

تأثیر جایگزینی سیمان و سنگدانه با لاستیک در مقاومت فشاری و

دوام بتن‌های متداول

مرتضی خرمی (کارشناس ارشد)
مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن
عطایه حاجی‌مدارایی (استادیار)
دانشکده‌ی فنی، دانشگاه گیلان
جنگیز دهقانان (دانشیار)
دانشکده‌ی فنی، دانشگاه تهران

لاستیک‌های مستعمل خودروها یکی از مصالحی هستند که در چرخه‌ی بازیافت طبیعت شرکت نمی‌کنند و به‌عنوان یکی از آلاینده‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شوند. تحقیق حاضر با هدف امکان‌سنجی کاربرد آنها در ساخت بتن انجام شده است. در این تحقیق نمونه‌های آزمایشگاهی در دو گروه کلی ساخته و آزمایش شدند: در گروه اول جایگزینی سنگدانه‌ی درشت (شن) با خرده لاستیک، و در گروه دوم جایگزینی سیمان با پودر لاستیک انجام شد. آزمایش مقاومت فشاری را برای آگاهی از رفتار مقاومتی نمونه‌ها، و دونوع از مهم‌ترین آزمایشات دوام شامل جذب آب و نفوذپذیری برای بررسی دوام این نمونه‌ها در شرایط مختلف در نظر گرفتیم. نتایج نشان می‌دهد که روند کسب مقاومت فشاری در بتن حاوی لاستیک با یک رابطه‌ی تجربی و با تخمین مناسب قابل تعیین است و در درصدهای جایگزینی کم، مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه شبیه نمونه‌های کنترل است. همچنین هنگامی که درصد جایگزینی از حد معینی تجاوز نکند دوام این‌گونه بتن‌ها شبیه بتن‌های رایج است.

۱. مقدمه

براساس آمار منتشره از سوی وزارت صنایع ایران، در سال‌های اخیر حدود ۳۰ میلیون تن سیمان در کشور تولید شده است که بخش عظیمی از آن در مصارف مختلف صنعت ساختمان و سدسازی به‌کار می‌رود. در صورتی که بتوان حداقل ۳ درصد وزنی سیمان مصرفی کشور را با لاستیک جایگزین کرد، نه تنها حدود ۹۰ هزار تن سیمان صرفه‌جویی می‌شود، بلکه از ورود این مقدار لاستیک مستهلک به محیط زیست جلوگیری می‌شود. بدیهی است بسیاری مزایای غیرمستقیم دیگر، از جمله صرفه‌جویی در مصرف انرژی و افزایش اشتغال و مانند آنها، نیز وجود خواهد داشت. البته لازم است کلیه‌ی جوانب از دیدگاه کلان اقتصادی نیز مورد بررسی قرار گیرد.

در تحقیق حاضر نیز به‌منظور بسط و توسعه‌ی تحقیقات انجام شده‌ی قبلی در جهان با هدف امکان‌سنجی کاربرد لاستیک مستهلک در ساخت بتن در کشور ایران، مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی مصالح سنگی متداول، لاستیک‌های مستعمل اتومبیل، سیمان و آب مصرفی انجام شده است. در این تحقیق، با ساخت نمونه‌های متعدد و انجام آزمایش‌های لازم براساس استانداردهای رایج، تأثیر جایگزینی (۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد وزنی) شن با خرده لاستیک و «جایگزینی سیمان با پودر لاستیک» مورد بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است که نگارندگان

گسترش صنعت خودروسازی سبب شده است تا وجود لاستیک‌های مستعمل به‌عنوان یکی از آلوده‌کننده‌های زیست‌محیطی در دهه‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گیرد. از جمله پیامدهای آن عدم تجزیه در مدفن‌های زباله بوده و می‌تواند محل مناسبی برای رشد و پرورش پشه و سایر حشرات باشد. بنابراین لازم است تا همگام با روند رو به گسترش توسعه‌ی پایدار در کشور، برای بازیافت آن تدابیر لازم در نظر گرفته شود. تاکنون شیوه‌های مختلفی توسط متخصصین در سایر کشورها برای بازیافت این مصالح مورد استفاده قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به کاربرد آنها در تهیه‌ی آسفالت، سوخت کوره، تهیه‌ی دوده در رنگ‌سازی و استفاده از آن در ساخت بتن اشاره کرد. در این تحقیق جایگزینی مصالح سنگی درشت (شن) و سیمان با لاستیک مستهلک اتومبیل، هر یک به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است.

در ایران آمار دقیقی از لاستیک‌های مستعمل وجود ندارد، اما برآوردهای انجام شده نشان می‌دهد که با توجه به تولید حدود ۲۰۰ هزار تن لاستیک در کشور (براساس آمار رسمی ایران در سال ۱۳۸۴) و برآورد تقریبی دو سال عمر مفید برای لاستیک‌ها، مقدار لاستیک مستعمل در کشور سالانه حدود یکصد هزار تن تخمین زده می‌شود. همچنین

موردی از جایگزینی پودر لاستیک با سیمان نیز در تحقیقات گذشته مشاهده نکردند، لذا احتمالاً این موضوع برای اولین بار در ایران انجام می‌شود.

به نظر می‌رسد تحقیقات گذشته که غالباً بر پایه‌ی جایگزینی مصالح سنگی با لاستیک انجام شده است بیشتر با هدف کاربرد لاستیک مستهلک به منظور جلوگیری از ورود آن به محیط زیست بوده است و اصلاح یا بهبود ویژگی‌های بتن مد نظر نبوده است. بنابراین با توجه به حجم زیاد مصالح سنگی در بتن، و نیز نقش کم‌تر آن نسبت به سیمان در ماتریس بتن، تحقیقات انجام شده بر آن متمرکز شده است و جایگزینی سیمان با پودر لاستیک کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق سعی شده است تا علاوه بر بررسی روند تحقیقات گذشته در مورد جایگزینی شن با خرده لاستیک، جایگزینی سیمان با پودر لاستیک نیز بررسی شود، چرا که بر این باوریم که جایگزینی سیمان با پودر لاستیک، اگر چه باعث کاهش مقدار مواد چسباننده در بتن می‌شود، ممکن است با پر کردن خلل و فرج درون بتن، بخشی از مشکلات ناشی از کاهش مواد چسباننده را برطرف کند.

در ادامه ابتدا یک دسته‌بندی کلی از انواع لاستیک مورد استفاده در بتن، و شرحی گذرا در مورد نتایج تحقیقات انجام شده ارائه می‌شود. سپس جزئیات مطالعات آزمایشگاهی این تحقیق تشریح، و نهایتاً تغییرات ایجاد شده بر ویژگی‌های متداول بتن حاوی لاستیک تحلیل شده است.

۲. دسته‌بندی لاستیک مستهلک

معمولاً در اغلب تحقیقات انجام شده لاستیک به ابعاد کوچک‌تری تبدیل می‌شود. به طور کلی دو گروه از لاستیک‌ها در ساخت انواع بتن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. [۱-۳]

۱. تایر ریزشده (chip): برای دستیابی به لاستیکی با اندازه‌های کوچک‌تر، خرد کردن لاستیک در دو مرحله انجام می‌شود. معمولاً در مرحله‌ی اول لاستیک دارای طول ۳۰۰ تا ۴۳۰ میلی‌متر و عرض ۱۰۰ تا ۲۳۰ میلی‌متر است که در مرحله‌ی ثانویه‌ی برش، ابعاد آن به حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر می‌رسد. در صورتی که مراحل خردکردن ادامه یابد، ذرات کوچک‌تر شده و به ابعادی در حدود ۱۳ تا ۷۶ میلی‌متر موسوم به shredded تبدیل می‌شوند.

۲. تایر خرد شده (Crumb tire): به کمک آسیاب‌های ویژه، قطعات بزرگ لاستیک به قطعات کوچک‌تر تبدیل می‌شوند. با توجه به نوع آسیاب و شرایط آن (از جمله دما)، اندازه‌ی ذرات تولید شده با یکدیگر تفاوت دارد. در حالت معمول، ذرات با درجه‌ی بی‌نظمی بالا و در محدوده‌ی ۴/۷۵ تا ۰/۴۲۵ میلی‌متر تولید می‌شود. در روش‌های پیچیده‌تر ذرات با اندازه‌ی ۲ تا ۹/۵ میلی‌متر و در روش

دقیق‌تر ذرات با اندازه ۰/۴۷۵ تا ۷۵ میلی‌متر تولید می‌شود. دما و روش آسیاب‌کردن بر اندازه و ساختار سطحی لاستیک به دست آمده تأثیر به‌سزایی دارد. در هوا و دمای محیط، سطح ذرات لاستیک به دست آمده زبر هستند، ولی اگر خردکردن در نیتروژن مایع انجام شود ذرات لاستیک سطحی صاف خواهند داشت.

۳. سوابق تحقیقاتی

نتایج تحقیقات انجام شده [۲] حاکی از آن است که بتن حاوی لاستیک چپ و کرامب کاهنده‌ی مقاومت فشاری و کششی بتن است، به‌طوری‌که جایگزینی سنگدانه‌های درشت با ذرات لاستیک چپ، ۸۵٪ از مقاومت فشاری و ۱۵٪ از مقاومت کششی برزیلی (یا دو نیمه کردن) را کاهش داد. ولی اگر سنگدانه‌های ریز با کرامب ریز و کوچک جایگزین شوند، مقاومت فشاری معادل ۶۵٪ و مقاومت کششی معادل ۵٪ کاهش می‌یابد. هر دوی این مخلوط‌ها شکست نرم (شکل‌پذیر) داشته و تحت بارگذاری کششی و فشاری توانایی‌شان برای جذب انرژی بسیار زیاد است.

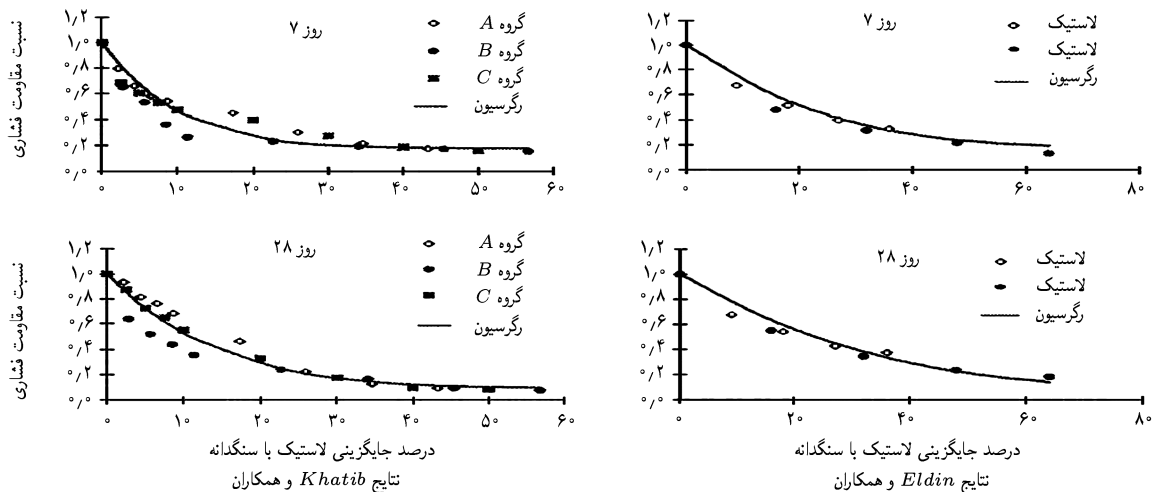
همچنین دیگر تحقیقات محققان حاکی از آن است که تأثیر افزودن دو نوع لاستیک شامل کرامب (بسیار ریز برای جایگزینی با ماسه) و چپ (با اندازه‌ی ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر برای جایگزینی با شن) را بررسی کردند. [۴] در تحقیق آنها، نسبت آب به سیمان برابر ۰/۴۸، و مقاومت فشاری نمونه‌ی کنترل برابر با ۳۵ مگاپاسکال به دست آمد. آنها سه گروه مخلوط بتن ساختند. در گروه الف لاستیک کرامب، در گروه ب لاستیک چپ و در گروه ج حجم مساوی لاستیک‌های کرامب و چپ در درصد‌های مختلف به ترتیب جایگزین سنگدانه‌های ریز، درشت و مخلوط ریز و درشت شد.

از جمله نتایج به دست آمده، کاهش کارایی بتن (برحسب کاهش در مقادیر اسلامپ) بود. همچنین نتایج حاصله از مقاومت فشاری (که به صورت نسبت مقاومت بتن حاوی لاستیک در مقایسه با بتن کنترل بیان می‌شود، SFR) در شکل ۱ ارائه شده است، در این شکل نتایج تحقیقات قبلی نیز نشان داده شده است. [۴ و ۳]

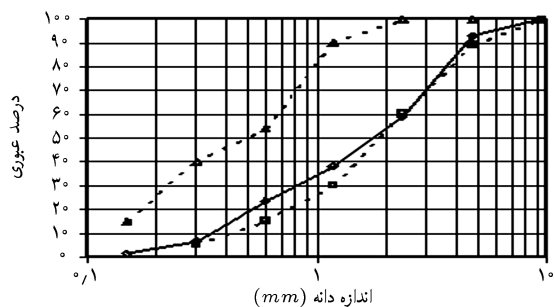
همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار لاستیک، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد. مثلاً در جایگزین‌کردن ۱۰٪ لاستیک به جای سنگدانه، کاهش مقاومت فشاری برابر ۹٪ رویت شد. همچنین کاهش مقاومت در بتن حاوی لاستیک درشت دانه چپ بیشتر از بتن حاوی لاستیک خرد شده یا کرامب است.

دیگر نتایج به دست آمده [۵] همچنین حاکی از آن است که اضافه کردن چپ‌های لاستیکی درشت در بتن، بیشتر از اضافه کردن لاستیک کرامب ریز، مقاومت فشاری و کششی را پائین می‌آورد. ولی نتایج حاصله در منابع [۶ و ۷] خلاف این ادعا را بیان می‌کنند.

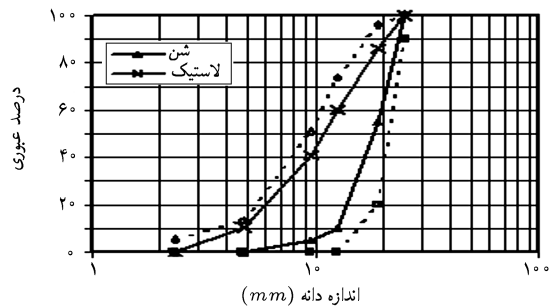
در مورد آزمایشات دوام، اطلاعات زیادی به دست نیامد، و تنها در



شکل ۱. نمودار کاهش مقاومت فشاری بر اثر افزایش درصد لاستیک. [۴۳]



شکل ۲. دانه بندی مصالح سنگی ریز (ماسه) و نمایش محدوده استاندارد ۳۰۲ ایران.



شکل ۳. دانه بندی مصالح سنگی درشت (سنگ) و لاستیک و نمایش محدوده استاندارد ۳۰۲ ایران.

- پودر لاستیک (لاستیک پودری) با اندازه‌هایی در حدود $50 \mu m$ تا $400 \mu m$ جهت جایگزینی آن با سیمان برای تهیه آن خرده لاستیک‌ها در آسیاب‌های ویژه‌ی به صورت پودر تبدیل شدند. برای محاسبه‌ی نسبت مصالح مصرفی در طرح اختلاط، لازم است مشخصات مصالح سنگی -- مانند درصد رطوبت و وزن مخصوص -- تعیین شود. وزن مخصوص در حالت اشباع (S_s) و درصد جذب آب، برای مصالح سنگی درشت (سنگ) براساس

مراجع [۹۸] به نفوذپذیری اشاره شده است که به طور کلی با جایگزینی خرده لاستیک با سنگدانه درشت (سنگ) نفوذپذیری افزایش یافته است.

۴. آزمایش‌ها

به منظور بررسی تأثیر ویژگی‌های مصالح مصرفی (سنگ، ماسه و سیمان) و امکان جایگزینی آنها با لاستیک‌های مستعمل موجود، نمونه‌های آزمایشگاهی مختلفی در این تحقیق طراحی و ساخته شده و پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد مورد آزمایش قرار گرفت.

۱.۴. مشخصات مصالح مصرفی

مصالح سنگی درشت دانه‌ی به کار رفته در ساخت نمونه‌ها از نوع شکسته و با حداکثر اندازه ۲۵ میلی‌متر بوده است. ماسه نیز از نوع شکسته و شسته انتخاب شد. نمودارهای مربوط به دانه بندی سنگ و ماسه که نشان دهنده‌ی وضعیت توزیع دانه‌ها برحسب اندازه است در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. همچنین در این شکل‌ها محدوده‌ی استاندارد (استاندارد ملی ایران - شماره ۳۰۲) با خط چین مشخص شده است. سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ دو و آب نیز از آب قابل شرب استفاده شد، و لاستیک‌های استفاده شده در این آزمایش‌ها به دو صورت مورد استفاده قرار گرفته است:

- لاستیک خرد شده (خرده لاستیک) برای جایگزینی با سنگ مصرفی در بتن معمولی. برای تهیه‌ی این سنگ، تکه‌های بزرگ لاستیک در آزمایشگاه به وسیله‌ی قیچی به تکه‌های کوچک لاستیک (خرده لاستیک) در ابعاد مورد نظر تبدیل شدند، به طوری که دانه بندی آن تقریباً شبیه دانه بندی سنگ شود. در شکل ۳ توزیع اندازه‌ی دانه‌های خرده لاستیک مورد استفاده نیز نشان داده شده است.

مقدار جذب آب براساس ۱۹۹۳: part ۱۲۲: BS ۱۸۸۱ نمونه‌یی از بتن سخت‌شده (۲۸ روزه) به مدت ۳۰ دقیقه در فشار اتمسفر در آب غوطه‌ور شد. سپس با اندازه‌گیری اختلاف جرم در حالت خیس و خشک، مقدار جذب آب اندازه‌گیری شد.

۵. تحلیل نتایج آزمایش‌ها

نتایج اندازه‌گیری مقادیر در آزمایشگاه و تجزیه و تحلیل آنها در ادامه تشریح شده است.

۱.۵. آزمایش مقاومت فشاری

نتایج حاصل از مقاومت فشاری ۷ روزه در نمودار شکل ۴ و مقاومت فشاری ۲۸ روزه در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه دارای پودر لاستیک و خرده لاستیک، در درصد‌های ۵ و ۷٫۵، بیش از نمونه‌ی شاهد است. بررسی روند تغییر مقاومت فشاری در نمونه‌های ۷ روزه (شکل ۴) نشان می‌دهد که:

- در گروه‌های اول و دوم با افزودن لاستیک تا ۷٫۵ درصد به جای شن و سیمان، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت فشاری در گروه اول (جایگزینی با شن) به مراتب بیشتر از گروه دوم (جایگزینی با سیمان) است، به طوری که در جایگزینی ۵ درصد وزنی، مقاومت فشاری گروه‌های اول و دوم به ترتیب ۴۹ و ۱۸ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش داشته است.



شکل ۴. نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه برای گروه‌های اول و دوم.



شکل ۵. نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای گروه‌های اول و دوم.

ASTM C ۱۲۸-۸۸ به ترتیب برابر با ۲٫۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، و ۲٫۴ (درصد) است. این مقادیر در مورد مصالح سنگی ریز (ماسه) براساس ASTM C ۱۲۷-۸۸ برابر با ۲٫۳۷ (گرم بر سانتی‌متر مکعب) و ۲٫۴۶ درصد به دست آمد. این مقادیر برای خرده‌لاستیک‌ها محاسبه نشده است زیرا براساس استانداردهای معتبر لازم است مصالح سنگی در فر با دمای حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گیرند که این امر موجب تغییر مشخصات لاستیک و ذوب شدن آن شد. همچنین لاستیک به دلیل ماهیت آب‌گریزی قابلیت جذب آب را ندارد؛ و نیز با توجه به مقدار بسیار کم جایگزینی آن در بتن، به نظر می‌رسد تعیین این مشخصات با روش‌های پیچیده ضرورتی نداشته باشد.

۲.۴. مشخصات نمونه‌ها

پس از آماده‌سازی مصالح مورد نیاز با مشخصات ذکر شده و تهیه طرح اختلاط بتن به روش انگلیسی (BS)، نمونه‌های آزمایشگاهی در دو گروه ساخته شد. در هر دو گروه نسبت آب به سیمان ۰٫۵ درصد، و مقدار ماسه در همه‌ی نمونه‌ها ثابت است.

گروه اول؛ جایگزینی با شن: در این گروه خرده‌لاستیک در سه درصد وزنی ۵، ۷٫۵ و ۱۰ درصد جایگزین شن شد. در این نمونه‌ها به صورت x درصد جانشینی توافقی (RAX) صورت گرفته و با همین اختصار نامیده شدند. بنابراین مقدار سیمان در این گروه ثابت است.

گروه دوم؛ جایگزینی با سیمان: در این گروه، پودر لاستیک در سه درصد وزنی ۵، ۷٫۵ و ۱۰ جایگزین سیمان شد. این نمونه‌ها به صورت x درصد جانشینی سیمان (RCX) صورت گرفته است، و بنابراین مقدار شن در این گروه ثابت است.

نمونه‌ی شاهد (کنترل) در این تحقیق به صورت نمونه‌ی کنترلی معرفی شده است. نامگذاری نمونه‌های آزمایشگاهی و طرح اختلاط آنها در جدول ۱ آمده است.

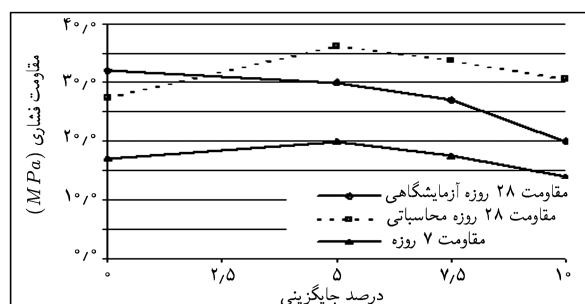
پس از ریختن بتن در قالب‌ها، روی قالب‌ها برای مدت ۲۴ ساعت با گونی مرطوب و روکش نایلونی پوشانده شد. سپس نمونه‌های بتنی از قالب خارج شد و مدت ۲۸ روز طبق شرایط استاندارد (در محیط کاملاً مرطوب) نگهداری شد.

برای انجام مقاومت فشاری، نمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵ سانتی‌متری ساخته و پس از عمل‌آوری در محیط مرطوب، طبق استاندارد ۱۹۹۳: BS ۱۸۸۱: part ۱۱۶ مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش‌های مقاومت کششی با نمونه‌های سیلندری ۱۵×۳ cm، نیز طبق استاندارد ۱۹۹۳: BS ۱۸۸۱: part ۱۱۷ انجام شد.

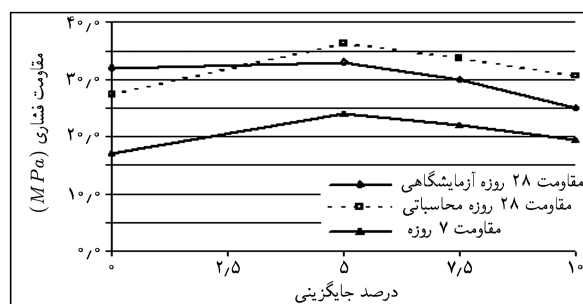
میزان نفوذپذیری طبق استاندارد DIN ۱۰۴۸ آلمان (براساس نفوذ آب تحت فشار روی یک طرف بتن به مدت ۹۶ ساعت) با اندازه‌گیری عمق نفوذ آب در نمونه‌ها بعد از شکست آنها تعیین شد. برای تعیین

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های ساخته شده.

توضیحات	شماره	ماده	وزن مصالح مصرفی (kg/m^3)		نام نمونه	
			لاستیک			
			پودر	خرده		
شاهد	۹۲۷	۸۵۸	۰/۰	۰/۰	۳۸۰	نمونه کنترلی (CS)
جایگزینی ۵ درصد وزنی خرده لاستیک با شن	۸۸۴	۸۵۸	۰/۰	۴۶/۴	۳۸۰	RA۵
جایگزینی ۷٫۵ درصد وزنی خرده لاستیک با شن	۸۶۱	۸۵۸	۰/۰	۶۹/۵	۳۸۰	RA۷٫۵
جایگزینی ۱۰ درصد وزنی خرده لاستیک با شن	۸۳۹	۸۵۸	۰/۰	۹۳	۳۸۰	RA۱۰
جایگزینی ۵ درصد وزنی پودر لاستیک با سیمان	۹۲۷	۸۵۸	۱۹/۰	۰/۰	۳۶۱	RC۵
جایگزینی ۷٫۵ درصد وزنی پودر لاستیک با سیمان	۹۲۷	۸۵۸	۲۸/۵	۰/۰	۳۵۲	RC۷٫۵
جایگزینی ۱۰ درصد وزنی پودر لاستیک با سیمان	۹۲۷	۸۵۸	۳۸/۰	۰/۰	۳۴۲	RC۱۰



شکل ۷. نمایش مقاومت فشاری محاسباتی و آزمایشگاهی (پودر لاستیک جایگزین سیمان).



شکل ۶. نمایش مقاومت محاسباتی و آزمایشگاهی (خرده لاستیک جایگزین شن).

فشاری نمونه‌های آزمایشگاهی را در مقایسه با مقاومت فشاری محاسبه شده از رابطه‌ی ۱ نشان می‌دهد. در حالت اول (جایگزینی با شن) مقادیر واقعی نسبت به مقادیر محاسباتی بدون در نظر گرفتن ضریب اطمینان حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد کم تر است و در صورتی که رابطه‌ی فوق براساس نتایج همین آزمایش در جهت اطمینان کالیبره شود، لازم است تا حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد (متناسب با افزایش لاستیک) کاهش یابد. در این صورت براساس آزمایشات انجام شده در تحقیق حاضر می‌توان رابطه‌ی مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی خرده لاستیک (جایگزینی تا ده درصد وزنی شن یا سیمان) را با تقریب مناسب از رابطه‌ی پیشنهادی ۲ به دست آورد.

$$f_{c(28)} = f_{c(7)} + 1/1 \sqrt{f_{c(7)}} \quad (2)$$

نمودار شکل ۸ مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده، و مقایسه‌ی آنها را با رابطه‌ی ۲ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با تقریب نسبتاً مناسب رابطه پیشنهاد شده در مورد درصد وزنی جایگزینی شن یا جایگزینی سیمان، با نتایج آزمایشگاهی در جهت اطمینان مطابقت دارد. البته لازم به ذکر است که برای تعمیم این نتیجه به عنوان قانون کلی، یا رابطه‌ی کاربردی بایستی با در نظر گرفتن سایر عوامل مؤثر احتمالی (مانند نسبت آب به سیمان، نوع سیمان یا مصالح سنگی، نوع و مقدار لاستیک) آزمایش‌های بیشتری انجام شود.

- بررسی روند تغییر مقاومت فشاری در نمونه‌های ۲۸ روزه (شکل ۶) نشان می‌دهد که روند افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی لاستیک، برای نمونه‌های ۲۸ روزه، نسبت به نمونه‌های ۷ روزه تفاوت زیادی دارد.
- همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود در گروه‌های اول و دوم افزایش لاستیک تا ۵ درصد وزنی، تغییرات چندانی در مقاومت فشاری ایجاد نمی‌کند (حدود ۵ درصد کاهش یا افزایش مقاومت فشاری را به دنبال دارد) و با افزایش درصد جایگزینی، نرخ کاهش مقاومت فشاری زیاد می‌شود.
- آیین‌نامه‌ی بتن ایران (آبا) رابطه‌ی ۱ را برای تخمین مقاومت فشاری ۲۸ روزه، از روی مقاومت فشاری ۷ روز توصیه می‌کند:

$$f_{c(28)} = f_{c(7)} + 2/5 \sqrt{f_{c(7)}} \quad (1)$$

با جایگزین کردن مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌ها در رابطه‌ی ۱، مشاهده می‌شود که در نمونه‌ی کنترلی (شاهد)، مقاومت فشاری ۲۸ روزه محاسباتی، کم‌تر از مقاومت فشاری ۲۸ روزه واقعی است، ولی در مورد سایر بتن‌های حاوی لاستیک این موضوع عکس است. به عبارت دیگر، استفاده از رابطه‌ی ۱ به منظور برآورد مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای بتن حاوی لاستیک صحیح نیست؛ زیرا نتایج آن خلاف جهت اطمینان است. نمودارهای ترسیم شده در شکل‌های ۸ و ۹، مقاومت

از خاصیت آبگریزی برخوردارند و وجود این مواد در بتن، سبب راندن آب به توده‌ی بتن و خمیرسیمان شده و هیدراتاسیون سیمان با سرعت بیشتری انجام می‌شود؛ لذا روند کسب مقاومت فشاری در سنن اولیه زیاد است. در بتن کنترل، سنگدانه‌ها چنین نقشی ندارند و در نتیجه عمل‌آوری با سرعت کم‌تری انجام می‌شود. ولی با افزایش سن بتن، سرعت آبگیری (هیدراتاسیون) بتن حاوی لاستیک کم می‌شود، ولی عمل‌آوری بتن کنترل در حال انجام است. این موضوع در کنار دلایلی که در گروه دوم قرار می‌گیرند سبب کاهش روند کسب مقاومت فشاری بتن حاوی لاستیک در درازمدت می‌شوند.

- کاهش تخلخل و نفوذپذیری بتن؛ ذرات بسیار کوچک لاستیک مانند فیلتر، سبب کاهش تخلخل و پرکردن خلل و فرج، و در نتیجه باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود.

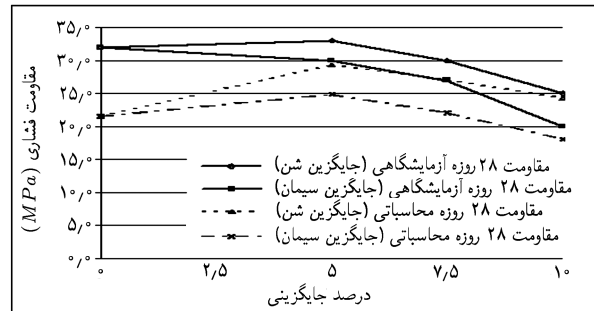
در گروه دوم عواملی قرار می‌گیرند که سبب کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شوند و این عوامل که بیشتر به دلیل تفاوت ویژگی‌های لاستیک و سنگدانه است به شرح زیر است:

- چون ذرات لاستیک خیلی نرم‌تر از خمیر سیمان سخت‌شده، در اطراف سنگدانه‌ها هستند، هنگام بارگذاری، ترک به سرعت از اطراف ذرات لاستیک موجود در مخلوط بتن شروع می‌شود و به سرعت گسترش می‌یابد و در نهایت سبب تسریع در شکست بتن می‌شود.

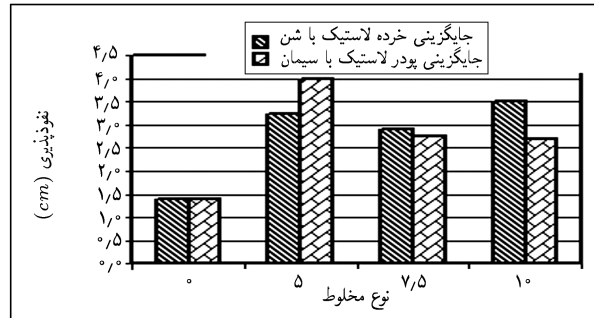
- به علت عدم چسبندگی لازم بین ذرات لاستیک و خمیر سیمان (در مقایسه با خمیر سیمان و سنگدانه) محیط پیوسته و یکپارچه‌یی در برابر بار وارده وجود ندارد و به دلیل ناهمگونی و ناپیوستگی مخلوط بتن، تنش‌های وارده به صورت غیر یکنواخت توزیع شده و ترک‌ها در مرز خمیر سیمان و لاستیک ایجاد می‌شوند.

- از آنجا که در نمونه‌های آزمایشگاهی، لاستیک جایگزین سنگدانه یا سیمان می‌شود لذا از حجم این مواد در بتن می‌کاهد. از طرفی مقاومت فشاری بتن به خواص فیزیکی و مکانیکی این مواد (که نسبت به لاستیک جایگزین برتری قابل توجهی دارند) بستگی دارد. در نتیجه کاهش مقاومت فشاری بتن را به همراه دارد.

- هنگام بتن‌ریزی و ویبره کردن، لاستیک‌ها به سمت سطوح بالایی قالب حرکت می‌کنند، و در نتیجه غلظت آنها در سطوح بالایی بیشتر می‌شود. این امر به علت چگالی کم‌تر لاستیک نسبت به سایر مواد مورد استفاده در بتن و عدم چسبندگی بین لاستیک و توده‌ی بتن است و در گروه اول بیشتر خودنمایی می‌کند. توزیع غیر یکنواخت لاستیک در سطوح بالایی سبب کاهش مقاومت بتن در این قسمت‌ها می‌شود، و لذا شکست نمونه‌ها در تنش‌های کم‌تری رخ می‌دهد. همچنین مقاومت کم‌تر در نمونه‌های گروه دوم (پودر لاستیک جایگزین سیمان) نسبت به نمونه‌های گروه اول (خرده



شکل ۸. مقایسه‌ی مقاومت فشاری براساس رابطه‌ی ۲ و نتایج آزمایشگاهی.



شکل ۹. نفوذپذیری گروه‌های اول و دوم.

بررسی روند تغییرات مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نشان می‌دهد که افزودن مقدار لاستیک در درصد‌های وزنی پائین (حدود ۵ درصد) در مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه تغییر چندانی ایجاد نمی‌کند؛ این در حالی است که افزایش درصد جایگزینی لاستیک (بیش از ۷٫۵ درصد) با کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها همراه است. در بتن حاوی لاستیک، می‌توان عوامل مؤثر بر مقاومت فشاری بتن را به دو گروه کلی تقسیم کرد:

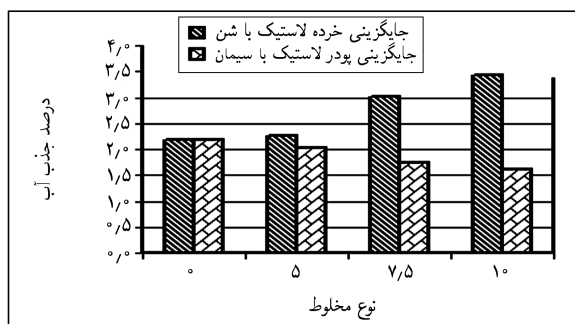
گروه اول سبب افزایش مقاومت فشاری نمونه می‌شوند و گروه دوم در راستای کاهش مقاومت فشاری عمل می‌کنند. روند کسب مقاومت فشاری نمونه‌ها نشان می‌دهد که در سنن اولیه (تا ۷ روز) و درصد‌های پائین جایگزینی لاستیک غلبه با گروه اول است و در نتیجه مقاومت فشاری نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌ی شاهد افزایش می‌یابد. ولی با افزایش سن نمونه‌ها و نیز با افزایش درصد جایگزینی (بیش از ۵ درصد)، گروه دوم غلبه می‌کند و مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. مهم‌ترین عواملی که می‌توانند در سنن اولیه و درصد‌های جایگزینی کم، مقاومت فشاری را افزایش دهد عبارت‌اند از:

- سرعت عمل‌آوری بیشتر در نمونه‌های حاوی لاستیک نسبت به نمونه‌های شاهد.

- بالاتر بودن سرعت عمل‌آوری از آنجا ناشی می‌شود که اغلب اجزای لاستیک (مانند ایزوپرن، پلی‌بوتادین، استیرین، بوتادین و نئوپرن)

جدول ۲. محدوده‌های نفوذپذیری طبق استاندارد DIN ۱۰۴۸.

میزان نفوذپذیری طبق DIN ۱۰۴۸	کم	متوسط	زیاد
عمق نفوذپذیری در ۴ روز (cm)	کم‌تر از ۳	۳-۶	بیشتر از ۶



شکل ۱۰. جذب آب گروه‌های اول و دوم.

بررسی جذب آب و نفوذپذیری در سایر نمونه‌های گروه اول (با درصد جایگزینی ۷٫۵ و ۱۰ درصد) نشان می‌دهد که با افزایش درصد جایگزینی، جذب آب و نفوذپذیری (هر دو) افزایش یافته‌اند. به عبارت دیگر افزایش ترک‌های بین خمیر سیمان و خرده لاسستیک به دلیل خواص آب‌گریزی لاسستیک، مسیرهایی مناسب را برای نفوذ آب درون ماتریس بتن فراهم آورده، به طوری که در جایگزینی ۷٫۵ درصد، نفوذپذیری حدود دو برابر و جذب آب حدود ۳۵ درصد افزایش یافته است. در جایگزینی ۱۰ درصد نیز، نفوذپذیری حدود ۲٫۵ برابر و جذب آب نیز حدود ۵ درصد افزایش داشته است.

برای توجیه نفوذپذیری و جذب آب در نمونه‌های گروه دوم (جایگزینی سیمان با پودر لاسستیک) باید به این موضوع توجه کرد که جایگزینی سیمان با پودر لاسستیک سبب کاهش مقدار سیمان در نمونه و به عبارتی افزایش نسبت آب به سیمان خواهد شد. بدیهی است افزایش مقدار آب نسبت به مواد چسباننده در بتن باعث می‌شود که نفوذپذیری افزایش یابد. اما این نکته حائز اهمیت است که چرا با افزایش درصد جایگزینی سیمان با پودر لاسستیک، نفوذپذیری افزایش، اما جذب آب دائماً کاهش یافته است؟ برای پاسخ به این پرسش لازم است با بررسی دقیق‌تر مفاهیم نفوذپذیری و جذب آب بپردازیم.

نفوذپذیری به معنی وجود خلل و فرج زیاد در یک نمونه نیست، بلکه به معنای «وجود کانال‌ها و مسیرهای ارتباطی بین خلل و فرج‌ها» است که اجازه‌ی نفوذ آب به عمق نمونه را می‌دهد (شکل ۱۱).

وجود پودر لاسستیک در نمونه‌های گروه دوم (RCX) باعث ایجاد مسیرهای ارتباطی بسیار ریز در درون ماتریس بتن شده، به طوری که هنگام قرارگیری آنها در دستگاه نفوذپذیری، فشار زیاد آب باعث نفوذ آب به درون آنها می‌شود. البته به همان دلایلی که قبلاً مطرح شد، افزایش نفوذپذیری در نمونه RC۵ نسبت به دیگر نمونه‌های این گروه

لاستیک جایگزین شن) می‌تواند به علت کاهش سیمان مورد استفاده (به عنوان ماده‌ی چسباننده) باشد.

۲.۵. نفوذپذیری و جذب آب

نفوذپذیری بتن به عنوان مهم‌ترین عامل داخلی مؤثر در دوام بتن است، به طوری که با کاهش نفوذپذیری بسیاری از خصوصیات بتن، از جمله مقاومت در برابر شرایط محیطی (مانند: دوره‌های یخ بنان و ذوب، کاهش خوردگی بتن و فولاد در برابر املاح مهاجم یا اسیدها)، افزایش می‌یابد. محدوده نفوذپذیری زیاد، کم و متوسط مشخص شده در استاندارد DIN ۱۰۴۸ در جدول ۲ آمده است. نتایج آزمایش نفوذپذیری و جذب آب در شکل‌های ۹ و ۱۰ آمده است.

بررسی و مقایسه‌ی نتایج آزمایش نفوذپذیری و نتایج آزمایش مربوط به جذب آب نمونه‌ها نشان می‌دهد که:

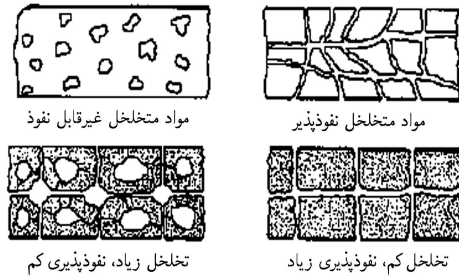
در گروه‌های اول و دوم در نتیجه‌ی افزودن لاسستیک نفوذپذیری افزایش می‌یابد. در گروه اول میزان نفوذپذیری تا ۱۰ درصد نسبت به نمونه‌ی کنترل زیاد می‌شود. نفوذپذیری در گروه اول در محدوده‌ی متوسط، و در گروه دوم در محدوده‌ی کم و متوسط طبق استاندارد DIN ۱۰۴۸ قرار می‌گیرد.

نفوذپذیری و جذب آب در نمونه‌های گروه اول (خرده لاسستیک جایگزین شن) که در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است بیان‌گر رفتار متفاوت و غیرقابل انتظار نمونه‌ها است، به طوری که در ۵ درصد جایگزینی، میزان نفوذپذیری حدود دو برابر شده، اما جذب آب تقریباً ثابت مانده است. دلیل این موضوع، بعد از مشاهده‌ی نمونه‌های شکسته شده بعد از آزمایش مشخص شد. بدین ترتیب که در هنگام ریختن بتن درون قالب‌ها و ویریه کردن آنها، خرده لاسستیک به دلیل چگالی کم‌تر به طرف وجه فوقانی قالب حرکت کرده است. وجود خرده لاسستیک که با خمیر سیمان چسبندگی کم‌تری دارد باعث شده نفوذپذیری و جذب آب در نمونه، به صورت یکنواخت و متقارن توزیع نشود.

شایان ذکر است که هر چند میزان نفوذپذیری آب به دلیل عدم توزیع یکنواخت خرده لاسستیک در ماتریس سیمان افزایش یافته، جذب آب این نمونه‌ها بسیار اندک افزایش یافته است زیرا ترک‌های ریز و درشت در سایر وجه نمونه بسیار کم‌تر بوده و اجازه‌ی ورود آب به درون نمونه را نداده است. برای اثبات دلایل مطرح شده، نفوذپذیری نمونه RA۷٫۵ در مقایسه با RA۱۰ و RA۵ نیز تشریح می‌شود. نفوذپذیری نمونه‌ی RA۷٫۵ نسبت به نمونه‌ی RA۱۰ و RA۵ کاهش یافته است این موضوع نیز به دلیل قرارگیری نمونه‌ی آزمایش از وجه تحتانی در دستگاه آزمایش بوده است. به طوری که با حرکت خرده لاسستیک‌ها به وجه فوقانی، نفوذپذیری وجه تحتانی به دلیل افزایش ریزدانه‌ها در این ناحیه نسبت به دو نمونه‌ی دیگر (RA۱۰ و RA۵) به میزان اندکی کاهش یافته است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق براساس استانداردهای رایج تعداد محدودی نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت، که نتایج به دست آمده فقط براساس این مطالعات آزمایشگاهی است و ممکن است با تغییر شرایط (از جمله ویژگی‌های مصالح، تغییر نسبت اختلاط مواد، نحوه‌ی عمل‌آوری و همچنین استفاده از مواد افزودنی) نتایج تغییر کند. نتایج حاصل از تحقیق حاضر عبارت است از:



شکل ۱۱. ارتباط بین نفوذپذیری و تخلخل.

۱. مقاومت فشاری بتن به اندازه‌ی لاستیک اضافه‌شده و نسبت اضافه‌کردن بستگی دارد. به‌طور کلی با افزایش مقدار لاستیک در بتن مقاومت فشاری آن کاهش می‌یابد. هر چند در جایگزینی ۵ درصد (سنگدانه یا سیمان) تغییر چندانی ایجاد نمی‌شود. بیشترین کاهش در هر دو گروه مربوط به افزودن لاستیک از ۷/۵ تا ۱۰ درصد است (مقدار کاهش حدود ۱۰ تا ۲۳ درصد در حالت جایگزینی با شن، و حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد در حالت جایگزینی با سیمان) است. به عبارتی مقاومت فشاری قابل حمل هنگام جایگزینی خرده لاستیک با شن بهتر از جایگزینی لاستیک پودری با سیمان است.
۲. با افزودن لاستیک به بتن، نفوذپذیری حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ درصد نسبت به نمونه‌ی کنترل افزایش می‌یابد. رفتار نفوذپذیری در دو گروه متفاوت است. در گروه اول نفوذپذیری تقریباً ثابت است و بیشترین مقدار آن مربوط به افزودن ۱۰ درصد لاستیک است که طی آن نفوذپذیری ۱۵٪ نسبت به نمونه‌ی کنترل زیاد می‌شود ولی در گروه دوم با افزایش لاستیک به نسبت‌های ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد، ۱۸۵٪، ۱۰۰٪ و ۹۳٪ نفوذپذیری نسبت به نمونه کنترل افزایش می‌یابد.
۳. بررسی نتایج جذب آب در دو گروه نشان داد که در گروه اول، جذب آب شدیداً افزایش (۱۰۰ درصد بالاتر نسبت به نمونه کنترل) می‌یابد، در حالی که در گروه دوم جذب آب کم‌تر از نمونه‌ی شاهد است.
۴. دلیل افزایش نفوذپذیری و کاهش جذب آب در گروه دوم می‌تواند چنین باشد:

- عدم چسبندگی بین لاستیک و خمیر سیمان، کانال‌های ریز را به وجود می‌آورد که نفوذ آب را در سطح مشترک این دو امکان‌پذیر می‌کند. بنابراین نفوذپذیری نسبت به نمونه‌ی کنترل زیاد می‌شود.
- با توجه به خواص آب‌گریزی لاستیک، با افزایش مقدار لاستیک باید نفوذپذیری زیاد شود. در مورد گروه اول باید گفت که به‌علت درشت‌تر بودن لاستیک مورد استفاده، کانال‌های ایجاد شده برای عبور آب عریض‌تر است، و از طرفی نفوذپذیری با عرض کانال به‌صورت نمایی رابطه دارد. بنابراین حساسیت نفوذپذیری به عرض کانال به‌مراتب بالاتر از خواص آب‌گریزی لاستیک است.

به‌علت قرارگیری نمونه از وجه فوقانی در درون دستگاه آزمایش بوده است و نمونه‌های RC۱۰ و RC۷/۵ از وجه تحتانی درون دستگاه قرار گرفته‌اند. البته چنین تغییری در انجام این آزمون استاندارد تنها به‌دلیل شناخت ویژگی‌های مخلوط‌ها و چگونگی توزیع لاستیک در مخلوط‌ها انجام شده است. همان‌طور که اشاره شد در این نمونه‌ها برخلاف انتظار، افزایش نفوذپذیری با کاهش جذب آب توأم بوده است.

دلیل این موضوع عرض کانال‌ها و مسیر ارتباطی بین خلل و فرج درون ماتریس بتن است. به‌عبارت دقیق‌تر پودر لاستیک پرکننده‌ی خلل و فرج‌های بزرگ درون بتن است و با توجه به ابعاد بسیار ریز آن (در حدود ۳-۵ میکرون) می‌تواند عرض کانال‌ها و مسیرهای ارتباطی و همچنین حجم خلل و فرج بتن را کاهش دهد. این موضوع سبب کاهش جذب آب به درون بتن می‌شود (شکل ۱۱). از طرف دیگر عدم چسبندگی مناسب بین خمیر سیمان و پودر لاستیک به‌دلیل خواص آب‌گریزی لاستیک، سبب ایجاد ترک‌های بسیار ریز در درون بتن می‌شود که این ترک‌ها می‌توانند به‌عنوان مسیری برای نفوذ آب تحت فشار در آزمایش نفوذپذیری محسوب شده و در نتیجه عمق نفوذ آب را افزایش دهند. برای تشریح بیشتر این موضوع، توجه به نمودار ارائه شده در شکل ۱۰ که به مقایسه‌ی جذب آب در نمونه‌های RC و RA می‌پردازد، نشان می‌دهد که در نمونه‌های RA به‌دلیل کاهش سطح جانبی خرده لاستیک در مقایسه با پودر لاستیک، محصورشدگی کامل خرده لاستیک در خمیر سیمان انجام نمی‌شود و ترک‌های درشت و بزرگ‌تری نسبت به نمونه‌های RC ایجاد می‌شود. وجود این ترک‌های عریض سبب می‌شود تا نه‌تنها مسیر عبور آب درون بتن بیشتر باشد بلکه همین مسیرهای عبوری به دلیل بزرگ بودن به‌عنوان خلل و فرج محسوب شده و هنگام غوطه‌وری، نمونه‌ها آب زیادی را جذب کنند. از این رو مهم‌ترین عامل تغییر رفتار نمونه‌های RC و RA در شکل ۱۰، بزرگی عرض کانال‌ها و مسیرهای عبور آب (ترک‌های مجاور خرده لاستیک) در نمونه‌های RA نسبت به RC است. همچنین نفوذپذیری در بتن حاوی لاستیک با عرض کانال رابطه‌ی نمایی داشته و با عریض‌تر شدن عرض کانال‌ها نفوذپذیری به‌شدت افزایش می‌یابد.^[۱۰]

منابع

1. Siddique, R. and Naik, T.R., Properties of concrete containing scrap-tire rubber-an overview, **24** pp. 563-569 (2004).
2. Fattuhi, N.I. and Clark, N.A., Cement-based materials containing tire rubber. *Journal of construction and Building Materials* **10**(4), pp. 229-236 (1996).
3. Eldin, N.N. an, Senouci, A.B., Rubber-tire particles as concrete aggregates. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering* **5**(4), pp. 478-496 (1993).
4. Khatib, Z.K. and Bayomy, F.M., Rubberized portland cement concrete. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering* **11**(3), pp. 206-213 (1999).
5. Topcu, I.B., The properties of rubberized concrete. *Cement and Concrete Research* **25**(2), pp. 304-310 (1995).
6. Segre, N. and Joekes, I., Use of tire rubber particles as addition to cement paste. *Cement and Concrete Research* **30**(9), pp. 1421-1425 (2000).
7. Rostami, H., Lepore, J., Silverstraim, T. and Zundi, I., Use of recycled rubber tires in concrete. In: Dhir, R.K. (Ed.) Proceedings of the International Conference on Concrete, University of Dundee, Scotland, UK, pp. 391-399 (2000).
8. Naik, T.R. and Singh, S.S., Utilization of discarded tires as construction materials for transportation facilities. Report No.CBU-1991-2002, UWM center for By-products Utilization. University Of Wisconsin- Milwaukee, Milwaukee, 16 pp. (1991).
9. Hernandez-Olivares, F., Barluenga, G., Bollati, Witoszed, B. Static and dynamic behavior of recycled tire tubbe-filled concrete. *Cement and Concrete Research* **32**(10), pp. 1587-1596 (2002).
10. Benazzouk, A. and Douzane, O., Qu-eneudec M. Trancport of fluids in cement-rubber composites, *cement and composit* **26**, pp. 21-29 (2004).