

ارزیابی مقاومت سایشی و دوام بتن حاوی خرده‌لاستیک و الیاف بازیافتی حاصل از تایرهای فرسوده

علی زارعی، کارشناسی ارشد مهندسی عمران و محیط‌زیست، گروه راه و ترابری، دانشگاه تربیت
مدرس، تهران

حامد روح‌الامینی*، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان،
بندرعباس

مجتبی زارعی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه تربیت
مدرس، تهران

Email: Rooholamini@Hormozgan.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۴ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴

چکیده

این مطالعه، با هدف بررسی اثرات خرده‌لاستیک و الیاف فولادی بازیافتی بر خواص دوام بتن معمولی انجام شده است. اثرات خرده‌لاستیک (۲۰-۰ درصد) و الیاف فولادی بازیافت شده (۵-۰ درصد) بر مقاومت فشاری، مقاومت در برابر سایش و چرخه ذوب- یخبندان بتن ارزیابی شد. نتایج نشان داد که جایگزینی بخشی از سنگ‌دانه‌های ریزدانه با خرده‌لاستیک منجر به دستیابی به نتایج متفاوت سایشی، بسته به نوع آزمایش سایش، گردید. با استفاده از مدل‌سازی روش پاسخ سطح حاصل از تحلیل نتایج آزمایش‌های سایشی چرخ پهن و چرخ ساینده، این نتیجه حاصل شد که افزودن خرده‌لاستیک به بتن منجر به افزایش مقاومت سایشی در آزمایش سایش چرخ پهن و کاهش مقاومت سایشی در آزمایش چرخ ساینده می‌گردد. در طول آزمایش سایش چرخ پهن، ذرات خرده‌لاستیک موجود در بتن لاستیکی از سطح صاف در معرض سایش بتن فراتر رفته و سطح مالش بتن را محدود کرده و منجر به مقاومت سایشی بیشتر در مقایسه با مخلوط شاهد می‌شود. برعکس، در آزمون سایش چرخ ساینده، بیشترین سطح ساییده شده، سطوح با بیشترین محتوای خرده‌لاستیک به دلیل پیوند ضعیف‌تر خرده‌لاستیک با خمیر سیمان و وجود تخلخل بیشتر در ناحیه انتقالی بتن می‌باشد. همچنین، این نتیجه حاصل شد که افزودن الیاف فلزی بازیافتی به بتن لاستیکی تأثیری در دوام سایشی آن ندارد. در حالی که استفاده از خرده‌لاستیک به‌عنوان دانه‌بندی ریزدانه منجر به از دست رفتن جرم بیشتری در چرخه ذوب- یخبندان در حضور محلول نمکی ۳٪ می‌شود، یک اثر هم‌افزایی بین خرده‌لاستیک و الیاف فولاد بازیافتی بر مقاومت در برابر چرخه ذوب- یخبندان وجود دارد. ترکیبی از ۱۲/۵ درصد خرده‌لاستیک و ۰/۳۴ درصد الیاف فلزی بازیافتی باعث حداکثر اثر هم‌افزایی در مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب- یخبندان، به‌ویژه در چرخه‌های بالاتر، می‌شود. واژه‌های کلیدی: بتن حاوی خرده‌لاستیک، الیاف فلزی بازیافتی، مقاومت سایشی، چرخه ذوب- یخبندان، دوام

۱. مقدمه

امروزه، مسئله ذخیره انرژی و کاهش تولید گاز کربن دی‌اکسید، استفاده بهینه از منابع، افزایش کیفیت مصالح و ساخت سازه‌های اقتصادی، تبدیل به مسائل بسیار مهمی در جهان شده است (یونگ و همکاران، ۲۰۱۳). برخی از مصالح بازیافتی، از جمله تایرهای فرسوده، در سطح محیط پراکنده شده و راحت‌ترین راه‌حل برای از بین بردن آن‌ها سوزاندن است. این سوزاندن، منجر به تولید گازهای سمی و آلودگی آب‌ها، خاک و هوا می‌گردد. لذا، در بسیاری از کشورها، سوزاندن تایرهای فرسوده ممنوع اعلام شده و تلاش در جهت استفاده از این مصالح به‌عنوان مصالح بازیافتی در فناوری‌های نوآورانه گردیده است. با گسترش سریع تولید تایرهای فرسوده در اثر توسعه سیستم‌های حمل‌ونقلی، روند تولید تایرهای فرسوده به‌شدت افزایش یافته است، تایرهایی با الاستیسیته زیاد، چگالی کم، عمر طولانی و قیمت ارزان. که از این تایرها در صنایع اتومبیل‌سازی (ساخت سپر)، سازه‌های ضدآب و درزگیرها استفاده می‌شود (شیونگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ چن و همکاران، ۲۰۲۲). این مواد منجر به آلودگی موسوم به آلودگی سیاه محیط‌زیست می‌شوند. تخمین زده شده که سالانه حدود ۱۰۰۰ میلیون تایر به پایان عمر مفید خود می‌رسند، که این عدد در سال ۲۰۳۰ چیزی در حدود ۱۲۰۰ میلیون تایر خواهد بود، و تا کنون حدود ۵۰۰۰ میلیون تایر در سطح محیط رها شده است. این تایرهای فرسوده محل مناسبی برای پرورش حشرات و جانوران موذی بوده و یک خطر بالقوه آتش‌سوزی محسوب می‌گردند (توماس و همکاران، ۲۰۱۴). امروزه، مسئله استفاده از خرده‌لاستیک در بتن به یک مسئله بسیار مهم، بر اساس برنامه توسعه سبز، که منجر به توسعه ساختمان‌های سبز می‌شود، تبدیل شده است. در این راستا، باید خرده‌لاستیک و الیاف فلزی بازیافتی حاصل از تایرها به‌عنوان مصالح بازیافتی مورد استفاده قرار گیرند؛ که این امر می‌تواند با افزودن آن‌ها به بتن به‌عنوان

جایگزین سنگ‌دانه یا سیمان صورت گیرد (گسوغلو و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین، از خرده‌لاستیک می‌توان در روسازی‌های بتنی و به‌عنوان مواد پرکننده در روسازی‌های بتنی استفاده کرد (لی و همکاران، ۲۰۱۴). تحقیقات در مورد بتن حاوی خرده‌لاستیک از سال ۱۹۹۰ آغاز شده است. در این تحقیقات، از خرده‌لاستیک، پودر لاستیک، تکه‌های لاستیک و یا ترکیبی از این‌ها در بتن استفاده گردیده است و پارامترهای مقاومتی و دوام بتن اندازه‌گیری شده است (آرونکومار و همکاران، ۲۰۲۰؛ چرخ‌تاب مقدم و همکاران، ۲۰۲۱). در این تحقیقات، از این مواد به‌جای سیمان، درشت‌دانه، ریزدانه و یا ترکیبی از آن‌ها استفاده گردیده است. بتن‌های مورد استفاده در این تحقیقات دارای انواع مختلفی از جمله بتن معمولی، بتن متخلخل و بتن با مقاومت بالا بوده است. به‌طور کلی، در تحقیقات صورت گرفته، روش‌های زیادی برای استفاده از خرده‌لاستیک و الیاف فلزی بازیافتی از تایرهای فرسوده در بتن وجود دارد که شامل: استفاده از خرده‌لاستیک به‌عنوان جایگزین ریزدانه یا درشت‌دانه یا ترکیبی از هر دو در درصد‌های مختلف، افزودن خرده‌لاستیک به بتن در درصد‌های مختلف، اضافه کردن خرده‌لاستیک به همراه سایر مواد افزودنی همچون سیلیکا فوم به بتن و اصلاح خرده‌لاستیک با ایجاد پوشش‌هایی همچون سیلان روی آن و افزودن آن به بتن، است. همچنین، از الیاف فلزی بازیافتی به‌صورت حجمی و وزنی در بتن استفاده گردیده است (زارعی و حسنی، ۲۰۱۹).

بر اساس تحقیق گسوغلو و همکاران (۲۰۱۴)، مقاومت سایشی بتن متخلخل با افزایش درصد خرده‌لاستیک از صفر تا ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. در این زمینه، پودر لاستیک با ابعاد کوچک‌تر از یک میلی‌متر مقاومت بیشتری در برابر سایش، نسبت به خرده‌لاستیک، از خود نشان می‌دهد. با افزایش پودر لاستیک از صفر به

۲۰٪، عمق سایش از ۰/۹۱ درصد به ۰/۱۷ درصد کاهش می‌یابد (توماس و گوپتا، ۲۰۱۶).

بر اساس تحقیق توماس و گوپتا (۲۰۱۶)، بتن خردده‌لاستیکی مقاومت بیشتری نسبت به بتن شاهد از خود نشان می‌دهد. در حین آزمایش سایش، ذرات خردده‌لاستیک حاضر در بتن خردده‌لاستیک، فراتر از سطح صاف بتن معمولی عمل کرده و آسیاب/مالش^۱ سطح بتن را با عمل کردن شبیه برش^۲ محصور می‌کنند. این عمل، کار پودر ساینده روی سطح بتن را به حداقل رسانده و بنابراین بتن خردده‌لاستیک بسیار مقاوم‌تر در برابر سایش خواهد بود. این در حالی است که بر اساس تحقیقات سوکونتا سوکول و چایکاو (۲۰۰۶)، بلوک‌های بتنی خردده‌لاستیک دارای مقاومت سایشی کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد هستند، همچنین، نمونه‌های حاوی دانه‌بندی‌های ترکیبی خردده‌لاستیک دارای مقاومت سایشی بهتری نسبت به نمونه‌های با خردده‌لاستیک یک اندازه بوده‌اند. بر اساس تحقیقات توماس و گوپتا (۲۰۱۶) عمق سایش در اثر افزایش درصد خاکستر تابر افزایش می‌یابد؛ در حالی که با افزایش درصد الیاف خردده‌لاستیک، کاهش می‌یابد. در برخی حالات (نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ و جایگزینی الیاف خردده‌لاستیک به میزان ۲۵٪) نیز عمق سایش بیشتر از حد مجاز بر اساس استاندارد BIS-1237 بوده است. ژانگ و لی (۲۰۱۲) روی مقاومت سایشی بتن حاوی سیلیکا فوم و خردده‌لاستیک تحقیق کرده‌اند. نتایج حاکی از آن بود که خردده‌لاستیک مقاومت فشاری را کاهش، ولی مقاومت سایشی را افزایش می‌دهد. همچنین، افزودن سیلیکا فوم، هر دو مقاومت فشاری و سایشی بتن خردده‌لاستیک را افزایش می‌دهد. مقاومت سایشی بتن خردده‌لاستیک بیشتر از بتن حاوی سیلیکا فوم و بتن حاوی سیلیکا فوم بهتر از نمونه شاهد بوده است.

تا به امروز، تحقیقات بسیار زیادی روی خواص مکانیکی بتن‌های حاوی خردده‌لاستیک و الیاف فلزی بازیافتی صورت گرفته است (چو و همکاران، ۲۰۱۰؛ السیف و همکاران، ۲۰۱۸؛ محمد و آدامو، ۲۰۱۸). ولی در زمینه دوام بتن حاوی خردده‌لاستیک و الیاف فلزی، به‌خصوص دوام در برابر چرخه‌های ذوب-یخبندان، تحقیقات بسیار کمی انجام شده است (زارعی و حسنی، ۲۰۱۹). همچنین، بر اساس مطالعات انجام گرفته توسط لو و همکاران (۲۰۲۰)، افزودن پودر لاستیک به بتن منجر به افزایش وزن ازدست‌داده آن در چرخه‌های ذوب-یخبندان می‌گردد. در حالی که اضافه شدن الیاف فلزی به بتن حاوی خردده‌لاستیک موجب بهبود روند کاهش وزن در اثر چرخه‌های ذوب-یخبندان شده و وزن ازدست‌رفته در این چرخه‌ها را کاهش می‌دهد.

در تحقیق ژو و همکاران (۲۰۱۲) روی دوام چرخه ذوب-یخبندان بتن حاوی خردده‌لاستیک، از خردده-لاستیک با اندازه‌های مختلف استفاده شد. بر اساس نتایج این تحقیق، افزودن خردده‌لاستیک با اندازه مش کوچک‌تر از ۶۰، دوام در برابر چرخه ذوب-یخبندان، با ریز تر شدن اندازه خردده‌لاستیک افزایش می‌یابد. در حالی که اگر اندازه مش بزرگ‌تر از ۶۰ باشد، هرچه که اندازه ذرات خردده‌لاستیک افزایش یابد، دوام در برابر ذوب و یخبندان کاهش می‌یابد.

الخرس و صمدی (۲۰۰۴) دوام ذوب-یخبندان بتن حاوی پودر لاستیک را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، نمونه‌های شاهد دوام کمی در برابر ذوب-یخبندان از خود نشان دادند و مدول الاستیسیته آن‌ها بعد از ۵۰ چرخه ذوب و یخبندان ۵۵٪ کاهش یافت. در طرف مقابل، جایگزینی پودر لاستیک با ریزدانه منجر به دستیابی به همان مدول الاستیسیته پس از ۱۵۰ چرخه ذوب-یخبندان گردید. همچنین، جایگزینی ۱۰٪ ریزدانه با

¹- Grinding/rubbing

²- Brush

اساس استاندارد ASTM C779 مطالعه گردید. در ادامه، دوام بتن در برابر چرخه‌های ذوب-یخبندان در شرایط وجود املاح نمکی در چرخه‌های مختلف آزمایش گردید و به جهت ارزیابی مؤثرتر اندرکنش استفاده توأمان خرده‌لاستیک و الیاف فلزی بازیافتی از روش تحلیل دو-عاملی برای تحلیل بهتر نتایج استفاده گردید.

۲. مطالعات آزمایشگاهی

در این تحقیق، برای بررسی دوام بتن با جایگزینی خرده-لاستیک و الیاف فلزی بازیافتی از آزمایش‌های مقاومت فشاری، دوام سایشی و چرخه ذوب-یخبندان استفاده شده است. در این راستا، یک برنامه جامع آزمایشگاهی طراحی و اعمال شد که در ادامه به تشریح آن پرداخته می‌شود.

۲-۱. مشخصات مصالح مصرفی

مواد و مصالح مصرفی در این تحقیق عبارتند از: سنگ‌دانه، سیمان، آب، افزودنی فوق روان کننده، خرده-لاستیک و الیاف فلزی بازیافتی، که در ادامه به ویژگی‌ها و مشخصات هر یک پرداخته شده است.

سنگ‌دانه مورد استفاده در این تحقیق از نوع شکسته رودخانه‌ای است که شامل دو بخش ریزدانه و درشت‌دانه بوده که به ترتیب بر اساس جداول ۲-۴ و ۴-۴ نشریه ۱۰۱ سازمان برنامه‌و بودجه، تحت عنوان مشخصات فنی عمومی راه، انتخاب شده است و دارای دانه‌بندی ارائه شده در شکل ۱ و مشخصات فیزیکی و مکانیکی ارائه شده در جداول ۱ و ۲ است. همچنین، در این تحقیق، از سیمان پرتلند تیپ یک استفاده شده است.

خرده‌لاستیک منجر به دستیابی به نسبت مدول الاستیسیته ۶۰٪ پس از ۲۲۵ چرخه ذوب و یخبندان شد.

یونگ و همکاران (۲۰۱۳) خوردگی بتن حاوی خرده‌لاستیک بر اثر سولفات را مورد مطالعه قرار داده‌اند. به‌منظور انجام آزمایش، چرخه‌های متوالی خشک و تر شدن با سولفات روی نمونه‌ها اجرا گردید. نتایج نشان داد که با افزایش مدت‌زمانی که نمونه در معرض چرخه‌ها قرار می‌گیرد، کاهش وزن نمونه افزایش می‌یابد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بتن حاوی ۵٪ خرده‌لاستیک گذشته شده از الک شماره ۳۰ بهترین عملکرد را در مقابل سولفات از خود نشان می‌دهد. سوکونتا سوکول و چایکاو (۲۰۰۶) در تحقیق خود روی بتن حاوی خرده‌لاستیک به این نتیجه رسیدند که مقاومت سایشی بتن با افزودن خرده‌لاستیک به آن کاهش می‌یابد. همچنین، استفاده از خرده‌لاستیک متشکل از اندازه‌های مختلف، مقاومت بهتری را نسبت به سایش نمونه‌های حاوی خرده‌لاستیک (با یک اندازه) از خود نشان می‌دهد.

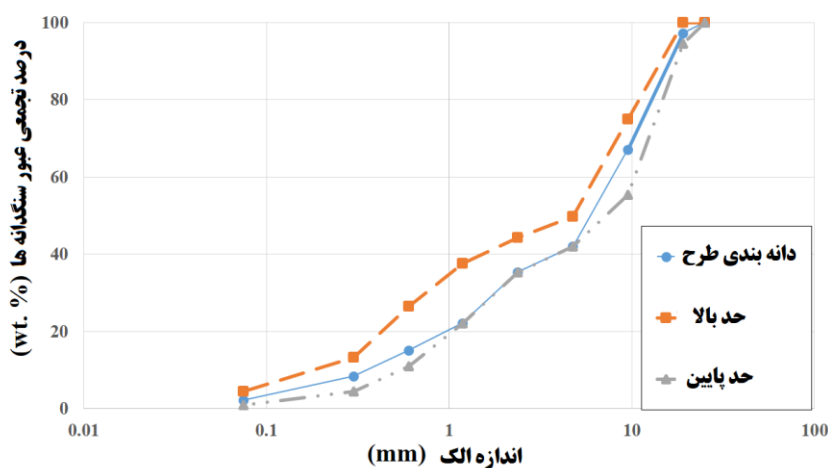
از آنجایی که برخلاف خصوصیات مکانیکی (گونسی و همکاران، ۲۰۰۴؛ توماس و همکاران، ۲۰۱۶) تحقیقات بسیار محدودی در زمینه‌ی بررسی دوام بتن حاوی توأمان خرده‌لاستیک و الیاف فلزی بازیافتی حاصل از تایرهای فرسوده صورت گرفته است، از این‌رو، در این تحقیق، با در نظرگیری ۱۵ طرح مخلوط، پس از بررسی اثر افزودن خرده‌لاستیک (در درصدهای جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰) و الیاف فلزی بازیافتی (در درصدهای حجمی ۰/۲۵ و ۰/۵) بر مقاومت فشاری بتن، مقاومت سایشی مخلوط‌های طرح با استفاده از دو روش ارزیابی سایش، آزمایش بر اساس استاندارد BS EN 1338: 2003 و آزمایش سایش با استفاده از دستگاه چرخ ساینده بر

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی درشت‌دانه

شماره	نام آزمایش	استاندارد مربوطه	مشخصات درشت‌دانه
۱	حداکثر اندازه درشت‌دانه	(ASTM C33 2017)	۱۹ میلی‌متر
۲	وزن مخصوص بالک	(ASTM C127 2012)	۲۵۵۹ کیلوگرم بر متر مکعب
۳	درصد جذب آب در حالت اشباع با سطح خشک	(ASTM C127 2012)	۱/۶۵ درصد
۴	درصد سایش لس‌آنجلس	(ASTM-C131 2006)	۱۸ درصد

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ریزدانه

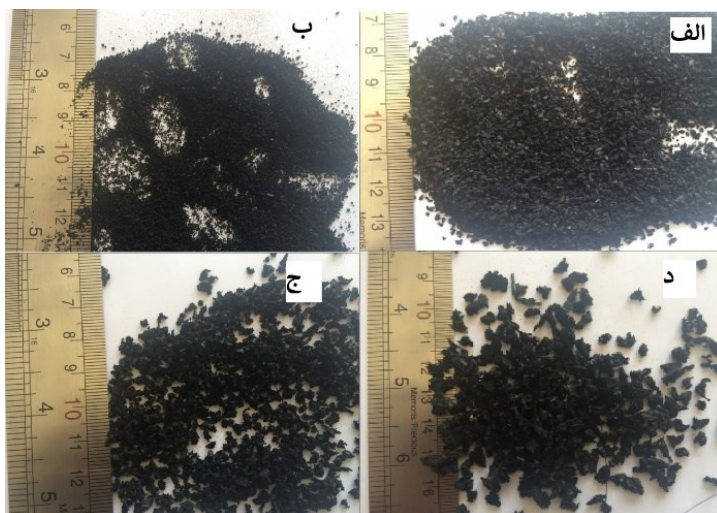
شماره	نام آزمایش	استاندارد مربوطه	مشخصات ریزدانه
۱	وزن مخصوص بالک	(ASTM-C128 2017)	۲۵۷۳ کیلوگرم بر متر مکعب
۲	درصد جذب آب در حالت اشباع با سطح خشک	(ASTM-C128 2017)	۲/۱ درصد
۳	مدول نرمی	(ASTM-D6758 2021)	۴/۱۲ درصد
۴	درصد هم‌ارز ماسه‌ای	(ASTM-D2419 2016)	۷۸ درصد



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی سنگ‌دانه مورد استفاده در تحقیق حاضر

است تا ضمن افزایش کارایی بتن، نسبت آب به سیمان را کاهش دهد که این موضوع سبب بسیاری مزایای دیگر، از جمله افزایش مقاومت‌ها و دوام بتن، خواهد شد. خرده‌لاستیک استفاده شده در این تحقیق از یک کارخانه بازیافت تایرهای فرسوده در شهرک صنعتی اشتهاارد واقع در استان البرز تهیه شده است که شامل چهار دانه‌بندی مختلف است، که در **Error!** Reference source not found. ۲ نشان داده شده است.

آب مورد استفاده در این تحقیق بر اساس آیین‌نامه بتن ایران و نشریه شماره ۱۰۱ سازمان برنامه‌و بودجه، با عنوان مشخصات فنی روسازی، آب آشامیدنی است و نکته بسیار مهم در استفاده از آب در ترکیب، پایین نگه‌داشتن نسبت آب به سیمان تا حدی است که بتن کارایی مورد نظر را داشته باشد. یکی از مشکلاتی که افزودن خرده‌لاستیک به بتن ایجاد می‌کند، کاهش کارایی بتن است. برای حل این مشکل در این تحقیق، از افزودنی فوق‌روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات اتر استفاده شده



شکل ۲. انواع خرده‌لاستیک مورد استفاده در این تحقیق: الف) پودر لاستیک، ب) گرانول اندازه ۱، ج) گرانول اندازه ۳ و د) گرانول اندازه ۵

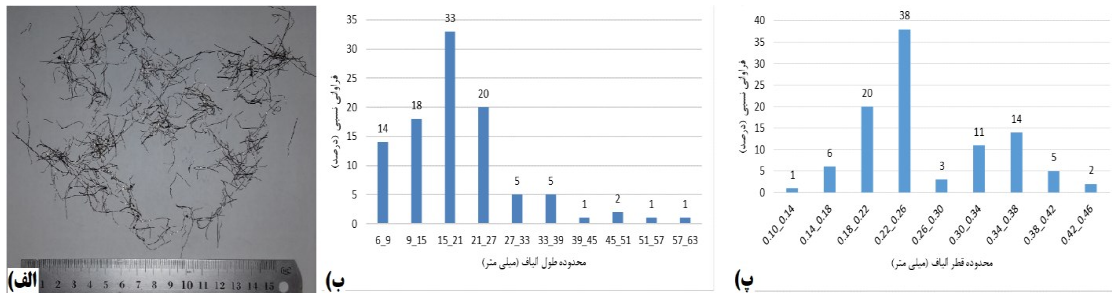
در این تحقیق، از خرده‌لاستیک به صورت حجمی و به‌عنوان جایگزین ریزدانه در ترکیب به میزان ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد استفاده شده است. ترکیب چهار نوع خرده‌لاستیک بالا به‌گونه‌ای به کار رفته که دارای دانه‌بندی تقریباً مشابه با دانه‌بندی ریزدانه مورد استفاده در نسبت مخلوط باشد که دانه‌بندی آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. دانه‌بندی خرده‌لاستیک مورد استفاده در تحقیق حاضر

شماره	نام خرده‌لاستیک	ابعاد (میلی‌متر)	میزان استفاده (%)
۱	پودر لاستیک	<۰/۴	۲۲/۴۸
۲	گرانول ۱	۰/۱-۴	۲۴/۵۵
۳	گرانول ۳	۳-۱	۳۸/۹۰
۴	گرانول ۵	۵-۳	۱۴/۰۷

الیاف فلزی مورد استفاده در این تحقیق از همان کارخانه بازیافت تایرهای فرسوده، که برای تهیه خرده‌لاستیک به آنجا مراجعه شده بود، تهیه شده است. در فرآیند تولید خرده‌لاستیک توسط دستگاه‌های مخصوص، ابتدا سیم‌های ضخیم موجود در لبه‌های تایر جدا شده و پس از آن سیم‌هایی که هنوز در بدنه تایر وجود دارند وارد دستگاه خردکننده تایر می‌شوند. در این مرحله، الیاف نیز خرد شده و با خرده‌لاستیک مخلوط می‌شود. سپس با عبور از یک سری الک، الیاف فلزی از خرده‌لاستیک جدا می‌گردد. این الیاف در برخی موارد برای ساخت دریچه‌های منهول‌های آب و فاضلاب که احتیاج به مقاومت زیاد دارند و سازه‌های مشابه، مورد استفاده قرار می‌گیرند. ولی اکثریت این الیاف بلااستفاده مانده و به کارخانه‌های ذوب فلزات فرستاده می‌شوند و در آنجا ذوب شده و به شمش‌های فلزی تبدیل می‌شوند، که مشکل این کار این است که جنس این نوع از الیاف، به جهت استفاده در صنایع تولید تایر، مرغوب بوده ولی به دلیل نازکی، در فرآیند ذوب، حدود ۴۰٪ آن می‌سوزد. مشخصات الیاف فلزی حاصل از تایرهای فرسوده در شکل ۳ و مشخصات مکانیکی آن در جدول ۴ نمایش داده شده است.

الیاف فلزی مورد استفاده در این تحقیق از همان کارخانه بازیافت تایرهای فرسوده، که برای تهیه خرده‌لاستیک به آنجا مراجعه شده بود، تهیه شده است. در فرآیند تولید خرده‌لاستیک توسط دستگاه‌های مخصوص، ابتدا سیم‌های ضخیم موجود در لبه‌های تایر جدا شده و پس از آن سیم‌هایی که هنوز در بدنه تایر وجود دارند وارد دستگاه خردکننده تایر می‌شوند. در این مرحله، الیاف نیز خرد شده و با خرده‌لاستیک مخلوط می‌شود. سپس با عبور از یک سری الک، الیاف فلزی از خرده‌لاستیک جدا می‌گردد. این الیاف در برخی موارد برای ساخت دریچه‌های منهول‌های آب و فاضلاب که



شکل ۳. مشخصات الیاف فلزی حاصل از تایرهای فرسوده: الف) شکل ظاهری، ب) فراوانی طول و پ) فراوانی قطر

جدول ۴. مشخصات مکانیکی الیاف فلزی بازیافتی

شماره	مشخصه مکانیکی	مقدار	واحد
۱	مقاومت نهایی گسیختگی	۲۰۰۰۰-۱۸۰۰۰	kg/cm ²
۲	مدول الاستیسیت	۲۱۰۰۰۰	kg/cm ²
۳	وزن مخصوص	۷۸۰۰	kg/cm ²
۴	درصد افزایش متوسط طول هنگام پاره شدگی	۱۰	%

در این تحقیق، از روش حجم مطلق بر اساس استاندارد ACI_211.1 برای تعیین نسبت مخلوط بتن مورد استفاده، که بتن معمولی است، استفاده گردیده است (ACI 211.1 1991). با توجه به مواد و مصالح مورد استفاده در این تحقیق که در بخش‌های قبل شرح داده شده‌اند، نسبت مخلوط در نظر گرفته شده مطابق با روش طرح آزمایش-های پاسخ سطح و به روش CCD^۱ در جدول ۵ ارائه شده است.

در این تحقیق، اثر استفاده از خرده‌لاستیک بر مقاومت‌های روسازی بتنی با و بدون الیاف فلزی بازیافتی بررسی گردیده است، که در مواردی که از الیاف فلزی استفاده شده مقدار آن برابر با ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد حجم کل بتن بوده است.

۲-۲. نسبت مخلوط

جدول ۵. جزئیات طرح‌های مخلوط بتنی و تعداد نمونه‌ها مطابق با روش طرح آزمایش‌ها

شماره طرح	نام طرح	آب مصرفی (kg/m ³)	درشت‌دانه (kg/m ³)	ریزدانه (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	فوق‌روان‌کننده (kg/m ³)	خرده‌لاستیک (kg/m ³)	الیاف فلزی (kg/m ³)
۱	C0F0	۱۶۴	۹۵۱	۷۵۴	۴۱۱	۴/۱۱	۰	۰
۲	C5F0	۱۶۴	۹۵۱	۷۱۶/۳	۴۱۱	۴/۱۱	۱۵/۶۸	۰
۳	C10F0	۱۶۴	۹۵۱	۷۸۷/۶	۴۱۱	۴/۱۱	۳۱/۳۵	۰
۴	C15F0	۱۶۴	۹۵۱	۶۴۰/۹	۴۱۱	۴/۱۱	۴۷/۰۳	۰
۵	C20F0	۱۶۴	۹۵۱	۶۰۳/۲	۴۱۱	۴/۱۱	۶۲/۷	۰
۶	C0F.25	۱۶۴	۹۵۱	۷۵۴	۴۱۱	۴/۱۱	۰	۱۹/۵
۷	C5F.25	۱۶۴	۹۵۱	۶۷۱/۳	۴۱۱	۴/۱۱	۱۵/۶۸	۱۹/۵
۸	C10F.25	۱۶۴	۹۵۱	۶۷۸/۶	۴۱۱	۴/۱۱	۳۱/۳۵	۱۹/۵

¹- Central composite design

۱۹/۵	۴۷/۰۳	۴/۱۱	۴۱۱	۶۴۰/۹	۹۵۱	۱۶۴	C15F.25	۹
۱۹/۵	۶۲/۷	۴/۱۱	۴۱۱	۶۰۳/۲	۹۵۱	۱۶۴	C20F.25	۱۰
۳۹	۰	۴/۱۱	۴۱۱	۷۵۴	۹۵۱	۱۶۴	C0F5	۱۱
۳۹	۱۵/۶۸	۴/۱۱	۴۱۱	۷۱۶/۳	۹۵۱	۱۶۴	C5F5	۱۲
۳۹	۳۱/۳۵	۴/۱۱	۴۱۱	۶۷۸/۶	۹۵۱	۱۶۴	C10F5	۱۳
۳۹	۴۷/۰۳	۴/۱۱	۴۱۱	۶۴۰/۹	۹۵۱	۱۶۴	C15F5	۱۴
۳۹	۶۲/۷	۴/۱۱	۴۱۱	۶۰۳/۲	۹۵۱	۱۶۴	C20F5	۱۵

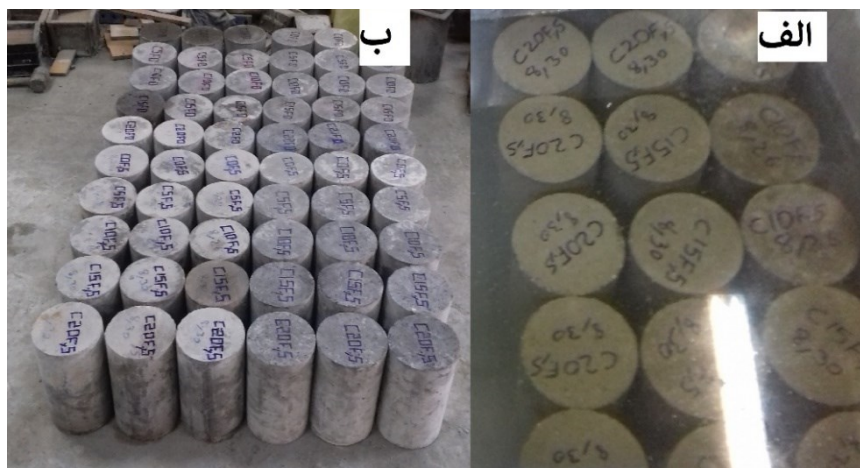
۲-۳. ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

در این تحقیق، از ۱۵ نسبت مخلوط مختلف استفاده شده است که از هر کدام ۳ نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۵ سانتی-متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر برای آزمایش مقاومت فشاری و ۳ نمونه با ابعاد ۱۰×۱۰×۳ سانتی‌متر برای آزمایش چرخه ذوب و یخبندان ساخته شده است.

ساخت نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C192 (۲۰۱۶) صورت گرفت که در آن برای ساخت نمونه‌ها باید مصالح درشت‌دانه اشباع با سطح خشک را به همزن اضافه کرده و پس از آن مصالح ریزدانه به ترتیب درشت به ریز به همزن در حال چرخش اضافه می‌شوند. پس از اینکه سنگ‌دانه‌ها به صورت کامل با هم مخلوط شدند، خرده‌لاستیک به تدریج به مخلوط در حال چرخش اضافه می‌شود. پس از این مرحله و اختلاط کامل خرده‌لاستیک، در صورتی که مخلوط شامل الیاف فلزی باشد، الیاف فلزی به تدریج بر سطح مخلوط در حال چرخش به صورت دستی پاشیده می‌شود تا مانع از درهم‌تنیدن الیاف گردد و پس از حصول اطمینان از اختلاط کاملاً همگن ترکیبات، سیمان به ترکیب اضافه شده و با آن مخلوط می‌شود و در انتها آبی که افزودنی فوق‌روان‌کننده

در آن حل شده به تدریج به مخلوط اضافه می‌شود و به مدت ۳ دقیقه مخلوط شده و ۳ دقیقه به آن استراحت داده می‌شود و در انتها به مدت ۲ دقیقه عملیات مخلوط کردن مجدداً ادامه پیدا می‌کند تا یک مخلوط همگن حاصل شود. طی این مراحل، باید دهانه همزن با یک پلاستیک پوشانده شود تا آب ترکیب بخار نشود و در این مرحله ترکیب بتن آماده شده است.

عمل‌آوری نمونه‌ها (شکل ۴) نیز بر اساس استاندارد ASTM C192 (۲۰۱۶) صورت گرفت. در عمل‌آوری اولیه، به منظور جلوگیری از تبخیر آب از سطح بتن، باید سطح آن با یک نایلون یا یک پوشش غیرقابل نفوذ دیگر که در تماس با سطح بتن تازه نباشد پوشانده شود و پس از گذشت ۲۴ ساعت نمونه‌ها را باید از قالب‌ها خارج ساخت. همچنین، در عمل‌آوری ثانویه، پس از اینکه نمونه‌ها از قالب خارج شدند، به مدت ۲۸ روز در آب با دمای 23 ± 2 درجه سلسیوس قرار گرفته و پس از گذشت ۲۸ روز از آب خارج شده و در اتاق بخار قرار می‌گیرند تا فرایند آماده‌سازی آن‌ها جهت آزمایش صورت پذیرد. شکل ۴ مربوط به ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های استوانه‌ای جهت آزمایش مقاومت فشاری است.



شکل ۴. الف) عمل آوری نمونه‌های استوانه‌ای و ب) ساخت نمونه‌های استوانه‌ای

۲-۴. شرح آزمایش‌ها

آزمایش‌هایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند شامل آزمایش‌های مکانیکی و دوام می‌باشند. در بخش مکانیکی، آزمایش مقاومت فشاری و در بخش دوام، دو نوع آزمایش سایش و آزمایش چرخه ذوب-یخبندان بررسی شده است.

۲-۴-۱. آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C39 (۲۰۱۵) روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر صورت گرفت. بر اساس این استاندارد، نباید یک نمونه دارای قطرهای با اختلاف بیش از ۲٪ باشد. این آزمایش با دستگاه UTM ساخته شده توسط شرکت سنتام، با ظرفیت بارگذاری ۱۰۰ تن، انجام گرفت. در انجام این آزمایش ابتدا یک پیش‌بارگذاری سبک در حد چند کیلوگرم به نمونه وارد می‌شود تا صفحات بالا و پایین دستگاه به خوبی بر سطح نمونه بنشینند. پس از آن، نیرو با نرخ جابجایی ثابت یک میلی‌متر بر ثانیه بر نمونه وارد می‌شود و این روند تا زمانی که نمونه بشکند ادامه پیدا می‌کند و مقداری هم پس‌از آن ادامه پیدا می‌کند تا نمونه تقریباً خود را رها کند. طی این

فرایند، نمودار نیرو-جابجایی برای هر نمونه ترسیم می‌گردد. تعداد تکرار این آزمایش به ازای هر طرح مخلوط سه مرتبه است.

۲-۴-۲. آزمایش سایش چرخ پهن

این آزمایش بر اساس استاندارد BS EN 1338 (۲۰۰۳) جهت اندازه‌گیری مقاومت سایشی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۲۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس این استاندارد، نمونه‌های مورد آزمایش تحت سایش چرخ پهن با استفاده از پودر آلومینیا اکسید قرار گرفته‌اند. پس از اینکه نمونه‌ها به مدت یک دقیقه مورد سایش قرار گرفتند، مساحت سطح مورد سایش قرار گرفته اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری دقیق سطح سایش، ابتدا از هر نمونه یک عکس باکیفیت در یک مقیاس مشخص گرفته شد. پس از آن، با استفاده از ابزار اندازه‌گیری مساحت در نرم‌افزار اتوکلد، سطح سایش هر نمونه اندازه‌گیری شده و میزان مقاومت نسبی هر یک از نمونه‌ها در مقابل سایش حاصل گردید. تعداد تکرار این آزمایش به ازای هر طرح مخلوط سه مرتبه است.

۲-۴-۳. آزمایش سایش چرخ ساینده

آزمایش سایش با استفاده از دستگاه چرخ ساینده بر اساس استاندارد ASTM C779 (۲۰۱۹) روی نمونه‌ها

میکرومتر با دقت 0.01 میلی‌متر اندازه‌گیری شد تا مقاومت سایشی نمونه‌ها قابل ارزیابی گردند. شکل ۵، تصویر مربوط به دستگاه چرخ ساینده را نشان می‌دهد. تعداد تکرار این آزمایش به ازای هر طرح مخلوط سه مرتبه است.

اعمال گردید. این آزمایش که روی نمونه‌های با ابعاد $30 \times 30 \times 10$ سانتی‌متر انجام شد، بر اساس اعمال ضربه و لغزش سایشی روی نمونه‌ها عمل می‌کند. بر اساس این استاندارد، آزمایش روی هر نمونه به مدت ۶۰ دقیقه توسط دستگاه چرخ ساینده صورت پذیرفت تا مقاومت سایشی بلندمدت نمونه‌ها را مورد ارزیابی قرار دهد. در پایان، عمق سایش ایجادشده روی هر نمونه با استفاده از



شکل ۵. دستگاه‌های سایش: الف) دستگاه سایش چرخ پهن و ب) دستگاه سایش چرخ ساینده

بیشتری با شرایط واقعی داشته باشد. در آخر، میزان وزن ازدست‌رفته هر نمونه پس از اعمال ۵۰ چرخه ذوب و یخبندان اندازه‌گیری شد. تعداد تکرار این آزمایش به ازای هر طرح مخلوط سه مرتبه است. شکل ۶، تصویر مربوط به آزمایش چرخه ذوب- یخبندان را نشان می‌دهد.

۲-۴-۴. آزمایش چرخه ذوب- یخبندان

در این تحقیق، آزمایش چرخه ذوب و یخبندان بر اساس استاندارد ASTM C1262 (۲۰۱۸) روی نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف خرده‌لاستیک و الیاف فلزی بازیافتی انجام شده است. ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش قرار گرفته $100 \times 100 \times 30$ میلی‌متر بوده است. بر اساس استاندارد مذکور، نمونه‌ها در آب با ۳ درصد نمک قرار گرفته‌اند، تا روند چرخه ذوب و یخبندان تسریع یافته و مشابهت



شکل ۶. آزمایش چرخه ذوب- یخبندان

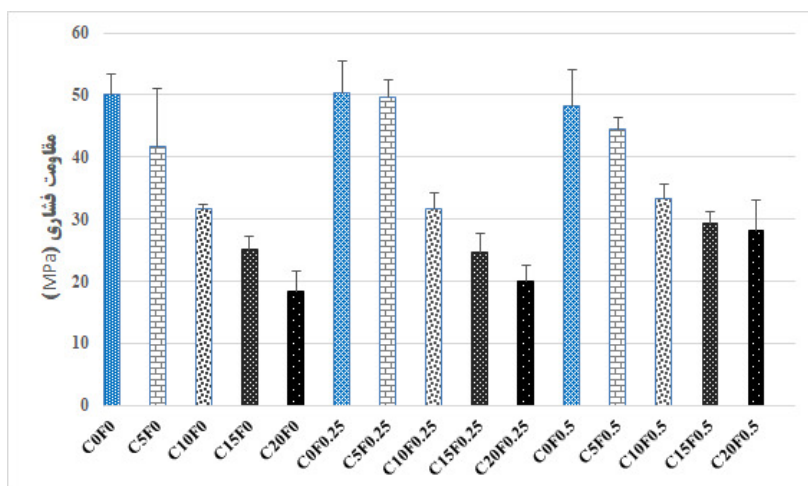
۳. تفسیر نتایج

بر اساس آزمایش‌های مقاومت فشاری، سایش و چرخه ذوب و یخبندان نمونه‌های بتنی حاوی خرده‌لاستیک و الیاف فلزی بازیافتی در محلول حاوی ۳ درصد نمک، نتایج زیر حاصل گردید:

مقاومت فشاری با استفاده از دستگاه UTM روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر با جابجایی ثابت یک میلی‌متر بر دقیقه، صورت گرفت. از هر حالت سه نمونه برای این آزمایش ساخته شده و مقاومت فشاری آن‌ها اندازه‌گیری شده و نتایج در

داده شده است.

۳-۱. مقاومت فشاری



شکل ۷. نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی

بیشتر می‌شود، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد، سبک‌تر بودن بتن حاوی خرده‌لاستیک نسبت به بتن معمولی است. به عبارت دیگر، به دلیل چگالی کم و چسبندگی کم ذرات خرده‌لاستیک با سایر اجزای بتن، در حین ویرانه شدن، ذرات خرده‌لاستیک به سمت بالای نمونه‌ها حرکت کرده و تراکم خرده‌لاستیک در لایه‌های بالایی افزایش یافته و منجر به ایجاد یک بتن ناهمگن می‌شود، که این امر منجر به کاهش مقاومت فشاری می‌گردد.

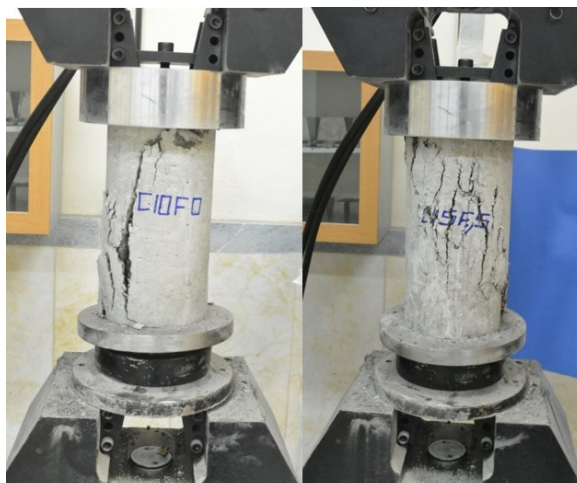
همچنین، همان‌گونه که در شکل ۷ قابل مشاهده است، افزودن الیاف فلزی بازیافتی به بتن فاقد خرده‌لاستیک مقاومت فشاری آن‌ها را مقداری کاهش می‌دهد. ولی مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خرده‌لاستیک و ۰/۵ درصد الیاف فلزی، نسبت به نمونه شاهد، به ترتیب دارای کاهش ۰/۳،

بر اساس نتایج به دست آمده، افزایش درصد خرده‌لاستیک، مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی را کاهش می‌دهد. دلیل این کاهش نیز کمتر بودن مقاومت و سختی ذرات خرده‌لاستیک نسبت به سنگ‌دانه ریزدانه است که منجر به تضعیف پیوند بین ذرات خرده‌لاستیک و خمیر سیمان می‌گردد. هر چه میزان جایگزینی خرده‌لاستیک در بتن افزایش یابد، میزان تأثیر آن در کاهش مقاومت فشاری کمتر می‌شود. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خرده‌لاستیک و بدون الیاف فلزی، نسبت به نمونه شاهد، به ترتیب دارای کاهش ۱/۶، ۳۶/۹، ۴۹/۹ و ۶۳/۱ درصدی، بوده است. دلیل این امر، کم بودن چسبندگی بین خرده‌لاستیک و خمیر سیمان نسبت به چسبندگی بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه‌ها است. همچنین، یکی دیگر از دلایل اینکه هرچه خرده‌لاستیک

مخلوط (C5F5) از لحاظ مقاومت فشاری، بهترین کارکرد را نسبت به نمونه‌های شاهد دارد.

از سوی دیگر، اضافه شدن الیاف فلزی بازیافتی باعث جلوگیری از شکست ناگهانی نمونه‌های بتنی حاوی خرده‌لاستیک گردیده (شکل ۸) و در لحظه شکست، با ایجاد یک شبکه سه‌بعدی در نمونه‌های بتنی، ترک‌ها در سطح بتن پخش و کوچک گردیده که این امر کمک شایانی در جهت جلوگیری از تخریب ناگهانی بتن ایفا می‌کند. نتایج این آزمایش‌ها در راستای آزمایشات صورت گرفته توسط بسیاری از محققان در این زمینه است (عیسی و همکاران، ۲۰۲۰؛ ونگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ زارعی و همکاران، ۲۰۲۲).

۱۱/۲، ۳۳/۷، ۴۱/۵ و ۴۴/۳ درصدی بوده است. در این موارد، مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف فلزی و بتن شاهد تقریباً برابر است و به جز در تیمار ۵ درصد خرده‌لاستیک، که کاهش مقاومت فشاری بتن دارای الیاف فلزی نسبت به بتن بدون الیاف بیشتر است، در جایگزینی‌های بیشتر خرده‌لاستیک، بتن مسلح شده با ۰/۵ درصد الیاف فلزی دارای کاهش مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه‌های مشابه بدون الیاف فلزی خواهد بود. بنابراین، مشاهده می‌شود هر چه میزان الیاف فلزی بازیافتی در بتن حاوی خرده‌لاستیک افزایش یابد تأثیر بهتری بر عملکرد مقاومت فشاری آن خواهد داشت. در اثر افزودن توأمان ۰/۵ درصد الیاف فلزی و ۵ درصد خرده‌لاستیک به بتن شاهد، مقاومت فشاری بتن تقریباً تغییری نمی‌کند و این بدان معناست که این طرح



شکل ۸. آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های حاوی خرده‌لاستیک: بدون الیاف فلزی (سمت چپ) و با الیاف فلزی (سمت راست)

۳-۲. مقاومت سایشی

مقاومت سایشی یک نمونه بتنی بیشتر باشد، کاربرد آن در سطوحی که مورد سایش مواد قرار می‌گیرند، مانند روسازی‌های بتنی، مناسب‌تر است. در این تحقیق، آزمایش سایش چرخ پهن روی نمونه‌های بتنی اعمال شد. در ابتدا سطح نمونه‌ها با رنگ پوشانده شد تا سطح مورد سایش قرارگرفته به‌وضوح قابل مشاهده باشد. در شکل ۹، نتیجه اعمال این آزمایش روی نمونه‌ها قابل

مقاومت سایشی بتن را می‌توان قابلیت سطح آن به مقاومت در برابر اعمال نیروهای مختلف سایشی، لغزشی یا تماسی با سایر سطوح تعریف کرد. بنابراین، برای حاصل شدن یک سطح مقاوم سایشی باید یک سطح سفت و محکم در برابر ساییدگی و شکستگی در اثر حرکت جسم ساینده ایجاد نمود. در نتیجه، هر چه

سطح سایش کاهش پیدا می‌کند که این به معنی افزایش مقاومت سایشی در نتیجه افزایش میزان خرده‌لاستیک است.

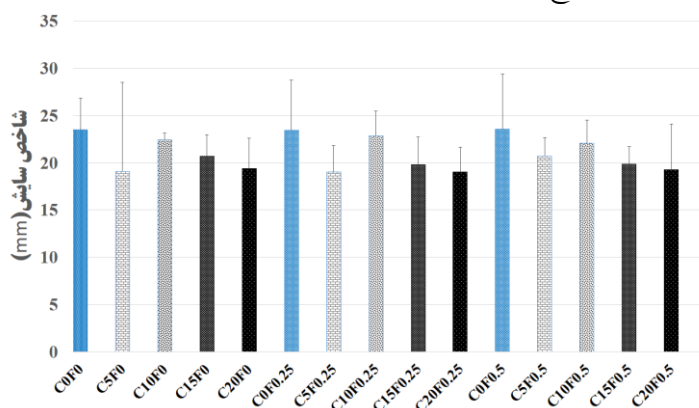
مشاهده است. در این تصویر، هر چه از سمت چپ به سمت راست حرکت کنیم میزان خرده‌لاستیک موجود در نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند و همان‌گونه که قابل مشاهده است، هر چه میزان خرده‌لاستیک افزایش می‌یابد، میزان



شکل ۹. نتیجه انجام آزمایش سایش چرخ پهن روی نمونه‌ها

همچنین، افزودن الیاف فلزی بازیافتی در درصد‌های مختلف نتیجه مؤثری در تغییر مقاومت سایشی ندارد.

همان‌گونه که از نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ قابل مشاهده است، افزودن خرده‌لاستیک منجر به افزایش مقاومت سایشی در آزمایش سایش چرخ پهن می‌گردد.



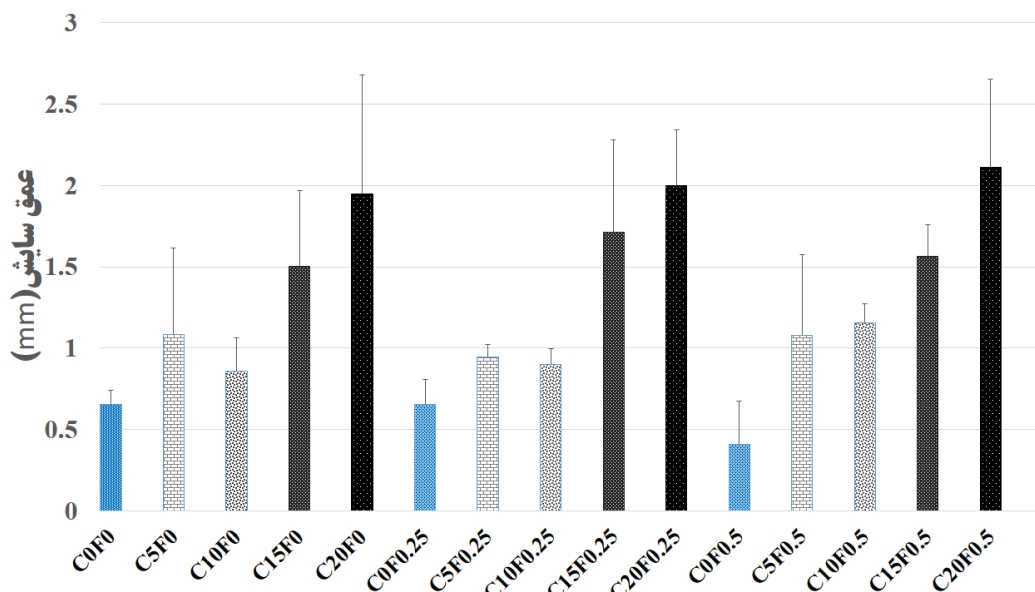
شکل ۱۰. نتایج آزمایش سایش چرخ پهن روی مخلوط‌های بتنی طرح

چرخ پهن، افزودن خرده‌لاستیک به ترکیب باعث می‌شود که بر اثر سایش، ذرات خرده‌لاستیک در معرض سایش با چرخ پهن قرار گیرند. در نتیجه مقاومت سایشی بیشتر ذرات خرده‌لاستیک نسبت به ذرات سنگ‌دانه، ذرات خرده‌لاستیک بالاتر از سطح سایش قرار می‌گیرند و مانع از عملکرد سایشی پودر ساینده و چرخ پهن می‌شوند. در نتیجه، بتن حاوی خرده‌لاستیک در این آزمایش عملکرد

برخلاف آزمایش سایش چرخ پهن، در آزمایش سایش چرخ ساینده، افزودن خرده‌لاستیک به بتن منجر به کاهش مقاومت سایشی آن می‌گردد. نتایج مربوط به این آزمایش در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. برای درک بهتر این تناقض، تصویر مربوط به سایش نمونه‌ها در آزمایش چرخ ساینده در شکل ۱۲ نشان داده شده است. دلیل این تناقض می‌تواند این مسئله باشد که در آزمایش

و همکاران (۲۰۱۴)، گسوغلو و همکاران (۲۰۱۴) و محمد و آدامو (۲۰۱۸) است.

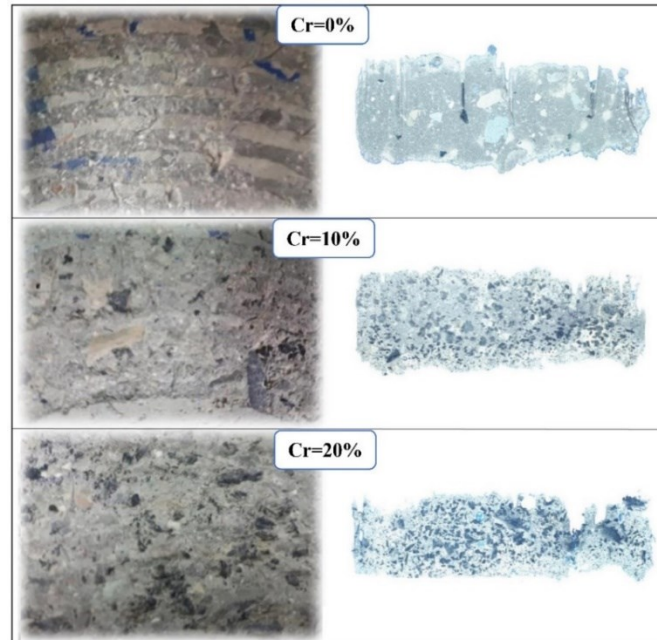
سایشی بهتری را از خود به نمایش می‌گذارد. نتایج این آزمایش مشابه با نتایج به‌دست آمده در تحقیقات توماس



شکل ۱۱. نتایج آزمایش سایش چرخ ساینده

امر منجر به کاهش خصوصیات مکانیکی و در نتیجه کاهش مقاومت سایشی آن در بلندمدت می‌گردد (زارعی و همکاران، ۲۰۲۲). هر چه درصد تخلخل نمونه بتنی بیشتر باشد، پیوند میان خرده‌لاستیک و خمیر بتن ضعیف‌تر شده و این امر موجب جداشدگی راحت‌تر خرده‌لاستیک از بتن شده و در نتیجه مقاومت سایشی آن کاهش پیدا می‌کند (سوکونتاسوکول و چایکاو، ۲۰۰۶).

در طرف مقابل، در آزمایش چرخ ساینده، نمونه‌هایی که دارای درصد بیشتری از خرده‌لاستیک بودند مقاومت کمتری در برابر سایش از خود نشان دادند. نتایج این آزمایش در تطابق با نتایج آزمایش مقاومت فشاری است که در آن افزودن خرده‌لاستیک منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه می‌گردد. هر چه درصد خرده-لاستیک موجود در نمونه بتنی افزایش یابد، میزان تخلخل و فضای خالی آن افزایش پیدا می‌کند که این



شکل ۱۲. نتیجه انجام آزمایش سایش روی نمونه‌های بتنی حاوی خرده‌لاستیک

مقاومت سایشی چرخ ساینده روی نمونه‌ها نیز اعمال گردید. عمق سایش پس از ۶۰ دقیقه اعمال آزمایش روی نمونه‌ها اندازه‌گیری شده که نتایج تحلیل آماری آن منجر به رابطه (۲) گردید:

$$\text{عمق سایش (mm)} = 0.571 + 0.019Cr + 2.702Cr^2 \quad (2)$$

مطابق با این رابطه، خرده‌لاستیک دارای یک تأثیر مثبت خطی بر عمق سایش است. همچنین، افزودن الیاف فلزی بازیافتی تأثیری بر عمق سایش نخواهد داشت. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که افزودن خرده‌لاستیک تأثیر متفاوتی بر مقاومت سایشی نمونه‌های بتنی طی آزمایش‌های چرخ پهن و چرخ ساینده دارد.

بر اساس تحلیل آماری روش پاسخ سطح دوسطحی روی نتایج آزمایش سایش چرخ پهن که در جدول ۶ نمایش داده شده است، شاخص سایش بتن حاوی خرده-لاستیک و الیاف فلزی بازیافتی مطابق با رابطه (۱) خواهد بود:

$$\text{شاخص سایش (mm)} = 23.44 - 0.2Cr \quad (1)$$

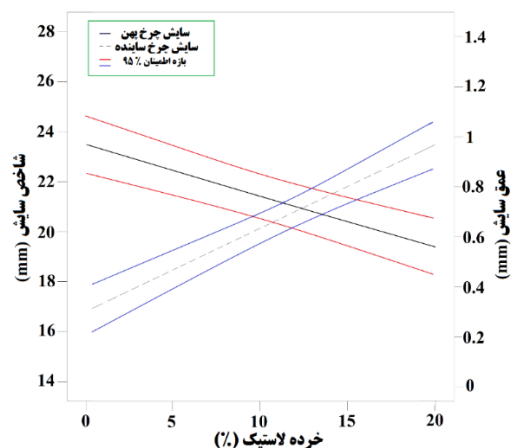
بر اساس این رابطه، ذرات خرده‌لاستیک نقش اصلی را در مقاومت سایشی دستگاه چرخ پهن بازی می‌کنند؛ در حالی که الیاف فلزی بازیافتی تأثیری در مقاومت سایشی ندارند. از آنجایی که سازه‌های بتنی برای عمر طولانی طراحی می‌شوند، مقاومت سایشی بلندمدت آنها باید مورد بررسی قرار گیرد. به همین دلیل، آزمایش

جدول ۶. نتایج تحلیل دوسطحی برای مقاومت سایشی مخلوط‌های بتنی حاوی خرده‌لاستیک

منبع	جمع مربعات	درجه آزادی	مقدار تابع F	F > احتمال
شاخص سایش (mm)				
Model	۹۲/۳۱	۱	۱۹/۱۶	<۰/۰۰۰۱
Cr	۹۲/۳۱	۱	۱۹/۱۶	<۰/۰۰۰۱
Residual	۲۰۷/۱۷	۴۳		
Lack of fit	۶۳/۰۴	۱۳	۱/۰۱	۰/۴۶۷۳

ارزیابی مقاومت سایشی و دوام بتن حاوی خرده‌لاستیک و الیاف بازیافتی حاصل از تایرهای فرسوده

Pure error	۱۴۴/۱۳	۳۰		
Total	۲۹۹/۴۸	۴۴		
R-Squared	۰/۲۴۹۷			
AdjR-Squared	۰/۲۲۲۹			
عمق سایش (mm)				
Model	۶/۸۹	۲	۷۰/۰۷	<۰/۰۰۰۱
Cr	۶/۶۴	۱	۱۳۴/۹	<۰/۰۰۰۱
Cr ²	۰/۲۶	۱	۵/۲۴	۰/۰۲۵۳
Residual	۱/۱۸	۲۴		
Lack of fit	۰/۵۳	۵	۲/۴۴	۰/۰۶۶۱
Pure error	۰/۶۵	۱۸		
Total	۸/۰۸	۲۶		
R-Squared	۰/۸۵۳۸			
AdjR-Squared	۰/۸۴۱۶			
افت وزنی (%)				
Model	۱۵/۲۰	۸	۴۸/۳۸	<۰/۰۰۰۱
Cr	۱/۸۷	۱	۲۷۴/۲۸	<۰/۰۰۰۱
F	۴/۰۳	۱	۵/۵۳	<۰/۰۰۰۱
N	۶/۵۸	۱	۱۶۷/۴۲	<۰/۰۰۰۱
CrF	۰/۳۲۰	۱	۴/۱۵	۰/۰۰۰۵
CrN	۱/۴۰	۱	۱۶/۶۱	<۰/۰۰۰۱
Cr ²	۱/۲۲	۱	۳۱/۱۷	<۰/۰۰۰۱
F ²	۰/۲۱۸۸	۱	۵/۵۷	<۰/۰۰۰۱
Residual	۴/۹۵	۱۲۶		
Lack of Fit	۵/۹۲	۳۶	۰/۷۰	۰/۷۱۳۲
Pure Error	۱/۰۳	۹۰		
Cor Total	۲۰/۱۵	۱۳۴		
R-Squared	۰/۷۵۴۴			
AdjR-Squared	۰/۷۳۸۸			



شکل ۱۳. تأثیر درصدهای مختلف خرده لاستیک بر مقاومت سایشی بتن

۳-۳. چرخه ذوب و یخبندان

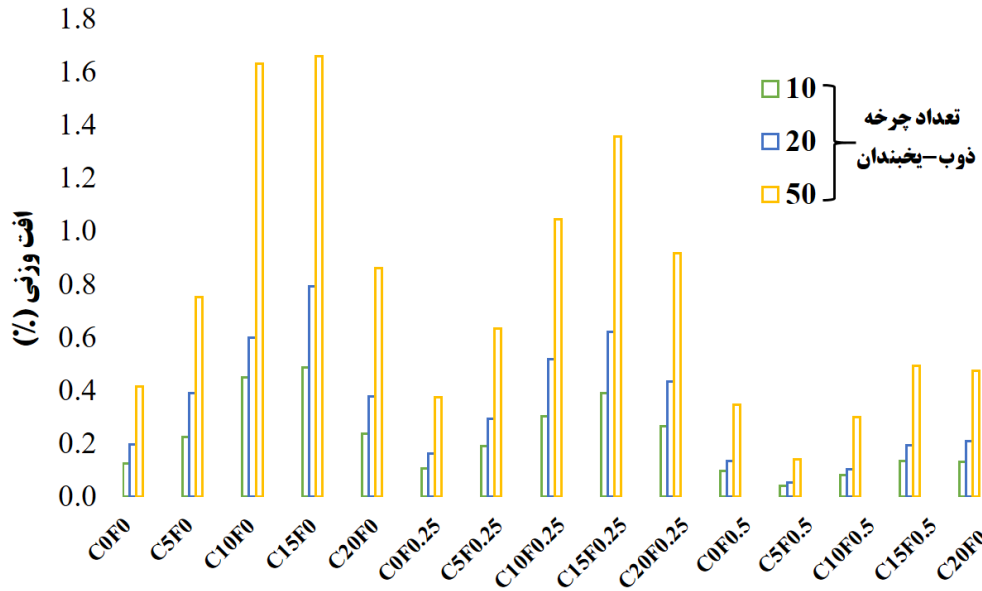
عملکرد دوام نمونه‌های بتنی شاهد، حاوی خرده لاستیک و الیاف فلزی بازیافتی در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان در اثر اعمال ۱۰، ۲۰ و ۵۰ چرخه ذوب و یخبندان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج انجام این آزمایش‌ها در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که از نتایج آزمایش چرخه ذوب و یخبندان قابل مشاهده است، تصاویر مربوط به نمونه‌های مورد آزمایش پس از اعمال ۵۰ چرخه ذوب و یخبندان در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

$$\text{افت وزنی (\%)} = 0.12 + 0.05C_r - 0.10F + 0.01N - 0.003C_r F - 0.001C_r N + 0.02C_r^2 + 0.013F^2 \quad (3)$$

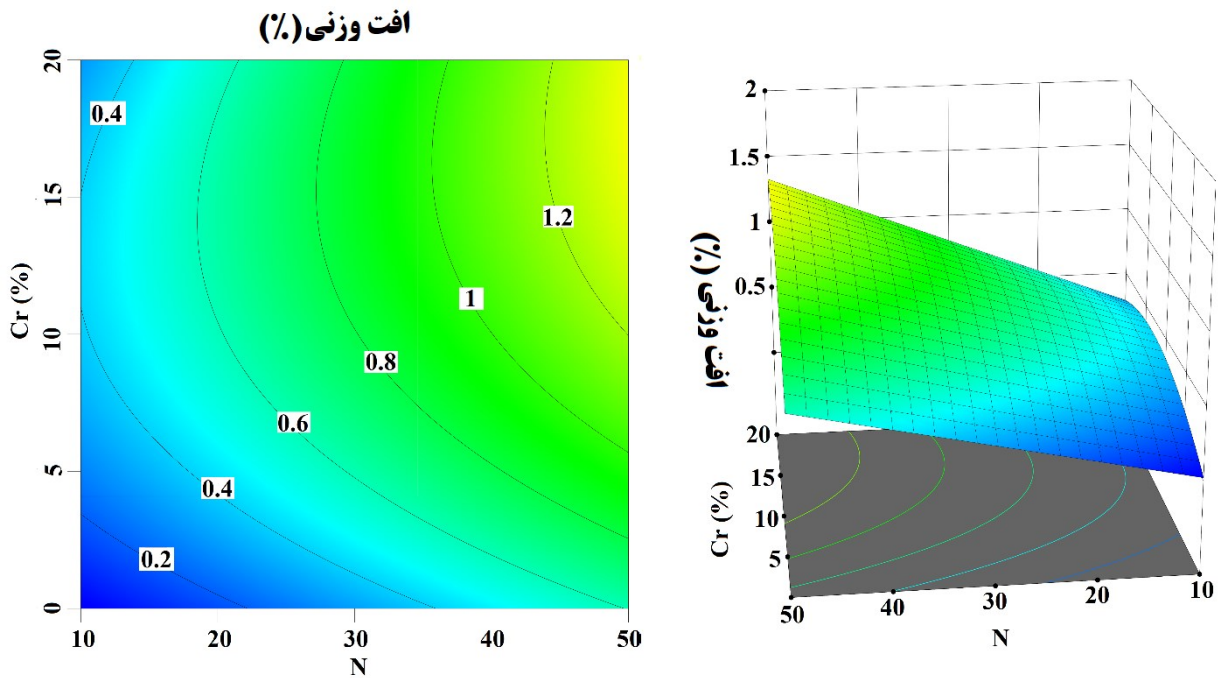
که C_r درصد خرده لاستیک مصرفی، F درصد الیاف فلزی و N تعداد چرخه ذوب- یخبندان است. مطابق با رابطه به دست آمده، اثر خرده لاستیک و الیاف به صورت غیرخطی است. با افزایش میزان خرده لاستیک، دوام در برابر چرخه ذوب و یخبندان کاهش پیدا می‌کند. در طرف مقابل، هرچه میزان الیاف فلزی بازیافتی موجود در طرح افزایش یابد، دوام آن در برابر ذوب و یخبندان افزایش پیدا می‌کند. بتن فاقد الیاف فلزی بازیافتی و حاوی ۱۵ درصد خرده لاستیک دارای ضعیف‌ترین عملکرد در برابر

چرخه‌های ذوب و یخبندان است. عملکرد ضعیف‌تر بتن حاوی خرده لاستیک در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان می‌تواند در نتیجه تخلخل بیشتر بتن حاوی خرده لاستیک باشد که منجر به ایجاد بلورهای بیشتر یخ در بتن شده و دوام آن را کاهش می‌دهد. نتایج این تحقیق در تضاد با نتایج تحقیق صورت گرفته توسط گسوغلو و همکاران (۲۰۱۴) است که بر اساس آن تحقیق، زمانی که خرده-لاستیک در بتن متخلخل با سنگدانه جایگزین می‌شود، دوام آن در برابر ذوب و یخبندان افزایش می‌یابد. از طرف دیگر همان‌گونه که در شکل ۱۶ قابل مشاهده است، هرچه میزان الیاف فلزی بازیافتی موجود در بتن افزایش یابد، دوام آن نیز در برابر ذوب و یخبندان افزایش می‌یابد. بنابراین، بهترین عملکرد در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان مربوط به نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف فلزی بازیافتی و فاقد خرده لاستیک است. اندرکنش خطی تعداد چرخه و درصد خرده لاستیک حاکی از آن است که با افزایش تعداد چرخه‌های ذوب- یخبندان، بتن حاوی درصدهای بیشتر خرده لاستیک ضعف بیشتری در افزایش افت وزنی از خود نشان می‌دهند. شکل ۱۷، نمونه‌های بتنی را پس از اعمال ۵۰ چرخه ذوب- یخبندان نشان می‌دهد.

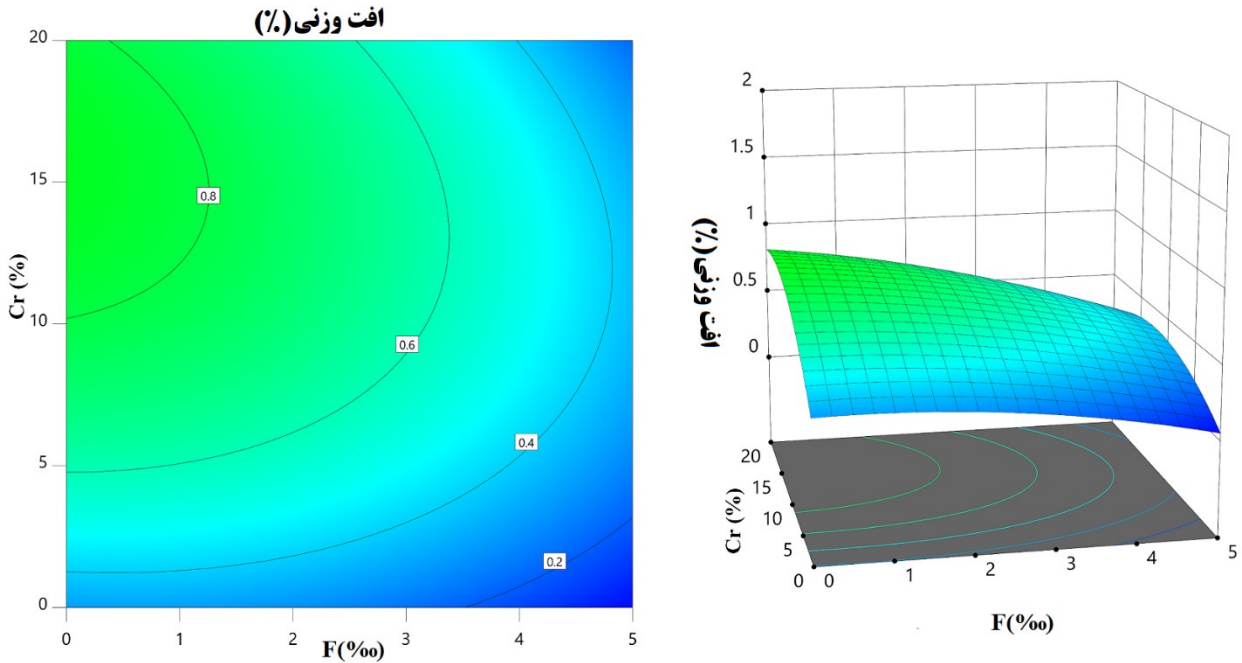
ارزیابی مقاومت سایشی و دوام بتن حاوی خرده‌لاستیک و الیاف بازیافتی حاصل از تایرهای فرسوده



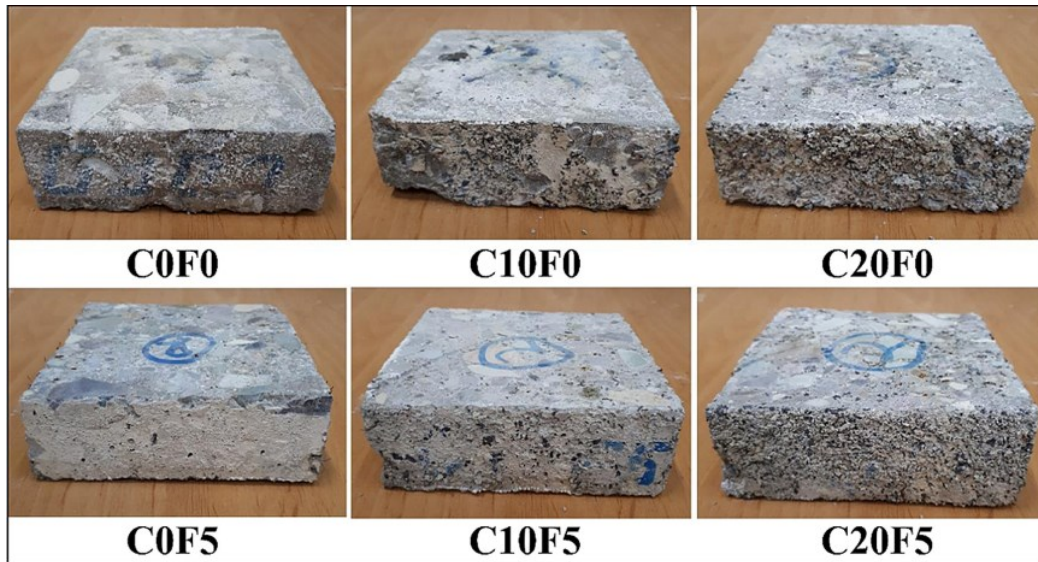
شکل ۱۴. نتایج افت وزنی مخلوط‌های بتنی پس از تعداد چرخه‌های مختلف (۱۰، ۲۰ و ۵۰)



شکل ۱۵. اثر درصد خرده‌لاستیک مصرفی و تعداد چرخه در آزمایش ذوب- یخبندان بر افت وزنی مخلوط‌های بتنی



شکل ۱۶. اثر درصد خرده‌لاستیک مصرفی و الیاف مصرفی در آزمایش ذوب- یخبندان بر افت وزنی مخلوط‌های بتنی



شکل ۱۷. تصویر نمونه‌های مخلوط‌های بتنی پس از اعمال ۵۰ چرخه ذوب- یخبندان

۴. نتیجه‌گیری

برای بررسی دوام و مقاومت مکانیکی بتن حاوی خرده-لاستیک و الیاف فلزی بازیافتی، آزمایش‌های مقاومت فشاری، دوام در برابر چرخه‌های ذوب- یخبندان و دوام سایشی روی نمونه‌های فاقد و حاوی درصد‌های مختلف الیاف فلزی بازیافتی و خرده‌لاستیک صورت گرفت. بر

اساس آزمایش‌های صورت گرفته، نتایج زیر به دست آمد:

- کاهش مشاهده شده در مقاومت فشاری به دلیل ضعیف‌تر بودن پیوند میان خرده‌لاستیک و خمیر سیمان نسبت به سنگ‌دانه و خمیر سیمان، سبک‌تر بودن بتن حاوی خرده‌لاستیک نسبت به نمونه شاهد

چرخ ساینده به روش ANOVA، مشخص شد که افزودن خرده‌لاستیک به بتن منجر به افزایش مقاومت سایشی در آزمایش سایش چرخ پهن و کاهش مقاومت سایشی در آزمایش چرخ ساینده می‌گردد. شایان ذکر است که افزودن الیاف فلزی بازیافتی به ترکیب تأثیری در دوام سایشی آن نداشت.

- در اثر اعمال آزمایش چرخه ذوب- یخبندان این نتیجه حاصل شد که افزودن خرده‌لاستیک به نمونه‌ها باعث کاهش دوام آن‌ها در برابر چرخه‌های ذوب- یخبندان می‌گردد. بیشترین کاهش دوام در برابر چرخه‌های ذوب- یخبندان در نمونه حاوی ۱۵ درصد خرده‌لاستیک مشاهده شد. این کاهش دوام چرخه‌های ذوب- یخبندان می‌تواند در ارتباط با تخلخل بیشتر نمونه‌های حاوی خرده‌لاستیک باشد. از سوی دیگر، هرچه درصد الیاف فلزی بازیافتی در مخلوط افزایش یابد، مخلوط عملکرد بهتری در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان از خود نشان می‌دهد. در حالی که درگیری خرده‌لاستیک به‌عنوان دانه‌بندی ریزدانه منجر به از دست رفتن جرم بیشتری در چرخه ذوب- یخبندان در حضور محلول نمکی ۳٪ می‌شود، یک اثر هم‌افزایی بین خرده‌لاستیک و الیاف فولاد بازیافتی روی مقاومت در برابر چرخه ذوب- یخبندان وجود دارد. استفاده از مقدار بهینه ۱۲/۵ درصد خرده‌لاستیک و ۰/۳۴ درصد الیاف فلزی بازیافتی باعث حداکثر اثر هم‌افزایی در مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب- یخبندان، به‌ویژه در چرخه‌های بیشتر، می‌شود.

و صاف‌تر بودن سطح خرده‌لاستیک نسبت به سنگ‌دانه و عدم وجود منافذ در آن است.

- دلیل نتایج متفاوت در آزمون دوام سایشی نمونه‌های خرده‌لاستیک بر اثر آزمایش‌های سایش چرخ پهن و چرخ ساینده می‌تواند در ارتباط با عملکرد سایشی این دو آزمایش باشد. در آزمایش سایش چرخ پهن، نیروی قائم وارد بر سطح نمونه از طرف چرخ در مقایسه با آزمایش سایش چرخ ساینده بسیار کمتر است. در نتیجه، در آزمایش چرخ ساینده، وقتی که نیروی بسیار زیادی به سطح وارد می‌گردد اهمیت مقاومت فشاری افزایش پیدا می‌کند و در صورت کم بودن مقاومت فشاری، ساختار بتن تا حدی خرد شده و این امر موجب کاهش مقاومت سایشی می‌گردد. به‌عبارت دیگر، چنانچه نیروی سایشی در اثر اعمال نیروی قائم سبک‌تر باشد، مقاومت سایشی با افزایش درصد خرده‌لاستیک افزایش می‌یابد و چنانچه نیروی قائم افزایش یابد، هرچه درصد خرده‌لاستیک افزایش یابد (که به تبع آن مقاومت فشاری کاهش نیز می‌یابد) اهمیت مقاومت فشاری افزایش یافته و در نتیجه خرد شدگی راحت‌تر ذرات سطح بتن، مقاومت سایشی نیز افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که از آنجایی که روسازی بتنی در یک دوره طولانی مدت تحت شرایط سایش است، آزمایش سایش چرخ ساینده ارزیابی بهتری از شرایط سایشی سطح روسازی را برآورده می‌نماید.
- در نتیجه‌ی مدل‌سازی‌های روش پاسخ سطح حاصل از تحلیل نتایج آزمایش‌های سایشی چرخ پهن و

۵. مراجع

- ACI 211.1. 1991. "Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete". Reported by ACI Committee 211.
- Al-Akhras, N. M. and Smadi, M. M. 2004. "Properties of tire rubber ash mortar". Cement Concrete Compos., 26(7): 821-826.
- Alsaif, A., Koutas, L., Bernal, S. A., Guadagnini, M. and Pilakoutas, K. 2018. "Mechanical performance of

- steel fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavement”. *Constr. Build. Mater.*, 172: 533-543.
- Arunkumar, K., Muthukannan, M., Kumar, A. S. and Ganesh, C. 2020. “Mitigation of waste rubber tire and waste wood ash by the production of rubberized low calcium waste wood ash based geopolymer concrete and influence of waste rubber fibre in setting properties and mechanical behavior”. *Environ. Res.*, 194: 110661.
- ASTM-C131. 2006. “Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion”. ASTM International.
- ASTM C127. 2012. “Standard test method for density, relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate”. ASTM International.
- ASTM-C39. 2015. “Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens”. ASTM International.
- ASTM-C192. 2016. “Making and curing concrete test specimens in the laboratory”. ASTM International.
- ASTM-D2419. 2016. “Standard test method for sand equivalent value of soils and fine aggregate”. ASTM International.
- ASTM C33. 2017. “Standard specification for concrete aggregates”. ASTM International.
- ASTM-C128. 2017. “Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate”. ASTM International.
- ASTM-C1262. 2018. “Standard test method for evaluating the freeze-thaw durability of dry-cast segmental retaining wall units and related concrete units”. ASTM International.
- ASTM-C779. 2019. “Standard test method for abrasion resistance of horizontal concrete surfaces”. ASTM International.
- ASTM-D6758. 2021. “Standard test method for measuring stiffness and apparent modulus of soil and soil-aggregate in-place by electro-mechanical method”. ASTM International.
- Charkhtab Moghaddam, S., Madandoust, R., Jamshidi, M. and Nikbin, I. M. 2021. “Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions”. *Constr. Build. Mater.*, 281: 122571.
- Chen, M., Si, H., Fan, X., Xuan, Y. and Zhang, M. 2022. “Dynamic compressive behaviour of recycled tyre steel fibre reinforced concrete”. *Constr. Build. Mater.*, 316: 125896.
- Chou, L. H., Yang, C. K., Lee, M. T. and Shu, C. C. 2010. “Effects of partial oxidation of crumb rubber on properties of rubberized mortar”. *Compos. Part B: Eng.*, 41(8): 613-616.
- Eisa, A. S., Elshazli, M. T. and Nawar, M. T. 2020. “Experimental investigation on the effect of using crumb rubber and steel fibers on the structural behavior of reinforced concrete beams”. *Constr. Build. Mater.*, 252: 119078.
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G. and Ipek, S. 2014. “Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers”. *Constr. Build. Mater.*, 63: 206-213.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M. and Özturan, T. 2004. “Properties of rubberized concretes containing silica fume”. *Cement Concrete Res.*, 34(12): 2309-2317.
- Kang, J., Zhang, B. and Li, G., 2012. The abrasion-resistance investigation of rubberized concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 27(6), pp.1144-1148.
- Li, L., Ruan, S. and Zeng, L. 2014. “Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles”. *Constr. Build. Mater.*, 70: 291-308.
- Luo, T., Zhang, C., Sun, C., Zheng, X., Ji, Y. and Yuan, X. 2020. “Experimental investigation on the freeze-thaw resistance of steel fibers reinforced rubber concrete”. *Mater.*, 13(5).
- Mohammed, B. S. and Adamu, M. 2018. “Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica”. *Constr. Build. Mater.*, 159: 234-251.
- Purwanto, Y. A. P. 2008. “Testing of concrete paving blocks: The BS EN 1338:2003 British and European standard code”. *TEKNIK*, 29(2): 80-84.
- Sukontasukkul, P. and Chaikaew, C. 2006. “Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber”. *Constr. Build. Mater.*, 20(7): 450-457.
- Thomas, B. S. and Gupta, R. C. 2016. “A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete”. *Renew. Sustain. Energ. Rev.*, 54: 1323-1333.
- Thomas, B. S., Gupta, R. C., Kalla, P. and Csetenyi, L. 2014. “Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates”. *Constr. Build. Mater.*, 59: 204-212.
- Thomas, B. S., Kumar, S., Mehra, P., Gupta, R. C., Joseph, M. and Csetenyi, L. J. 2016. “Abrasion resistance of sustainable green concrete containing waste tire rubber particles”. *Constr. Build. Mater.*, 124: 906-909.
- Wang, J., Dai, Q., Si, R., Ma, Y. and Guo, S. 2020. “Fresh and mechanical performance and freeze-thaw

- durability of steel fiber-reinforced rubber self-compacting concrete (SRSCC)". *J. Clean. Prod.*, 277: 123180.
- Xiong, C., Li, Q., Lan, T., Li, H., Long, W. and Xing, F. 2021. "Sustainable use of recycled carbon fiber reinforced polymer and crumb rubber in concrete: mechanical properties and ecological evaluation". *J. Clean. Prod.*, 279: 123624.
- Yung, W. H., Yung, L. C. and Hua, L. H. 2013. "A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete". *Constr. Build. Mater.*, 41: 665-672.
- Zarei, A. and Hassani, A. 2019. "Evaluation of recycled products from worn tires effect on the mechanical properties of concrete pavement". *Modares Civ. Eng. J.*, 18(6): 143-153. viewed 12 July 2019, <<http://journals.modares.ac.ir/article-16-19487-en.html>>.
- Zarei, A., Rooholamini, H. and Ozbakkaloglu, T. 2022. "Evaluating the properties of concrete pavements containing crumb rubber and recycled steel fibers using response surface methodology". *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 15: 470-484.
- Zhu, X., Miao, C., Liu, J. and Hong, J. 2012. "Influence of crumb rubber on frost resistance of concrete and effect mechanism". *Proc. Eng.*, 27: 206-213.