



بهینه‌سازی آزمایشگاهی و بررسی زیست محیطی بتن لاستیکی استفاده همزمان خرده لاستیک و الیاف لاستیک

پیمان کرد رستمی^۱، بابک امین نژاد^{۲*}، علیرضا لُرک^۳، مهدی دهستانی^۴

۱- گروه مهندسی عمران، واحد بین المللی کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، جزیره کیش، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

۳- گروه مهندسی عمران، واحد صفا دشت، دانشگاه آزاد اسلامی، صفا دشت، ایران

۴- گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۳

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۷/۰۵

کلمات کلیدی:

مقاومت فشاری

اسلامپ

خرده لاستیک

الیاف لاستیک

بتن لاستیک

خلاصه: سالانه هزاران تن تایر لاستیکی در داخل کشور تولید، مصرف و فرسوده می‌شوند. محققین در دهه اخیر بررسی‌های متعددی برای استفاده از الیاف لاستیک یا خرده لاستیک در بتن و تأثیرات آن بر روی مشخصات مکانیکی آن انجام داده‌اند، ولی استفاده همزمان این دو ماده به جای شن و ماسه در بتن مورد بررسی قرار نگرفته است. در این پژوهش تأثیرات استفاده همزمان این دو ماده بر روی مشخصات مکانیکی بتن لاستیکی و بررسی زیست محیطی تأثیر لاستیک در بتن انجام شده است. با بررسی نتایج آزمایش اسلامپ نمونه‌های بتن لاستیکی در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵ با افزایش خرده‌لاستیک و الیاف لاستیک تا ۲۵٪، مشخص شد از ۳۱ تا ۸۲ میلی‌متر روندی کاهشی دارد. نتایج تست‌ها حاکی از کاهش مقاومت فشاری با افزایش محتوای لاستیک است؛ به طوری که با جایگزینی حدود ۱۳٪ ترکیب خرده‌لاستیک و الیاف لاستیک، مقاومت فشاری بتن لاستیکی نسبت به نمونه شاهد حدود ۵۰٪ کاهش یافته است. در نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ با افزایش خرده لاستیک و الیاف لاستیک از ۴ تا ۲۵٪، مقدار مقاومت فشاری از ۱۵/۷۸ به ۳/۱۹ مگاپاسکال کاهش می‌یابد. با نسبت‌های آب به سیمان و درصد‌های مختلف بتن لاستیکی با نرم‌افزار سیمپرو، طبق نتایج بدست آمده، ترکیب خرده‌لاستیک و الیاف لاستیک باعث کاهش حدود ۴۰ درصدی تولید گاز کربن‌دی‌اکسید در محیط زیست شده است. بهینه‌ترین حالت در تمامی نسبت‌ها با افزودن ۴٪ خرده لاستیک و الیاف لاستیک حاصل می‌شود.

فرسوده به عنوان سنگدانه در بتن، یعنی بتن لاستیکی (RuC)^۱ مورد استفاده قرار گرفته‌اند و این ماده نسبتاً جدید ویژگی‌های متمایزی نظیر جذب انرژی و انعطاف‌پذیری بالا از خود نشان داده است. ترکیب خرده لاستیک و الیاف لاستیک در مخلوط‌های بتن دو مزیت اصلی دارد: (۱) کاهش میزان زباله‌های دفن زباله انباشته شده سالانه و (۲) جایگزینی مقدار سنگدانه‌های طبیعی مصرف شده در فرآیند تولید بتن سنتی با مواد بازیافتی. به طور خاص، شن و ماسه و سنگدانه‌های طبیعی که از سنگ‌ها منشأ می‌گیرند، میلیون‌ها سال طول می‌کشد تا تشکیل شوند و این امر ترکیب لاستیک فرسوده در بتن را به گزینه‌ای پایدار تبدیل می‌کند. طبق تخمین جهانی، سالانه حدود یک میلیارد لاستیک فرسوده می‌شود [۱]. از این تعداد، بیش از ۵۰٪ بازیافت شده و بقیه به محل دفن زباله منتقل می‌شوند [۲].

بسیاری از سازه‌های مهم بارهای دینامیکی را در طول عمر خود تجربه کنند، به عنوان مثال، ساختمان‌های بلند، باند فرودگاه، موانع کنار جاده‌ها و

۱- مقدمه

با جهانی‌شدن روزافزون و رشد بخش تولید خودرو در چند دهه گذشته، دفع تایرهای فرسوده خودروها در محوطه‌های دفن زباله ایجاد مشکلات زیست محیطی متعددی به دنبال داشته است. این تایرها از لاستیک تولید می‌شوند که تجزیه آن قرن‌ها طول می‌کشد. متعاقباً اثرات زیست‌محیطی نامطلوب آن نظیر تجمع پشه‌ها، انتشار مواد شیمیایی سمی و خطرات آتش‌سوزی به دنبال دارد که مردم مناطق اطراف را در معرض خطر قرار می‌دهد. سازمان‌های دولتی، سهامداران خصوصی و جامعه علمی با درک این موضوع به دنبال راه حلی علمی برای رفع این مشکل هستند. یکی از موادی که به عنوان بازیافت مورد استفاده قرار می‌گیرد، لاستیک‌های فرسوده هستند. بازیافت یا استفاده مجدد از این لاستیک‌های مستعمل به حل مسائل زیست محیطی مربوطه کمک می‌کند. اخیراً تایرهای ماشین



روسازی‌های آسفالتی که باید به گونه‌ای طراحی شوند که در برابر ضربه، انفجار و بارهای لرزه‌ای مقاوم باشند. محققان مختلف به بررسی تأثیر ترکیب نسبت‌های مختلف مصالح طبیعی به بازیافت شده پرداخته‌اند.

بتن یکی از پرکاربردترین مواد ساختمانی است که در جاده‌ها، ساختمان‌ها، پل‌ها و سایر زیرساخت‌ها استفاده می‌شود [۳]. سالانه ۵۰٪ منابع جهان در صنعت ساخت‌وساز مصرف می‌شود [۴]. روزانه به طور متوسط ۶۸/۱ کیلوگرم زباله ساخت‌وساز و تخریب به ازای هر فرد تولید می‌شود که می‌تواند به عنوان مصالح ساختمانی ثانویه مورد استفاده قرار گیرد [۵]. منابع طبیعی و اکوسیستم‌ها با توجه به مصرف بالای منابع طبیعی و تولید زباله‌های ساخت و ساز و تخریب، محیط زیست در معرض خطر بالایی قرار گرفته‌اند [۶]. به همین دلیل، دولت‌ها و سازمان‌های مختلف با هدف افزایش بهره‌وری منابع و ایجاد اقتصاد پایدار، دست به اقداماتی زده‌اند. به دلیل این استفاده گسترده جهانی از منابع در سراسر جهان، ارزیابی اثرات زیست محیطی امری ضروری است. اثرات زیست محیطی یک ماده اغلب با تأثیر آن بر انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHGs) و تغییر آب و هوا معادل‌سازی می‌شود. با توجه به این موضوع، مفاهیم زیادی از اصطلاح بتن «سبز» در طول سال‌ها توسعه یافته است. اغلب این مفاهیم بر جایگزینی جزئی سیمان تمرکز دارند [۷]. ارزیابی پایدار می‌تواند پیشنهاد‌های ارزشمندی را برای توسعه فناوری سازگار با محیط زیست و کاربرد اقتصادی ارائه دهد.

هدف و نوآوری تحقیق حاضر، استفاده همزمان خرده لاستیک و الیاف لاستیک در طرح مخلوط بتن و تعیین میزان اثرگذاری آن بر روی مقاومت فشاری و اسلامپ و نحوه شکست و پیدا کردن درصد بهینه استفاده همزمان آن و همچنین تجزیه و تحلیل چرخه عمر آن با استفاده از نرم‌افزار سیمپرو انجام شده است. با توجه به اینکه در تحقیقات پیشین، مطالعه و بررسی خصوصیات رفتاری بتن شامل خرده‌لاستیک و الیاف لاستیک انجام نشده است، در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی افزودن خرده‌لاستیک و الیاف لاستیک به عنوان جایگزین درصدی از درشت‌دانه و ریزدانه پرداخته شده است. در این راستا به منظور انجام فرایند آزمایشگاهی، از درصد‌های مختلف شامل ۰ تا ۸/۵٪ خرده لاستیک و ۰ تا ۱۶/۵٪ الیاف لاستیک برای نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵ استفاده شده است. همچنین برای هر نسبت آب به سیمان، نمونه شاهد به عنوان بتن بدون لاستیک در نظر گرفته شده است. پس از تهیه طرح مخلوط بر اساس نشریه ACI با توجه به درصد‌های مختلف خرده و الیاف، آزمایش مقاومت فشاری و اسلامپ بر روی

نمونه‌ها انجام می‌شود. در گام آخر با توجه به نتایج آزمایشات به تحلیل و تفسیر مقاومت فشاری و اسلامپ بر روی نمونه‌ها پرداخته خواهد شد.

۲- پیشینه پژوهش

بررسی مختصری در مورد مطالعات قبلی و درک تأثیر استفاده از لاستیک در بتن به عنوان سنگدانه بر خواص فیزیکی و مکانیکی بتن انجام شد. خواص فیزیکی بتن لاستیکی از نظر سه عامل شامل اسلامپ، فضای خالی هوا و چگالی بررسی می‌شود. در مطالعات قبلی مشاهده شد که افزودن خرده‌های لاستیکی به بتن تازه، تأثیر منفی بر مقادیر اسلامپ دارد. با این حال، هوانگ و همکاران دریافتند که افزودن لاستیک به مخلوط بتن مقادیر اسلامپ را افزایش می‌دهد [۸] در حالی که در پژوهش لی و همکاران مشاهده شد که اثر نامطلوب افزودن لاستیک به اسلامپ با محتوای لاستیک حداقل ۱۵ درصد است [۹]. یافته‌های متناقض اثر سنگدانه‌های لاستیکی بر اسلامپ در مطالعه قبلی توسط سو مورد بحث قرار گرفت [۱۰]. به طور کلی، اکثر مطالعات قبلی کاهش اسلامپ را هنگام افزودن سنگدانه‌های لاستیکی به بتن نشان دادند. این کاهش مقادیر اسلامپ به افزایش اصطکاک ناشی از سطح ناصاف خرده‌های لاستیکی نسبت به سطوح صاف تر مصالح طبیعی نسبت داده می‌شود که منجر به حرکت آهسته مخلوط می‌شود. علاوه بر این، جذب آب لاستیک بیشتر از سنگدانه‌های طبیعی است و در نتیجه آب کمتری برای مخلوط و اسلامپ کمتر است. در همین حال، چگالی ویژه لاستیک بسیار سبک تر از سنگدانه‌های طبیعی است، که منجر به دشوارتر شدن جریان بر روی وزن خود و در نتیجه اسلامپ کمتر می‌شود.

مطالعات قبلی نشان داده‌اند که همبستگی مستقیم بین افزودن خرده‌های لاستیک و محتوای هوای حاصل در بتن لاستیکی وجود دارد [۱۱]. افزودن سنگدانه‌های لاستیکی به مخلوط منجر به محتوای هوای بالاتر در بتن می‌شود. افزایش محتوای هوا ممکن است به دلیل شکل و بافت خرده‌های لاستیکی، علاوه بر احتمال محبوس شدن هوا در اطراف یک سطح دندانه دار باشد [۱۲]. این پدیده از طریق غوطه ور شدن خرده‌های لاستیکی در آب مشاهده شد که منجر به ایجاد حباب‌های هوا در سطح خرده‌ها شد [۱۳]. این آزمایش ساده و در عین حال مؤثر، دشواری فرورفتن خرده‌ها را نشان داد و خواص آبریزی لاستیک را برجسته کرد. خاصیت آبریزی به این معنی است که خیس شدن لاستیک در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی دشوارتر است و بنابراین لاستیک نسبت به سنگدانه‌های طبیعی استحکام پیوند کمتری با زمینه بتن دارد. به طور کلی می‌توان بیان کرد که افزایش حجم



شکل ۱. (الف) الیاف لاستیک؛ (ب) خرده لاستیک

Fig. 1. (a) Rubber fibers, (b) Rubber powder

بتن لاستیکی با سنگدانه‌های لاستیکی بزرگتر دارد [۱۴]. در پژوهش سنین^۱ خواص مکانیکی، دوام و میرایی بتن خاکستر لاستیکی و بتن خرده لاستیکی با بتن شاهد مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که خاکستر لاستیک و خرده لاستیک برای جایگزینی جزئی ماسه در مخلوط بتن مناسب هستند. خواص مکانیکی، دوام و میرایی تا ۱۵٪ بهبود یافته‌اند [۲۳].

نجیم و همکارانش با جایگزینی لاستیک اظهار نمودند که افزایش درصد جایگزینی لاستیک بازیافتی و اندازه ذرات لاستیک باعث کاهش مقاومت فشاری می‌گردد. این امر می‌تواند به دلیل ناحیه انتقال سطحی ضعیف‌تر بین دانه‌های ذرات لاستیک و خمیر سیمان باشد [۲۴]. لیو و همکاران در بررسی‌های خود با افزودن خرده لاستیک افزایش دوام بتن را مشاهده کردند [۲۵]. جعفری و همکاران در بررسی‌هایی که با اضافه کردن خرده لاستیک انجام دادند تأثیری مثبت در مقاومت الکتریکی بتن گزارش دادند [۲۶]. قیزداوت و همکاران دریافتند که جذب صدا با اضافه کردن لاستیک به بتن افزایش پیدا می‌کند [۲۷]. مدینا و همکاران تأثیر مطلوب افزودن لاستیک در مقاومت حرارتی بتن را مشاهده کردند [۲۸].

۳- مصالح و نسبت مخلوط‌های بتن

۳-۱- مشخصه طرح اختلاط

در پژوهش حاضر از آب شرب استان مازندران جهت استفاده در بتن و شست شوی سنگدانه‌های درشت و ریز طبیعی استفاده شد. از سیمان تیپ ۲ با چگالی ظاهری ۳۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شده است. سنگدانه‌های درشت دانه و ریز دانه از معادن خطیر کوه استخراج شده است.

لاستیک باعث افزایش متعاقب حفره‌های هوا در یک مخلوط می‌شود [۱۴]. در بتن، چگالی سنگدانه‌های طبیعی می‌تواند ۲/۵ برابر خرده‌های لاستیکی باشد. در نتیجه، چگالی سازه‌های بتنی زمانی که خرده‌های لاستیکی برای جایگزینی بخشی از سنگدانه‌های طبیعی استفاده می‌شوند، کاهش می‌یابد [۱۵]. اکثر مطالعات قبلی به این نتیجه رسیده‌اند که چگالی بتن به صورت خطی با افزایش محتوای لاستیک کاهش می‌یابد [۱۶-۱۹]. از سوی دیگر، بنازوک و همکارانش گزارش داد که رابطه بین چگالی بتن و محتوای لاستیک به دلیل افزایش حباب هوای مرتبط با محتوای لاستیک غیرخطی است که باعث سبک شدن بیشتر بتن لاستیکی می‌شود [۲۰].

از لاستیک‌های فرسوده در فرایندهای بازپخت، تولید محصولات لاستیکی، پیرولیز لاستیک برای تولید کربن سیاه و گاز به عنوان سوخت جایگزین در کوره‌های سیمان و کاربردهای ژئوتکنیکی مانند پرکردن زیرسطحی در جاده‌ها و خاکریزها استفاده می‌شود [۹]. علاوه بر این می‌توان از لاستیک‌های ضایعاتی به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه در بتن بهره برد. در این راستا تحقیقات متعددی انجام گرفته است. بعنوان مثال صوفی در پژوهش خود با افزودن درصدهای مختلف خرده لاستیک به بتن از ۵/۲ تا ۲۰٪، کاهش ۱۰ تا ۲۳ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه را مشاهده نمود [۲۱]. یانگ و همکارانش با افزودن ۰.۵٪ پودر لاستیک ضایعاتی عبوری از الک ۵۰، بهترین عملکرد در بتن لاستیکی را نشان دادند [۲۲]. فام و همکارانش در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که بتن لاستیکی با سنگدانه‌های لاستیکی کوچکتر مقاومت فشاری استاتیکی بالاتری نسبت به

جدول ۱. مشخصات نمونه آزمایشگاهی نسبت آب به سیمان

Table 1. Laboratory Test Sample Specifications: Water-to-Cement Ratio

| ردیف | نمونه | مشخصات نمونه |
|------|---|---|
| ۱ | COW ₁ | نمونه شاهد بتن، سنگدانه خرده لاستیک و الیاف لاستیک، نسبت آب به سیمان ۰/۵ |
| ۲ | CRP _{1.5} F _{2.5} W ₁ | نمونه دارای سنگدانه خرده لاستیک ۱/۵٪ و الیاف لاستیک ۲/۵٪، نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ |
| ۳ | CRP _{2.5} F _{4.5} W ₁ | نمونه دارای سنگدانه خرده لاستیک ۲/۵٪ و الیاف لاستیک ۴/۵٪، نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ |
| ۴ | CRP _{3.5} F _{6.5} W ₂ | نمونه دارای سنگدانه خرده لاستیک ۳/۵٪ و الیاف لاستیک ۶/۵٪، نسبت آب به سیمان ۰/۵ |
| ۵ | CRP _{4.5} F _{8.5} W ₂ | نمونه دارای سنگدانه خرده لاستیک ۴/۵٪ و الیاف لاستیک ۸/۵٪، نسبت آب به سیمان ۰/۵ |
| ۶ | CRP _{5.5} F _{10.5} W ₃ | نمونه دارای سنگدانه خرده لاستیک ۵/۵٪ و الیاف لاستیک ۱۰/۵٪، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ |
| ۷ | CRP _{6.5} F _{12.5} W ₃ | نمونه دارای سنگدانه خرده لاستیک ۶/۵٪ و الیاف لاستیک ۱۲/۵٪، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ |
| ۸ | CRP _{7.5} F _{14.5} W ₁ | نمونه دارای سنگدانه خرده لاستیک ۷/۵٪ و الیاف لاستیک ۱۴/۵٪، نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ |
| ۹ | CRP _{8.5} F _{16.5} W ₁ | نمونه دارای سنگدانه خرده لاستیک ۸/۵٪ و الیاف لاستیک ۱۶/۵٪، درصد نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ |



شکل ۲. نمونه اسلامپ بتن لاستیکی

Fig. 2. Example of rubber concrete slump

۳-۲- نامگذاری نمونه‌ها و تهیه طرح‌های اختلاط بتن لاستیکی در این پژوهش با توجه به محدودیت‌های تعیین شده، در مجموع ۲۷ نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. درصد خرده لاستیک و درصد الیاف لاستیک و نسبت آب به سیمان در جدول ۱ ارائه شده است. نمونه‌ها با CO (بتن شاهد)، W (نسبت آب به سیمان)، CR (بتن لاستیکی)، P (خرده لاستیک)، F (الیاف لاستیک) نامگذاری شده‌اند. برای طرح مخلوط بتن از استاندارد ACI استفاده شده است. طرح مخلوط برای یک متر مکعب بتن جهت تهیه نمونه‌های مختلف مطابق جداول ۲ تا ۴ استفاده شده و مقاومت معیار ۵۰ مگاپاسکال ۲۸ روزه مد

چگالی ظاهری شن و ماسه به ترتیب ۲۶۵۰ و ۲۷۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد و بزرگترین سایز درشت دانه ۱۹ میلی‌متر بوده و بر اساس استاندارد ASTM C125 بدست آمده است. با استفاده از آزمایش ارزش ماسه‌ای، میزان ریزدانه‌های مجاز در ماسه تعیین گردید و مطابق آیین نامه، ارزش ماسه‌ای ۷۵٪ حداقل مقدار قابل پذیرش برای ماسه جهت استفاده در بتن می‌باشد. در شکل ۱ (الف) و ۱ (ب) الیاف لاستیک و خرده لاستیک استفاده شده نمایش داده شده است. قطرالیاف لاستیک ۵-۲ میلی‌متر، عرض آن حداکثر ۲۰ میلی‌متر و در خرده لاستیک اندازه ذرات کمتر از ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۲. اجزا بتن برای ساخت یک متر مکعب بتن تازه W/C نسبت آب به سیمان (kg/m³) /۰.۵۵

Table 2. Concrete components for making one cubic meter of fresh concrete W/C ratio of water to cement 0.55(kg/m³)

| ردیف | مقدار خرده لاستیک | مقدار الیاف لاستیک | سیمان | ریز دانه (ماسه) | درشت دانه (شن) | آب |
|---|-------------------|--------------------|-------|-----------------|----------------|-----|
| COW ₁ | . | . | ۴۰۰ | ۸۹۴ | ۸۶۶ | ۲۲۰ |
| CRP _{1.5} F _{2.5} W ₁ | ۱۳/۴۱ | ۲۲/۳۵ | ۴۰۰ | ۸۷۶/۱۲ | ۸۴۸/۱۲ | ۲۲۰ |
| CRP _{2.5} F _{4.5} W ₁ | ۲۲/۳۵ | ۴۰/۲۳ | ۴۰۰ | ۸۶۲/۷۱ | ۸۳۴/۷۱ | ۲۲۰ |
| CRP _{3.5} F _{6.5} W ₁ | ۳۱/۲۹ | ۵۸/۱۱ | ۴۰۰ | ۸۴۹/۳ | ۸۲۱/۳ | ۲۲۰ |
| CRP _{4.5} F _{8.5} W ₁ | ۴۰/۲۳ | ۷۵/۹۹ | ۴۰۰ | ۸۳۵/۹ | ۸۰۷/۸۹ | ۲۲۰ |
| CRP _{5.5} F _{10.5} W ₁ | ۴۹/۱۷ | ۹۳/۸۷ | ۴۰۰ | ۸۲۲/۴۸ | ۷۹۴/۴۸ | ۲۲۰ |
| CRP _{6.5} F _{12.5} W ₁ | ۵۸/۱۱ | ۱۱۱/۷۵ | ۴۰۰ | ۸۰۹/۰۷ | ۷۸۱/۰۷ | ۲۲۰ |
| CRP _{7.5} F _{14.5} W ₁ | ۶۷/۰۵ | ۱۲۹/۶۳ | ۴۰۰ | ۷۹۵/۶۶ | ۷۶۷/۶۶ | ۲۲۰ |
| CRP _{8.5} F _{16.5} W ₁ | ۷۵/۹۹ | ۱۴۷/۵۱ | ۴۰۰ | ۷۸۲/۲۵ | ۷۵۴/۲۵ | ۲۲۰ |

جدول ۳. اجزاء بتن برای ساخت یک متر مکعب بتن تازه W/C نسبت آب به سیمان (kg/m³) /۰.۵

Table 3. Concrete components for making one cubic meter of fresh concrete W/C ratio of water to cement 0.5(kg/m³)

| ردیف | مقدار خرده لاستیک | مقدار الیاف لاستیک | سیمان | ریز دانه (ماسه) | درشت دانه (شن) | آب |
|---|-------------------|--------------------|-------|-----------------|----------------|-----|
| COW ₂ | . | . | ۴۰۰ | ۹۰۸ | ۸۷۲ | ۲۰۰ |
| CRP _{1.5} F _{2.5} W ₂ | ۱۳/۶۲ | ۲۲/۷ | ۴۰۰ | ۸۸۹/۸۴ | ۸۵۳/۸۴ | ۲۰۰ |
| CRP _{2.5} F _{4.5} W ₂ | ۲۲/۷ | ۴۰/۸۶ | ۴۰۰ | ۸۷۶/۲۲ | ۸۴۰/۲۲ | ۲۰۰ |
| CRP _{3.5} F _{6.5} W ₂ | ۳۱/۷۸ | ۵۹/۰۲ | ۴۰۰ | ۸۶۲/۶ | ۸۲۶/۶ | ۲۰۰ |
| CRP _{4.5} F _{8.5} W ₂ | ۴۰/۸۶ | ۷۷/۱۸ | ۴۰۰ | ۸۴۸/۹۸ | ۸۱۲/۹۸ | ۲۰۰ |
| CRP _{5.5} F _{10.5} W ₂ | ۴۹/۹۴ | ۹۵/۳۴ | ۴۰۰ | ۸۳۵/۳۶ | ۷۹۹/۳۶ | ۲۰۰ |
| CRP _{6.5} F _{12.5} W ₂ | ۵۹/۰۲ | ۱۱۳/۵ | ۴۰۰ | ۸۲۱/۷۴ | ۷۸۵/۷۴ | ۲۰۰ |
| CRP _{7.5} F _{14.5} W ₂ | ۶۸/۱ | ۱۳۱/۶۶ | ۴۰۰ | ۸۰۸/۱۲ | ۷۷۲/۱۲ | ۲۰۰ |
| CRP _{8.5} F _{16.5} W ₂ | ۷۷/۱۸ | ۱۴۹/۸۲ | ۴۰۰ | ۷۹۴/۵ | ۷۵۸/۵ | ۲۰۰ |

جدول ۴. اجزا بتن برای ساخت یک متر مکعب بتن تازه W/C نسبت آب به سیمان (kg/m³) ۰/۴۵

Table 4. Concrete components for making one cubic meter of fresh concrete W/C ratio of water to cement 0.45(kg/m³)

| ردیف | مقدار خرده لاستیک | مقدار الیاف لاستیک | سیمان | ریز دانه (ماسه) | درشت دانه (شن) | آب |
|---|-------------------|--------------------|-------|-----------------|----------------|-----|
| COW ₃ | . | . | ۴۰۰ | ۹۱۸ | ۸۸۲ | ۱۸۰ |
| CRP _{1.5} F _{2.5} W ₃ | ۱۳/۷۷ | ۲۲/۹۵ | ۴۰۰ | ۸۹۹/۶۴ | ۸۶۳/۶۴ | ۱۸۰ |
| CRP _{2.5} F _{4.5} W ₃ | ۲۲/۹۵ | ۴۱/۳۱ | ۴۰۰ | ۸۸۵/۸۷ | ۸۴۹/۸۷ | ۱۸۰ |
| CRP _{3.5} F _{6.5} W ₃ | ۳۲/۱۳ | ۵۹/۶۷ | ۴۰۰ | ۸۷۲/۱ | ۸۳۶/۱ | ۱۸۰ |
| CRP _{4.5} F _{8.5} W ₃ | ۴۱/۳۱ | ۷۸/۰۳ | ۴۰۰ | ۸۵۳/۳۳ | ۸۲۲/۳۳ | ۱۸۰ |
| CRP _{5.5} F _{10.5} W ₃ | ۵۰/۴۹ | ۹۶/۳۹ | ۴۰۰ | ۸۴۴/۵۶ | ۸۰۸/۵۶ | ۱۸۰ |
| CRP _{6.5} F _{12.5} W ₃ | ۵۹/۶۷ | ۱۱۴/۷۵ | ۴۰۰ | ۸۳۰/۸ | ۷۹۴/۹۹ | ۱۸۰ |
| CRP _{7.5} F _{14.5} W ₃ | ۶۸/۸۵ | ۱۴۳/۱۱ | ۴۰۰ | ۸۱۷/۰۲ | ۷۸۱/۰۲ | ۱۸۰ |
| CRP _{8.5} F _{16.5} W ₃ | ۷۸/۰۳ | ۱۵۱/۴۷ | ۴۰۰ | ۸۰۳/۲۵ | ۷۶۷/۲۵ | ۱۸۰ |

۳-۴- آزمایش بارگذاری

برای انجام تست تنش- کرنش از دستگاه یونیورسال استفاده شد و تغییر شکل نمونه‌ها توسط ترانسفورمر تفاضلی متغیر خطی ضبط و سپس مورد بررسی قرار گرفتند. نحوه محاسبه مدول الاستیسیته عموماً چند نوع می‌باشد. مدول الاستیسیته بتن به صورت شیب منحنی تنش-کرنش که از آزمایش بارگذاری تک محوره نمونه استوانه‌ای استاندارد به دست می‌آید.

$$\text{مدول یانگ} = (F / A) / (\Delta L / L)$$

که F برابر نیرو، A برابر سطح مقطع، L طول اولیه و ΔL تغییرات طول می‌باشد. همچنین استاندارد ASTM C469 نیز نحوه محاسبه مدول الاستیسیته را بر اساس آزمایش تنش کرنش و فرمول کلی برای محاسبه این مدول توضیح می‌دهد که به صورت زیر است:

$$E = (S_2 - S_1) / (\epsilon_2 - 0.000050)$$

E مدول الاستیسیته، S_1 تنش‌ی که در کرنش ۰/۰۰۰۰۵، اتفاق افتاده ۴۰٪ نیروی نهایی و ϵ_2 کرنش مطابق S_2 است مدول الاستیسیته بتن به نوعی بیانگر سختی بتن می‌باشد. بسته به نوع بتن، سن بتن، سرعت بارگذاری، خصوصیات و درصد اجزای بتن روش تعریف‌های متفاوتی از مدول الاستیسیته ارائه می‌گردد. در صورتیکه مدول الاستیسیته بتن بر اساس شیب خط مماس بر منحنی تنش-کرنش باشد. به نام مدول الاستیسیته مماسی

نظر بود. همچنین نسبت وزنی آب به سیمان به ترتیب ۰/۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵ می‌باشد. پس از تهیه طرح مخلوط مطابق جداول ۲ تا ۴ برای نسبت‌های آب به سیمان‌های مختلف مخلوط‌های بتنی مطابق طرح موردنظر ساخته و از هر نمونه اسلامپ گرفته شد. بتن در قالب‌ها و پس از ۲۴ ساعت، در حوضچه جهت عمل‌آوری قرار گرفتند. پس از گذشت ۲۸ روز از فرآیند عمل‌آوری، نمونه‌های بتنی مورد تست آزمایش‌های مقاومت فشاری قرار گرفتند.

۳-۳- دانه‌بندی

ابعاد ذرات لاستیک استفاده شده در این پژوهش به دو دسته خرده لاستیک به سایز بزرگترین دانه ۱۵۰ میکرون و الیاف لاستیک به سایز بزرگترین دانه ۴/۷۵ میلی‌متر می‌باشند. در تحقیقات پیشین، هیچگاه بررسی همزمان استفاده از خرده لاستیک و الیاف لاستیک صورت نگرفته است. تأثیر اندازه لاستیک ریز و سطح جایگزینی بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن لاستیکی در بررسی‌های پیشین به صورت زیر می‌باشد.

در جدول ۵ سایز دانه‌بندی‌های لاستیک بر اساس مطالعات پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده است.

جدول ۵. سایز دانه‌بندی‌های لاستیک بر اساس مطالعات پژوهش‌های پیشین

Table 5. Rubber granulation sizes based on previous research studies

| ردیف | مقدار خرده لاستیک | مقدار الیاف لاستیک | سیمان | ریز دانه (ماسه) | درشت دانه (شن) | آب |
|---------------------------|-------------------|--------------------|-------|-----------------|----------------|-----|
| COW ₃ | . | . | ۴۰۰ | ۹۱۸ | ۸۸۲ | ۱۸۰ |
| CRP _{1.5F2.5W3} | ۱۳/۷۷ | ۲۲/۹۵ | ۴۰۰ | ۸۹۹/۶۴ | ۸۶۳/۶۴ | ۱۸۰ |
| CRP _{2.5F4.5W3} | ۲۲/۹۵ | ۴۱/۳۱ | ۴۰۰ | ۸۸۵/۸۷ | ۸۴۹/۸۷ | ۱۸۰ |
| CRP _{3.5F6.5W3} | ۳۲/۱۳ | ۵۹/۶۷ | ۴۰۰ | ۸۷۲/۱۱ | ۸۳۶/۱۱ | ۱۸۰ |
| CRP _{4.5F8.5W3} | ۴۱/۳۱ | ۷۸/۰۳ | ۴۰۰ | ۸۵۳/۳۳ | ۸۲۲/۳۳ | ۱۸۰ |
| CRP _{5.5F10.5W3} | ۵۰/۴۹ | ۹۶/۳۹ | ۴۰۰ | ۸۴۴/۵۶ | ۸۰۸/۵۶ | ۱۸۰ |
| CRP _{6.5F12.5W3} | ۵۹/۶۷ | ۱۱۴/۷۵ | ۴۰۰ | ۸۳۰/۸ | ۷۹۴/۹۹ | ۱۸۰ |
| CRP _{7.5F14.5W3} | ۶۸/۸۵ | ۱۴۳/۱۱ | ۴۰۰ | ۸۱۷/۰۲ | ۷۸۱/۰۲ | ۱۸۰ |
| CRP _{8.5F16.5W3} | ۷۸/۰۳ | ۱۵۱/۴۷ | ۴۰۰ | ۸۰۳/۲۵ | ۷۶۷/۲۵ | ۱۸۰ |

شناخته می‌شود و اگر بر اساس شیب خطی که هر نقطه از منحنی تنش- کرنش را به مبدا وصل می‌کند باشد، به نام مدول الاستیسیته سکانت شناخته می‌شود.

۴- آنالیزهای انجام شده

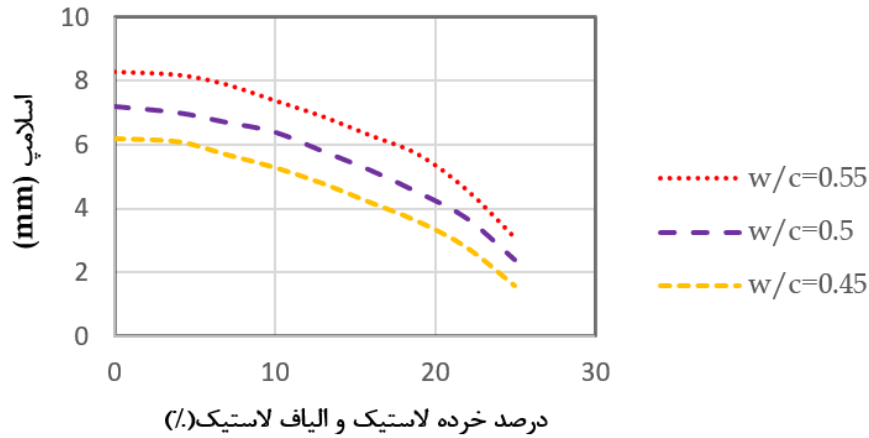
۴-۱- اسلامپ

آزمایش اسلامپ بر اساس نشریه ACI 211 انجام شد. شکل ۳ نتایج آزمایش اسلامپ را نشان می‌دهد. تغییرات اسلامپ برحسب درصد خرده‌لاستیک و الیاف لاستیک به صورت سهمی می‌باشد. در ابتدا شیب کاهشی نمودار اسلامپ ناچیز بوده و در ادامه با افزایش میزان خرده‌لاستیک و الیاف لاستیک، حساسیت اسلامپ نیز افزایش می‌یابد. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود در تمامی نسبت‌های آب به سیمان تا ۰.۴٪ جایگزینی خرده‌لاستیک و الیاف لاستیک افت اسلامپ ناچیز است. درصد تغییرات اسلامپ در ۰.۴٪ جایگزینی در تمامی نسبت‌های آب به سیمان در حدود ۰.۲/۵٪ می‌باشد. در ۰.۲۵٪ جایگزینی خرده‌لاستیک و الیاف لاستیک در نسبت آب به سیمان ۰.۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵٪ افت اسلامپ به ترتیب برابر ۶۳، ۶۷ و ۷۵٪ می‌باشد. این افت به دلیل وجود لاستیک بیش از حد و جذب آب توسط لاستیک در بتن می‌باشد.

۴-۲- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ACI 211 انجام شده است. آزمایش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر انجام شده است. نمونه‌ها طبق شرایط استاندارد تهیه و سپس در شرایط آزمایشگاهی در حوضچه عمل آوری به مدت ۲۸ روز نگهداری شدند. پس از ۲۸ روز نمونه‌ها تحت اثر نیروی فشاری به وسیله جک‌های مخصوص شکسته شدند. شکل‌های زیر (۴ الی ۹) نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۰/۴۵ و ۰/۵ و ۰/۵۵ را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده در نسبت‌های آب به سیمان، با افزایش مقدار لاستیک، به دلیل افزایش حفره‌های هوا و ترک‌ها در اطراف مواد لاستیکی، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.

مدول الاستیسیته بتن لاستیکی با افزایش خرده‌لاستیک و الیاف لاستیک کاهش می‌یابد. مدول الاستیسیته در نمونه شاهد در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ برابر ۱۱۵۷۶۶ MPa بوده و مدول الاستیسیته بتن لاستیکی ۶۶۱۵۲ MPa می‌باشد. علت آن می‌تواند دلیلی غیر از فشارهای ناشی از انقباض باشد فعالیت حرارتی می‌تواند باعث ایجاد تنش بسیار کم شود و خواص سنگدانه درشت مانند مدول الاستیک سنگدانه، نوع سنگدانه و مقدار سنگدانه نیز تأثیرگذار است. افزایش حجم سنگدانه در مخلوط باعث افزایش مدول الاستیسیته بتن می‌شود.



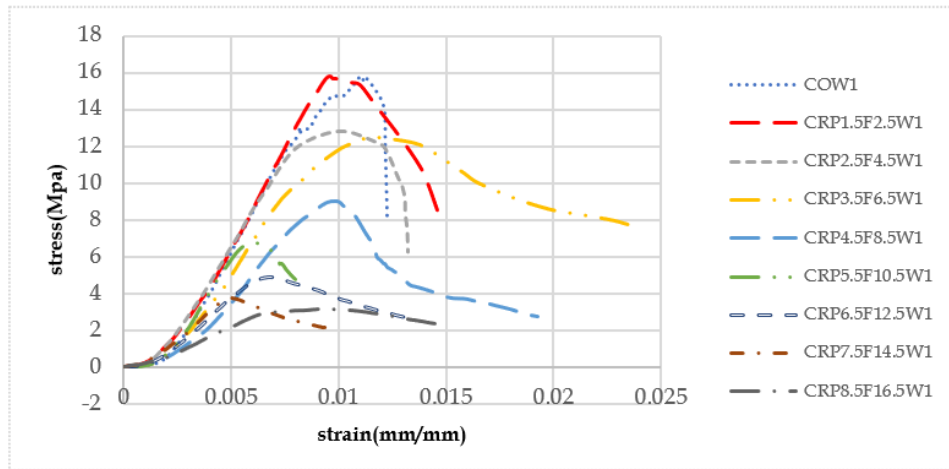
شکل ۳. نمودار تغییرات اسلامپ نسبت به درصد خرده لاستیک و الیاف لاستیک

Fig. 3. Slump change diagram in relation to the percentage of rubber crumb and rubber fibers

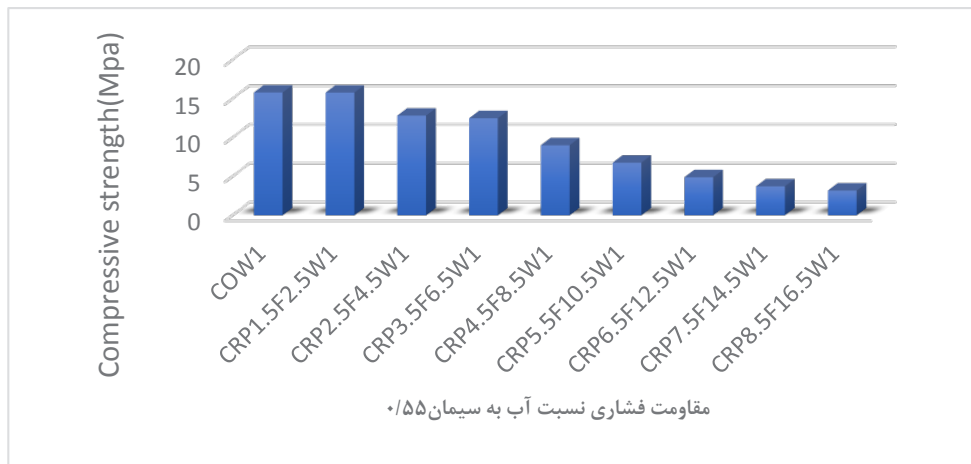
جدول ۶. اسلامپ نمونه‌های بتن و بتن لاستیکی (mm)

Table 6. Slump of concrete and rubber concrete samples (mm)

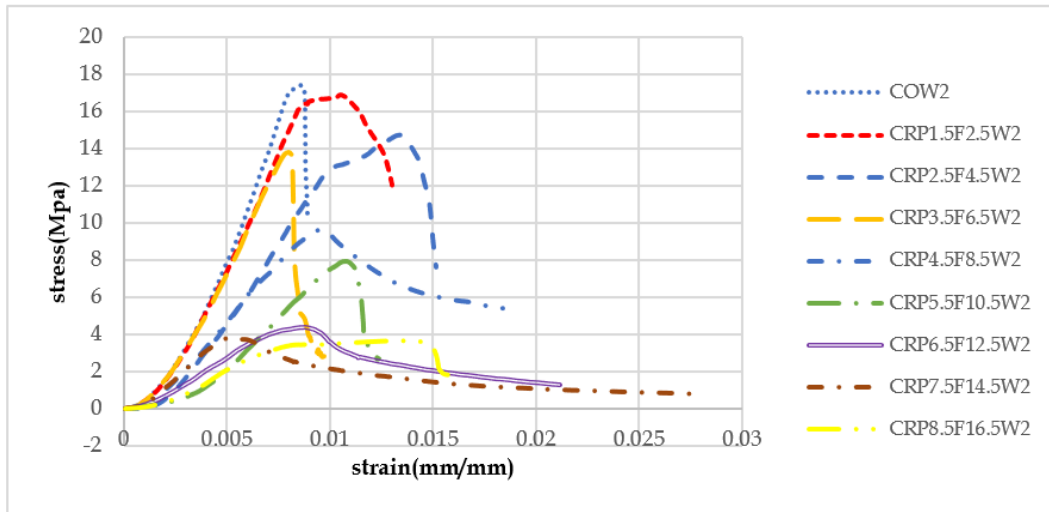
| نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ | نمونه | نسبت آب به سیمان ۰/۵ | نمونه | نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ | نمونه |
|-----------------------|---|----------------------|---|-----------------------|---|
| ۶۲ | COW ₃ | ۷۲ | COW ₂ | ۸۳ | COW ₁ |
| ۶۱ | CRP _{1.5} F _{2.5} W ₃ | ۷۰ | CRP _{1.5} F _{2.5} W ₂ | ۸۲ | CRP _{1.5} F _{2.5} W ₁ |
| ۵۷ | CRP _{2.5} F _{4.5} W ₃ | ۶۷ | CRP _{2.5} F _{4.5} W ₂ | ۷۹ | CRP _{2.5} F _{4.5} W ₁ |
| ۵۳ | CRP _{3.5} F _{6.5} W ₃ | ۶۴ | CRP _{3.5} F _{6.5} W ₂ | ۷۴ | CRP _{3.5} F _{6.5} W ₁ |
| ۴۸ | CRP _{4.5} F _{8.5} W ₃ | ۵۸ | CRP _{4.5} F _{8.5} W ₂ | ۶۹ | CRP _{4.5} F _{8.5} W ₁ |
| ۴۲ | CRP _{5.5} F _{10.5} W ₃ | ۵۲ | CRP _{5.5} F _{10.5} W ₂ | ۶۳ | CRP _{5.5} F _{10.5} W ₁ |
| ۳۶ | CRP _{6.5} F _{12.5} W ₃ | ۴۵ | CRP _{6.5} F _{12.5} W ₂ | ۵۷ | CRP _{6.5} F _{12.5} W ₁ |
| ۲۸ | CRP _{7.5} F _{14.5} W ₃ | ۳۷ | CRP _{7.5} F _{14.5} W ₂ | ۴۶ | CRP _{7.5} F _{14.5} W ₁ |
| ۱۶ | CRP _{8.5} F _{16.5} W ₃ | ۲۴ | CRP _{8.5} F _{16.5} W ₂ | ۳۱ | CRP _{8.5} F _{16.5} W ₁ |



شکل ۴. نمودار تنش- کرنش حاوی نمونه شاهد و خرده لاستیک و الیاف لاستیک (نسبت آب به سیمان ۰/۵۵)
 Fig. 4. Stress-strain diagram containing control sample and rubber crumb and rubber fibers (water to cement ratio 0.55)

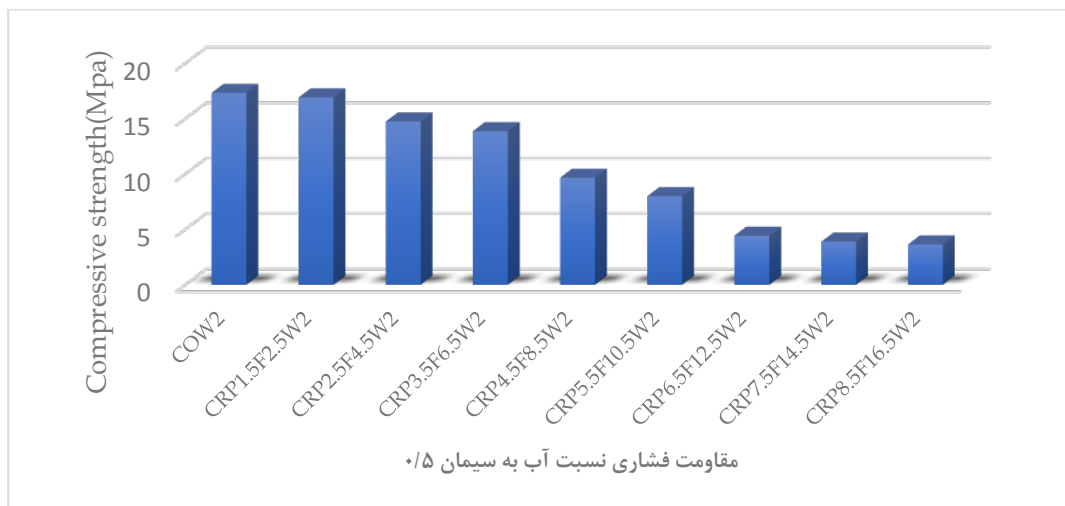


شکل ۵. نمودار میله ای مقاومت فشاری (نسبت آب به سیمان ۰/۵۵)
 Fig. 5. Bar graph of compressive strength (water to cement ratio 0.55)



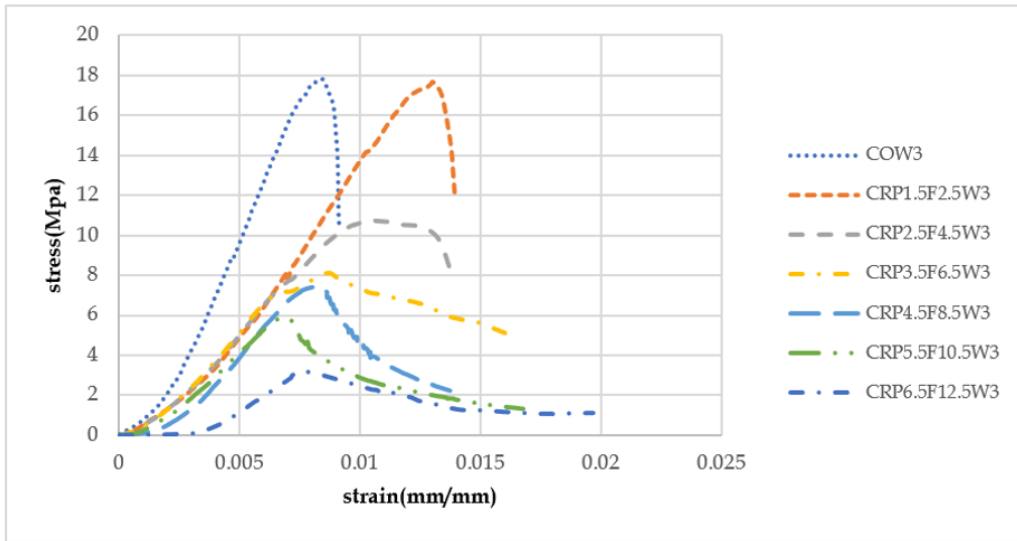
شکل ۶. نمودار تنش- کرنش حاوی نمونه شاهد و خرده لاستیک و الیاف لاستیک (نسبت آب به سیمان ۰/۵)

Fig. 6. Stress-strain diagram containing control sample and crumb rubber and rubber fibers (water to cement ratio 0.5)



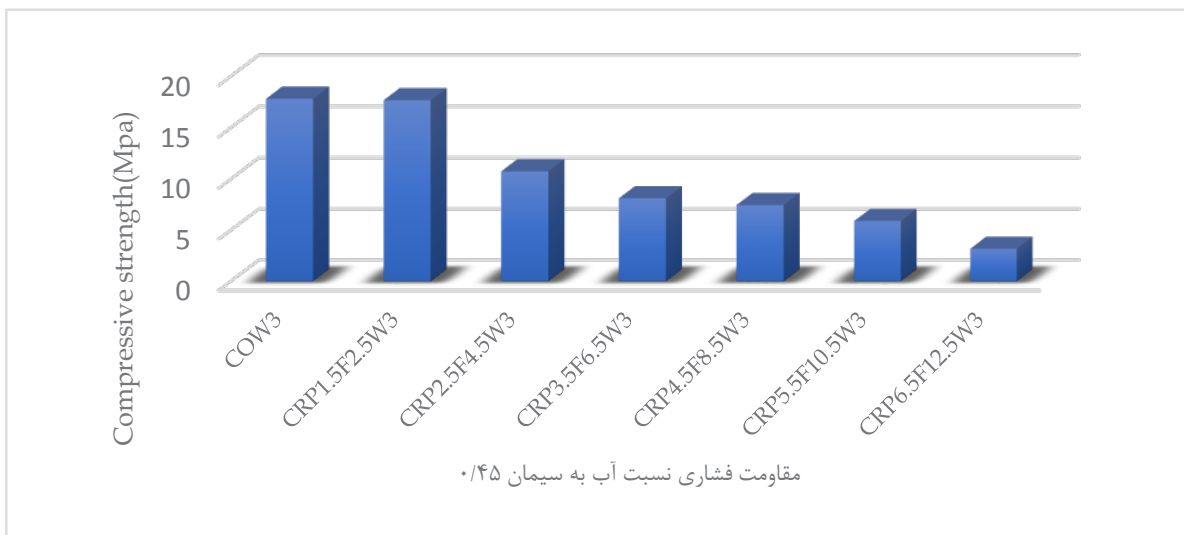
شکل ۷. نمودار میله ای مقاومت فشاری (نسبت آب به سیمان ۰/۵)

Fig. 7. Bar chart of compressive strength (water to cement ratio 0.5)



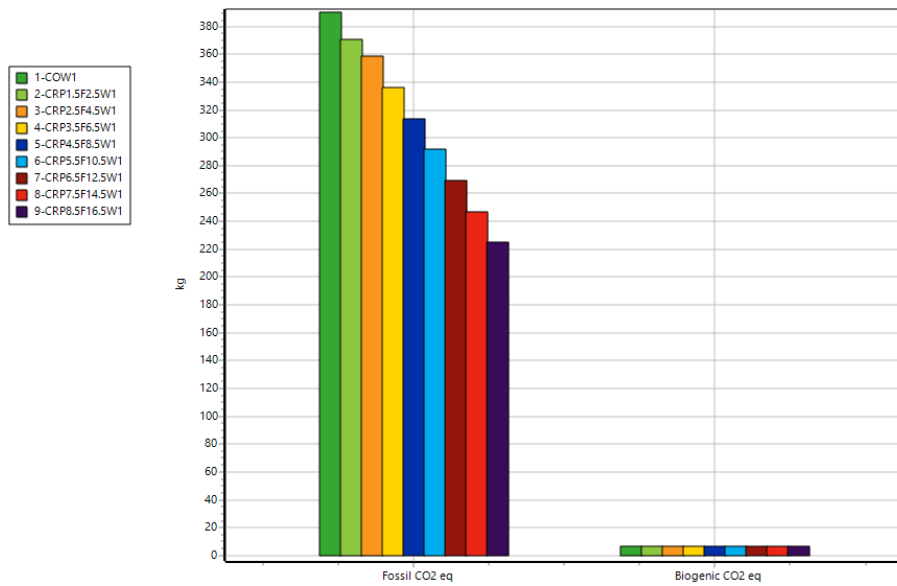
شکل ۸. نمودار تنش- کرنش حاوی نمونه شاهد و خرده لاستیک و الیاف لاستیک (نسبت آب به سیمان ۰/۴۵)

Fig. 8. Stress-strain diagram containing control sample and rubber crumb and rubber fibers (water to cement ratio 0.45)



شکل ۹. نمودار میله ای مقاومت فشاری (نسبت آب به سیمان ۰/۴۵)

Fig. 9. Bar chart of compressive strength (water to cement ratio 0.45)



شکل ۱۰. نمودار تغییرات چرخه عمر در نمونه شاهد و نمونه‌های بتن لاستیک در نسبت آب به سیمان ۰/۵۵

Fig. 10. Life cycle change diagram in the control sample of rubber concrete samples in water to cement ratio of 0.55

جدول ۷. نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ بر اساس نرم‌افزار سیماپرو

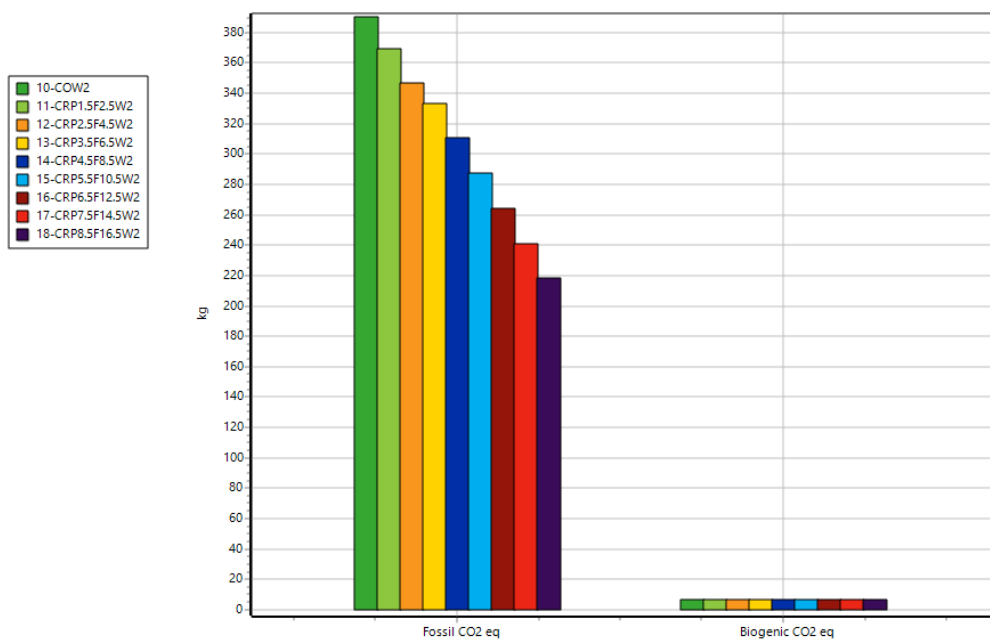
Table 7. Water to cement ratio of 0.55 based on Simapro software

| موارد | دسته تأثیر | Cow 1 | CRP1.5F2.5W1 | CRP2.5F4.5W1 | CRP3.5F6.5W1 | CRP4.5F8.5W1 | CRP5.5F10.5W1 | CRP6.5F12.5W1 | CRP7.5F14.5W1 | CRP8.5F16.5W1 |
|-------|------------------------------|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ۱ | فسیلی CO ₂ (kg) | ۳۹۰ | ۳۷۱ | ۳۵۸ | ۳۳۶ | ۳۱۴ | ۲۹۲ | ۲۶۹ | ۲۴۷ | ۲۲۵ |
| ۲ | بیوژنیک CO ₂ (kg) | ۶/۷۱ | ۶/۶۹ | ۶/۶۸ | ۶/۶۶ | ۶/۶۴ | ۶/۶۳ | ۶/۶۱ | ۶/۵۹ | ۶/۵۷ |

۳-۴- ارزیابی زیست محیطی مصالح بازیافتی و لاستیکی

ارزیابی زیست محیطی چرخه عمر بتن لاستیکی با استفاده از نرم‌افزار سیماپرو در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵ نشان داده شده است. میزان انتشار گاز CO₂ طبق جداول و نمودارها در بتن خرده‌لاستیک و الیاف لاستیک روندی کاهشی را نشان می‌دهد.

با مقایسه بتن بدون لاستیک و بتن لاستیکی در نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ با افزودن ۴٪ لاستیک جایگزینی ۵٪ گاز CO₂ فسیلی کاهش می‌یابد. هر چه مقدار لاستیک در بتن افزوده می‌شود این کاهش بیشتر می‌شود. بیشترین کاهش در بتن لاستیکی ۲۵٪ جایگزینی می‌باشد که نسبت به بتن بدون لاستیک ۴۲٪ گاز فسیلی کاهش را نشان داده شده است. در مقایسه



شکل ۱۱. نمودار تغییرات چرخه عمر در نمونه شاهد و نمونه‌های بتن لاستیک در نسبت آب به سیمان ۰/۵۵

Fig. 11. Life cycle change diagram in the control sample of rubber concrete samples in water to cement ratio of 0.5

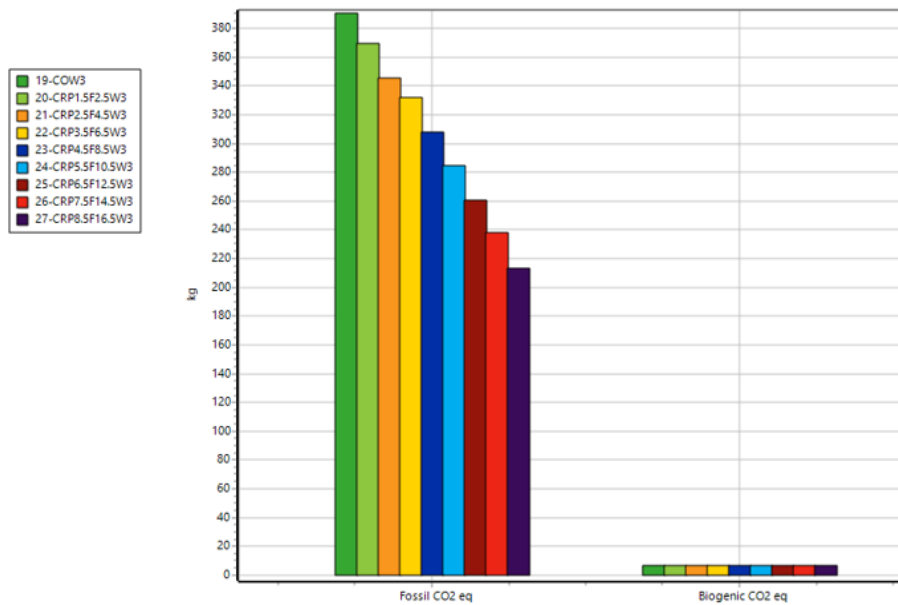
جدول ۸. نسبت آب به سیمان ۰/۵ بر اساس نرم‌افزار سیماپرو

Table 8. Water to cement ratio of 0.5 based on Simapro software

| موارد | دسته تأثیر | Cow 2 | CRP _{1.5} F _{2.5} W ₂ | CR _{2.5} F _{4.5} W ₂ | CRP _{3.5} F _{6.5} W ₂ | CRP _{4.5} F _{8.5} W ₁ | CRP _{5.5} F _{10.5} W ₂ | CRP _{6.5} F _{12.5} W ₂ | CRP _{7.5} F _{14.5} W ₂ | CRP _{8.5} F _{16.5} W ₂ |
|-------|-----------------------------|-------|--|---|--|--|---|---|---|---|
| ۱ | فسیلی (kg)CO ₂ | ۳۹۰ | ۳۷۰ | ۳۴۷ | ۳۳۳ | ۳۱۰ | ۲۸۷ | ۲۶۴ | ۲۴۱ | ۲۱۸ |
| ۲ | بیوژنیک (kg)CO ₂ | ۶/۷۱ | ۶/۶۹ | ۶/۶۸ | ۶/۶۶ | ۶/۶۴ | ۶/۶۳ | ۶/۶۱ | ۶/۵۹ | ۶/۵۷ |

با مقایسه بتن بدون لاستیک و بتن لاستیکی در نسبت آب به سیمان ۰/۵ با افزودن ۴٪ لاستیک جایگزینی ۱/۵٪ گاز CO₂ فسیلی کاهش می‌یابد. هر چه مقدار لاستیک در بتن افزوده می‌شود، این کاهش افزایش می‌یابد. بیشترین کاهش در بتن لاستیکی ۲۵٪ جایگزینی می‌باشد که نسبت به بتن بدون لاستیک ۴۴٪ کاهش گاز فسیلی را نشان داده است. در دسته

بین بیشترین مقدار لاستیک و کمترین مقدار آن در نسبت آب به سیمان ۰/۵۵، با افزودن ۲۵٪ لاستیک به بتن، تولید گاز CO₂ حدود ۴۰٪ کاهش پیدا کرده است. در دسته بیوژنیک نیز مقدار CO₂ در بتن بدون لاستیک نسبت به بتن لاستیکی ۴٪ با کاهش ۰/۲٪ همراه شده است و نسبت به بیشترین مقدار لاستیک ۲ درصد گاز CO₂ کاهش نشان داده شده است.



شکل ۱۲. نمودار تغییرات چرخه عمر در نمونه شاهد و نمونه‌های بتن لاستیک در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵

Fig. 12. Life cycle change diagram in the control sample of rubber concrete samples in water to cement ratio of 0.45

جدول ۹. نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ بر اساس نرم‌افزار سیمپرو

Table 9. Water to cement ratio of 0.45 based on Simapro software

| موارد | دسته تأثیر | مقدار |
|--|------------------------------|-------|
| Cow 3 | فسیلی CO ₂ (kg) | ۳۹۱ |
| CRP _{1.5} F _{2.5} W ₃ | بیوژنیک CO ₂ (kg) | ۶/۷۱ |
| CR _{2.5} F _{4.5} W ₃ | | ۶/۷۱ |
| CR _{3.5} F _{6.5} W ₃ | | ۶/۶۸ |
| CR _{4.5} F _{8.5} W ₃ | | ۶/۶۶ |
| CR _{5.5} F _{10.5} W ₃ | | ۶/۶۴ |
| CR _{6.5} F _{12.5} W ₃ | | ۶/۶۳ |
| CR _{7.5} F _{14.5} W ₃ | | ۶/۶۱ |
| CR _{8.5} F _{16.5} W ₃ | | ۶/۵۸ |

می‌یابد. بیشترین کاهش در بتن لاستیکی ۲۵٪ جایگزینی می‌باشد که نسبت به بتن بدون لاستیک، ۲/۴۵٪ گاز فسیلی کاهش یافته است. در دسته بیوژنیک نیز مقدار CO₂ در بتن بدون لاستیک نسبت به بتن لاستیکی ۴٪ تغییری نداشته است و نسبت به بیشترین مقدار لاستیک ۲٪ کاهش گاز CO₂ را نشان داده است که در مقایسه نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۵۵ نیز تغییری انجام نشده است. طبق نتایج بررسی تأثیر خرده‌لاستیک و الیاف لاستیک بر مود شکست بدست آمده، افزایش خرده‌لاستیک و الیاف لاستیک

بیوژنیک نیز مقدار CO₂ در بتن بدون لاستیک نسبت به بتن لاستیکی ۴٪ با کاهش ۰/۲٪ همراه شده و نسبت به بیشترین مقدار لاستیک ۲٪ کاهش گاز CO₂ نشان داده شده است که در مقایسه نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ تغییر محسوسی ایجاد نشده است.

با مقایسه بتن بدون لاستیک و بتن لاستیکی در نسبت آب به سیمان ۰/۵ با افزودن ۴٪ لاستیک جایگزینی ۳/۵٪، گاز CO₂ فسیلی کاهش می‌یابد. هر چه مقدار لاستیک در بتن افزوده می‌شود این کاهش افزایش



شکل ۱۳. (الف) نمونه بدون خرده لاستیک و الیاف لاستیک؛ (ب) نمونه با خرده لاستیک و الیاف لاستیک

Fig. 13. (a) Sample without rubber crumb and rubber fibers; (b) Sample with rubber powder and rubber fibers

لاستیک در تحقیقات گذشته به شرح زیر می باشد:
 در صورت استفاده از تراشه مقدار ۳۰ تا ۶۰ درصد جایگزینی باعث کاهش اسلامپ ۱۳ تا ۵۶ درصدی شده است. نوع سنگدانه و اندازه سنگدانه بر روی اسلامپ تاثیر دارد. به عنوان نمونه جایگزینی ۱۰ تا ۴۰ درصد گرانول باعث افزایش اسلامپ ۱۱/۹ تا ۴۶/۶ شده است.
 در شکل ۱۵ پودر و گرانول با نسبت جایگزینی ۵ تا ۳۰ درصد، باعث کاهش مقاومت فشاری از ۱۱/۸ تا ۵۷/۹ درصدی شده است. با جایگزینی ۲۵ درصد خرده و الیاف لاستیکی در این پژوهش، ۶۲ درصد کاهش مقاومت فشاری رانسیبت به بتن بدون لاستیک نشان می دهد.

۵- نتیجه گیری

- با توجه به نمودارها و نتایج تفسیرهای بدست آمده از آزمایش های مقاومت فشاری و اسلامپ می توان اظهار داشت:
- با توجه به نمودارهای تنش و کرنش با افزایش مقدار خرده لاستیک و الیاف لاستیک به علت چسبندگی و کشسانی کمتر ذرات لاستیک و تخلخل موجود بین ذرات آن، کاهش مقاومت مشاهده می شود.
 - خرده لاستیک و الیاف لاستیک دارای جذب آب زیادی بوده و استفاده همزمان خرده لاستیک و الیاف باعث کاهش اسلامپ در بتن لاستیکی می شود.
 - با افزایش مقدار جایگزینی خرده لاستیک و الیاف لاستیک، مدول الاستیسیته روندی کاهشی پیدا می کند.

در نمونه ها منجر به کاهش عرض ترک نمونه ها می شود. در شکل ۱۳ (الف) که نمونه بدون خرده و الیاف لاستیک بوده، ترک هایی با عرض زیاد روی بتن ایجاد شده است که موجب گسیختگی تردتر و شکست ناگهانی نمونه گردیده است. در مقابل، شکل ۱۳ (ب) که نمونه با خرده لاستیک و الیاف لاستیک است، شکست نرم تر و ترک ها ریزتر و عمق ترک کمتر است.
 در شکل ۱۴ تأثیر استفاده همزمان ۴٪ الیاف لاستیک و خرده لاستیک بر اسلامپ و مقاومت فشاری در این پژوهش و مقایسه آن با محققین پیشین که فقط براده لاستیک به بتن اضافه شده است، نشان داده شده است [۲۹]. طبق نمودار اسلامپ، در صورت استفاده همزمان خرده لاستیک و الیاف لاستیک به جای شن و ماسه، به دلیل جذب آب بیشتر این مصالح و خاصیت پرکنندگی منافذ بین دانه ها، اسلامپ روند کاهشی پیدا می کند. همچنین کاهش مقاومت فشاری در صورت استفاده همزمان خرده لاستیک و الیاف نسبت به بتن های مرسوم مشاهده شده است. بتن لاستیکی در مقایسه با بتن پرتلند بدون لاستیک اسلامپ کمتری دارد. با افزایش مقدار جایگزینی در بتن لاستیکی اسلامپ روندی کاهشی پیدا کرده است [۳۰-۳۲]. کاهش ارزش اسلامپ حدود ۱۹٪ تا ۹۳٪ در هنگام جایگزینی مشاهده شده است [۳۳]. همچنین برخی از نتایج بررسی های گذشته در بحث اسلامپ در جدول ۱۰ آمده است:

نتایج برخی از بررسی های گذشته در بحث مقاومت فشاری به شرح جدول ۱۱ می باشد:

در شکل ۱۴ کاهش اسلامپ در صورت جایگزینی از اشکال مختلف

جدول ۱۰. نتایج برخی از بررسی‌های گذشته براساس آزمایش اسلامپ

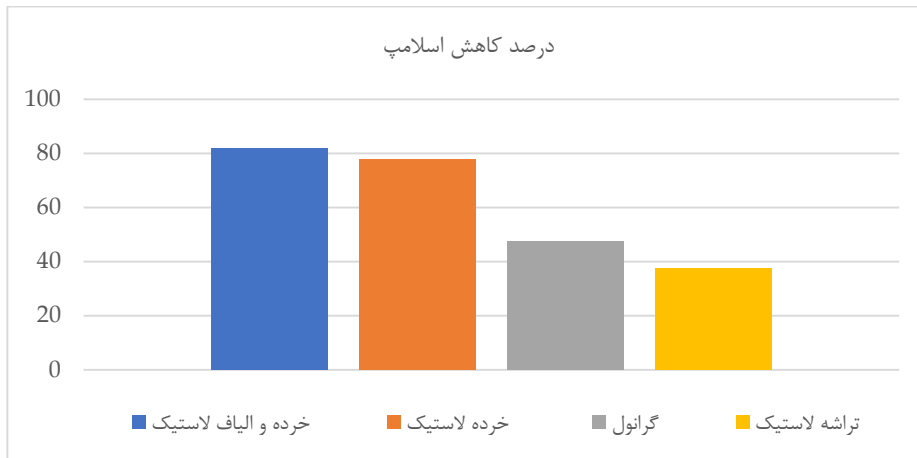
Table 10. The results of some past investigations based on the slump test

| مرجع | نتایج | نوع بتن | نسبت جایگزینی لاستیک | جایگزینی الگو | اندازه / نوع لاستیک | خواص |
|------|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------------|------------------|--|-----------------------|
| [۳۴] | کاهش اسلامپ ۱۳-۵۶٪ | بتن | ۳۰-۶۰٪ متوسط | ریز و درشت | ۶-۰ میلی‌متر (گرانول)، ۲۰-۵ میلی‌متر (تراشه) | کارایی/ارزش اسلامپ |
| [۳۵] | کاهش اسلامپ ۵/۳۷-۶/۱۶٪ | روسازی بتنی | ۲۰-۶۰٪ متوسط | ریز و درشت | ۴-۰ میلی‌متر (گرانول)، ۲۰-۴ میلی‌متر (تراشه) | کارایی/ارزش اسلامپ |
| [۳۶] | افزایش اسلامپ ۴۷/۶-۱۱/۹٪ | توخالی بلند لاستیکی بلوک و آجر | ۱۰-۴۰٪ متوسط | سنگدانه ریز | ۴-۱ میلی‌متر (گرانول) | کارایی/ارزش اسلامپ |
| [۳۷] | افزایش اسلامپ ۴۳/۸-۴/۲٪ | بتن | ۲۵-۵٪ متوسط | سنگدانه ریز | ۷۵-۰۴-۰۷۵ میلی‌متر (پودر و دانه ای) | کارایی/ارزش اسلامپ |
| [۳۸] | چگالی ۶-۲٪ | بتن استحکام بالا | ۳۰-۵٪ متوسط | سنگدانه ریز | مش ۸-۱۴ ، ۱۴-۳۰ و ۳۰ (دانه و پودر) | تراکم تازه |
| [۳۹] | چگالی ظاهری ۶/۹-۰٪ کاهش | بتن استحکام بالا | ۲۵-۵٪ وزنی | سنگدانه ریز | ۶۰٪ از ۸۰-۴ میلی‌متر (گرانول) و ۴۰٪ پودر | تراکم تازه |
| [۴۰] | وزن واحد: ۱۰/۷-۳/۱٪ کاهش | ملات | ۶۰-۱۰٪ متوسط | سنگدانه ریز | ۴-۲۰ میلی‌متر (گرانول) | تراکم تازه |
| [۴۱] | وزن واحد: ۲۲/۳-۹/۴٪ کاهش | بتن | ۳۰-۶۰٪ متوسط | ریز و درشت | ۶-۰ میلی‌متر (گرانول)، ۲۰-۵ میلی‌متر (تراشه) | تراکم تازه |

جدول ۱۱. نتایج برخی از بررسی‌های گذشته آزمایش مقاومت فشاری

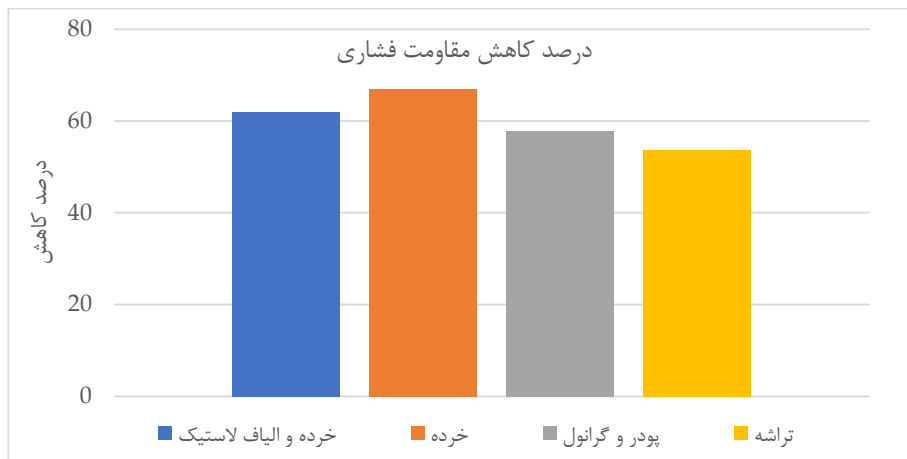
Table 11. Results of some past investigations of compressive strength testing

| مرجع | نتایج | نوع بتن | نسبت جایگزینی لاستیک | جایگزینی الگو | اندازه / نوع لاستیک | خواص |
|------|---|---------------------------|----------------------------|------------------|--|--------------|
| [۴۲] | کاهش مقاومت ۵۷/۹-۱۱/۸٪ | بتن خود متراکم لاستیکی | ۳۰-۵٪ حجمی | سنگدانه ریز | ۴/۷۵-۰/۰۷۵ میلی‌متر (پودر و گرانول) | مقاومت فشاری |
| [۴۳] | افزایش مقاومت ۳۸/۲-۲۸٪ کاهش | روسازی بتنی | ۱۰٪ متوسط حجمی | سنگدانه ریز | ۲/۳۶-۱/۱۸ میلی‌متر (گرانول) | مقاومت فشاری |
| [۴۴] | مقاومت (۵٪ لاستیک) کاهش ۳۷/۱٪ مقاومت (۱۰٪ لاستیک) | بتن | ۱۰-۲/۵٪ وزنی | سیمان | ۶۳ میکرون تا ۰/۶۳ میلی‌متر (پودر/خاکستر) | مقاومت فشاری |
| [۴۴] | کاهش مقاومت ۵۳/۶-۱۴/۳٪ | بتن | ۲۰-۵٪ وزنی | سنگدانه درشت | ۴۰٪ از ۵ میلی‌متر و ۶۰٪ از ۱۰ میلی‌متر (تراشه) | مقاومت فشاری |



شکل ۱۴. مقایسه اسلامپ الیاف و خرده لاستیک با خرده لاستیک پژوهش‌های گذشته

Fig. 14. Comparison of fiber slump and rubber powder with rubber powder of past researches



شکل ۱۵. مقایسه مقاومت فشاری الیاف و خرده لاستیک با خرده لاستیک پژوهش‌های گذشته

Fig. 15. Comparison of the compressive strength of fibers and powder rubber with powder rubber of past researches

بتن لاستیکی با نرم‌افزار سیماپرو، بهینه‌ترین حالت چرخه عمر با توجه به اطلاعات میزان انتشار گاز CO₂ در بتن با خرده‌لاستیک و الیاف لاستیک کاهش یافته است.

(الف) در نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ و حالت بهینه، با اضافه کردن ۲۵٪ لاستیک نسبت به بتن بدون لاستیک، ۴۲٪ گاز CO₂ فسیلی کاهش می‌یابد.

(ب) در نسبت آب به سیمان ۰/۵ و حالت بهینه، اضافه کردن ۲۵٪ لاستیک نسبت به بتن بدون لاستیک ۴۴٪ گاز CO₂ کاهش می‌یابد.

(ج) در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و حالت بهینه، با اضافه کردن ۲۵٪ لاستیک نسبت به بتن بدون لاستیک ۴۶٪ گاز CO₂ کاهش می‌یابد.

(د) در سه نسبت آب به سیمان ۰/۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵ و حالت بهینه در حوزه بیوژنیک، با اضافه کردن ۲۵٪ جایگزینی لاستیک نسبت به بتن لاستیک ۲٪ کاهش گاز CO₂ همراه شده است.

• بهینه‌سازی کلی

در مجموع حالت بهینه در سه نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵ برای تمامی طرح مخلوطها مقاومت فشاری و کاهش سوخت‌های فسیلی بیوژنیک، جایگزینی ۴٪ لاستیک به بتن می‌باشد.

در نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ درصد و حالت بهینه، با اضافه کردن بتن لاستیک نسبت به بتن بدون لاستیک، ۴۲٪ گاز CO₂ فسیلی کاهش می‌یابد.

سپاسگزاری:

بدینوسیله از تمامی کسانی که در راستای پیشبرد این مقاله، به ویژه ریاست آزمایشگاه دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل و اعضای کارشناس آزمایشگاه دانشگاه نوشیروانی بابل، کمال قدردانی و سپاسگزاری را دارم.

منابع

- [1] H. Mouri, Bridgestone's View on Circular Economy', Anbumozhi, V. and J. Kim, (2016) 31-42.
- [2] B.S. Thomas, R.C. Gupta, V.J. Panicker, Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance, Journal of Cleaner Production, 112 (2016) 504-513.
- [3] B. Lippiatt, S. Ahmad, Measuring the life-cycle environmental and economic performance of concrete: the BEES approach, in: Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete

به دلیل سطح ویژه بالا و اندازه منافذ کوچکتری که در اطراف منطقه تماس لاستیک و سنگ سیمان وجود دارد، ذرات خرده لاستیک کمتر هوا را نسبت به الیاف لاستیک به دام می‌اندازند. این منافذ ذرات لاستیک باعث ایجاد اثر میرایی برای انجماد آب و بهبود مقاومت بتن در برابر چرخه ذوب و یخبندان می‌شوند.

• هرچند بتن لاستیکی مقاومت فشاری کمتری دارد، ولی دارای قابلیت الاستیک بسیار مشهود تری نسبت به بتن عادی می‌باشد. بتن لاستیکی را می‌توان بتنی سبز با معیارهای محیط‌زیستی نامید. بهترین نمونه از نظر عملکرد در مقاومت فشاری و اسلامپ که می‌توان در طرح مخلوط بتن استفاده کرد که بهینه‌ترین عملکرد را دارا باشد، ۵٪ بتن لاستیکی می‌باشد. وزن این بتن‌ها نسبت به بتن شاهد نیز کمتر است.

• اضافه کردن الیاف و خرده لاستیک باعث کاهش تولید گاز CO₂ شده، و با افزایش مقدار جایگزینی این مقدار روندی افزایشی پیدا می‌کند. بیشینه کاهش در نسبت خرده لاستیک ۸/۵٪ و الیاف لاستیک ۱۶/۵٪ بود.

• بهینه‌سازی مقاومت فشاری

باتوجه به نسبت‌های مختلف آب به سیمان تست‌های مقاومت فشاری درخصوص بهینه‌سازی در مجموع ۲۷ نمونه مورد بررسی قرار گرفته شده است.

(الف) در نسبت آب به سیمان ۰/۵۵، مقاومت فشاری بتن لاستیکی در ۴٪ جایگزینی، ۱۵/۷۸ MPa شده است.

(ب) در نسبت آب به سیمان ۰/۵ مقاومت فشاری بتن لاستیکی در ۴٪ جایگزینی ۱۶/۹۱ MPa شده است.

(ج) در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ مقاومت فشاری بتن لاستیکی در ۴٪ جایگزینی ۱۷/۸۱ MPa شده است.

با توجه به نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵ و مقایسه مقاومت فشاری این نسبت‌ها، بهترین حالت مقاومت فشاری با اضافه کردن ۴٪ لاستیک به بتن می‌باشد. در مقایسه بین سه نسبت آب به سیمان جایگزینی ۴٪ بهترین حالت در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ رخ داده است و بیشترین افت مقاومت فشاری نیز در همین نسبت آب به سیمان در نسبت جایگزینی ۷٪ می‌باشد. در بررسی انجام شده به طور کلی نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ دارای مقاومت فشاری بهتری بود؛ زیرا با افزودن لاستیک به بتن افت مقاومت فشاری با شیب کمی همراه شده است.

• بهینه‌سازی کاهش سوخت‌های فسیلی و بیوژنیک
با بررسی نسبت‌های آب به سیمان‌های مختلف و درصد‌های مختلف

- used rubber tyre aggregates: effect on recycled concrete performance, Magazine of Concrete Research, 67(12) (2015) 680-691.
- [16] A.O. Atahan, A.Ö. Yücel, Crumb rubber in concrete: Static and dynamic evaluation, Construction and building materials, 36 (2012) 617-622.
- [17] M. Bravo, J. de Brito, Concrete made with used tyre aggregate: durability-related performance, Journal of Cleaner Production, 25 (2012) 42-50.
- [18] T. Gupta, S. Chaudhary, R.K. Sharma, Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate, Construction and building Materials, 73 (2014) 562-574.
- [19] T.-C. Ling, Prediction of density and compressive strength for rubberized concrete blocks, Construction and Building Materials, 25(11) (2011) 4303-4306.
- [20] A. Benazzouk, O. Douzane, T. Langlet, K. Mezreb, J. Roucoult, M. Quéneudec, Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes, Cement and Concrete Composites, 29(10) (2007) 732-740.
- [21] A. Sofi, Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete—A review, Ain Shams Engineering Journal, 9(4) (2018) 2691-2700.
- [22] W.H. Yung, L.C. Yung, L.H. Hua, A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete, Construction and Building Materials, 41 (2013) 665-672.
- [23] M.S. Senin, Mechanical, durability and damping properties for optimum rubberised concrete performance, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, 2022.
- [24] K.B. Najim, M.R. Hall, Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete, Construction and building materials, 27(1) (2012) 521-530.
- [25] H. Liu, X. Wang, Y. Jiao, T. Sha, Experimental investigation of the mechanical and durability properties of crumb rubber concrete, Materials, 9(3) (2016) 172.
- [26] K. Jafari, V. Toufigh, Experimental and analytical Technology, 2004, pp. 213-230.
- [4] C. Meyer, The greening of the concrete industry, Cement and concrete composites, 31(8) (2009) 601-605.
- [5] Oecd, Global material resources outlook to 2060, in, 2019.
- [6] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, F. Van Woerden, What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050, World Bank Publications, 2018.
- [7] C. Peña, B. Civit, A. Gallego-Schmid, A. Druckman, A.C.-. Pires, B. Weidema, E. Mieras, F. Wang, J. Fava, L.M.i. Canals, Using life cycle assessment to achieve a circular economy, The International Journal of Life Cycle Assessment, 26 (2021) 215-220.
- [8] B. Huang, G. Li, S.-S. Pang, J. Eggers, Investigation into waste tire rubber-filled concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 16(3) (2004) 187-194.
- [9] G. Li, M.A. Stubblefield, G. Garrick, J. Eggers, C. Abadie, B. Huang, Development of waste tire modified concrete, Cement and Concrete Research, 34(12) (2004) 2283-2289.
- [10] H. Su, Properties of concrete with recycled aggregates as coarse aggregate and as-received/surface-modified rubber particles as fine aggregate, (2015).
- [11] Q. Dong, B. Huang, X. Shu, Rubber modified concrete improved by chemically active coating and silane coupling agent, Construction and Building Materials, 48 (2013) 116-123.
- [12] B.Z. Savas, S. Ahmad, D. Fedroff, Freeze-thaw durability of concrete with ground waste tire rubber, Transportation Research Record, 1574(1) (1997) 80-88.
- [13] P. Sukontasukkul, K. Tiamlom, Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete mixed with crumb rubber with different size, Construction and Building Materials, 29 (2012) 520-526.
- [14] T.M. Pham, N. Renaud, V.L. Pang, F. Shi, H. Hao, W. Chen, Effect of rubber aggregate size on static and dynamic compressive properties of rubberized concrete, Structural Concrete, 23(4) (2022) 2510-2522.
- [15] H. Su, J. Yang, G.S. Ghataora, S. Dirar, Surface modified

- [36] E. Sodupe-Ortega, E. Fraile-Garcia, J. Ferreiro-Cabello, A. Sanz-Garcia, Evaluation of crumb rubber as aggregate for automated manufacturing of rubberized long hollow blocks and bricks, *Construction and Building materials*, 106 (2016) 305-316.
- [37] R. Bharathi Murugan, C. Natarajan, Investigation of the behaviour of concrete containing waste tire crumb rubber, in: *Advances in Structural Engineering: Materials*, Volume Three, Springer, 2015, pp. 1795-1802.
- [38] A. Moustafa, M.A. ElGawady, Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber, *Construction and Building Materials*, 93 (2015) 249-256.
- [39] B.S. Thomas, R.C. Gupta, Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber, *Journal of Cleaner production*, 113 (2016) 86-92.
- [40] S. Ramdani, A. Guettala, M. Benmalek, J.B. Aguiar, Physical and mechanical performance of concrete made with waste rubber aggregate, glass powder and silica sand powder, *Journal of Building Engineering*, 21 (2019) 302-311.
- [41] A. Alsaif, S.A. Bernal, M. Guadagnini, K. Pilakoutas, Freeze-thaw resistance of steel fibre reinforced rubberised concrete, *Construction and Building Materials*, 195 (2019) 450-458.
- [42] M.K. Ismail, A.A. Hassan, Impact resistance and mechanical properties of self-consolidating rubberized concrete reinforced with steel fibers, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(1) (2017) 04016193.
- [43] F.M. da Silva, L.A.G. Barbosa, R.C.C. Lintz, A.E.P. Jacintho, Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber, *Construction and Building Materials*, 91 (2015) 71-79.
- [44] M. Fernández-Ruiz, L. Gil-Martín, J. Carbonell-Márquez, E. Hernández-Montes, Epoxy resin and ground tyre rubber replacement for cement in concrete: Compressive behaviour and durability properties, *Construction and Building Materials*, 173 (2018) 49-57.
- evaluation of rubberized polymer concrete, *Construction and Building Materials*, 155 (2017) 495-510.
- [27] Z. Ghizdăveț, B.-M. Ștefan, D. Nastac, O. Vasile, M. Bratu, Sound absorbing materials made by embedding crumb rubber waste in a concrete matrix, *Construction and Building Materials*, 124 (2016) 755-763.
- [28] N.F. Medina, D.F. Medina, F. Hernández-Olivares, M. Navacerrada, Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling, *Construction and building Materials*, 144 (2017) 563-573.
- [29] S. Choudhary, S. Chaudhary, A. Jain, R. Gupta, Valorization of waste rubber tyre fiber in functionally graded concrete, *Materials Today: Proceedings*, 32 (2020) 645-650.
- [30] V. Corinaldesi, J. Donnini, Waste rubber aggregates, in: *New trends in eco-efficient and recycled concrete*, Elsevier, 2019, pp. 87-119.
- [31] A.A. Gheni, M.A. ElGawady, J.J. Myers, Mechanical Characterization of Concrete Masonry Units Manufactured with Crumb Rubber Aggregate, *ACI Materials Journal*, 114(1) (2017).
- [32] H. Su, J. Yang, T.-C. Ling, G.S. Ghataora, S. Dirar, Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes, *Journal of Cleaner production*, 91 (2015) 288-296.
- [33] M.K. Batayneh, I. Marie, I. Asi, Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries, *Waste management*, 28(11) (2008) 2171-2176.
- [34] A. Alsaif, S.A. Bernal, M. Guadagnini, K. Pilakoutas, Durability of steel fibre reinforced rubberised concrete exposed to chlorides, *Construction and Building Materials*, 188 (2018) 130-142.
- [35] A. Alsaif, L. Koutas, S.A. Bernal, M. Guadagnini, K. Pilakoutas, Mechanical performance of steel fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavements, *Construction and Building Materials*, 172 (2018) 533-543.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

P. KordRostami, B. Aminnejad, A. R. Lark, M. Dehestani, Laboratory Optimization and Environmental Assessment of Rubber Concrete Using Simultaneous Incorporation of Rubber Powder and Rubber Fibers, Amirkabir J. Civil Eng., 55(10) (2024) 2043-2064.

DOI: [10.22060/ceej.2023.21625.7779](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21625.7779)



