فصلنامه‌ی علمی و پژوهشی شریف
زمستان ۱۳۸۶، شماره‌ی چهلم، ص. ۵۱-۵۹

تأثیر جایگزینی سیمان و سنگدانه با لاستیک در مقاومت فشاری و دوام‌بتن‌های متداول

مرتضی خرمی (کارشناس ارشد)
مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن
عطاالله حاجتی مدارایی (استادیار)
دانشکده‌ی فنی، دانشگاه گیلان
چنگیز دهقانیان (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 فشاریِ 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

گسترش صنعت خودروسازی سبب شده است تا وجود لاستیک‌های مستعمل به‌عنوان یکی از آلوده‌کننده‌های زیست‌محیطی در دهه‌های اخیر مورد توجه محققین قرارگیرد. 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 قرارگرفته 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 لاستیکِ مستهلک اتومبیل، هریک به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرارگرفته است.

در ایران آمار دقیقی از لاستیک‌های مستعمل وجود ندارد، اما برآوردهای انجام‌شده نشان می‌دهد که با توجه به تولید حدود ۲۰۰ هزار تن لاستیک درکشور (براساس آمار رسمی ایران در سال ۱۳۸۴) و برآورد تقریبی دوسال عمر مفید برای لاستیک‌ها، مقدار لاستیک مستعمل درکشور سالانه حدود یکصد هزار تن تخمین زده می‌شود. همچنین براساس آمار منتشره از سوی وزارت صنایع ایران، در سال‌های اخیر حدود ۳۰ میلیون تن سیمان درکشور 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 سیمانِ مصرفیِ کشور را با لاستیک جایگزین کرد، نه‌تنها 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، ازجمله 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 قرارگیرد.

در تحقیق حاضر نیز به‌منظور بسط و توسعه‌ی تحقیقات انجام شده‌ی قبلی در جهان با هدف امکان‌سنجی کاربرد لاستیک مستهلک در ساخت بتن درکشور 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 قرارگرفته است. شایان ذکر است که نگارندگان

Archive of SID

www.SID.ir

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 غالبا بر پایه‌ی جایگزینی مصالح سنگی با لاستیک انجام شده است بیشتر با هدف کاربرد لاستیک مستهلک به‌منظور 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 قرارگرفته 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 پرکردن خلل و فرج درون بتن، بخشی از مشکلات ناشی ازکاهش مواد چسباننده را برطرف کند.

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

۲. دسته‌بندی لاستیک مستهلک

معمولاً در اغلب تحقیقات انجام شده لاستیک به ابعاد کوچک‌تری تبدیل می‌شود. به طورکلی دوگروه از لاستیک‌ها در ساخت انواع بتن مورد استفاده قرارگرفته‌اند.[۱-۳]

۱. تایر ریزشده (chip): برای دست‌یابی به لاستیکی با اندازه‌های کوچک‌تر، خردکردن 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 ۰٫۰ 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[۳] حاکی از آن است که بتن حاوی لاستیک چیپ وکرامب کاهنده‌ی مقاومت فشاری وکششی بتن است، به‌طوری که جایگزینی سنگدانه‌های درشت با ذرات لاستیک چیپ، ۸۵٪ از مقاومت فشاری و ۱۵٪ از مقاومت کششی برزیلی (یا دو نیمه‌کردن) راکاهش داد. ولی اگر سنگدانه‌های ریزباکرامب ریزوکوچک جایگزین شوند، مقاومت فشاری معادلِ ۶۵٪ و مقاومت کششی معادل ۵۰٪کاهش می‌یابد. هر دوی این مخلوط‌ها شکست نرم (شکل‌پذیر) داشته و تحت بارگذاری کششی و فشاری توانائی‌شان 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 چیپ (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 به‌دست آمد. آنها سه گروه مخلوط بتن ساختند. درگروه الف لاستیک کرامب، درگروه ب لاستیک چیپ و درگروه ج حجم مساوی لاستیک‌های کرامب و چیپ در درصدهای مختلف به‌ترتیب جایگزین سنگدانه‌های ریز، درشت و مخلوط ریز و درشت شد.

از جمله نتایج به‌دست آمده، کاهش کارایی بتن (برحسب کاهش در مقادیر اسلامپ) بود. همچنین نتایج حاصله از مقاومت فشاری (که به‌صورت 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.[۳و۴]

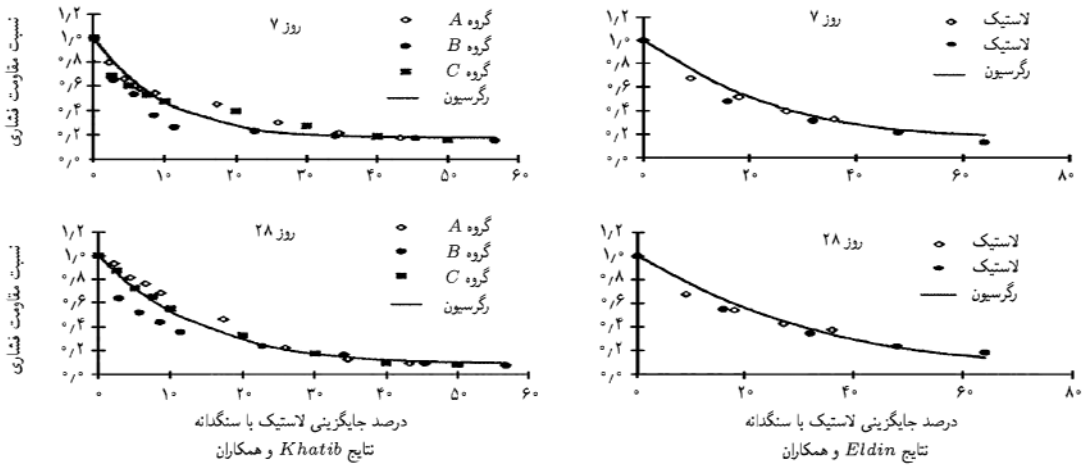
همان طورکه مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار لاستیک، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد. مثلاً در جایگزین‌کردن ۱۰۰٪ لاستیک به جای سنگدانه، کاهش مقاومت فشاری برابر ۹۰٪ رویت شد. همچنین کاهش مقاومت در بتن حاوی لاستیک درشت دانه چیپ بیشتر از بتن حاوی لاستیک خردشده یا کرامب است.

دیگر نتایج به دست آمده[۵] همچنین حاکی از آن است که اضافه کردن چیپ‌های لاستیکی درشت در بتن، بیشتر از اضافه‌کردن لاستیک کرامب ریز، مقاومت فشاری وکششی را پائین می‌آورد. ولی نتایج حاصله در منابع[۶و۷] خلاف این ادعا را بیان می‌کنند.

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

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱. نمودار کاهش مقاومت فشاری بر اثر افزایش درصد لاستیک.[۳و۴]

مراجع[۸و۹] به نفوذپذیری اشاره شده است که به‌طورکلی با جایگزینی خرده لاستیک با سنگدانه درشت (شن) نفوذپذیری افزایش یافته است.

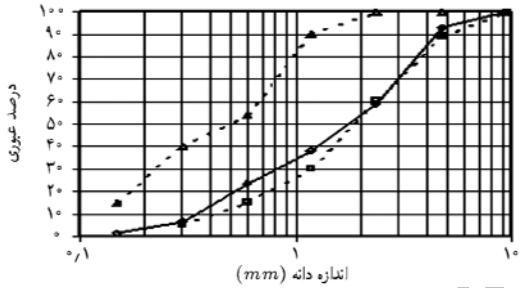
۴. آزمایش‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر ویژگی‌های مصالح مصرفی (شن، 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.

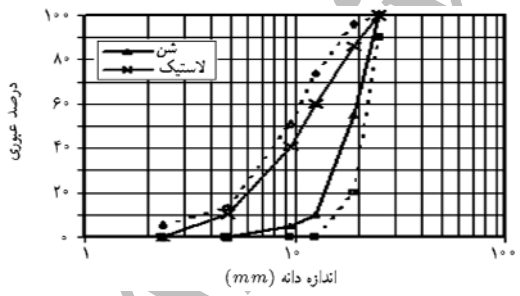
۱.۴. مشخصات مصالح مصرفی

مصالح سنگی درشت‌دانه‌ی به‌کار 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 دانه‌بندی شن و ماسه که نشان‌دهنده‌ی وضعیت توزیع دانه‌ها برحسب اندازه است در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. همچنین در این شکل‌ها محدوده‌ی استاندارد (استاندارد ملی ایران ـ 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 شن مصرفی در بتن معمولی. برای تهیه‌ی این شن، تکه‌های بزرگ لاستیک در آزمایشگاه به‌وسیله‌ی قیچی به تکه‌های کوچک لاستیک (خرده‌لاستیک) در ابعاد مورد نظر تبدیل شدند، به‌طوری که دانه‌بندی آن تقریباً شبیه دانه‌بندی شن شود. در شکل ۳ توزیع اندازه‌ی دانه‌های خرده لاستیک مورد استفاده نیز نشان داده شده است.



شکل ۲. دانه‌بندی مصالح سنگی ریز (ماسه) و نمایش محدوده‌ی استاندارد ۳۰۲ ایران.



شکل ۳. دانه‌بندی مصالح سنگی درشت (شن) و لاستیک و نمایش محدوده‌ی استاندارد ۳۰۲ ایران.

- پودرلاستیک (لاستیک پودری) با اندازه‌هایی در حدود μm ۵۰۰ تا ۴۰۰ جهت جایگزینی آن با سیمان برای تهیه آن خرده لاستیک‌ها در آسیاب‌های ویژه‌یی به‌صورت پودر تبدیل شدند.

برای محاسبه‌ی نسبت مصالح مصرفی در طرح اختلاط، لازم است مشخصات مصالح سنگی ــ مانند درصد رطوبت و وزن مخصوص ــ تعیین شود. وزن مخصوص در حالت اشباع (Ss) و درصد جذب آب، برای مصالح سنگی درشت (شن) براساس

Archive of SID
www.SID.ir

ASTM C ۱۲۸-۸۸ به‌ترتیب برابر با ۲٫۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، و ۲٫۰۴ (درصد) است. این مقادیر در مورد مصالح سنگی ریز (ماسه) براساس ASTM C۱۲۷-۸۸ 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 قرارگیرند که این امر موجب تغییر مشخصات لاستیک و ذوب شدن آن شد. همچنین لاستیک به‌دلیل ماهیت آب گریزی 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 تهیه‌ی 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 به‌صورت 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 به‌صورت x درصد جانشینی سیمان (RCx) صورت گرفته است، و بنابراین مقدار شن در این گروه ثابت است.

نمونه‌ی شاهد (کنترل) در این تحقیق به‌صورت 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 BS۱۸۸۱: part ۱۱۶: مورد آزمایش قرارگرفتند. آزمایش‌های مقاومت کششی با نمونه‌های سیلندری $۳۰ \times ۱۵\ cm$، نیز طبق استاندارد ۱۹۹۳: part ۱۱۷ BS ۱۸۸۱ 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 مقدار جذب آب براساس ۱۹۹۳ :part ۱۲۲ : BS ۱۸۸۱ نمونه‌یی از بتن سخت‌شده (۲۸ روزه) به‌مدت 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

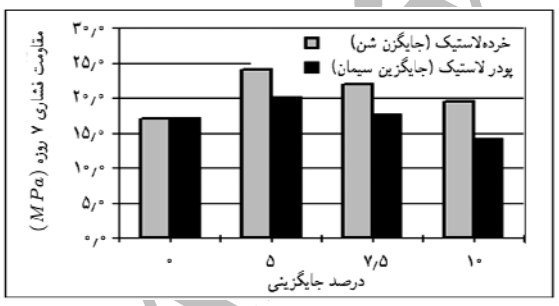
نتایج اندازه‌گیری مقادیر در آزمایشگاه و تجزیه و تحلیل آنها در ادامه تشریح شده است.

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. همان‌طورکه 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:

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



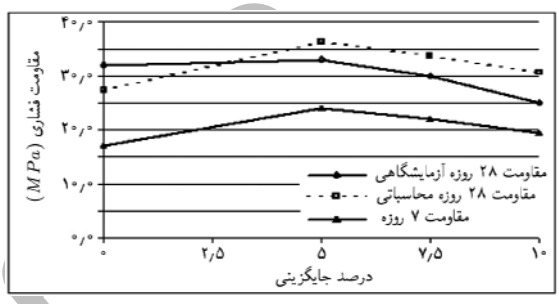
شکل ۴. نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه برای گروه‌های اول و دوم.

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

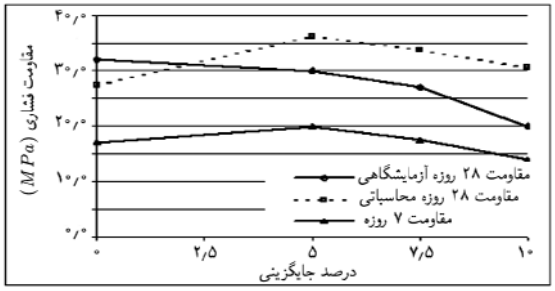
Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های ساخته شده.

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



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



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

- بررسی روند تغییر مقاومت فشاری در نمونه‌های ۲۸روزه (شکل ۶) نشان می‌دهد که روند افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی لاستیک، برای نمونه‌های ۲۸ روزه، نسبت به نمونه‌های ۷روزه تفاوت زیادی دارد.
- همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود در گروه‌های اول و دوم افزایش لاستیک تا ۵درصد 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 ۲۸روز، از روی مقاومت فشاری ۷ روز توصیه می‌کند:

$$f_{c(۲۸)} = f_{c(۷)} + ۲/۵\sqrt{f_{c(۷)}} \qquad (۱)$$

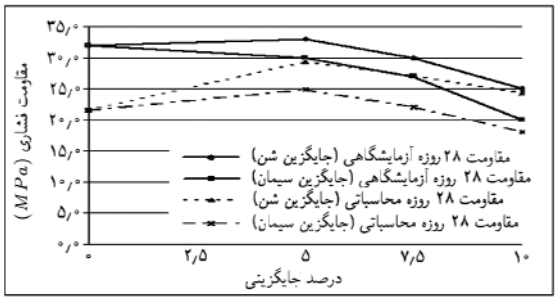
با جایگزین کردن مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌ها در رابطه‌ی ۱، مشاهده می‌شود که در نمونه‌ی کنترلی (شاهد)، مقاومت فشاری ۲۸روزه محاسباتی، کم‌تر از مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی واقعی است، ولی در مورد سایر بتن‌های حاوی لاستیک این موضوع عکس است. به‌عبارت دیگر، استفاده از رابطه‌ی ۱ به‌منظور برآورد مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای بتن حاوی لاستیک صحیح نیست؛ زیرا نتایج آن خلاف جهت اطمینان است. نمودارهای ترسیم شده در شکل‌های ۸ و ۹، مقاومت 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 نظرگرفتن ضریب اطمینان حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد کم‌تر 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.

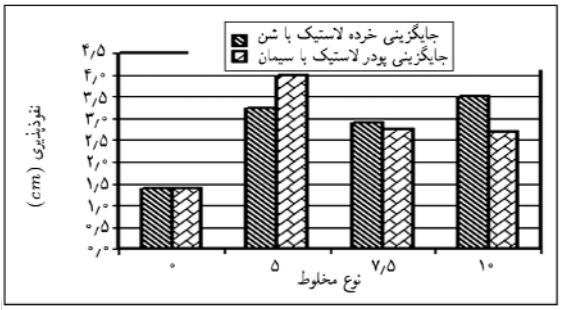
$$f_{c(۲۸)} = f_{c(۷)} + ۱/۱\sqrt{f_{c(۷)}} \qquad (۲)$$

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 درمورد 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 به‌عنوان قانون کلی، یا رابطه‌ی کاربردی بایستی با در نظرگرفتن سایر عوامل مؤثر احتمالی (مانند نسبت آب به سیمان، نوع سیمان یا مصالح سنگی، نوع و مقدار لاستیک) آزمایش‌های بیشتری انجام شود.

Archive of SID
www.SID.ir



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 ۵درصد) در مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه تغییر چندان مهمی 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 سنین 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 ۵درصد)، گروه دوم غلبه می‌کند و مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. مهم‌ترین عواملی که می‌توانند در سنین 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 ایزوپرین، پلی‌بوتادین، استیرین، بوتادین و نئوفرین) 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 سنین 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 درکنار دلایلی که درگروه دوم قرار می‌گیرند سبب کاهش روند کسب مقاومت فشاری بتن حاوی لاستیک در درازمدت می‌شوند.
- کاهش تخلخل و نفوذپذیری بتن؛ ذرات بسیارکوچک لاستیک مانند فیلتر، سبب کاهش تخلخل و پرکردن خلل و فرج، و در نتیجه باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود.

درگروه دوم عواملی قرار می‌گیرند که سبب کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شوند و این عوامل که بیشتر به‌دلیل 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 به‌سرعت از اطراف ذرات لاستیک موجود در مخلوط بتن شروع می‌شود و به‌سرعت گسترش می‌یابد و در نهایت سبب تسریع در شکست بتن می‌شود.
- به‌علت 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 به‌دلیل ناهمگونی و ناپیوستگی مخلوط بتن، تنش‌های وارده به‌صورت 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 ویبره‌کردن، لاستیک‌ها به‌سمت سطوح بالایی قالب حرکت می‌کنند، و در نتیجه غلظت آنها در سطوح بالایی بیشتر می‌شود. این امر به‌علت چگالی کم‌تر لاستیک نسبت به سایر مواد مورد استفاده در بتن و عدم چسبندگی بین لاستیک و توده‌ی بتن است و درگروه اول بیشتر خودنمایی می‌کند. توزیع غیریکنواخت 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

Archive of SID
www.SID.ir

لاستیک جایگزین شن) می‌تواند به‌علت کاهش سیمان مورد استفاده (به‌عنوان ماده‌ی چسباننده) باشد.

۲.۵. نفوذپذیری و جذب آب

نفوذپذیری بتن به‌عنوان مهم‌ترین عامل داخلی مؤثر در دوام بتن است، به‌طوری که با کاهش نفوذپذیری بسیاری از خصوصیات بتن، از جمله مقاومت در برابر شرایط محیطی (مانند: دوره‌های یخ بندان و ذوب، کاهش‌خوردگی 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:

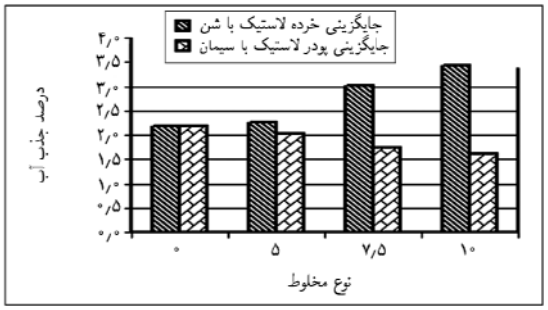
درگروه‌های اول و دوم درنتیجه‌ی افزودن لاستیک نفوذپذیری افزایش می‌یابد. درگروه اول میزان نفوذپذیری تا ۱۰۰ درصد نسبت به نمونه‌ی کنترل زیاد می‌شود. نفوذپذیری درگروه اول در محدوده‌ی متوسط، و درگروه دوم در محدوده‌ی کم و متوسط طبق استاندارد DIN۱۰۴۸ قرار می‌گیرد.

نفوذپذیری و جذب آب در نمونه‌های گروه اول (خرده‌لاستیک جایگزین شن) که در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است بیان‌گر رفتار متفاوت و غیرقابل انتظار نمونه‌ها است، به‌طوری 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 ویبره‌کردن آنها، خرده‌لاستیک به‌دلیل چگالی کم‌تر به طرف وجه فوقانی قالب حرکت کرده است. وجود خرده لاستیک که با خمیر سیمان چسبندگی کم‌تری دارد باعث شده نفوذپذیری و جذب آب در نمونه، به‌صورت یکنواخت و متقارن توزیع نشود.

شایان ذکر است که هرچند میزان نفوذپذیری آب به‌دلیل عدم توزیع یکنواخت خرده لاستیک در ماتریس سیمان افزایش یافته، جذب آب این نمونه‌ها بسیار اندک افزایش یافته است زیرا ترک‌های ریز و درشت در سایر وجوه 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 به‌دلیل قرارگیری نمونه‌ی آزمایش از وجه تحتانی در دستگاه آزمایش بوده است. به‌طوری‌که با حرکت خرده لاستیک‌ها به وجه فوقانی، نفوذپذیری وجه‌تحتانی به دلیل افزایش ریزدانه‌ها در این ناحیه نسبت به دو نمونه‌ی دیگر (RA۱۰ و RA۵) به‌میزان اندکی کاهش یافته است.

جدول ۲. محدوده‌های نفوذپذیری طبق استاندارد DIN۱۰۴۸.

میزان نفوذپذیری طبق DIN۱۰۴۸	کم	متوسط	زیاد
عمق نفوذپذیری در ۴ روز (cm)	کم‌تر از ۳	۶-۳	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. به‌عبارت دیگر افزایش ترک‌های بین خمیر سیمان و خرده لاستیک به‌دلیل خواص آب‌گریزی لاستیک، مسیرهایی مناسب را برای نفوذ آب درون ماتریس بتن فراهم آورده، به‌طوری 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 ۵۰ درصد افزایش داشته است.

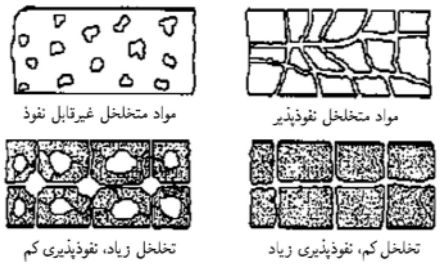
برای توجیه نفوذپذیری و جذب آب در نمونه‌های گروه دوم (جایگزینی سیمان با پودر لاستیک) باید به این موضوع توجه کرد که جایگزینی سیمان با پودر لاستیک سبب کاهش مقدار سیمان در نمونه و به‌عبارتی افزایش نسبت آب به سیمان خواهد شد. بدیهی است افزایش مقدار آب نسبت به مواد چسباننده در بتن باعث می‌شود که نفوذپذیری افزایش یابد. اما این نکته حائز اهمیت است که چرا با افزایش درصد جایگزینی سیمان با پودر لاستیک، 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 به‌معنی وجود خلل و فرج زیاد در یک نمونه نیست، بلکه به‌معنای «وجود کانال‌ها و مسیرهای ارتباطی بین خلل و فرج‌ها» است که اجازه‌ی نفوذ آب به عمق نمونه را می‌دهد (شکل ۱۱).

وجود پودر لاستیک در نمونه‌های گروه دوم (RCX) باعث ایجاد مسیرهای ارتباطی بسیار ریز در درون ماتریس بتن شده، به‌طوری 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

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱۱. ارتباط بین نفوذپذیری و تخلخل.

به‌علت قرارگیری نمونه از وجه فوقانی در درون دستگاه آزمایش بوده است و نمونه‌های RC۷/۵ و RC۱۰ 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. همان‌طورکه 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]

نتیجه‌گیری

در این تحقیق براساس استانداردهای رایج تعداد محدودی نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شد و مورد آزمایش قرارگرفت، 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:

۱. مقاومت فشاری بتن به اندازه‌ی لاستیک اضافه‌شده و نسبت اضافه‌کردن بستگی دارد. به‌طورکلی 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 دوگروه 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. به‌عبارتی 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 دوگروه متفاوت است. درگروه اول نفوذپذیری تقریباً ثابت است و بیشترین مقدار آن مربوط به افزودن ۱۰ درصد لاستیک است که طی آن نفوذپذیری ۱۵۰٪ نسبت به نمونه‌ی کنترل زیاد می‌شود ولی درگروه 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 دوگروه نشان داد که درگروه اول، جذب آب شدیداً افزایش (۱۰۰ درصد و بالاتر نسبت به نمونه کنترل) می‌یابد، در حالی که درگروه دوم جذب آب کم‌تر از نمونه‌ی شاهد است.

۴. دلیل افزایش نفوذپذیری و کاهش جذب آب درگروه 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.

Archive of SID
www.SID.ir

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 Buiding 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 Reseaarch* **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 constrution 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 Concreter 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).

Archive of SID

www.SID.ir