

بررسی مروری تأثیر سنگدانه لاستیکی بر خواص بتن

علیرضا علی یار^{۱*}، محمد باقری^۲

۱- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد

Aliyar.Alireza@Yahoo.Com, M.Unique7821@Gmail.Com

چکیده

دفع کردن مواد زائد و ضایعات صنایع، یک مشکل اساسی در سراسر دنیا است. یکی از این مواد زائد، لاستیک‌های ضایعاتی تایلر است که یک ماده تجزیه‌ناپذیر می‌باشد. استفاده از بتن لاستیکی نویدبخش کاهش آلودگی زیست‌محیطی ناشی از لاستیک‌های دور ریخته‌شده و همچنین صرفه‌جویی در استفاده از منابع طبیعی است؛ که هر دوی آن‌ها مزایای اقتصادی و اجتماعی را به دنبال دارند. اثرات استفاده از لاستیک بازیافتی و ضایعاتی بر روی بتن تازه و سخت‌شده شامل مواردی چون چگالی ظاهری، اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و سایر خواص بتن می‌شود. مطابق با مطالعات پیشین، لاستیک با اندازه ذرات بزرگ به شدت خواص مکانیکی بتن را تضعیف می‌کند. با این حال، لاستیک تایلر ضایعاتی با اندازه ذرات کوچک‌تر می‌تواند تعدادی از خواص بتن را بهبود بخشد. علاوه بر این، میزان استفاده از لاستیک نیز تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی بتن دارد. کاربرد بتن با مقدار بالای لاستیک در سازه‌های ساختمانی محدود می‌باشد، زیرا مقاومت بتن را به طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد. با این وجود، بتن با درصد لاستیک بهینه، تعادل خوبی بین مقاومت و چقرمگی دارد. هدف از این پژوهش ارائه یک بررسی مروری بر تحقیقات صورت گرفته حول بتن لاستیکی و خواص آن می‌باشد.

کلمات کلیدی: بتن لاستیکی، مقاومت بتن، سنگدانه بازیافتی.

۱. مقدمه

دفع زباله‌های پلاستیکی در دهه‌های اخیر به نگرانی‌های بزرگ جهانی تبدیل شده است. استراتژی‌های جدید حذف زباله باید برای انواع مختلف زباله مانند لاستیک، تایلر، شیشه و پلاستیک ایجاد شود. سالانه حدود ۱۵۰۰ میلیون لاستیک در جهان دور ریخته می‌شود [۱]. این مشکل با استفاده مجدد از آن‌ها در صنعت و ساختمان قابل حل است. محققان امکان استفاده از لاستیک ضایعاتی را به عنوان سنگدانه در مخلوط بتن در دو دهه گذشته بررسی کردند [۲]. از طرفی، بتن پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در جهان است. نگرانی‌هایی برای درک بیشتر و بهبود خواص آن وجود دارد. استفاده از زباله و مواد بازیافتی در مخلوط‌های بتنی برای مدیریت و دفن زباله‌های جامد تولیدشده توسط صنایع و زباله‌های شهری اهمیت فزاینده‌ای پیدا می‌کند [۳].

بسیاری از محققان خواص بتن حاوی انواع زباله‌های پلاستیکی مانند پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)، پلی‌اتیلن (PE) و الیاف پلی‌وینیل الکل (PVA) را بررسی کرده‌اند [۴]. بتن لاستیکی یک نوع بتن سازگار با محیط‌زیست است که در آن یک ماده افزودنی لاستیکی به ماتریس بتن اضافه می‌شود. این کار نه تنها می‌تواند از زباله لاستیک به‌طور موثر استفاده کند، بلکه می‌تواند برخی از خواص بتن مانند رفتار ضربه‌ای آن را بهبود بخشد. هم‌چنین منجر به محیط سبزتر، ساخت‌وساز سازگار با محیط‌زیست و پایدار شود [۵]. سنگ‌دانه‌های پلاستیکی در بسیاری از مطالعات از زباله‌های پلاستیکی منابع مختلف به‌دست آمده است. به‌عنوان مثال، بطری‌های پلاستیکی در آزمایشگاه با استفاده از ماشین سنگ‌زنی، آسیاب و سپس الک شدند تا اندازه مناسب به دست آید [۶].

۲. پیشینه پژوهش

المناسر و همکاران [۷] اثر سنگ‌دانه‌های پلاستیکی را بر چگالی بتن بررسی کردند. برای این منظور، ۱۲ مخلوط بتن با w/c مختلف حاوی درصد‌های مختلف سنگ‌دانه‌های پلاستیکی (۰، ۱۰، ۳۰، و ۵۰ درصد) ساخته شد. از سنگ‌دانه‌های پلاستیکی با حداکثر اندازه ۱۳ میلی‌متر استفاده شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که: (۱) چگالی ظاهری بتن با افزایش مقدار سنگ‌دانه‌های پلاستیکی کاهش می‌یابد. (۲) کاهش در چگالی ظاهری به‌طور مستقیم با مقدار مصالح پلاستیکی متناسب است و (۳) چگالی بتن برای بتن حاوی ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد مصالح پلاستیکی به ترتیب ۲/۵، ۶ و ۱۳ درصد کاهش یافت.

امکان استفاده از ضایعات پلاستیکی مختلف حاوی تقریباً ۸۰ درصد پلی‌اتیلن و ۲۰ درصد پلی‌استایرن به عنوان سنگ‌دانه‌های ریز تا ۴/۷۵ میلی‌متر در بتن ارائه شد. با افزایش مقدار ضایعات پلاستیکی، آزمایش‌های مقاومت فشاری تمایل به کاهش مقاومت بتن پلاستیکی را نسبت به بتن مرجع، در هر سن عمل‌آوری نشان داد. بتن با ۱۰ درصد ضایعات پلاستیکی کم‌ترین مقاومت فشاری را در ۲۸ روزه نشان داد، تقریباً ۳۰ درصد کمتر از مخلوط بتن مرجع. هم‌چنین، این مطالعه ۵، ۷ و ۸/۷ درصد تراکم کم‌تر مخلوط بتن حاوی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد سنگ‌دانه‌های پلاستیکی را نشان داد [۸].

نتایج آزمایشی نشان داد که چگالی بتن تازه با افزایش مقدار سنگ‌دانه پلاستیکی کاهش می‌یابد. تفاوت در اندازه و شکل سنگ‌دانه‌های پت (PET) بر اسلامپ مخلوط بتن تازه تأثیر می‌گذارد که در نهایت رفتار مکانیکی را تغییر می‌دهد. این مطالعه هم‌چنین کاهش مقاومت فشاری بتن را به دلیل افزودن سنگ‌دانه‌های PET برای جایگزینی سنگ‌دانه‌های طبیعی نشان داد. سنگ‌دانه‌های طبیعی و سنگ‌دانه‌های PET نمی‌توانند با خمیر سیمان برهم‌کنش داشته باشند و بنابراین ناحیه انتقال سطحی در بتن حاوی سنگ‌دانه PET ضعیف‌تر از بتن مرجع است که مقاومت فشاری حاصل را کاهش می‌دهد [۹]. به گفته پژوهشگران، کاهش مقاومت فشاری به دلیل افزودن سنگ‌دانه‌های پلاستیکی را می‌توان عمدتاً به پیوند ضعیف بین ماتریس و سنگ‌دانه‌های پلاستیکی نسبت داد. درحالی‌که افزودن سنگ‌دانه‌های پلاستیک PC و PET در مواد سیمانی می‌تواند ترکیب جاذب انرژی خوبی را ایجاد کند که برای کاربردهای مهندسی مانند سازه‌های تحت تأثیر دینامیک یا ضربه مناسب باشد [۱۰].

بتن با ضایعات تایلر به‌ویژه برای سازه‌های بتنی واقع در مناطق با خطر زلزله شدید و هم‌چنین برای کاربردهای دینامیکی شدید مانند تراورس‌های راه‌آهن توصیه می‌شود [۱۱]. بررسی در مورد لاستیک دور ریخته‌شده به‌عنوان سنگ‌دانه بتن نشان می‌دهد که خواص مکانیکی بتن را کاهش می‌دهد [۱۲]. پژوهشی با تمرکز بر مقاومت ضربه‌ای بتن نشان داد که مقاومت ضربه‌ای بتن در جایگزینی سنگ‌دانه‌های ریز با الیاف لاستیکی بهبود می‌یابد و مقاومت فشاری در جایگزینی بخشی از سیمان با دوده سیلیس، افزایش می‌یابد [۱۳]. کاهش مقاومت فشاری (تا ۳۰ درصد) بتن لاستیکی در مقایسه با بتن معمولی، گزارش شده است، درحالی‌که اگر مقدار بهینه لاستیک (۲۰ تا ۲۵ درصد) انتخاب شود، اضافه کردن لاستیک به

مخلوط‌های بتنی منجر به کنترل ترک‌های انقباضی می‌شود [۱۴]. هم‌چنین گزارش شده است کارایی بتن با افزودن ذرات لاستیک، به‌طور قابل توجهی تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد، اما مقاومت فشاری بتن تایر ضایعاتی با افزایش سطح جایگزینی سنگ‌دانه‌های ریز، کاهش می‌یابد. مقاومت ضربه‌ای بتن در استفاده از الیاف فولادی تا پانزده برابر و در استفاده از الیاف پلی پروپیلن تا ده برابر افزایش می‌یابد [۱۵].

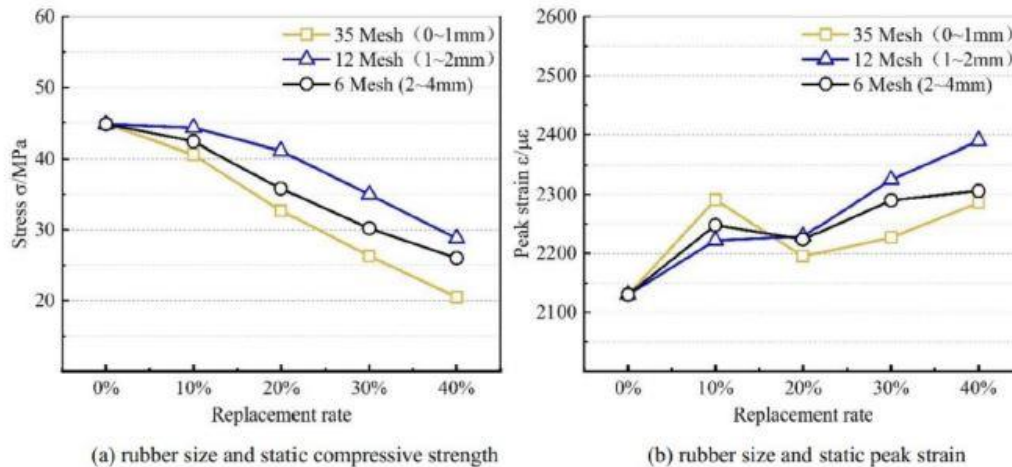
آزمایش‌های خمشی انجام شده افزایش قابل توجهی در جذب انرژی تا ۷۵ درصد برای جایگزینی سنگ‌دانه‌های درشت و ریز با خرده‌های لاستیک را نشان داد [۱۶]. هم‌چنین حدود ۲۵ درصد افزایش ظرفیت جذب انرژی بتن را در جایگزینی ۲۵ درصدی سنگ‌دانه‌های ریز با خرده لاستیک داشت [۱۷]. تجمع تایرهای لاستیکی دور ریخته شده یک مشکل بزرگ است، زیرا دفع آن به دلیل پیکربندی بسیار پیچیده مواد تشکیل دهنده، بسیار دشوار است. مطالعات موجود در مورد استفاده از تایرهای لاستیکی ضایعاتی در بتن، توصیه‌هایی برای استفاده از این ضایعات به‌عنوان جایگزینی جزئی سنگ‌دانه‌های ریز در تولید بتن ارائه می‌دهد. در ادامه، تاثیر استفاده از لاستیک بر خواص بتن به‌صورت موردی شرح داده می‌شود.

۱.۲. مقاومت فشاری

امروزه از معضلات اصلی بشر حفظ محیط‌زیست در برابر وجود مواد ضایعاتی است. استفاده مجدد این مواد هم‌چون لاستیک ضایعاتی تایر به‌عنوان جایگزینی بخشی از مصالح در ساخت بتن به‌عنوان یک استراتژی اساسی برای دستیابی به توسعه پایدار محسوب می‌شود. اثر هم‌زمان لاستیک و الیاف فولادی بازیافت شده از تایر ضایعاتی بر مقاومت سایشی بتن در سال ۱۳۹۸ توسط ولی‌زاده و خزائی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش به‌کارگیری هم‌زمان پودر و خرده لاستیک و سیم و الیاف فولادی بازیافت شده از تایر ضایعاتی در مخلوط بتن، مقاومت‌های سایشی و فشاری و وزن واحد حجم بتن مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش در ۱۲ طرح اختلاط از جایگزینی پودر و خرده لاستیک با ماسه مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد افزودن الیاف فولادی بازیافتی به بتن حاوی پودر و خرده لاستیک، کاهش مقاومت فشاری را بهبود می‌بخشد و باعث افزایش مقاومت سایشی می‌شود. با افزایش درصد‌های جایگزینی پودر و خرده لاستیک با ماسه در مخلوط بتن همراه با الیاف فولادی بازیافتی، مقاومت سایشی بتن افزایش اما مقاومت فشاری و وزن واحد حجم بتن کاهش می‌یابد. مقاومت سایشی این نوع بتن‌های حاوی مواد ضایعاتی نسبت به بتن شاهد تا ۵/۳۷ درصد افزایش داشته است [۱۸].

کاهش مقاومت فشاری بتن لاستیکی (RuC) را می‌توان به سه عامل اصلی نسبت داد: ابتدا، ذرات لاستیک بیش‌تر از خمیر سیمان اطراف تغییر شکل می‌دهند. این منجر به تمرکز تنش در اطراف خمیر سیمان شده که خود منجر به شروع رشد ترک در خمیر سیمان می‌شود، همان‌طور که با حفره‌های هوا در نمونه‌های بتنی اتفاق می‌افتد. دوم، افزودن خرده لاستیک باعث افزایش فضای خالی (هوا) در مخلوط می‌شود [۲ و ۱۹]. عامل سوم شامل ضعف ناحیه انتقال سطحی پیوند بین ذرات خرده لاستیک و ملات سیمان اطراف است [۲، ۲۰ و ۲۱].

در پژوهشی دیگر، مقاومت فشاری بتن با افزایش مقدار لاستیک کاهش یافت. کاهش نسبت‌های جایگزینی CR کم‌تر از حدود ۵ درصد حجمی، قابل توجه نیست (کمتر از ۸/۵ درصد)، اما کاهش بیش‌تر برای نسبت‌های جایگزینی CR بالاتر، قابل توجه است. جذب آب با افزایش مقدار CR تا حدود ۹ درصد جایگزینی، کاهش یافت (حدود ۵/۵ درصد). اما زمانی که مقدار CR از این نسبت فراتر رفت، افزایش یافت [۲۲].



شکل ۱- مقایسه خواص مکانیکی، الف) اندازه لاستیک و مقاومت فشاری ب) اندازه لاستیک و اوج کرنش [۲۳]

نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن خودمتراکم و بتن خودمتراکم لاستیکی در شکل ۱ آورده شده است. مقاومت فشاری با افزایش مقدار لاستیک، کاهش می‌یابد. در مقابل، افزایش مقدار ذرات لاستیک به حداکثر کرنش کمک می‌کند. به دلیل استحکام کم و تغییر شکل آسان ذرات لاستیک، برخی از منافذ روی سطح مشترک بین لاستیک و بتن یک رابط ضعیف را تشکیل می‌دهند. ترک‌ها اغلب از سطح مشترک ضعیف ایجاد می‌شوند که منجر به کاهش مقاومت فشاری می‌شود [۲۴]. با این حال، تغییر شکل لاستیک هم‌چنین می‌تواند به‌طور موثر انرژی آزاد شده توسط انبساط ریزترک‌ها را جذب کند که در نتیجه باعث افزایش چقرمگی و بهبود اوج کرنش بتن می‌شود [۲۵]. هنگامی که مقدار لاستیک کم است (۰/۱۰٪)، ذرات لاستیک راحت‌تر در نمونه نسبت به اندازه‌های دیگر توزیع می‌شوند، که منجر به جلوگیری از گسترش ریزترک‌ها و افزایش کرنش پیک می‌شود.

مجموع ۹ طرح مخلوط در طول آزمایش ساخته شد و متغیرهای آزمایش شامل درصد حجمی لاستیک تأیر بازیافتی جایگزین ماسه طبیعی (۰، ۵ و ۱۰ درصد)، درصد حجمی الیاف فولادی (۰، ۵/۰ و ۱ درصد)، و دمای آتش (۲۵، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه) می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف فولادی به حجم بتن و اضافه کردن لاستیک تأیر جایگزین ماسه به مخلوط بتن منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حرارت دیده و حرارت ندیده می‌شود. هم‌چنین، با افزایش درجه حرارت، مقاومت فشاری کلیه نمونه‌های بتنی با یک افت قابل توجهی روبه‌رو شده است.

لی و ژانگ [۲۶] مقاومت سایشی بتن را مورد مطالعه قرار دادند که در آن دود سیلیس و خرده لاستیک به‌عنوان مواد افزودنی در نظر گرفته شد. گزارش شد که افزودن خرده لاستیک مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد، اما مقاومت سایشی بتن افزایش پیدا کرد. افزودن دوده سیلیس هم مقاومت فشاری و هم مقاومت سایشی بتن لاستیکی را افزایش داد.

تأثیر ترکیب الیاف هیبریدی و سنگ‌دانه لاستیکی بر خواص رئولوژیکی و مکانیکی بتن خودمتراکم توسط ابدال قدیر و طارن‌نعمان در ۲۰۲۴ بررسی شد [۲۷]. سنگ‌دانه‌های لاستیکی بازیافت شده از لاستیک‌های زائد به بتن خودمتراکم اضافه می‌شود تا برخی از خواص آن مانند دوام، چقرمگی و مقاومت بتن در برابر ضربه و لرزش را بهبود بخشد. در این مطالعه، بتن اصلاح شده هیبریدی لاستیکی خودمتراکم (SCC) با استفاده از سنگ‌دانه‌های لاستیکی تأیرهای بازیافتی، زباله‌های پلاستیکی (PET) و الیاف فولادی تولید شد. لاستیک به‌عنوان یک جایگزین جزئی برای ماسه، تنها با ۱۰٪ استفاده شد، در حالی که الیاف در دو نسبت مختلف ۰/۲۵ و ۰/۳۵ (حجم) استفاده شد. نتایج نشان داد که افزودن سنگ‌دانه لاستیکی در مقدار ۱۰ درصد، باعث کاهش خواص رئولوژیکی SCC می‌شود. علاوه بر این، مقاومت فشاری حدود ۱۴٪ در همان مقدار

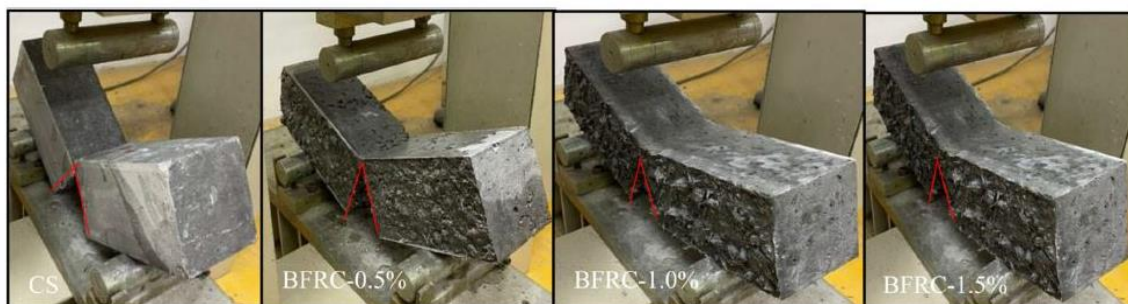
سنگدانه لاستیکی کاهش یافت، درحالی که افزودن الیاف هیبریدی خواص مکانیکی را علی‌رغم تأثیر منفی بر خواص رئولوژیکی SCC لاستیکی، بهبود می‌بخشد. ترکیب سنگدانه لاستیکی و الیاف هیبریدی در SCC می‌تواند با متعادل کردن ضعف در استحکام به دلیل عدم اتصال بین سنگدانه لاستیک و خمیر سیمان، بر خواص مکانیکی آن تأثیر مثبت بگذارد و برای جلوگیری از زوال شدید در مقاومت کششی، انعطاف‌پذیری را بهبود بخشد و افزایش ظرفیت جذب انرژی ویژه برای اعضای که در معرض اثرات زلزله قرار دارند را به‌دنبال داشته باشد.

اثرات الیاف بازالت و ذرات لاستیک بر خواص مکانیکی و مقاومت بتن توسط ژینگ لو و همکاران در ۲۰۲۴ مورد آزمایش قرار گرفت [۲۸]. در این مطالعه، اثرات ذرات لاستیک بر عملکرد مکانیکی بتن به صورت تجربی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که برای بتن مسلح با الیاف بازالت، زمانی که مقدار الیاف از ۰ به ۰/۴ درصد افزایش می‌یابد، مقاومت فشاری و مدول الاستیک به ترتیب از ۷۱/۵ مگاپاسکال به ۶۲/۵ مگاپاسکال و ۴۴/۵ گیگا پاسکال به ۴۱ گیگا پاسکال کاهش می‌یابد.

۲.۲. مقاومت خمشی

آزمایش‌های خمشی انجام‌شده افزایش قابل توجهی در جذب انرژی برای ۷۵ درصد جایگزینی سنگدانه‌های درشت/ریز توسط خرده‌های لاستیک را نشان داد [۱۶]. همچنین حدود ۲۵ درصد افزایش ظرفیت جذب انرژی بتن را در جایگزینی ۲۵ درصدی سنگدانه‌های ریز با خرده لاستیک داشت [۱۷]. تجمع تیرهای لاستیکی دور ریخته شده یک مشکل بزرگ است زیرا دفع آن به دلیل پیکربندی بسیار پیچیده مواد تشکیل‌دهنده، بسیار دشوار است. مطالعات موجود در مورد استفاده از تیرهای لاستیکی ضایعاتی در بتن، توصیه‌هایی برای استفاده از این ضایعات به‌عنوان جایگزینی جزئی سنگدانه‌های ریز در تولید بتن ارائه می‌دهد. نتایج مطالعه ژینگ لو و همکاران در ۲۰۲۴ با موضوع اثرات ذرات لاستیک بر عملکرد مکانیکی بتن به صورت نشان داد که با استفاده از سنگدانه لاستیکی، مقاومت خمشی از ۵/۹ مگاپاسکال به ۶/۶ مگاپاسکال افزایش می‌یابد و سپس به ۶/۳ مگاپاسکال کاهش می‌یابد [۲۸].

در پژوهشی مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی حاوی درصدهایی از الیاف بازالت (BF) و دوده سیلیس (SF) مقایسه شده است. با افزایش مقدار BF، مقاومت خمشی بین ۴/۳ تا ۱۴/۸ درصد بهبود یافته است. بالاترین مقاومت مشاهده‌شده ۶/۴۴ مگاپاسکال در مقدار ۱/۵٪ BF بود که نشان‌دهنده بهبود مقاومت در برابر تنش‌های کششی است. اثر هم‌افزایی BF با SF منجر به افزایش ماتریس خمیر الیاف می‌شود. در نتیجه این امر جذب انرژی و توانایی خمشی بتن افزایش می‌کند. این خواص بهبودیافته در نمونه‌های با مقدار الیاف بالاتر، همان‌طور که در حالت‌های شکست نشان‌داده‌شده در شکل ۲ مشاهده می‌شود، کاهش تدریجی عرض ترک پس از شکست را به‌دنبال دارد [۲۹].



شکل ۲- عرض ترک پس از شکست بتنی حاوی الیاف بازالت (BF) و دوده سیلیس (SF) [۲۹]

علاوه بر این، ترکیب دوده سیلیس، تولید ژل هیدرات سیلیکات کلسیم اضافی (C-S-H) را افزایش داده که منجر به ایجاد پیوندهای سیمانی قوی تر و در نهایت بهبود مقاومت خمشی بتن می گردد. این افزایش شکل پذیری به ویژه برای کاربردهایی که بتن در معرض بارگذاری دینامیکی قرار می گیرد، سودمند است.

۳.۲. مقاومت کششی

در پژوهشی از لاستیک به عنوان جایگزین سنگدانه طبیعی و یک فوق روان کننده پلی کربوکسیلیک اتر (SP) استفاده شد. در مجموع ۱۶ مخلوط SCRC با جایگزینی سنگدانه طبیعی با لاستیک در شش سطح جایگزینی مختلف ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد طراحی و ساخته شد. بتن لاستیکی خودتراکم با مقاومت فشاری بیش از ۳۰ مگاپاسکال به راحتی قابل تولید است. کاهش سیستماتیک مقاومت کششی با افزایش مقدار لاستیک مشاهده گردید. هم چنین مدول الاستیک استاتیکی با افزایش اندازه و مقدار لاستیک کاهش یافت [۳۰].

الوسابی و همکاران در ۲۰۲۰ مقاومت بتن ساده و لاستیکی حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن را بررسی کردند. در این پژوهش، نتایج بر اساس یک آزمایش تجربی تعیین مقاومت ضربه ای با استفاده از چکش رهاسونده با سرعت کم (با سرعت ضربه ۲/۸ متر بر ثانیه) روی بتن تقویت شده با الیاف و بتن لاستیکی تقویت شده با الیاف انجام شده است. متغیرها نسبت های مختلف الیاف فولاد و الیاف پلی پروپیلن با و بدون خرده لاستیک به صورت جایگزین سنگدانه به نسبت ۲۰ درصد حجمی بودند که انرژی ضربه اول و نهایی بالاتری را در مقایسه با نمونه های بدون لاستیک جذب کردند. در مقابل، چگالی، مقاومت فشاری و کششی کاهش یافت، در حالی که فضاهای خالی و جذب آب بتن افزایش یافت [۳۱].

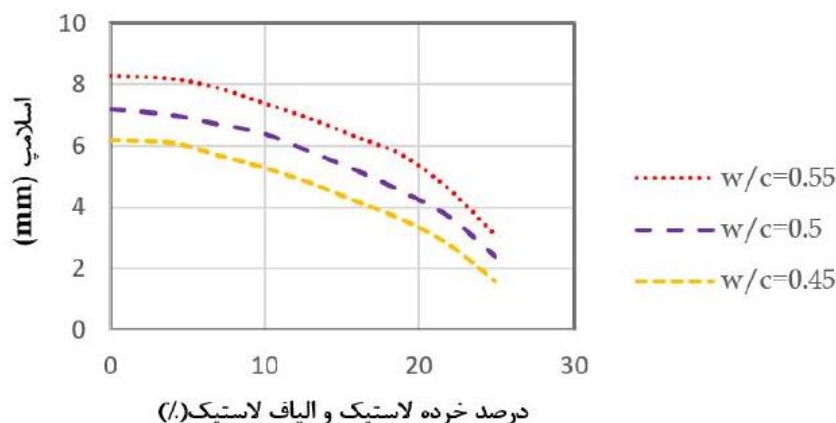
۴.۲. روانی بتن

اسلامپ با افزایش درصد جایگزینی ذرات لاستیکی افزایش می یابد. انقباض با درصد جایگزینی ذرات لاستیک و با افزایش سن افزایش می یابد اما هم چنان زیر حد تعیین شده ۰/۰۲۵ درصد است. در درصد جایگزینی ذرات لاستیکی ۴۰ درصد، رطوبت به دلیل منافذ اضافی شروع به نشت می کند، بنابراین نسبت نفوذپذیری را نمی توان به درستی اندازه گیری کرد. نرخ جذب با درصد جایگزینی ذرات لاستیک افزایش می یابد. میانگین نرخ جذب بتن با درصد جایگزینی متفاوت تقریباً ۳ درصد بیش تر از بقیه بتن ها است [۳۲].



شکل ۳- انجام آزمایش اسلامپ [۳۳]

در پژوهش کردرستی و همکاران [۳۳] از یک طرح مخلوط بتن از استاندارد ACI برای ساخت بتن لاستیکی استفاده شد و مقاومت معیار ۵۰ مگاپاسکال ۲۸ روزه مد نظر بود. شکل ۳ آزمایش اسلامپ را نشان می‌دهد. تغییرات اسلامپ برحسب درصد خرده لاستیک و الیاف لاستیک به صورت سهمی می‌باشد. در ابتدا شیب کاهشی نمودار اسلامپ ناچیز بوده و در ادامه با افزایش میزان خرده لاستیک و الیاف لاستیک، حساسیت اسلامپ نیز افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در تمامی نسبت‌های آب به سیمان تا ۰.۴٪ جایگزینی خرده لاستیک و الیاف لاستیک، افت اسلامپ ناچیز است.



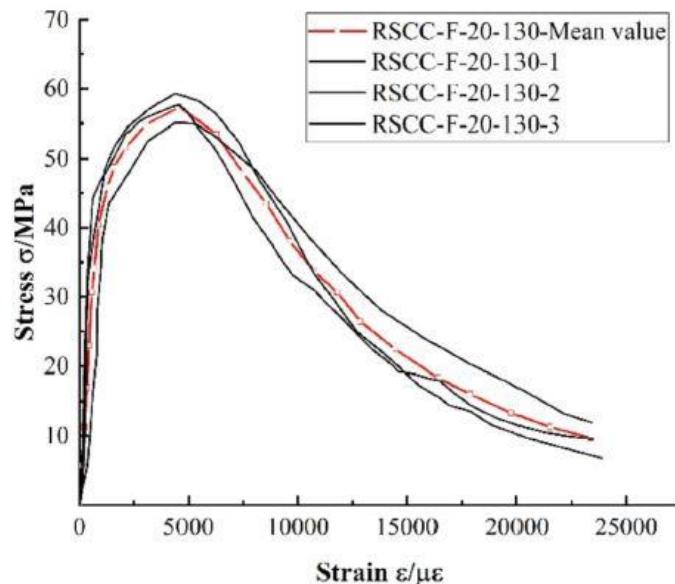
شکل ۴- تغییرات اسلامپ نسبت به درصد خرده لاستیک و الیاف لاستیک [۳۳]

۵.۲. سایر خواص بتن

در مقابل، شکل پذیری، ظرفیت پلاستیک و انرژی ضربه به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد [۳۴-۳۶]. این ویژگی به این دلیل است که ذرات لاستیک می‌توانند سازوکارهایی با انعطاف پذیری بالا را در مقایسه با بتن معمولی به دلیل سختی کم آن، اضافه کنند [۳۷-۳۹]. ژنگ و همکاران [۴۰] گزارش کردند که جایگزینی جزئی لاستیک باعث افزایش شکل پذیری بتن و افزایش خواص الاستیک، عایق صوتی و گرمایی در بتن می‌شود. نومان و همکاران [۴۱] گزارش دادند که جایگزینی ۰ تا ۲۵ درصد سنگ‌دانه‌های ریز از لاستیک‌های فرسوده خودرو (در اندازه ۱-۲ میلی‌متر) در بتن، باعث افزایش شکل پذیری و سختی شده و انرژی ضربه با افزایش مقدار سنگ‌دانه لاستیکی به ۲۰٪، کاهش می‌یابد [۴۲-۴۴].

کاهش سختی و ریزترک‌ها معمولاً در بتن خودتراکم که در معرض ارتعاش طولانی مدت و بارگذاری ضربه قرار می‌گیرند، مشاهده می‌شود. افزودن ذرات لاستیک به بتن یک رویکرد جهانی برای بهبود مقاومت در برابر ضربه است. بهره‌برداری از خواص مکانیکی/دینامیکی بتن خودتراکم لاستیکی تحت بارگذاری ضربه‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است. چن و همکاران در ۲۰۲۲ به بررسی تجربی مقاومت در برابر ضربه بتن خود متراکم لاستیکی پرداختند [۲۳]. تأثیر نرخ جایگزینی لاستیک، اندازه ذرات لاستیک و نرخ کرنش بر مقاومت ضربه در نظر گرفته شد. ۱۰۸ نمونه بتن خودتراکم لاستیکی به همراه ۳۶ نمونه بتن خودتراکم معمولی طراحی گردید. نتایج نشان داد افزایش مقدار لاستیک مقاومت فشاری/دینامیکی بتن خود متراکم لاستیکی را کاهش می‌دهد.

منحنی تنش-کرنش بتن در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش نرخ کرنش ضربه، شیب منحنی بخش الاستیک کمی افزایش می‌یابد. به این معنی که وقتی به استحکام نهایی رسید، نمونه تغییر شکل قابل توجهی دارد [۲۳].



شکل ۵- منحنی تنش-کرنش بتن خودتراکم لاستیکی تحت بارگذاری ضربه‌ای [۲۳]

رفتار مکانیکی روسازی‌های بتنی خودتراکم حاوی خرده لاستیک بازیافتی تایر و تقویت‌شده با الیاف پلی‌پروپیلن توسط حسامی و همکاران در ۲۰۱۶ بررسی شد [۴۵]. این تحقیق بر روی یافتن بهترین راه برای تولید بتن روسازی با استفاده از ضایعات لاستیک تایر به عنوان ماده تشکیل دهنده متمرکز بود. بنابراین، خرده لاستیکی تایر به عنوان ماده جایگزین شن و ماسه جزئی (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) در طراحی مخلوط بتن خودتراکم استفاده شد. با توجه به نتایج این مطالعه، آزمایشات بتن تازه نشان داد که الیاف اثر منفی بر خواص رئولوژیکی بتن تازه دارد. علاوه بر این، آزمایشات بتن سخت‌شده نشان داد که خرده لاستیک مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، مقاومت سایشی و مدول الاستیسیته را کاهش می‌دهد؛ در حالی که جذب آب بتن را افزایش می‌دهد. بنابراین، الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های حاوی خرده لاستیک اضافه شد و منجر به افزایش قابل توجهی در استحکام فشاری، کششی، خمشی و سایشی شد؛ اما تأثیر قابل توجهی بر مدول الاستیسیته این نمونه‌ها نداشت. علاوه بر این، بتن الیافی لاستیکی، جذب آب را کاهش داد.

نتایج یک پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از ذرات لاستیکی تایر می‌تواند مقاومت سایشی بتن را بهبود بخشد و این امر می‌تواند کاربرد آن را در روسازی‌ها، کف‌ها و بزرگراه‌های بتنی و یا در مکان‌هایی که نیروهای سایشی بین سطوح و اجسام متحرک وجود دارد، تضمین کند. دفع لاستیک‌های زائد به یک موضوع مهم زیست‌محیطی در تمام نقاط جهان تبدیل شده است. هر ساله میلیون‌ها لاستیک در سرتاسر جهان دور انداخته یا دفن می‌شوند که این موضوع یک تهدید بسیار جدی برای محیط‌زیست است. مطالعات مناسب در مورد مقاومت سایشی بتن لاستیکی مورد توجه قرار نگرفته است. بتن‌هایی که در برابر سایش مقاوم‌تر هستند را می‌توان در روسازی‌ها، کف‌ها و راه‌های بتنی، در سازه‌های هیدرولیکی مانند تونل‌ها و سرریز سدها، یا در سطوح دیگری که نیروهای سایشی بین سطوح و اجسام متحرک در حین سرویس اعمال می‌شود، اعمال کرد [۴۶].

مقادیر مختلف سنگ‌دانه لاستیکی مورد استفاده در تحقیقات گذشته در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱- درصدهای مختلف سنگدانه لاستیکی مورد استفاده در تحقیقات گذشته

منبع	درصد های سنگدانه استفاده شده	نوع سنگدانه جایگزین	سایر افزودنی های بتن
[۷]	۰، ۱۰، ۳۰ و ۵۰٪	ضایعات لاستیک تایر	-
[۱۴]	۲۰ تا ۲۵٪	ضایعات لاستیک تایر	سرباره
[۴۱]	۰ تا ۲۵٪	ضایعات لاستیک تایر	-
[۳۰]	۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵٪	ضایعات لاستیک تایر	-
[۴۵]	۵، ۱۰ و ۱۵٪	ضایعات لاستیک تایر	الیاف پلی پروپیلن
[۴۷]	۰، ۵ و ۱۰٪	ضایعات لاستیک تایر	الیاف فولادی
[۴۸]	۰، ۱۵، ۲۵ و ۳۵٪	ضایعات لاستیک تایر	
[۲۷]	۱۰٪	ضایعات لاستیک تایر و قوطی پلاستیکی	الیاف فولادی
[۳۱]	۲۰٪	ضایعات لاستیک تایر	الیاف فولادی و پلی پروپیلن
[۴۹]	۰ تا ۴۰٪	ضایعات لاستیک تایر	الیاف بازالت
[۵۰]	۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪	ضایعات قوطی پلاستیکی	-

۴. نتیجه گیری

استفاده از ضایعات لاستیکی از جمله لاستیک تایر بازیافتی در مخلوط بتن به عنوان یکی از روش های موثر جهت بازیافت مواد زاید می باشد. علاوه بر این، امروزه استفاده از مواد ضایعاتی به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه های طبیعی در بتن، راه حلی موثر برای رفع مشکلات زیست محیطی می باشد که با توجه به تنزل خصوصیات بتن حاصل ناشی از حضور مواد ضایعاتی، افزودن الیاف به مخلوط بتن، می تواند عملکرد مکانیکی آن را بهبود بخشد [۴۷].

مقاومت سایشی بتن سبز پایدار حاوی ذرات لاستیک زائد، عنوان پژوهش توماس و همکاران در سال ۲۰۱۶ بود [۴۶]. به دلیل مشکلات زیست محیطی ایجاد شده توسط لاستیک زباله، توسعه بتن های جدید سازگار با محیط زیست مانند بتن لاستیکی در حال ترویج است. در این مطالعه، پتانسیل ذرات لاستیک ضایعاتی را به عنوان جایگزین جزئی برای سنگدانه های ریز در بتن سیمانی با مقاومت معمولی و با استحکام بالا تحلیل شد و مقاومت در برابر سایش اندازه گیری گردید. نتایج نشان می دهد که استفاده از ذرات لاستیک تایر می تواند مقاومت سایشی بتن را بهبود بخشد و این امر می تواند کاربرد آن را در روسازی ها، کف ها و راه های بتنی و یا در مکان هایی که نیروهای سایشی بین سطوح و اجسام متحرک وجود دارد، تضمین کند.

تاثیر پودر لاستیک ضایعاتی اصلاح شده بر مقاومت سایشی بتن توسط ژا-ای و همکاران در ۲۰۲۲ مورد مطالعه قرار گرفت [۵۱]. مقاومت سایشی بتن خرده لاستیکی همیشه یک نقطه تحقیقاتی بوده است. خواص مکانیکی بتن خرده لاستیکی با نسبت حجمی لاستیک ۰، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد تعیین شد. مقاومت سایشی بتن خرده لاستیکی با روش های بلبرینگ و ساچمه ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری و خمشی بتن خرده لاستیکی اصلاح شده به ترتیب ۷۴/۲ و ۴۵/۷ درصد نسبت به بتن خرده لاستیکی افزایش یافته است. مقاومت سایشی بتن ابتدا افزایش می یابد و سپس با افزایش مقدار لاستیک کاهش می یابد. در مقایسه با بتن شاهد، مقاومت سایشی بتن خرده لاستیکی و بتن خرده لاستیکی اصلاح شده به ترتیب ۱۴/۹٪ و ۲۴/۸٪ افزایش یافت. افزایش مقاومت سایشی بتن خرده لاستیکی عمدتاً به دلیل جذب انرژی سایش توسط لاستیک است.

۵. مراجع

1. Z. Jun, W. Xiang-ming, C. Jian-min, Z. Kai (2008). Optimization of processing variables in wood – rubber composite panel manufacturing technology. *Bioresour, Technol*, Volume 99, PP: 2384–2391, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.031>.
2. A.M. Rashad (2016). A comprehensive overview about recycling rubber as fine aggregate replacement in traditional cementitious materials. *Int. J. Sustain, Built Environ*, Volume 5, PP: 46–82, <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2015.11.003>.
3. A. A. Ishaiba, “Mechanical Properties of Concrete Using Recycled Plastic,” no. December, pp. 7–11, 2000.
4. J. Yu et al., “Tensile performance of sustainable Strain-Hardening Cementitious Composites with hybrid PVA and recycled PET fibers,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 107, no. February, pp. 110–123, 2018.
5. O. M. Olofinnade, A. N. Ede, J. M. Ndambuki, B. U. Ngene, I. I. Akinwumi, and O. Ofuyatan, “Strength and microstructure of eco-concrete produced using waste glass as partial and complete replacement for sand,” *Cogent Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–19, 2018.
6. N. Saikia and J. De Brito, “Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review,” *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 385–401, 2012.
7. A. A. Al-Manaseer and T. R. Dalal, “Concrete containing plastic aggregates,” *Concr. Int.*, vol. 19, no. 8, pp. 47–52, 1997, Accessed: Jul. 09, 2020.
8. Z. Z. Ismail and E. A. AL-Hashmi, “Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement,” *Waste Manag.*, vol. 28, no. 11, pp. 2041–2047, 2008.
9. N. Saikia and J. De Brito, “Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 52, pp. 236–244, 2014.
10. K. Hannawi, S. Kamali-Bernard, and W. Prince, “Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates,” *Waste Manag.*, vol. 30, no. 11, pp. 2312–2320, 2010.
11. F. P. Torgal, A. Shasavandi, and S. Jalali, “Tyre Rubber Wastes Based Concrete: A review,” *WASTES Solut. Treat. Oppor.*, p. 3, 2011.
12. R. Thiruppathi, “Discarded tyre rubber as concrete aggregate: A possible outlet for used tyres,” 2013 Int. Conf. Curr. Trends Eng. Technol. ICCTET 2013, no. December 2010, pp. 202–207, 2013.
13. Swetapadma Panda, Pradip Sarkar, Robin Davis (2021). Abrasion resistance and slake durability of copper slag aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, Volume 35, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101987>.
14. I. Mohammadi and H. Khabbaz, “In-depth assessment of Crumb Rubber Concrete (CRC) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 62, pp. 106–116, 2015.
15. T. Gupta, R. K. Sharma, and S. Chaudhary, “Impact resistance of concrete containing waste rubber fiber and silica fume,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 83, no. 4, pp. 76–87, 2015.

16. M. A. Aiello and F. Leuzzi, "Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state," *Waste Manag.*, vol. 30, no. 8–9, pp. 1696–1704, 2010.
17. E. Ozbay, M. Lachemi, and U. K. Sevim, "Compressive strength, abrasion resistance and energy absorption capacity of rubberized concretes with and without slag," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 44, no. 7, pp. 1297–1307, Aug. 2011.
۱۸. ولی زاده میثم، خزائنی گرشاسب. ارزیابی اثر همزمان لاستیک و الیاف فولادی بازیافت شده از تایر ضایعاتی بر مقاومت سایشی بتن. مهندسی عمران مدرس ۱۳۹۸؛ ۱۹(۵): ۲۴۷–۲۳۷. URL: [http://mcej.modares.ac.ir/article-۲۳۷-۲۴۷:\(۵\)۱۹; ۱۳۹۸](http://mcej.modares.ac.ir/article-۲۳۷-۲۴۷:(۵)۱۹; ۱۳۹۸).
-fa.html۱۶-۳۱۱۲۶
19. M.M.R. Taha, M. Asce, M.A.A. El-wahab (2009). Mechanical, fracture, and microstructural investigations. *J. Mater, Civ. Eng Volume 20*, PP: 640–649, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:10\(640\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:10(640)).
20. V. Corinaldesi, A. Mazzoli, G. Moriconi (2011). Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles. *Mater, Des, Volume 32*, PP: 1646–1650, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.013>.
21. A. Turatsinze, J.L. Granju, S. Bonnet (2006). Positive synergy between steel-fibres and rubber aggregates: effect on the resistance of cement-based mortars to shrinkage cracking. *Cem, Concr. Res, Volume 36*, PP: 1692–1697, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.02.019>.
22. O. Rezaifar, M. Hasanzadeh, and M. Gholhaki, "Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: Optimization using Response Surface Method," *Constr. Build. Mater.*, vol. 123, pp. 59–68, 2016.
23. Jianxing Chen, Jinping Zhuang, Sizheng Shen, Shuqing Dong (2022). Experimental investigation on the impact resistance of rubber self-compacting concrete, *Structures, Volume 39*, Pages 691–704, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.057>.
24. Roychand R, Gravina RJ, Zhuge Y, Ma X, Youssf O, Mills JE. A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete. *Constr Build Mater* 2020; 237:117651.
25. Chen X, Liu Z, Guo S, Huang Y, Xu W. Experimental study on fatigue properties of normal and rubberized self-compacting concrete under bending. *Constr Build Mater* 2019; 205:10–20.
26. Zhang Bo, Li Guangyu, The abrasion-resistance investigation of rubberized concrete, *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* 27 (2012) 1144–1148.
27. Iman Mohammed Abdal Qadir, Ahmed Tareq Noaman (2024). Effect of combination between hybrid fibers and rubber aggregate on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials, Volume 414*, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135038>.
28. Jing Lv, Wenchao Han, Jianlong Zheng, Shenao Lin, Shijie Yuan (2024). Effects of basalt fibre and rubber particles on the mechanical properties and impact resistance of concrete. *Science Direct, Structures, Volume 65*, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106677>.
29. Idris Ahmed Ja'e, Raja Amirul Naquib bin Raja Sazrin, Agusril Syamsir, Naraindas Bheel, Chiemela Victor Amaechi, Teh Hee Min, Vivi Anggraini (2024). Optimisation of mechanical properties and impact resistance of basalt fibre reinforced concrete containing silica fume: Experimental and response surface assessment, *Developments in the Built Environment, Volume 17*, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100368>.

30. N. N. Hilal, "Hardened properties of self-compacting concrete with different crumb rubber size and content," *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 6, no. 1, pp. 191–206, 2017.
31. Emad A. Alwesabi, B.H. Abu Bakar, Ibrahim M.H. Alshaikh, Hazizan Md Akil (2020). Impact resistance of plain and rubberized concrete containing steel and polypropylene hybrid fiber. *Science Direct, Materials Today Communications*, Volume 25, 101640, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101640>.
32. L. J. Hunag, H. Y. Wang, and Y. W. Wu, "Properties of the mechanical in controlled low-strength rubber lightweight aggregate concrete (CLSRLC)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, pp. 1054–1058, 2016.
33. G. Murali, K. Karthikeyan, and V. R. Ramkumar, "Reliability Analysis of Impact Failure Energy of Fibre Reinforced Concrete Using Weibull Distribution," vol. 21, no. 2, pp. 163–170, 2018.
34. K. Jafari, V. Toufigh (2017). Experimental and analytical evaluation of rubberized polymer concrete. *Constr. Build. Mater.*, Volume 155, PP: 495–510, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.097>.
35. M.K. Ismail, A.A.A. Hassan (2017). an experimental study on flexural behaviour of large-scale concrete beams incorporating crumb rubber and steel fibres. *Eng. Struct.*, Volume 145, PP: 97–108, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.05.018>.
36. D. Li, Y. Zhuge, R. Gravina, J.E. Mills (2018). Compressive stress strain behavior of crumb rubber concrete (CRC) and application in reinforced CRC slab. *Constr. Build. Mater.*, Volume 166, PP: 745–759, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.142>.
37. M.K. Ismail, A.A.A. Hassan (2016). Performance of full-scale self-consolidating rubberized concrete beams in flexure. *ACI, Mater. J.*, Volume 113, PP: 207–218, <https://doi.org/10.14359/51688640>.
38. A.T. Noaman, B.H. Abu Bakar, H.M. Akil (2016). Experimental investigation on compression toughness of rubberized steel fibre concrete. *Constr. Build. Mater.*, Volume 115, PP: 163–170, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.022>.
39. M.K. Ismail, A.A.A. Hassan (2017). an experimental study on flexural behaviour of large-scale concrete beams incorporating crumb rubber and steel fibres. *Eng. Struct.*, Volume 145, PP: 97–108, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.05.018>.
40. L. Zheng, X.S. Huo, Y. Yuan (2008). Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete. *Constr. Build. Mater.*, Volume 22, PP: 939–947, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.005>.
41. A.T. Noaman, B.H.A. Bakar, H.M. Akil (2015). The effect of combination between crumb rubber and steel fiber on impact energy of concrete beams. *Procedia Eng.*, Volume 125, PP: 825–831, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.148>.
42. M.M. Al-Tayeb, B.H. Abu Bakar, H.M. Akil, H. Ismail (2013). Performance of rubberized and hybrid rubberized concrete structures under static and impact load conditions. *Exp. Mech.*, Volume 53, PP: 377–384, <https://doi.org/10.1007/s11340-012-9651-z>.
43. A. Siddika, M.A. Al Mamun, R. Alyousef, Y.H.M. Amran, F. Aslani, H. Alabduljabbar (2019). Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: a review. *Constr. Build. Mater.*, Volume 224, PP: 711–731, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108>.

44. M.M. Al-Tayeb, B.H.A. Bakar, H. Ismail, H.M. Akil (2012). Impact resistance of concrete with partial replacements of sand and cement by waste rubber. Polym. – Plast, Technol. Eng, Volume 51, PP: 1230–1236, <https://doi.org/10.1080/03602559.2012.696767>.
45. Saeid Hesami, Iman Salehi Hikouei, Seyed Amir Ali Emadi (2016). Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber. Journal of Cleaner Production, Volume 133, Pages 228-234, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.079>.
46. Blessen Skariah Thomas, Sanjeev Kumar, Priyansha Mehra, Ramesh Chandra Gupta, Miqu el Joseph, Laszlo J. Csetenyi (2016). Abrasion resistance of sustainable green concrete containing waste tire rubber particles. Construction and Building Materials, Volume 124, Pages 906-909, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.110>.
۴۷. نعمت زاده، مهدی، و ذبیحی، رضا. (۱۳۹۹). بهینه سازی مقاومت فشاری بتن حاوی لاستیک تایر بازیافتی همراه با الیاف فولادی در معرض دماهای بالا. مهندسی عمران (فنی و مهندسی مدرس)، ۲۰ (۳)، ۱۷۵-۱۸۸. SID. <https://sid.ir/paper/1036986/fa>
48. R.J. Kettle and M. Sadegzadeh, "Recent Research Developments in Abrasion Resistance Concrete", pp. 29-31(1986).
49. M.K. Ismail A.A. Hassan (2016). Impact resistance and mechanical properties of self-consolidating rubberized concrete reinforced with steel fibers. J. Mater, Civ. Eng, Volume 29, Issue 1, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001731](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001731).
50. Rajat Saxena, Salman Siddique, Trilok Gupta, Ravi K. Sharma, Sandeep Chaudhary (2018). Impact resistance and energy absorption capacity of concrete containing plastic waste. science direct, Construction and Building Materials, Volume 176, PP: 415-421, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.019>.
51. Shengtian Zhai, Guojian Liu, Bo Pang, Cheng Liu, Zhuoyang Zhang, Lihua Zhang, Laibao Liu, Yonggan Yang, Zhiyong Liu, Yunsheng Zhang (2022). Investigation on the influence of modified waste rubber powder on the abrasion resistance of concrete. Construction and Building Materials, Volume 357, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129409>.