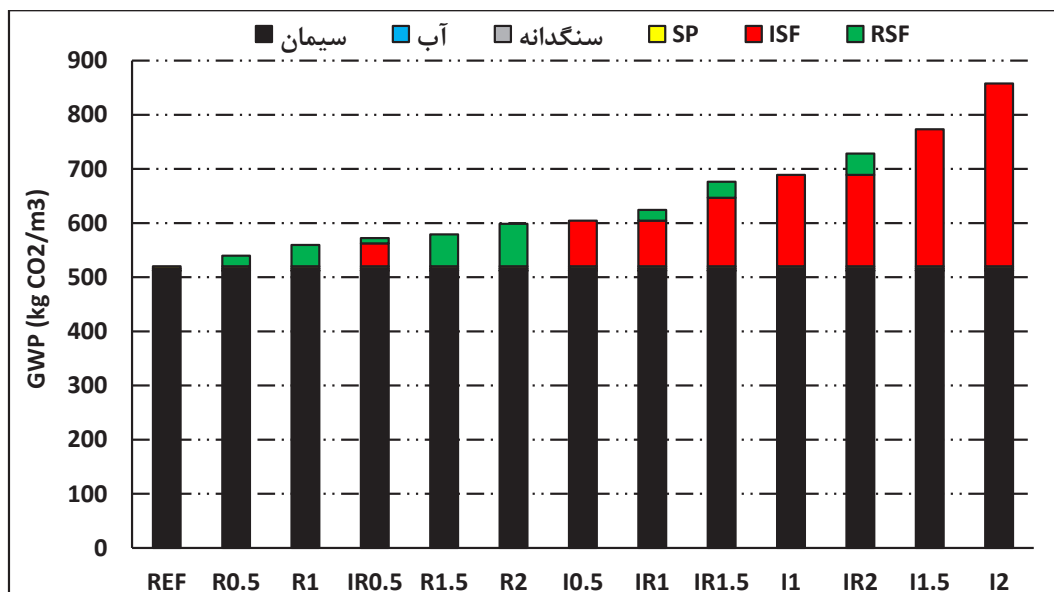
۶- خصوصیات اقتصادی

بین طرح‌های اختلاط بر اساس هزینه اجزاء تشکیل دهنده آن‌ها، مقایسه‌ی اقتصادی صورت گرفت. جدول (۴) نشان دهنده‌ی هزینه‌ی هر جزء از اجزاء تشکیل دهنده‌ی طرح‌های اختلاط در زمان نگارش مقاله می‌باشد. همانطوری که از اطلاعات نشان داده شده در این جدول مشخص است، هزینه ISF در مقایسه با RSF بسیار بیشتر است. بطوری که هزینه هر کیلوگرم ISF تقریباً معادل هزینه ۳/۹ کیلوگرم RSF می‌باشد. هزینه ساخت یک متر مکعب بتن از تمام طرح‌های اختلاط مورد استفاده محاسبه و بصورت صعودی در شکل (۹) نشان داده شده است. همانطوری که از این نتایج مشخص است، هزینه ساخت طرح‌های اختلاط تحت تاثیر مقدار و نوع الیاف مصرفی متغیر است. کمترین هزینه مربوط به طرح اختلاط مرجع (۷۴۱ هزار تومان در ازای هر متر مکعب) و بیشترین هزینه مربوط به طرح اختلاط حاوی ۲ درصد ISF (۶ میلیون و ۲۳۶ هزار تومان در ازای هر متر مکعب) می‌باشد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی ISF با RSF هزینه یک متر مکعب بتن را در طرح‌های اختلاط حاوی ۱/۵، ۱، ۰/۵ و ۲ درصد الیاف به ترتیب ۴۸، ۵۹، ۶۳ و ۶۵ درصد کاهش می‌دهد. بنابراین، RSF در مقایسه با ISF الیاف مقرون بصره‌تری برای استفاده در بتن است.

تیرهای بتنی بیشترین تاثیر را داشت. تیر مرجع (فاقد الیاف) پس از رسیدن به حداکثر مقاومت خود و به محض ایجاد ترک‌های اولیه، بدون جذب انرژی، به گسیختگی رسید. به گونه‌ای که جذب انرژی این تیر برابر با ۱/۷۸ ژول حاصل شد. از طرفی، تیرهای مسلح به RSF بعد از رسیدن به حداکثر مقاومت خود به آرامی و با جذب انرژی بسیار مطلوبی به گسیختگی رسیدند. در نمودارهای بار - تغییرمکان تیرهای مسلح به الیاف شاهد نقش قابل توجه الیاف‌ها در بهبود رفتار بعد از ترک‌خوردگی تیرها هستیم. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، مساحت زیر نمودار بار - تغییرمکان تیرهای مسلح به ISF به میزان قابل توجهی افزایش یافته است که نشان دهنده‌ی عملکرد مطلوب این الیاف در افزایش جذب انرژی تیرها می‌باشد. ISF به واسطه‌ی انتهای قلاب‌دار خود توانست در لحظه‌ی حداکثر بار با ایجاد پل بر روی ترک‌های ایجاد شده در وجه کششی تیر موجب تاخیر در افزایش عرض ترک و گسترش آن به سمت تار خنثی شود. قسمت فوقانی نمودارهای بار - تغییرمکان مربوط به تیرهای مسلح به ISF که بصورت چند قله‌ای ظاهر شده است، موید همین موضوع است که ISF با انتهای قلاب‌دار خود توانسته است با ایجاد پیوند در دو طرف ترک‌های ایجاد شده موجب افزایش مقاومت و جذب انرژی تیرها شود. در نهایت، این الیاف‌ها با مستقیم شدن تحت بارهای بیشتر از ماتریس جدا شده و سپس، شکست تیر اتفاق افتاده است. این پدیده در شکل (۶) نشان داده شده است. افزودن ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد ISF موجب افزایش جذب انرژی خمشی از ۱/۷۸ ژول در تیر شاهد به ترتیب تا ۱۱/۹، ۱۳۱/۶، ۱۷۸/۶ و ۲۱۴/۹ ژول گردید. از طرفی، RSF در افزایش جذب انرژی بتنی عملکرد ضعیف‌تری در مقایسه با ISF از خود نشان داد. مشاهدات نشان داد که عملکرد RSF در عمل پل زدن بر روی ترک‌ها و جلوگیری از گسترش آن‌ها در مقایسه با ISF چندان مطلوب نبود. به همین دلیل، افزایش جذب انرژی خمشی در تیرهای حاوی RSF کمتر از تیرهای حاوی ISF بود. جذب انرژی خمشی ۱/۵، ۲۳/۳، ۲۳/۷ و ۱۱۸/۷ ژولی به ترتیب برای تیرهای حاوی ۱/۵، ۱، ۰/۵ و ۲ درصد RSF بدست آمد.

۵- خصوصیات محیط‌زیستی

گرما در جو زمین توسط گازهای گلخانه‌ای (GHG) محبوس می‌شود [۳۸]. پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) برای هر ماده نشان دهنده‌ی مقدار GHG تولیدی توسط آن ماده می‌باشد. جدول (۳) نشان دهنده‌ی میزان GWP برای اجزاء تشکیل دهنده‌ی طرح‌های اختلاط می‌باشد. این اطلاعات



شکل ۸. GWP طرح‌های اختلاط به ترتیب صعودی.

Fig. 8. Global warming potential (GWP) of the mixtures in ascending order.

جدول ۳. GWP اجزاء تشکیل دهنده طرح‌های اختلاط (kg eq CO₂) [۲۴ و ۳۹].

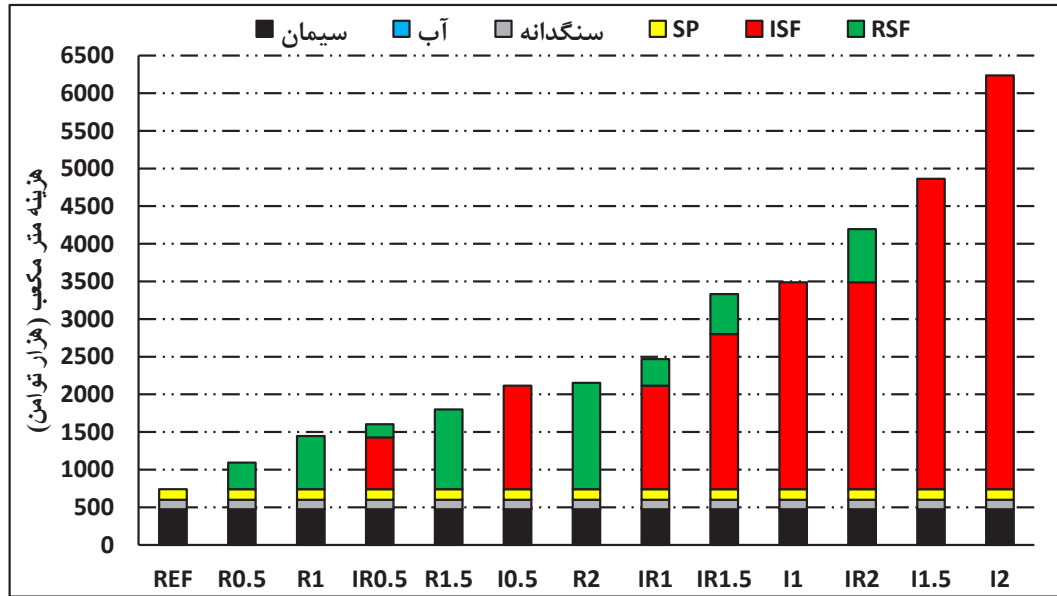
Table 3. Global warming potential for ingredient of mixtures (kg eq CO₂) [24 and 39].

سیمان	سنگدانه	آب	SP	ISF	RSF
۰/۹۳۱	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۰۱	۱/۰۶۴	۲/۱۵	۰/۵

جدول ۴. هزینه هر کیلوگرم از اجزاء تشکیل دهنده‌ی طرح‌های اختلاط (هزار تومان).

Table 4. The cost per kilogram of ingredient of mixtures (thousand Tomans).

سیمان	سنگدانه	آب	SP	ISF	RSF
۰/۸۶	۰/۰۸	۰/۰۰۱۴	۴۵	۳۵	۹



شکل ۹. هزینه ساخت طرح‌های اختلاط به ترتیب صعودی.

Fig. 9. Cost of the mixtures in ascending order.

$$d_j = \left[\frac{\max f_j - Y_j}{\max f_j - \min f_j} \right]^{l_j} \quad (4)$$

در این روابط، d_j مقدار تابع مطلوبیت، Y_j پاسخ و $\min f_j$ و $\max f_j$ به ترتیب کمینه و بیشینه مقدار بین پاسخ‌های مربوط به معیار j^{th} می‌باشد. توان l_j پارامتر وزنی برای معیار j^{th} است. این پارامتر نشان دهنده اهمیت معیار مورد نظر است. از آنجایی که معیارهای این تحقیق دارای اهمیت یکسانی می‌باشند، پارامتر وزنی برای تمامی آن‌ها مساوی ۱ در نظر گرفته شد [۴۳]. تابع مطلوبیت برای معیارهای خصوصیات رئولوژیکی و مکانیکی که حد بالای آن مطلوب است، با استفاده از رابطه (۳) و برای معیارهای خصوصیات محیط‌زیستی و اقتصادی که حد پایین آن مطلوب است، با استفاده از رابطه (۴) بدست آمد. سپس، تابع مطلوبیت کلی (D) به عنوان تابع هدف مطابق با رابطه (۵) در نظر گرفته شد.

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_m)^{\frac{1}{m}} \quad (5)$$

در این رابطه، m تعداد معیارها می‌باشد. چون در این تحقیق معیارهای تصمیم‌گیری شامل خصوصیات رئولوژیکی، مکانیکی (مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی)، محیط‌زیستی و اقتصادی می‌باشد، $m = 6$ در نظر گرفته

۷- بهینه‌یابی چند متغیره

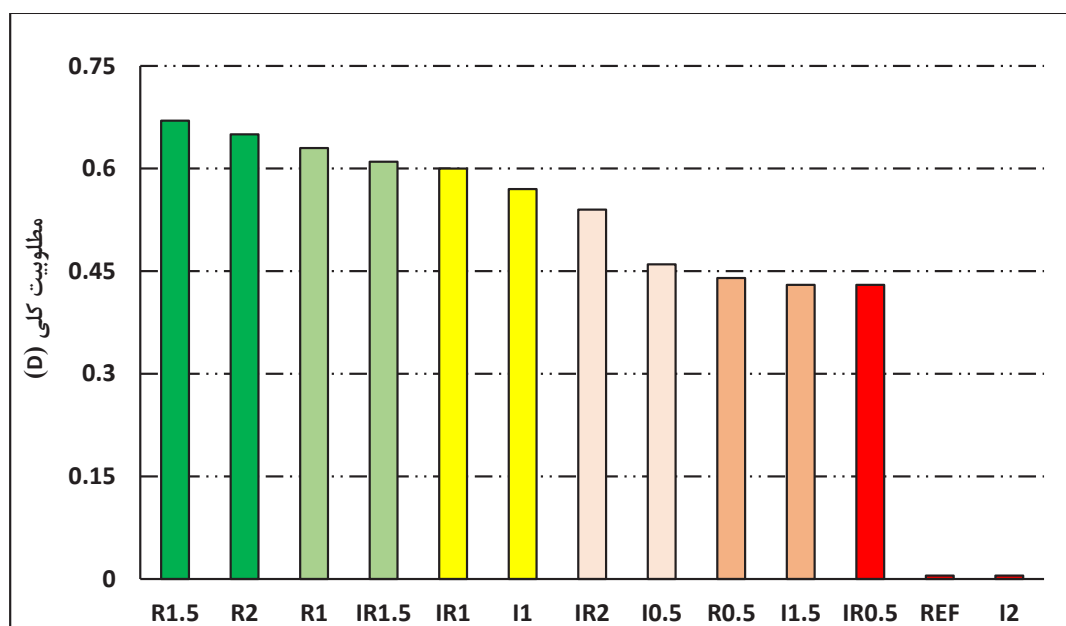
بر اساس خصوصیات رئولوژیکی، مکانیکی، محیط‌زیستی و اقتصادی طرح‌های اختلاط، یک روش بهینه‌یابی مورد استفاده قرار گرفت. هدف از انجام این بهینه‌یابی، انتخاب مناسب‌ترین طرح اختلاط از نظر رئولوژیکی، مکانیکی، محیط‌زیستی و اقتصادی می‌باشد. روش بهینه‌یابی مورد استفاده از یک تابع عملکرد برای تصمیم‌گیری تشکیل شده است. در تابع عملکرد مذکور متغیرهای مستقل و وابسته بر نتیجه تصمیم‌نهایی تاثیر می‌گذارند [۴۰]. اجزاء تشکیل دهنده طرح‌های اختلاط، متغیرهای مستقل می‌باشند، در صورتی که خصوصیات رئولوژیکی، مکانیکی، محیط‌زیستی و اقتصادی، متغیرهای وابسته‌ای هستند که تحت تاثیر متغیرهای مستقل قرار دارند. اگر در فرآیند تصمیم‌گیری تنها یک معیار موثر باشد، مقدار بیشینه یا کمینه آن به راحتی تعیین می‌شود و نیازی به انجام عملیات بهینه‌یابی نیست، اما از آنجایی که در تحقیق حاضر با چند معیار برای انتخاب طرح اختلاط بهینه مواجه هستیم، عملیات بهینه‌یابی را انجام خواهیم داد. روش بهینه‌یابی مورد استفاده در این تحقیق، بهینه‌یابی چند متغیره می‌باشد که از تابع مطلوبیت تشکیل شده است [۴۱]. مقدار این تابع بین ۰ و ۱ بدست می‌آید. مقدار تابع مطلوبیت با استفاده از روابط (۳ و ۴) محاسبه شده است [۴۲].

$$d_j = \left[\frac{Y_j - \min f_j}{\max f_j - \min f_j} \right]^{l_j} \quad (3)$$

جدول ۵. مطلوبیت کلی طرح‌های اختلاط.

Table 5. Overall desirability of mixtures

مطلوبیت کلی	مطلوبیت						طرح اختلاط
	خصوصیات اقتصادی	خصوصیات محیط‌زیستی	خصوصیات مکانیکی			خصوصیات رئولوژیکی (اسلامپ روانی)	
			فشار	کشش	خمش		
*	۱	۱	*	*	*	۱	REF
۰/۴۶	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۲۵	۰/۴	۰/۲۶	۰/۶۲	I0.5
۰/۵۷	۰/۵	۰/۵	۰/۵۴	۰/۷۱	۰/۷۴	۰/۴۶	I1
۰/۴۳	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۸۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۱۵	I1.5
*	*	*	۱	۱	۰/۸۴	*	I2
۰/۴۴	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۱۷	۰/۲۶	۰/۲۱	۰/۹۲	R0.5
۰/۶۳	۰/۸۶	۰/۸۸	۰/۳۸	۰/۴۸	۰/۵۸	۰/۷۷	R1
۰/۶۷	۰/۷۹	۰/۸۳	۰/۴۳	۰/۶۲	۰/۹۲	۰/۵۴	R1.5
۰/۶۵	۰/۷۲	۰/۷۷	۰/۵۳	۰/۷	۱	۰/۳۸	R2
۰/۴۳	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۲۱	۰/۳	۰/۲۱	۰/۶۹	IR0.5
۰/۶	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۴۸	۰/۶۱	۰/۶۶	۰/۵۴	IR1
۰/۶۱	۰/۵۲	۰/۵۴	۰/۶۳	۰/۸۲	۰/۹۵	۰/۳۸	IR1.5
۰/۵۴	۰/۳۶	۰/۳۸	۰/۸۳	۰/۹۸	۰/۹۲	۰/۲۳	IR2



شکل ۱۰. مطلوبیت کلی طرح‌های اختلاط به ترتیب نزولی.

Fig. 10. Overall desirability of mixtures in descending order.

میزان ۱۱۴ درصد ثبت گردید، این افزایش در نمونه حاوی همین مقدار RSF به ۸۰ درصد کاهش یافت.

۴- افزایش مقاومت چشم‌گیری در بتن‌های حاوی ISF و RSF در آزمایش مقاومت خمشی مشاهده شد. این افزایش مقاومت در اثر دوختگی ترک‌های خمشی ایجاد شده در تیر توسط ISF و RSF حاصل شد. ISF از عمل دوختگی ترک‌های خمشی عملکرد مطلوب‌تری در مقایسه با RSF از خود نشان داد. در اثر افزودن ۲ درصد ISF و RSF به ترتیب افزایش ۸۲ و ۴۴ درصدی در مقاومت خمشی تیرهای بتنی ثبت شد.

۵- بررسی جذب انرژی خمشی بعنوان یک پارامتر بسیار مهم در رفتار بعد از ترک‌خوردگی تیرهای بتنی نشان دهنده‌ی تاثیر قابل توجه ISF و RSF در بهبود رفتار خمشی تیرهای بتنی بود. در صورتی که ISF به واسطه‌ی طول بلندتر و انتهای قلاب‌دار خود عملکرد بهتری را در این زمینه از خود نشان داد. جایگزینی ISF با RSF در تیرهای بتنی حاوی ۲ درصد الیاف موجب کاهش جذب انرژی خمشی از ۲۱۴/۹ ژول به ۱۱۸/۷ ژول شد.

۶- تجزیه و تحلیل اقتصادی طرح‌های اختلاط نشان داد که RSF در مقایسه با ISF الیاف مقرون به صرفه‌تری به منظور مسلح کردن بتن می‌باشد. علاوه براین، بررسی GWP طرح‌های اختلاط نیز حاکی از سازگاری محیط‌زیستی بیشتر RSF در مقایسه با ISF بود.

۷- بهینه‌یابی چند متغیره در بین طرح‌های اختلاط، RSF را بعنوان الیافی ارزشمندتر به منظور دستیابی به خصوصیات مطلوب رئولوژیکی، مکانیکی، محیط‌زیستی و اقتصادی در مقایسه با ISF معرفی نمود.

منابع

- [1] M. Nehdi, J.D. Ladanchuk, Fiber synergy in fiber-reinforced self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal*, 101 (6) (2004) 508–517.
- [2] M. Mastali, A. Dalvand, A. Satarifard, The impact resistance and mechanical properties of reinforced self-compacting concrete with recycled glass fibre reinforced polymers, *Journal of Cleaner Production*, 124 (2016) 312–324.
- [3] M. Mastali, A. Dalvand, A. R. Satarifard, Z. Abdollahnejad, B. Nematollahi, J. G. Sanjayan, M. Illikainen, A comparison of the effects of pozzolanic binders on the hardened-state properties of high-strength cementitious composites reinforced with waste tire

شد. بعد از محاسبه تابع مطلوبیت برای تمام معیارها، تابع مطلوبیت کلی مطابق با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد. چنانچه تابع مطلوبیت مربوط به حتی یک معیار برای طرح اختلاطی برابر با صفر بدست آمده باشد، تابع مطلوبیت کلی آن نیز برابر با صفر بدست خواهد آمد [۴۴]. هرچقدر مقدار تابع مطلوبیت کلی برای یک طرح اختلاط بیشتر بدست آید، آن طرح اختلاط از فواید بیشتری برخوردار است. نتایج مربوط به بهینه‌یابی برای تمام معیارها در جدول (۵) آمده است. مطلوبیت کلی طرح‌های اختلاط نیز بصورت نزولی نیز در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مطلوبیت کلی برای ۲ طرح اختلاط REF و I۲ برابر با صفر بدست آمد. نتیجه مذکور نشان دهنده‌ی آن است که استفاده از این ۲ طرح اختلاط کمترین فواید را به دنبال خواهد داشت. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، طرح‌های اختلاط حاوی RSF بیشترین مقدار مطلوبیت کلی را به خود اختصاص داده‌اند. بنابراین، نتایج این بهینه‌یابی نشان می‌دهد که استفاده از RSF نسبت به ISF از لحاظ خصوصیات رئولوژیکی، مکانیکی، محیط‌زیستی و اقتصادی مطلوب‌تر است.

۸- نتیجه‌گیری

این تحقیق به ارائه نتایج مقایسه‌ی خصوصیات رئولوژیکی، مکانیکی، محیط‌زیستی و اقتصادی بتن‌های خودتراکم مسلح به ISF، RSF و ترکیب آن‌ها می‌پردازد. برای این منظور، ۱۳ طرح اختلاط حاوی ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد حجمی ISF، RSF و ترکیب آن‌ها بررسی و نتایجی به شرح زیر حاصل گردید:

۱- ISF و RSF بر خصوصیات رئولوژیکی بتن خودتراکم از قبیل روانی، سرعت جریان و قابلیت پرنندگی و عبور تاثیر منفی می‌گذارد. این تاثیر منفی در بتن‌های حاوی ISF مشهودتر بود.

۲- تاثیر ISF و RSF بر مقاومت فشاری بتن ناچیز (کمتر از ۱۰ درصد) بود. افزودن ISF تا مقدار ۱/۵ درصد حجم بتن موجب افزایش اندک و افزودن بیش از این مقدار موجب کاهش مقاومت فشاری بتن گردید. در نسبت‌های کم (۰/۵ و ۱ درصد حجم بتن) ISF عملکرد مطلوب‌تر و در نسبت‌های بالا (۱/۵ و ۲ درصد حجم بتن) RSF عملکرد مطلوب‌تری را در آزمایش مقاومت فشاری ایجاد نمود.

۳- مقاومت کششی بتن در اثر افزودن ISF و RSF بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. ISF به واسطه‌ی طول بلندتر و انتهای قلاب‌دار خود تاثیر به مراتب بیشتری نسبت به RSF در افزایش مقاومت کششی بتن داشت. بیشترین افزایش مقاومت کششی در نمونه حاوی ۲ درصد ISF به

- [14] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab, A. Dalvand, Experimental investigation of (FRSC) cementitious composite functionally graded slabs under projectile and drop weight impacts, *Construction and Building Materials*, 237 (2020) 117522.
- [15] A. Caggiano, P. Folino, C. Lima, E. Martinelli, M. Pepe, On the mechanical response of hybrid fiber reinforced concrete with recycled and industrial steel fibers, *Constr. Build. Mater.*, 147 (2017) 286–295.
- [16] O. Sengul, Mechanical behavior of concretes containing waste steel fibers recovered from scrap tires, *Construct Build Mater.*, 122 (2016) 649–658.
- [17] M. Mastali, A. Dalvand, Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete, *construction and building materials*, 125 (2016) 196–209.
- [18] E. Martinelli, A. Caggiano, H. Xargay, An experimental study on the post-cracking behaviour of hybrid industrial/recycled steel fiber-reinforced concrete, *Construct Build Mater.*, 94 (2015) 290–298.
- [19] ASTM C150 (2012). “Standard Specification for Portland Cement.”
- [20] ASTM C33 / C33M-18, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [21] M. Mastali, A. Dalvand, The impact resistance and mechanical properties of fiber reinforced self-compacting concrete (SCC) containing nano-SiO₂ and silica fume, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22 (1) (2018) 1–27.
- [22] D. Burchart-Korol, Life cycle assessment of steel production in Poland: a case study, *J. Clean. Prod.*, 54 (2013) 235–243.
- [23] S. Nagataki, H. Fujiwara, Self-compacting property of highly-flowable concrete, in: V.M. Malhotra (Ed.), *American Concrete Institute*, 154 (1995) 301–314.
- [24] M. Mastali, A. Dalvand, A.R. Sattarifard, M. Illikainen, Development of eco-efficient and cost-effective reinforced selfconsolidation concretes with hybrid industrial/recycled steel fibers, *Construction and fibers, Compos. Pt. B-Eng*, 162 (2019) 134–153.
- [4] I. Havlikova, I. Merta, A. Schneemayer, V. Vesely, H. Simonova, B. Korycanska, Z. Kersner, Effect of fiber type in concrete on crack initiation, *Appl. Mech. Mater.*, 769 (2015) 308–311.
- [5] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab, A. Dalvand, Flexural and impact performance of functionally graded reinforced cementitious composite (FGRCC) panels, *Structures*, 29 (2021) 1723–1733.
- [6] A.E. Naaman, Engineered steel fibres with optimal properties for reinforcement of cement composites, *Adv. Concr. Technol.*, 1 (2003) 241–252.
- [7] N. Spinella, Shear strength of full-scale steel fibre-reinforced concrete beams without stirrups, *Comput. Concr.*, 11 (2013) 365–382.
- [8] L. Lourenco, Z. Zamanzadeh, J.A.O. Barros, M. Rezazadeh, Shear strengthening of RC beams with thin panels of mortar reinforced with recycled steel fibres, *J. Clean.Prod.*, 194 (2018) 112–126.
- [9] M. Ahmadi, A. Hasani, M. Soleymani, Role of Recycled Steel Fibers from Tires on Concrete Containing Recycled Aggregate from Building Waste, *Concrete research journal*, 7 (2) (2014) 57–68. (In Persian)
- [10] M. Leone, F. Micelli, M.A. Aiello, G. Centonze, D. Colonna, Experimental study on bond behavior in fiber-reinforced concrete with low content of recycled steel fiber, *J. Mater. Civ. Eng.*, 28 (9) (2016) 87–99.
- [11] M. Jalal, Compressive strength enhancement of concrete reinforced by waste steel fibers utilizing nano SiO₂, *Middle East J. Sci. Res.*, 12 (3) (2012) 382–391.
- [12] A. Simalti, A.P. Singh, Comparative study on performance of manufactured steel fiber and shredded tire recycled steel fiber reinforced self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials*, 266 (2021) 121102.
- [13] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab, Assessment of hybrid FRSC cementitious composite with emphasis on flexural performance of functionally graded slabs, *Construction and Building Materials*, 250 (2020) 118904.

- deformed steel fibers, Part I: bond-slip mechanisms, *ACI Mater. J*, 91 (1994) 435–446.
- [35] ASTM C1609 / C1609M-19 (2019). “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading).”
- [36] M. Mastali, I.B. Valente, Joaquim A.O. Barros, M.F. Delfina, Gonçalves, Development of innovative hybrid sandwich panel slabs: experimental results, *J Compos. Struct*, 133 (2015) 476–498.
- [37] T. Ponikiewski, J. Gołaszewski, Properties of steel fibre reinforced selfcompacting concrete for optimal rheological and mechanical properties in precast beams, *J. Procedia Eng*, 65 (2013) 290–295.
- [38] M. Abdali Kia, F. Omidinasab, A. Sahraei Moghadam, Replacement of OPC with RCP in concrete containing RCA (Investigation of mechanical, economic and environmental characteristics), *Amirkabir journal of civil engineering*, 53 (1) (2020) 107-126 (In Persian).
- [39] Ecoinvent, *The Life Cycle Inventory Data Version 2.0*, 2008.
- [40] F. Bayramov, C. Tasdemir, M. A. Tasdemir, Optimization of fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method, *Cement Concr Compos*, 26 (2004) 665-675.
- [41] W.F. Smith, *Experimental design for formulation*, American Statistical Association, (2005).
- [42] O. Sengul, M.A. Tasdemir, Compressive strength and rapid chloride permeability of concretes with ground fly ash and slag, *Mater Civ Eng*, 21 (2009) 494-501.
- [43] O. Sengul, Mechanical behavior of concretes containing waste steel fibers recovered from scrap tires, *Construct Build Mater*, 122 (2016) 649-58.
- [44] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab, S. Moazami Goodarzi, Assessment of mechanical properties of environmentally friendly concrete with emphasis on selection of optimal mix designs in terms of resistance and economy, *Amirkabir journal of civil engineering*. 53 (8) (2020) 3403-3422.
- Building Materials*, 166 (2018) 214–226.
- [25] A. Khaloo, A. Esrafil, M. Kalani, M.H. Mobini, Use of polymer fibres recovered from waste car timing belts in high performance concrete, *Constr Build Mater*, 80 (2015) 7–31.
- [26] U. Khan, R.A. Khan, N.K. Pandey, A. Tyagi, Fresh and Hardened Properties of Hybrid Fibre Reinforced Self Consolidating Concrete Containing Basalt and Polypropylene Fibres, *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8 (2) (2019) 3356–3361.
- [27] ASTM C 39/C 39M-03 (2003). “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.”
- [28] A. El-Dieb, Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultrahigh- strength self-compacting concrete incorporating steel fibers, *J. Mater. Des*, 30 (2009) 4286–4292.
- [29] F. Aslani, S. Nejadi, Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress–strain curve, and energy dissipated under compression, *J. Compos. B: Eng*, 53 (2013) 121–133.
- [30] A. Khaloo, E. Molaei Raisi, P. Hosseini, H. Tahsiri, Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers, *J Constr. Build. Mater*, 51 (2014) 179–186.
- [31] ASTM C 496/C 496M-11 (2011). “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.”
- [32] B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk, S. Amziane, Failure mechanism of fibre reinforced concrete *Mater. Struct*, 48 (2014) 2713-2726.
- [33] K. Aghaee, K. Tsavdaridis, M. Yazdi, Investigation into the mechanical properties of structural lightweight concrete reinforced with waste steel wires, *Mag. Concr. Res*, 66 (2014) 1–9.
- [34] N. Banthia, J. Trottier, Concrete reinforced with

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. h. Sahraei Moghadam, A. r. Mirza Goltabar Roshan, *Rheological, mechanical, environmental, and economic comparison of the use of industrial and recycled steel fibers in self-compacting concrete, Amirkabir J. Civil Eng., 55(7) (2023) 1487-1504.*

DOI: [10.22060/ceej.2023.22071.7895](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.22071.7895)



