ارزیابی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن ساخته شده با سنگدانه‌ی بازیافتی بتنی در برابر پوسته‌شدگی

میلاد عقیلی لطف (دانشجوی کارشناسی ارشد)

امیرمحمد رمضانپور* (استادیار)

مسعود پلاسی (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شهریه، زمستان ۱۳۹۸ (دوره‌ی ۲ - ۳۵، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۳۱-۳۶)

در نوشتار حاضر، کاربرد توأمان شن و ماسه‌ی بازیافتی بتنی در ساخت رویه‌های بتنی بررسی شده است. برای ارزیابی رویه‌های بتنی ساخته شده با شن و ماسه‌ی بازیافتی بتنی، شن بازیافتی بتنی در نسبت‌های ۳۰ و ۵۰ درصد، جایگزین شن طبیعی شد. سپس در طرح‌های با ۳۰ و ۵۰ درصد شن بازیافتی بتنی، ۲۰ و ۴۰ درصد ماسه‌ی بازیافتی نیز جایگزین ماسه‌ی طبیعی شد. مجموعاً ۷ طرح اختلاط، کلیت فاز مطالعاتی ذکر شده را در بر می‌گیرد. برای ارزیابی نمونه‌های بتنی، مشخصه‌های: درصد جذب آب، چگالی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و دوام در برابر پوسته‌شدگی تعیین شدند. در خصوص ارزیابی دوام بتن در برابر پوسته‌شدگی، دو استاندارد ۶۷۲ C ASTM و ۴۱۲ R MTO LS استفاده شدند و نتایج نشان داد که ماسه‌ی بازیافتی بتنی، تأثیر بسیار بیشتری نسبت به شن بازیافتی بتنی در کاهش مقاومت‌های مکانیکی و دوام دارد. همچنین مشخص شد که ارزیابی دوام بتن در برابر پوسته‌شدگی با روش استاندارد ۴۱۲ R MTO LS انطباق بهتری با واقعیت دارد.

واژگان کلیدی: شن بازیافتی بتنی، ماسه‌ی بازیافتی بتنی، مقاومت‌های مکانیکی، دوام در برابر پوسته‌شدگی.

۱. مقدمه

اولیه و ب) ملات سیمان هیدراته‌ی چسبیده به سطح سنگدانه (های) طبیعی اولیه.

ملات سیمان و نوع بتن مادر منشأ خواص نامطلوب سنگدانه‌ی بازیافتی، شامل: چگالی پایین، جذب آب بالا، عملکرد مکانیکی و دوام ضعیف هستند، که تأثیر منفی در کیفیت سازه‌ی ساخته شده با سنگدانه‌ی بازیافتی دارند و به طور مشخصی در پارامترهای دوامی و مقاومتی بتن تأثیر گذارند.^[۱] سنگدانه‌های بازیافتی بتنی بسیار غیر یکنواخت، متخلخل و آمیخته با مقادیر زیادی ناخالصی هستند. لذا کاربرد سنگدانه‌های بازیافتی بتنی در صنعت ساخت و ساز با چالش‌های متعددی همراه است. همچنین مدل کردن و پیش‌بینی نتایج مشخصه‌های سازه‌ی ساخته شده با سنگدانه‌ی بازیافتی دشوار است؛ اگر چه شناخت بهتر مشخصات سنگدانه‌های بازیافتی، اطمینان لازم را برای استفاده از آنها در ساخت و سازه‌های جدید افزایش می‌دهد.

سنگدانه‌ی بازیافتی بتنی بیشترین کاربرد را در صنعت ساختمان و به خصوص تولید بتن دارد و تاکنون مطالعات گسترده‌ی بر روی کاربرد آنها در بتن به عمل آمده است. در مجموع می‌توان گفت که بتن ساخته شده با سنگدانه‌ی بازیافتی بتنی

امروزه تولید سنگدانه‌های بازیافتی به طور چشمگیری رو به افزایش است، که عموماً از زباله‌های مستحکم صنعتی، مانند: سرباره‌ی کوره‌های آهن‌گدازی، شیشه، پلاستیک، لاستیک تایرهای فرسوده و قطعات بتنی تشکیل می‌شوند. اما عمده‌ی آنها غالباً از خردایش قطعات بتنی تشکیل شده‌اند. ترکیب مصالح اخیر، که به سنگدانه‌های بازیافتی بتنی (RCA)^۱ شناخته می‌شوند، به گونه‌ی است که حدوداً بیش از ۸۵٪ وزنی آنها را نخاله‌های بتنی تشکیل می‌دهد و ناخالصی‌هایی، مانند: قطعات آجر، سرامیک، گچ متبلور شده، شیشه و چوب نیز در درصدهای جزئی در ساختار آنها یافت می‌شود.^[۲] در حال حاضر، استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی بتنی به عنوان راه‌حلی عملی برای کاهش معضلات زیست‌محیطی ناشی از استخراج و استفاده‌ی بی‌رویه‌ی مصالح سنگدانه‌ی طبیعی و همچنین معضل کمبود مراکز دفن، امری رایج است. به طور کلی سنگدانه‌ی بازیافتی بتنی از دو قسمت اصلی تشکیل شده است: الف) سنگدانه (های) طبیعی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۷/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱۲/۲۱، پذیرش ۱۳۹۷/۲/۱۵.

DOI:10.24200/J30.2018.5042.2194

m.aghili@ut.ac.ir
ramezani@ut.ac.ir
mpalas@ut.ac.ir

(بتن باز یافتی) به مراتب مقاومت مکانیکی و دوام کمتری نسبت به بتن معمولی دارد.^[۹-۴] این مقدار کاهش در مقاومت مکانیکی و دوام، رابطه‌ی مستقیمی با کیفیت سنگدانه‌ی باز یافتی، درصد جایگزینی سنگدانه‌ی طبیعی با سنگدانه‌ی باز یافتی بتنی، مشخصات بتن اولیه و مقدار ملات سیمان هیدراته‌ی چسبیده به سطح سنگدانه (های) طبیعی اولیه دارد.^[۷۲-۱۰]

از نقطه نظر کاربرد نیز سنگدانه‌های باز یافتی بتنی متناسب با اندازه‌ی ذرات به دو گروه شن باز یافتی بتنی (اندازه‌ی ذرات بزرگ‌تر از 4.75 (mm)) و ماسه‌ی باز یافتی بتنی (اندازه‌ی ذرات بین 4.75 (mm) و 0.075 (mm)) تقسیم‌بندی می‌شوند. استفاده از شن باز یافتی بتنی نسبت به ماسه‌ی باز یافتی، کاربرد بسیار بیشتری دارد. ماسه‌ی باز یافتی بتنی در مقایسه با شن باز یافتی، به مراتب خواص نامطلوب‌تری، مانند درصد جذب آب بالاتر، مقاومت مکانیکی کمتر و درصد ملات سیمان هیدراته شده‌ی بیشتر دارد. مشخصات ذکر شده، کاربرد ماسه‌ی باز یافتی بتنی در تولید بتن را با محدودیت‌های جدی روبه‌رو کرده است؛^[۱۱-۱۷] به طوری که در بسیاری از موارد، استفاده از ماسه‌ی باز یافتی در کاربردهای با درجه‌ی اهمیت کمتر، مانند رویه‌های بتنی و ملات بنایی توصیه شده است.^[۱۸-۲۱] در این بین یکی از موضوعات مورد توجه در زمینه‌ی کاربرد سنگدانه‌های باز یافتی بتنی، کاربرد توأمان شن و ماسه‌ی باز یافتی بتنی در رویه‌های بتنی است. از دهه‌ی گذشته تاکنون، استفاده از رویه‌های بتنی ساخته شده با سنگدانه‌ی باز یافتی بتنی در بسیاری از مناطق دنیا رواج گسترده‌ی داشته است.^[۲۲، ۱۸]

یکی از مسائل چالش برانگیز در زمینه‌ی رویه‌های بتنی، دوام بتن در برابر پوسته‌شدگی است. روسازی بتنی ممکن است در مناطق پربارش و سردسیر واقع شود، که این موضوع بروز چرخه‌های ذوب و یخبندان را در پی خواهد داشت. از سوی دیگر، در عملیات حفظ ایمنی راه‌ها در دوره‌ی یخبندان، استفاده از مخلوط نمک و ماسه رواج فراوانی دارد. حضور محلول حاوی نمک در چرخه‌های ذوب و یخبندان منجر به تشدید خرابی در رویه‌ی بتنی می‌شود. این خرابی‌ها عموماً به صورت: (الف) ترک‌های D شکل، (ب) پوسته‌شدگی سطحی و (ج) بیرون پریدگی یا اصطلاحاً پکیدگی^۲ رخ می‌دهد.^[۲۳] این خرابی‌ها به شدت در سطح سرویس راه (PSI)^۳ تأثیر منفی می‌گذارد و دوره‌ی عمر راه را به شدت کاهش می‌دهد.

از سوی دیگر، سنگدانه‌های باز یافتی بتنی به سه دلیل اصلی، دوام قابل قبولی در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان ندارند، که این دلایل عبارت‌اند از: (الف) وجود ملات سیمان هیدراته شده در ساختار سنگدانه‌ی باز یافتی بتنی؛ (ب) وجود مواد و اجزاء سست در سطح سنگدانه‌های باز یافتی بتنی و (ج) سطح بسیار متخلخل سنگدانه‌ی باز یافتی بتنی.^[۲۴] ملات سیمان هیدراته شده، تخلخل بسیار بالا و همچنین مقاومت مکانیکی بسیار کمتری نسبت به سنگدانه‌ی طبیعی دارد. لذا هنگامی که سنگدانه‌های باز یافتی بتنی در معرض اعمال چرخه‌های ذوب و یخبندان قرار می‌گیرند، ملات سیمانی بعد از اعمال چند چرخه به طور کامل متلاشی می‌شود.^[۲۵] اگرچه انتظار می‌رود با توجه به عملکرد دوامی بسیار ضعیف سنگدانه‌های باز یافتی بتنی در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان متوالی، دوام بتن باز یافتی نیز در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان و پوسته‌شدگی کمتر از دوام بتن معمولی باشد، اما در زمینه‌ی ذکر شده، پراکندگی نتایج مأخوذه بسیار گسترده است^[۲۴، ۲۶-۲۸] و تاکنون اظهار نظر قطعی در این زمینه ارائه نشده است. در عمل، دوام بتن در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان و پوسته‌شدگی به پارامترهای متعددی، از جمله: مقاومت فشاری بتن، غلظت و نوع محلول نمک استفاده شده، نسبت آب به سیمان، استفاده یا عدم استفاده از مواد جایگزین سیمان، نوع و دانه‌بندی سنگدانه‌ی مصرفی و به‌عنوان مهم‌ترین عامل به استفاده از افزودنی‌های هوازا در بتن وابسته است.^[۲۹] در بین موارد اشاره شده،

هوازایی بتن به عنوان اصلی‌ترین پارامتر در بهبود دوام در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان و پوسته‌شدگی یاد می‌شود. توپکو و سنگل (۲۰۰۴)،^[۲۷] در پژوهش خود بتن معمولی و بتن ساخته شده با شن باز یافتی بتنی با مقاومت هدف ۱۶ و ۲۰ MPa را به مدت ۸ چرخه در معرض چرخه‌های ذوب و یخبندان قرار دادند. سپس رفتار مکانیکی بتن‌های مورد آزمون را سنجیدند و افت قابل ملاحظه‌ی در عملکرد مکانیکی (مقاومت فشاری و خمشی) بتن باز یافتی مشاهده کردند. ناگاتاکا و آیدا (۲۰۰۱)^[۲۸]، نیز دوام کمتری برای بتن ساخته شده با شن باز یافتی بتنی نسبت به بتن معمولی در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان مشاهده کردند. اگرچه عملکرد دوامی بتن باز یافتی قابل قبول گزارش شد. مدول کشسانی دینامیکی بتن باز یافتی بعد از گذراندن ۳۰۰ چرخه‌ی ذوب و یخبندان بیش از ۷۰٪ گزارش شد.

ارزیابی دوام بتن در برابر پوسته‌شدگی به روش‌های مختلفی سنجیده می‌شود. در بین استانداردهای موجود دو روش مندرج در استانداردهای ASTM C ۶۷۲^[۳۰] و MTO LS-۴۱۲ R ۱۷^[۳۱]، جامعیت بیشتری دارند. استانداردهای ذکر شده دوام سطوح افقی بتن را در برابر پوسته‌شدگی بعد از اعمال ۵۰ چرخه‌ی ذوب و یخبندان می‌سنجند، اما روش‌های مشروحه در استانداردهای اخیر، تفاوت‌های آشکاری با یکدیگر دارند و ممکن است به نتایج یکسانی منجر نشوند. در نوشتار حاضر، با توجه به اهمیت موضوع دو نوآوری در نظر گرفته شده است: اولاً، با توجه به سهم قابل ملاحظه‌ی ماسه‌ی باز یافتی بتنی در فرایند تولید سنگدانه‌ی باز یافتی، کاربرد توأمان شن و ماسه‌ی باز یافتی در رویه‌ی بتنی بررسی شده است. در بخش حاضر، در کنار ارزیابی دوام در برابر پوسته‌شدگی، جذب آب و چگالی بتن سخت شده، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی طرح‌های بتنی نیز سنجیده شده است. نوآوری دوم نیز به مقایسه‌ی استانداردهای ASTM C ۶۷۲ و R ۱۷ MTO LS-۴۱۲ مربوط می‌شود، که با هدف ارزیابی دقیق‌تر رویه‌های بتنی در برابر پوسته‌شدگی بررسی شده است.

۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

۱.۲. مواد و مصالح

در پژوهش حاضر، یک نوع شن طبیعی شکسته و یک نوع ماسه‌ی طبیعی رودخانه‌یی استفاده شده‌اند، که از معدن صحرای شن واقع در جاده‌ی مخصوص کرج تهیه شدند. سنگدانه‌های باز یافتی بتنی (شن و ماسه) نیز از خردایش نمونه‌های بتنی $15 \times 15 \times 15\text{ cm}$ تولید شدند. نمونه‌های بتنی اشاره شده از پروژه‌ی عمرانی شرکت «ایران مال» واقع در اطراف دریاچه‌ی چیتگر تهیه شدند و بعد از گذشت

جدول ۱. مشخصات بتن اولیه‌ی سنگدانه‌های باز یافتی بتنی.

مشخصه	سنگدانه‌ی باز یافتی بتنی
W/C	۰/۳۴
سیمان (kg/m^3)	۳۹۰
میکروسیلیس (kg/m^3)	۳۰
آب (kg/m^3)	۱۳۲/۶
سنگدانه $5/9 - 19\text{ mm}$ (kg/m^3)	۲۵۳
سنگدانه $4/75 - 12\text{ mm}$ (kg/m^3)	۱۶۰
سنگدانه $6 - 12\text{ mm}$ (kg/m^3)	۱۱۹۷
پودر سنگ (kg/m^3)	۱۶۰

جدول ۲. خصوصیات فنی سنگدانه‌های مصرفی.

مشخصه	جذب آب (%)	چگالی (Ton/m^3)	سایش لوس آنجلس (%)
ماسه‌ی طبیعی	۳٫۴۱	۲٫۵۱	-
ماسه‌ی بازیافتی بتنی	۱۰٫۳	۲٫۲۷	-
شن طبیعی	۲٫۷۰	۲٫۶۲	۱۵٫۹۳
شن بازیافتی بتنی	۸٫۷۰	۲٫۳۰	۲۹٫۲۵

در پژوهش حاضر، سیمان پرتلند تیپ II استفاده و از کارخانه‌ی سیمان تهران در پاکت‌های ۵۰ کیلوگرمی تهیه شده است. در جدول ۳، نتایج حاصل از آزمایش XRF سیمان و سنگدانه‌های بازیافتی بتنی ارائه شده است.

۲.۲. طرح‌های اختلاط

برای ارزیابی رویه‌های بتنی ساخته شده با شن و ماسه‌ی بازیافتی بتنی، شن طبیعی در نسبت‌های جایگزینی ۳۰ و ۵۰ درصد با شن بازیافتی بتنی جایگزین شد (به ترتیب طرح‌های RCAC-۳۰ و RCAC-۵۰). سپس در طرح‌های دارای ۳۰ و ۵۰ درصد شن بازیافتی بتنی، ۲۰ و ۴۰ درصد از ماسه‌ی طبیعی نیز با ماسه‌ی بازیافتی جایگزین شده است (طرح‌های با ۲۰٪ ماسه‌ی بازیافتی بتنی به ترتیب با کدهای $RC\&FAC - ۳۰\&۲۰$ و $RC\&FAC - ۵۰\&۲۰$ مشخص شده‌اند. طرح‌های با ۴۰٪ ماسه‌ی بازیافتی بتنی نیز به ترتیب با کدهای $RC\&FAC - ۳۰\&۴۰$ و $RC\&FAC - ۵۰\&۴۰$ مشخص شده‌اند). در جدول ۴، مشخصات طرح‌های بتنی ساخته شده ارائه شده است. مجموعاً، ۷ طرح اختلاط، کلیت فاز پژوهشی ذکر شده را در بر می‌گیرد. مقاومت فشاری هدف MPa ۴۰ در سن ۲۸ روزه تعریف شد. در ادامه، با ساخت طرح‌های آزمایشی برای بتن شاهد، مقادیر بهینه‌ی عیار سیمان مصرفی kg/m^3 ۳۵۰ و نسبت آب به سیمان، ۰٫۵ به دست آمد. برای تأمین روانی mm 10 ± 8 ، یک نوع فوق روان‌کننده بر پایه‌ی پلی کربوکسیلیک اتر^۴، در مقادیر مختلف استفاده شده است. اختلاط بتن به دلیل درصد جذب آب بالای سنگدانه‌های بازیافتی بتنی (۸۰٪) با اصلاح روش طرح مخلوط ASTM ۱۹۲ C^[۳۲] و به صورت پیش اشباع‌سازی^[۳۳] صورت گرفت. در مطالعات صورت گرفته بر روی ناحیه‌ی انتقال سطحی^۵ در بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌ی بازیافتی مشاهده شد که استفاده از سنگدانه‌ی بازیافتی بتنی اشباع با سطح خشک می‌تواند منجر به ضعف عملکردی در ناحیه‌ی انتقال شود.^[۳۴] از سوی دیگر، کاربرد سنگدانه‌های بازیافتی بتنی کاملاً خشک نیز به دلیل جذب سریع آب آزاد در بتن، منجر به افت شدید کارایی می‌شود.^[۳۵] به همین دلیل، در پژوهش حاضر سنگدانه‌های بازیافتی بتنی با درصد رطوبت ۸۰ الی ۹۰ درصد استفاده شدند. به همین منظور، سنگدانه‌های بازیافتی بتنی ۶ ساعت قبل از اختلاط با استفاده از آب مورد نیاز برای اختلاط، اشباع و سپس در حین اختلاط، آب باقی‌مانده به اجزاء اختلاط اضافه شد. ۲۴ ساعت بعد از ساخت نیز نمونه‌ها از قالب خارج و در حوضچه‌های آب - آهک تا سن انجام آزمایش در شرایط استاندارد (دمای محیط 25 ± 3 درجه‌ی سانتی‌گراد (C°)) عمل‌آوری شدند. در شکل ۲، فرایند اختلاط اجزاء بتن بازیافتی مشاهده می‌شود.

۳.۲. طراحی آزمایش‌ها

برای ارزیابی عملکرد نمونه‌های بتنی، آزمایش‌های مختلفی بر روی بتن تازه و سخت شده انجام شده است. آزمایش تعیین چگالی و درصد جذب آب مطابق با استاندارد

شکل ۱. دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی.

جدول ۳. نتایج حاصل از آزمایش XRF سیمان و سنگدانه‌ی بازیافتی بتنی مورد استفاده.

ترکیب شیمیایی (%)	سیمان	سنگ‌دانه‌ی بازیافتی بتنی
SiO_2 (%)	۲۷٫۳۰	۲۷٫۵۵
Al_2O_3 (%)	۴٫۶۰	۵٫۶۹
Fe_2O_3 (%)	۲٫۷۰	۳٫۰۵
CaO (%)	۴۶٫۷۰	۲۶٫۷۹
MgO (%)	۳٫۵۰	۲٫۰۰
SO_2 (%)	۲٫۰۴	۰٫۷۶
Na_2O (%)	۰٫۳۴	۱٫۴۲
K_2O (%)	۰٫۵۲	۱٫۱۹
Equivalent alkali (%)	۰٫۶۸	-
LOI (%)	۴٫۸۴	-

سن ۹۰ روز، به مصالح سنگدانه‌ی با قطر اسمی $25mm$ تبدیل شدند. سپس با استفاده از الک معیار $4.75mm$ ، سنگدانه‌های بازیافتی بتنی به شن و ماسه تقسیم‌بندی شدند. در جدول ۱، مشخصات بتن اولیه‌ی سنگدانه‌های بازیافتی بتنی و در جدول ۲، مشخصات فنی سنگدانه‌های مصرفی ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، شن و ماسه‌ی بازیافتی بتنی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی، درصد جذب آب بسیار بیشتری دارند. به طوری که شن بازیافتی بتنی حدوداً ۶٪ جذب آب بزرگ‌تری نسبت به شن طبیعی و ماسه‌ی بازیافتی بتنی نیز ۶٫۸۹٪ جذب آب بزرگ‌تری نسبت به ماسه‌ی طبیعی دارند. همچنین نتایج آزمایش سایش لوس آنجلس نشان می‌دهد که شن بازیافتی بتنی نسبت به شن طبیعی، به مراتب کیفیت و مقاومت مکانیکی کمتری دارد. در شکل ۱، نیز دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی مشاهده می‌شود.

جدول ۴. مشخصات طرح اختلاط بتن‌های بازیافتی.

عنوان طرح	سیمان (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	W/b	ماسه‌ی طبیعی (kg/m^3)	ماسه‌ی بازیافتی بتنی (kg/m^3)	شن طبیعی (kg/m^3)	شن بازیافتی بتنی (kg/m^3)	فوق روان‌کننده (gr/m^3)	روانی بتن cm
NC	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۹۸۰	-	۸۰۰	۰	۹۵۰	۸
RCAC - ۳۰	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۹۸۰	-	۵۶۰	۲۴۰	۱۲۵۰	۷/۵
RCAC - ۵۰	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۹۸۰	-	۴۰۰	۴۰۰	۱۱۸۰	۸
RC&FAC - ۳۰ & ۲۰	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۷۸۴	۱۹۶	۵۶۰	۲۴۰	۱۲۴۰	۷/۵
RC&FAC - ۵۰ & ۲۰	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۷۸۴	۱۹۶	۴۰۰	۴۰۰	۱۲۱۰	۸
RC&FAC - ۳۰ & ۴۰	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۵۸۸	۳۹۲	۵۶۰	۲۴۰	۱۲۶۰	۸
RC&FAC - ۵۰ & ۴۰	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۵۸۸	۳۹۲	۴۰۰	۴۰۰	۱۲۷۵	۸/۵

۹۰/۰ است، که به عبارت دیگر ۲ برابر سطح مورد آزمون در استاندارد ASTM (کمینه‌ی مساحت سطح m^2 ۰/۴۵) است. تفاوت دیگر دو استاندارد ذکر شده در نوع و غلظت محلول نمک مصرفی است؛ در استاندارد ASTM، محلول ۴٪ کلسیم کلراید و در استاندارد LS محلول ۳٪ سدیم کلراید توصیه شده است. همچنین نمودار دما - زمان دو استاندارد مذکور در پژوهش حاضر یکسان در نظر گرفته شد و برای هر دو روش، نمونه‌های بتنی در سن ۵۶ روز آزمایش شدند.

شکل ۲. فرایند اختلاط اجزاء بتن بازیافتی.

۳. نتایج و بررسی

در بخش حاضر، میانگین نتایج اخذ شده‌ی حاصل از آزمایش‌ها: تعیین درصد جذب آب، چگالی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی در جدول ۵ و نتایج اخذ شده حاصل از آزمایش‌های دوام در برابر پوسه‌شدگی با هر دو روش ASTM و LS در جدول ۶ ارائه شده است. در ادامه، نتایج هر یک از آزمایش‌ها تجزیه و تحلیل شده است.

۳.۱. نتایج آزمایش چگالی و جذب آب

نتایج حاصل از آزمایش‌های چگالی و درصد جذب آب در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، مجموعاً با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه‌ی طبیعی با سنگدانه‌ی بازیافتی بتنی (شن + ماسه)، درصد جذب آب افزایش می‌یابد. کاربرد ۳۰ و ۵۰ درصد شن بازیافتی بتنی به ترتیب موجب افزایش ۱۰ و ۱۸ درصد، در میزان جذب آب شده است. اما با بررسی دقیق‌تر نتایج مشاهده می‌شود که تأثیر ماسه‌ی بازیافتی در روند افزایش درصد جذب آب بتن بازیافتی به مراتب بسیار بیشتر از شن بازیافتی است. به طوری که در طرح $RC\&FAC - ۳۰\&۴۰$ ، مقدار جذب آب ۴۴٪ نسبت به طرح NC و ۳۱٪ نسبت به طرح $RCAC - ۳۰$ افزایش داشته است. در طرح $RC\&FAC - ۵۰\&۴۰$ نیز درصد جذب آب ۵۳٪ نسبت به طرح NC و ۳۰٪ نسبت به طرح $RCAC - ۵۰$ افزایش داشته است. دلیل اصلی این موضوع را می‌توان در درصد جذب آب بالاتر ماسه‌ی بازیافتی (۱/۰/۳٪) نسبت به شن بازیافتی (۸/۷٪) جستجو کرد.

در حالت کلی باید به این موضوع اشاره کرد که درصد جذب آب بالا، یک ویژگی منفی برای بتن به خصوص بتن روسازی به شمار می‌رود، که نشان‌دهنده‌ی

ASTM C۶۴۲^[۲۷]، بر روی ۳ نمونه‌ی مکعبی $15 \times 15 \times 15\text{ cm}$ در سن ۵۶ روزه انجام شد. آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد EN ۱۲۳۹۰-۳^[۲۸] BS. بر روی ۳ نمونه‌ی مکعبی $15 \times 15 \times 15\text{ cm}$ در سن‌های ۷ و ۲۸ روزه انجام شده است. آزمایش مقاومت کششی نیز مطابق با روش دو نیم شدن (برزیلی) و با استفاده از استاندارد ASTM C۴۹۶^[۲۹]، بر روی ۳ نمونه‌ی استوانه‌یی با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ cm در سن ۲۸ روزه انجام شد. مقاومت خمشی نیز مطابق با استاندارد ASTM C۲۹۳^[۳۰]، به صورت ۳ نقطه‌یی بر روی ۲ نمونه‌ی مکعبی $15 \times 15 \times 60\text{ cm}$ و در سن ۲۸ روزه تعیین شد. اما در خصوص تعیین دوام در برابر پوسه‌شدگی نیز استانداردهای ASTM C ۶۷۲ و MTO ۴۱۲ R ۱۷ LS- استفاده شدند. ارزیابی نتایج نیز به دو صورت کیفی و کمی صورت پذیرفت. همچنین ارزیابی کیفی سطح در معرض ذوب و یخبندان با نسبت دادن یک عدد بین ۰ تا ۵ انجام شد، که در ارزیابی چشمی، مقیاس ۰ به سطح فاقد پوسه‌شدگی (بهترین عملکرد دوامی) و مقیاس ۵ به سطح کاملاً پوسه شده (ضعیف‌ترین عملکرد دوامی) اطلاق می‌شود. همچنین به منظور قیاس کمی بین نتایج در کنار قیاس کیفی، از یک روش کمیتی به منظور ارزیابی دوام در برابر پوسه‌شدگی در دو استاندارد استفاده شده است، که در آن بعد از اتمام هر ۵ چرخه، کل ذرات پوسه‌شده‌ی سطح از طریق شستشو جمع‌آوری و سپس در گرم‌خانه خشک می‌شدند. سپس با تقسیم وزن مواد جدا شده‌ی مذکور از سطح تقسیم بر مساحت کل سطح افقی، معیار کمی بر حسب kg/m^2 محاسبه می‌شد. مطابق با استاندارد LS، نمونه‌یی که مقدار کل پوسه‌شدگی آن بعد از اتمام ۵۰ چرخه‌ی ذوب و یخبندان کمتر از 0.8 kg/m^2 باشد، عملکرد قابل قبولی در برابر پوسه‌شدگی دارد. همچنین ابعاد نمونه‌های استفاده شده در روش LS، $10 \times 10 \times 30\text{ cm}$ (کمینه‌ی مساحت سطح $0.9 \times 0.9\text{ m}^2$)

جدول ۵. نتایج حاصل از انجام آزمایش های بتن تازه و سخت شده (مقاومت های مکانیکی) در فاز سوم مطالعاتی.

عنوان طرح	درصد کل سنگدانه باز یافتی (شن + ماسه)	جذب آب %	چگالی (Ton/m^3)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت فشاری (نسبت به طرح شاهد (%))	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت خمشی (MPa)
				۲۸ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۲۸ روزه
NC	۰	۳/۷۷	۲/۴۳	۳۳/۳	۴۰/۱	۱۰۰	۷/۳۲
RCAC - ۳°	۱۳/۵	۴/۱۵	۲/۳۷	۲۷/۲	۳۵/۷	۸۹	۶/۴۴
RCAC - ۵°	۲۲/۵	۴/۴۲	۲/۳۰	۲۶/۴	۳۳/۹	۸۵	۶/۲۷
RC&FAC - ۳°&۲°	۲۴/۵	۵/۰۴	۲/۳۳	۲۵/۵	۳۱/۴	۷۸	۶/۱۱
RC&FAC - ۵°&۲°	۳۳/۵	۵/۲۸	۲/۲۷	۲۵/۹	۳۰/۹	۷۷	۵/۹۱
RC&FAC - ۳°&۴°	۳۳/۵	۵/۴۳	۲/۲۹	۲۳/۴	۲۸/۶	۷۱	۶/۰۴
RC&FAC - ۵°&۴°	۴۴/۵	۵/۷۵	۲/۲۱	۲۰/۱	۲۶/۲	۶۵	۶/۶۵

جدول ۶. نتایج حاصل از انجام آزمایش های دوام در برابر پوسته شدگی در فاز سوم مطالعاتی.

عنوان طرح	درصد کل سنگ دانه باز یافتی (شن + ماسه)	روش $ASTM$ عامل پوسته شدگی (۵ تا ۰)	روش LS عامل پوسته شدگی (۵ تا ۰)
		کل پوسته شده (kg/m^2)	عامل پوسته شده (kg/m^2)
NC	۰	۱/۴۶	۲
RCAC - ۳°	۱۳/۵	۲/۱۲	۲
RCAC - ۵°	۲۲/۵	۳/۹۶	۲
RC&FAC - ۳°&۲°	۲۴/۵	۳/۱۸	۳
RC&FAC - ۵°&۲°	۳۳/۵	۴/۸۵	۴
RC&FAC - ۳°&۴°	۳۳/۵	۴/۸۱	۵
RC&FAC - ۵°&۴°	۴۴/۵	۵/۸۲	۵

شکل ۳. مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح های باز یافتی بتنی نسبت به طرح شاهد.

با افزایش کلی نسبت جایگزینی سنگدانه های طبیعی (شن + ماسه) با سنگدانه های باز یافتی، مقاومت های فشاری ۷ و ۲۸ روزه کاهش یافته است (این تذکر لازم است که تفاوت معناداری بین مقاومت ۷ روزه طرح های $RC&FAC - ۳°&۲°$ و $RC&FAC - ۵°&۲°$ مشاهده نشده است). همانند نتایج درصد جذب آب مشاهده می شود که ماسه های باز یافتی، تأثیر بسیار بیشتری در کاهش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نسبت به شن باز یافتی دارد. به طوری که در نسبت های جایگزینی ۳۰

بالا بودن تخلخل کلی بتن و در نتیجه احتمالاً دوام کمتر آن در شرایط محیطی نسبت به بتن معمولی است.

در خصوص نتایج چگالی نیز باید متذکر شد که چگالی بتن های باز یافتی نسبت به بتن شاهد کمتر است، اما در بین خود بتن های باز یافتی، نظم مشخصی مشاهده نمی شود. در این بین، طرح $RC&FAC - ۴°&۵°$ کمترین چگالی را دارد، به طوری که چگالی آن حدوداً ۴٪ نسبت به طرح $RCAC - ۵°$ و حدوداً ۹٪ نسبت به طرح NC کمتر است. دلایل اصلی کمتر بودن چگالی بتن های باز یافتی نسبت به بتن معمولی، تخلخل ملات سیمانی در سنگدانه های باز یافتی است، که منجر به کاهش چگالی سنگدانه های باز یافتی و در نتیجه کاهش چگالی بتن باز یافتی می شود. با توجه به کاهش ۹ درصدی در چگالی طرح $RC&FAC - ۴°&۵°$ که مجموعاً ۴۴/۵٪ از سنگدانه های طبیعی آن با سنگدانه های باز یافتی جایگزین شده است، در حین تولید یک تن بتن، حدوداً ۴۱ لیتر افزایش حجم مشاهده شده است.

۲.۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری در سن ۷ و ۲۸ روزه در شکل ۳ و جدول ۵ ارائه شده است. در جدول ۵، مقاومت های ۷ و ۲۸ روزه طرح های بتن باز یافتی نسبت به مقاومت ۷ و ۲۸ روزه بتن شاهد (NC) ارائه شده است، که مطابق آن

شکل ۴. مقاومت فشاری طرح‌های بازپافتی بتنی متناسب با مقدار افزایش در ماسه‌ی بازپافتی بتنی.

شکل ۵. ارتباط بین نسبت جایگزینی سنگدانه‌ی طبیعی با سنگدانه‌ی بازپافتی و مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه.

شکل ۶. مقاومت کششی ۲۸ روزه طرح‌های بازپافتی بتنی نسبت به طرح شاهد.

(+ ماسه) و ملات سیمانی جدید جستجو کرد. از سوی دیگر، با مقایسه‌ی طرح‌های RCAC-۳۰ و RCAC-۵۰ باید بیان کرد که طرح RCAC-۳۰، به میزان ۶٪ دارای مقاومت کششی بیشتری نسبت به طرح RCAC-۵۰ است؛ بدین معنا که با افزایش نسبت جایگزینی شن طبیعی با شن بازپافتی بتنی از ۳۰ به ۵۰ درصد، افت قابل ملاحظه‌ی در مقاومت کششی ایجاد نمی‌شود. همچنین تحلیل آماری نشان می‌دهد که تفاوت معناداری بین مقاومت کششی طرح‌های RC&FAC - ۳۰&۴۰ و

و ۵۰ درصد شن طبیعی با شن بازپافتی (طرح‌های RCAC-۳۰ و RCAC-۵۰)، مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ترتیب ۱۱ و ۱۵ درصد نسبت به طرح شاهد کاهش داشته است. اما در طرح RC&FAC - ۳۰&۴۰، کاهش ذکر شده نسبت به طرح RCAC-۳۰، ۲۱٪ و نسبت به طرح NC، ۲۹٪ بوده است. همچنین در طرح RC&FAC - ۵۰&۴۰، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به طرح RCAC-۵۰، ۲۳٪ و نسبت به طرح NC، ۳۵٪ کاهش داشته است. به عبارت دیگر، جایگزینی ۴۰٪ از ماسه‌ی طبیعی با ماسه‌ی بازپافتی بتنی، مجموعاً ۸٪ (۲۹-۲۱=۸) کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه در بتن ساخته شده با ۳۰٪ شن بازپافتی بتنی و مجموعاً ۱۲٪ (۳۵-۲۳=۱۲) نیز کاهش در مقاومت فشاری ۲۸ روزه در بتن ساخته شده با ۵۰٪ شن بازپافتی ایجاد کرده است. همان طور که مشاهده می‌شود، اثر منفی جایگزینی ماسه‌ی بازپافتی به جای ماسه‌ی طبیعی در بتن بازپافتی با کاهش درصد جایگزینی شن طبیعی با شن بازپافتی کمتر شده است. این در حالی است که در نسبت جایگزینی ۲۰٪ ماسه‌ی طبیعی با ماسه‌ی بازپافتی بتنی، تفاوت معناداری بین مقاومت‌های فشاری ۷ و ۲۸ روزه طرح‌های RC&FAC - ۳۰&۲۰ و RC&FAC - ۵۰&۲۰ مشاهده نشده است. به عبارت دیگر، می‌توان بیان کرد که تا نسبت جایگزینی ۲۰٪ ماسه‌ی طبیعی با ماسه‌ی بازپافتی بتنی، با افزایش نسبت جایگزینی شن طبیعی با شن بازپافتی تا ۵۰٪، تغییرات معناداری در مقاومت فشاری مشاهده نشده است. این مسئله در حالی رخ می‌دهد که در طرح RC&FAC - ۵۰&۲۰ نسبت به طرح RC&FAC - ۳۰&۲۰، مجموعاً ۹٪ سنگدانه‌ی بازپافتی (شن + ماسه) بیشتری مصرف شده است. در خصوص تأثیر مدت زمان عمل‌آوری نیز می‌توان عنوان کرد که در نسبت جایگزینی ۲۰ و ۴۰ درصد ماسه‌ی طبیعی با ماسه‌ی بازپافتی بتنی، مقدار کسب مقاومت از سن ۷ تا ۲۸ روزه نسبت به طرح‌های بازپافتی فاقد ماسه‌ی بازپافتی بتنی (طرح‌های RCAC-۳۰ و RCAC-۵۰) کمتر است. در شکل ۴، نتایج مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه طرح‌های با ۳۰ و ۵۰ درصد شن بازپافتی بتنی متناسب با مقدار ماسه‌ی بازپافتی بتنی مشاهده می‌شود. در شکل ۵ نیز روند کاهش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه متناسب با مقدار افزایش درصد سنگدانه‌ی بازپافتی (شن + ماسه) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، دو پارامتر مذکور، با یکدیگر رابطه‌ی خطی دارند.

۳.۳. نتایج آزمایش مقاومت کششی

نتایج حاصل از مقاومت کششی ۲۸ روزه در شکل ۶ و جدول ۵ ارائه شده است. همان گونه که انتظار می‌رفت، با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه‌ی طبیعی (شن + ماسه) با سنگدانه‌ی بازپافتی بتنی، مقاومت کششی کاهش یافته است. به طوری که در نسبت‌های جایگزینی ۳۰ و ۵۰ درصد شن طبیعی با شن بازپافتی بتنی، مقاومت کششی ۱۵ و ۲۰ درصد نسبت به طرح شاهد (NC) کاهش یافته است. اما باید قید کرد که ماسه‌ی بازپافتی بتنی نسبت به شن بازپافتی بتنی، مقاومت کششی را بیشتر کاهش می‌دهد. به طوری که در طرح RC&FAC - ۵۰&۴۰، مقاومت کششی حدوداً ۱۶٪ نسبت به طرح RC&FAC - ۵۰&۲۰ و حدوداً ۲۵٪ نسبت به طرح RCAC-۵۰ و نیز ۴۰٪ نسبت به طرح NC کاهش داشته است. به عبارت دیگر، جایگزینی ۴۰٪ از ماسه‌ی طبیعی با ماسه‌ی بازپافتی بتنی (که مجموعاً ۲۲٪ از کل سنگدانه را شامل می‌شود)، به میزان ۲۰٪ (۴۰-۲۰=۲۰) منجر به کاهش مقاومت کششی در طرح RCAC-۵۰ نسبت به طرح NC شده است. علت اصلی این روند کاهش می‌توان در برقراری اتصال‌های ضعیف بین سنگدانه‌های بازپافتی (شن

شکل ۸. نتایج دوام در برابر پوسته‌شدگی در استاندارد.

باربری طراحی روسازی، دسترسی به مصالح اولیه، ضرورت‌های زیست‌محیطی - اقتصادی و همچنین نسبت جایگزینی سنگدانه‌ی طبیعی با سنگدانه‌ی بازیافتی بتنی دارد.

۵.۳. نتایج آزمایش دوام در برابر پوسته‌شدگی

نتایج حاصل از آزمایش دوام در برابر پوسته‌شدگی در جدول ۶ و شکل ۸ ارائه شده است، که در آن برای هر دو روش ASTM و LS، دو معیار برای نمونه‌های بتنی ارائه شده است: الف) عامل پوسته‌شدگی (از مقدار ۵ تا ۱۰) و ب) مقدار کل مقادیر پوسته‌شدگی در پایان چرخه‌ی پنجاهم. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج هر دو روش گویای آن است که با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه‌ی طبیعی (شن + ماسه) با سنگدانه‌ی بازیافتی بتنی، دوام در برابر پوسته‌شدگی کاهش می‌یابد. در روش ASTM طرح $RC\&FAC - 50\&40$ به ترتیب $1/20$ ، $1/47$ و $3/97$ برابر مقدار پوسته‌شدگی بیشتری نسبت به طرح‌های $RC\&FAC - 50\&20$ ، $RCAC - 50$ و NC دارد. مقادیر مذکور برای استاندارد LS به ترتیب برابر با $1/79$ ، $3/50$ و $4/30$ است. در استاندارد LS، طرح‌های $RC\&FAC - 30\&40$ و $RC\&FAC - 50\&40$ بعد از گذشت ۳۰ چرخه، دچار شدیدترین وضعیت پوسته‌شدگی سطح شدند و در حقیقت مقادیر مندرج در جدول ۶، کمترین مقادیر کل پوسته‌شدگی برای دو طرح مذکور است. علت این امر نیز عدم امکان جمع‌آوری همه‌ی ذرات پوسته‌شده از سطح نمونه‌های بتنی است. این در حالی است که در استاندارد ASTM، هیچ‌یک از طرح‌ها به شدیدترین وضعیت پوسته‌شدگی نرسیدند و بعد از اتمام ۵۰ چرخه، سطح نمونه‌ها همچنان شرایط خوبی داشتند (به غیر از نمونه‌ی $RC\&FAC - 50\&40$ ، که عامل پوسته‌شدگی ۴ بود).

شکل ۹. مقاومت خمشی ۲۸ روزه‌ی طرح‌های بازیافتی بتنی نسبت به طرح شاهد.

$RC\&FAC - 50\&20$ (به ترتیب با $35/5$ و $33/5$ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی (شن + ماسه)) وجود ندارد. به عبارت دیگر، در نسبت جایگزینی حدوداً 35% سنگدانه‌ی طبیعی (شن و ماسه) با سنگدانه‌ی بازیافتی، ترکیب سنگدانه‌های ریز و درشت $X\%$ ماسه و $(1-X)\%$ شن تأثیری در مقاومت کششی ندارد.

۴.۳. نتایج آزمایش مقاومت خمشی

نتایج حاصل از مقاومت خمشی ۲۸ روزه در شکل ۷ و جدول ۵ نشان داده شده است. همانند سایر نتایج مقاومت مکانیکی، در آزمایش مقاومت خمشی نیز با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه‌ی طبیعی (شن + ماسه) با سنگدانه‌ی بازیافتی بتنی، مقاومت خمشی کاهش یافته است. هنگام اعمال فشار به نمونه‌ی خمشی، ترک‌ها در داخل نمونه رشد می‌کنند و در نهایت منجر به شکست نمونه می‌شوند. در این مرحله، سنگدانه نقش حیاتی ایفا می‌کند و می‌تواند از رشد ترک‌های داخلی جلوگیری کند و قدرت باربری را افزایش دهد. اما در بتن‌های بازیافتی به علت مقاومت مکانیکی و کیفیت کمتر سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی، عملاً ترک‌ها سریع‌تر منتشر می‌شوند و قدرت باربری کاهش می‌یابد.

تحلیل آماری نتایج نشان می‌دهد که تفاوت معناداری بین مقاومت خمشی طرح‌های $RC\&FAC - 30\&20$ و $RC\&FAC - 30\&40$ وجود ندارد. به عبارت دیگر، در نسبت جایگزینی 30% شن طبیعی با شن بازیافتی، جایگزینی ماسه‌ی طبیعی با ماسه‌ی بازیافتی تا 40% تأثیر قابل ملاحظه‌ی در مقاومت خمشی نخواهد داشت. همچنین در نسبت جایگزینی 50% شن طبیعی با شن بازیافتی بتنی، مقاومت خمشی حدوداً 4% با افزایش نسبت جایگزینی ماسه‌ی طبیعی با ماسه‌ی بازیافتی بتنی از 20 به 40 درصد کاهش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که در کاربردهای عملی و با اعمال ضریب اطمینان قابل قبول، استفاده از 40% ماسه‌ی بازیافتی به جای 20% ماسه‌ی بازیافتی، تأثیر چندانی در مقاومت خمشی ایجاد نخواهد کرد. در خصوص روند کاهش به علت کاربرد ماسه‌ی بازیافتی در بتن معمولی و بتن بازیافتی نیز باید اشاره کرد که طرح $RC\&FAC - 50\&40$ به میزان 4% ، مقاومت خمشی کمتری نسبت به طرح $RC\&FAC - 50\&20$ و $RCAC - 50$ نسبت به طرح NC دارد. همچنین باید قید کرد که در فرایند طراحی رویه‌ی بتنی، مقاومت خمشی اصلی‌ترین پارامتر تعیین‌کننده‌ی ضخامت رویه است. لذا با کاهش مقاومت خمشی، ضخامت رویه افزایش خواهد یافت و نتیجتاً حجم بتن مصرفی نیز بیشتر می‌شود. با در نظر گرفتن شرایط حاضر، کاربرد سنگدانه‌های بازیافتی در بتن رویه، بستگی به عوامل متعددی مانند: درجه‌ی اهمیت روسازی، حجم ترافیک عبوری، قدرت

در خصوص طرح‌های با شن بازیافتی بتنی نیز باید ذکر کرد که طرح‌های RCAC-۳۰ و RCAC-۵۰ در روش ASTM نسبت به طرح NC دچار خرابی‌هایی شدند، اما همچنان عملکرد قابل قبول داشتند (تغییر عامل پوسته‌شدگی از ۱ به ۲ و ۳). در استاندارد LS برخلاف استاندارد ASTM، مقدار کل پوسته‌شدگی برای طرح‌های NC و RCAC-۳۰ افزایش و برای طرح RCAC-۵۰ کاهش یافت. اگرچه بعد از بازرسی چشمی مشخص شد که تقریباً هر ۳ طرح، خرابی‌های نسبتاً یکسانی داشتند. در مجموع با توجه به نتایج هر دو آزمایش می‌توان بیان کرد که کاربرد شن بازیافتی بتنی تا ۵۰٪ نسبت جایگزینی، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش دوام در برابر پوسته‌شدگی نخواهد گذاشت. اما با بررسی نتایج نمونه‌های با ماسه‌ی بازیافتی به وضوح مشخص است که کاربرد ماسه‌ی بازیافتی بتنی به شدت در دوام نمونه‌های بتنی در برابر پوسته‌شدگی تأثیر منفی داشته است (به غیر از طرح ۲۰ و ۳۰ - RC&FAC، که نسبت به طرح RCAC-۵۰ در روش ASTM عملکرد بهتری داشته است، اگرچه عامل سطح برای هر دو نمونه یکسان بوده است). علت اصلی این موضوع را می‌توان در افزایش تخلخل نمونه‌های بتنی به دلیل درصد جذب آب و تخلخل زیاد ماسه‌ی بازیافتی نسبت به سنگدانه‌ی طبیعی و شن بازیافتی بتنی جستجو کرد. ماسه‌ی بازیافتی برخلاف شن بازیافتی، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در بهبود خواص ناحیه‌ی انتقال سطحی به دلیل مقاومت مکانیکی و کیفیت کمتر نسبت به شن بازیافتی ندارد؛ لذا عملکرد نمونه‌های بتنی با شن و ماسه‌ی بازیافتی نسبت به نمونه‌های دارای فقط شن بازیافتی در برابر پوسته‌شدگی ضعیف‌تر است.

با مقایسه‌ی نتایج کلی هر دو استاندارد می‌توان دریافت که در روش LS مقادیر پوسته‌شدگی و همچنین عوامل پوسته‌شدگی نسبت به روش ASTM بسیار بیشتر است (به غیر از طرح RCAC-۵۰). اگرچه معیار اندازه‌گیری مقدار کل پوسته‌شدگی و عامل پوسته‌شدگی برای هر دو روش یکسان بوده است. با استناد به این نتایج می‌توان بیان کرد که در پژوهش حاضر، استاندارد LS مخرب‌تر از استاندارد ASTM عمل می‌کند. دلیل این تفاوت را می‌توان در تفاوت‌های آزمایش‌ها جستجو کرد. تفاوت اول به نوع و غلظت محلول نمک مصرفی اشاره می‌کند، که همان‌گونه که پیش‌تر توضیح داده شد، در روش ASTM از ۴٪ محلول نمک کلسیم کلراید و در روش LS نیز از ۳٪ محلول نمک سدیم کلراید استفاده می‌شود. مهتا و مونتیرو^[۱۹۹۳]، عنوان کردند که در غلظت ۴ تا ۵ درصد، شدیدترین حالت تخریب سطح در آزمایش دوام در برابر پوسته‌شدگی به وقوع می‌پیوندد. اما وریک و کلیگر^[۱۹۵۷]، نشان دادند که غلظت ۳٪ محلول نمک (بین ۰ تا ۱۶ درصد غلظت) فارغ از نوع آن (سدیم کلراید یا کلسیم کلراید) به بیشینه‌ی خرابی‌های حاصل از پوسته‌شدگی سطح می‌انجامد. آنها همچنین تفاوت عملکردی محلول‌های نمک سدیم کلراید و کلسیم کلراید را بررسی و مشاهده کردند که محلول نمک کلسیم کلراید در کنار خرابی‌های ناشی از اعمال چرخه‌های ذوب و یخبندان، تخریب‌های شیمیایی نیز در سطح بتن و نیز با ریزساختار بتن، واکنش مخرب شیمیایی ایجاد می‌کند و رخداد خرابی‌های اشاره شده مستقل از اعمال چرخه‌های ذوب و یخبندان به وقوع می‌پیوندد. اما محلول نمک سدیم کلراید فقط در زمانی که چرخه‌های پیوسته‌ی ذوب و یخبندان بر روی نمونه اعمال شود، منجر به تشدید خرابی‌های سطح می‌شود.^[۲۴] هنگامی که نمونه در دوره‌ی یخبندان قرار دارد، محلول نمک سدیم کلراید قدرت تخریبی بیشتری نسبت به محلول نمک کلسیم کلراید دارد.^[۲۴] با توجه به این اطلاعات می‌توان گفت که تفاوت معناداری قاعداً بین عملکرد ۴٪ محلول نمک کلسیم کلراید و ۳٪ محلول نمک سدیم کلراید وجود ندارد.

تفاوت دوم در ۲ استاندارد مذکور به ابعاد نمونه‌های هر آزمایش اشاره می‌کند، که

روش LS سطحی دو برابر سطح نمونه در روش ASTM را توصیه کرده است (m^2 ۰/۹ در برابر m^2 ۰/۴۵) با بررسی سطح طرح‌های مشابه در هر دو استاندارد مشخص شد که در روش LS (که سطح نمونه‌ها بزرگ‌تر از سطح نمونه‌ها در روش ASTM است)، خرابی پکیدگی به صورت کامل‌تر و به تعداد بیشتری رخ می‌دهد. (البته این تذکر لازم است که هندسه‌ی سطح نیز حائز اهمیت است و هر چه دو ضلع سطح مستطیل شکل به یکدیگر نزدیک‌تر باشند، این نوع خرابی بهتر رخ می‌دهد). خرابی پکیدگی یکی از رایج‌ترین انواع خرابی در سطح رویه‌های بتنی در معرض هوای سرد است، که در آن با تکرار چرخه‌های ذوب و یخبندان، ترک‌های داخلی به مرور در اطراف سنگدانه‌های نزدیک به سطح رویه‌ی بتنی ایجاد و در نهایت سنگدانه به همراه قسمتی از ملات سیمانی به علت از دست دادن مقاومت کششی به صورت بیرون‌زدگی از سطح خارج می‌شوند.^[۲۵] این موضوع می‌تواند یکی از دلایل اصلی افزایش مقدار پوسته‌شدگی در روش LS نسبت به روش ASTM باشد. از طرفی در روش ASTM به دلیل سطح کوچک‌تر نمونه، تعدادی از پکیدگی‌ها به دلیل رخ دادن در اطراف اضلاع خارجی نمونه، به طور کامل رخ نمی‌دهد. لذا مجموعاً در روش ASTM، مقدار پوسته‌شدگی کمتری رخ می‌دهد. نمونه‌ی از سطح‌های یک طرح یکسان در هر دو استاندارد در شکل ۹ مشاهده می‌شود. با توجه به این نتایج می‌توان دریافت که مساحت سطح نمونه در ارزیابی دوام نمونه‌ی بتنی در برابر پوسته‌شدگی اهمیت زیادی دارد و نحوه‌ی انتخاب و ابعاد سطح می‌تواند در نتیجه‌ی پایانی تأثیرگذار باشد. لذا با توجه به توضیحات اخیر می‌توان نتیجه گرفت که در پژوهش حاضر، استاندارد LS به نتایج دقیق‌تری نسبت به استاندارد ASTM ختم می‌شود و مطابقت بهتری با شرایط واقعی و کاربردی دارد.

همچنین تحلیل آماری نشان می‌دهد که تفاوت معناداری بین نتایج طرح‌های ۴۰ و ۳۰ - RC&FAC و ۲۰ و ۵۰ - RC&FAC (به ترتیب با ۳۵/۵ و ۳۳/۵ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی (شن + ماسه)) در استاندارد ASTM وجود ندارد. به عبارت دیگر، در نسبت جایگزینی حدوداً ۳۵٪ سنگدانه‌ی طبیعی (شن + ماسه) با سنگدانه‌ی بازیافتی، ترکیب سنگدانه‌های ریز و درشت (X/۱ - ماسه و (X-۱)/۱ - شن) تأثیری در دوام در برابر پوسته‌شدگی به روش ASTM ندارد. در شکل ۱۰، همبستگی بین نتایج آزمایش دوام در برابر پوسته‌شدگی و درصد جذب آب نمونه‌های بتنی مشاهده می‌شود، که مطابق آن نتایج درصد جذب آب همبستگی بهتری با نتایج آزمایش دوام در برابر پوسته‌شدگی به روش LS نسبت به روش ASTM دارند. اگرچه باید قید کرد که عموماً تعیین همبستگی نتایج دوام در برابر پوسته‌شدگی با نتایج آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی تعیین نمی‌شود. همچنین باید ذکر کرد که

شکل ۹. خرابی‌های سطح نمونه‌ی RCAC-۳۰ در اثر پکیدگی‌های رخ داده در استانداردهای ASTM و LS.

می‌شوند. البته این نتیجه‌گیری مادامی که از افزودنی‌های هوازا در بتن استفاده نشده باشد، چندان دوازدهن نیست. در هر صورت به نظر می‌رسد در بتن‌های باز یافتی با افزایش نسبت جایگزینی بتن، استعداد بیشتری برای خرابی در چرخه‌های ذوب و یخبندان پیدا می‌شود و در این جا کاربرد افزودنی‌های شیمیایی، اهمیت بیشتری دارد. بررسی این موضوع در پژوهشی دیگر ضروری به نظر می‌رسد. در شکل ۱۱، نیز سطح نمونه‌های طرح $RC\&FAC - 50\&40$ در هر دو استاندارد ASTM و LS مشاهده می‌شود.

۴. نتیجه گیری

در نوشتار حاضر، کاربرد توأمان شن و ماسه‌ی باز یافتی بتنی در رویه‌های بتنی ارزیابی شده است. درصد جذب آب، چگالی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و همچنین دوام در برابر پوسته‌شدگی (به دو روش ASTM و LS) تعیین شدند. در ادامه، اهم نتایج پژوهش حاضر ارائه شده است:

-- جایگزینی سنگدانه‌ی باز یافتی بتنی (شن و ماسه) به شدت در افزایش درصد جذب آب بتن نقش مؤثری ایفا می‌کند. به طوری که جایگزینی مجموعاً $44\&5\%$ از سنگدانه‌ی طبیعی با سنگدانه‌ی باز یافتی بتنی منجر به 53% افزایش در درصد جذب آب نسبت به طرح شاهد شده است.

-- جایگزینی شن طبیعی با شن باز یافتی بتنی منجر به کاهش مقاومت مکانیکی و دوام بتن در برابر پوسته‌شدگی شده است؛ اما ماسه‌ی باز یافتی بتنی در مقایسه با شن باز یافتی بتنی، تأثیر بسیار بیشتری در کاهش مقاومت‌های مکانیکی و دوام در برابر پوسته‌شدگی داشته است. همچنین مشاهده شد که در صورت کاربرد توأمان شن و ماسه‌ی باز یافتی بتنی در رویه‌های بتنی، با افزایش نسبت جایگزینی، دوام بتن در برابر پوسته‌شدگی به شدت کاهش می‌یابد. لذا در صورت کاربرد رویه‌ی بتنی در مناطق سردسیر، کاربرد توأمان شن و ماسه‌ی باز یافتی در رویه‌ی بتنی توصیه نمی‌شود. اگرچه جایگزینی 30% از شن طبیعی با شن باز یافتی بتنی می‌تواند به نتایج قابل قبولی ختم شود.

-- ارزیابی دوام رویه‌های بتنی در برابر پوسته‌شدگی با استفاده از استاندارد $ASTM C672$ دارد. در رابطه با محلول مورد استفاده در دو استاندارد نیز می‌توان بیان کرد که نوع و غلظت محلول نمک مصرفی تأثیری در نتایج دو استاندارد نداشته است. همچنین در پژوهش حاضر مشخص شد که سطح نمونه‌ی بتنی مورد استفاده در ارزیابی دوام در برابر پوسته‌شدگی به شدت در نتیجه‌ی پایانی تأثیرگذار است. هر چه سطح بزرگ‌تر باشد، نتایج با واقعیت موجود انطباق بیشتری خواهند داشت و پدیده‌ی بیرون‌پریدگی (یا پکیدگی) در سطح‌های بزرگ‌تر بهتر به وقوع می‌پیوندد.

شکل ۱۰. همبستگی بین نتایج درصد جذب آب و دوام در برابر پوسته‌شدگی به روش استانداردهای ASTM و LS.

شکل ۱۱. سطح طرح $RC\&FAC - 50\&40$ به روش استانداردهای الف و ب.

اصلی‌ترین عاملی که موجب بهبود بسیار زیادی در دوام بتن در برابر پوسته‌شدگی می‌شود، استفاده از افزودنی شیمیایی هوازا در طرح اختلاط بتن است. با این حال در صورتی که از این افزودنی استفاده نشده باشد، می‌توان از همبستگی نتایج دوام به منظور پیش‌بینی عملکرد بتن باز یافتی در برابر پوسته‌شدگی بهره برد. البته این تذکر لازم است که این نتیجه‌گیری فقط در پژوهش حاضر و در محدوده‌ی نتایج به دست آمده صادق است.

در آخر نیز باید ذکر کرد که طرح‌های با شن و ماسه‌ی باز یافتی مجموعاً عملکرد دوامی ضعیف‌تری نسبت به طرح شاهد و یا طرح‌های با شن باز یافتی در برابر پوسته‌شدگی دارند. همچنین با توجه به استاندارد LS باید بیان کرد که طبق معیار استاندارد LS، که بیشینه‌ی مقدار پوسته‌شدگی را به $8\&8\text{ kg/m}^2$ محدود می‌کند، کلیه‌ی طرح‌های فاقد دوام پژوهش حاضر در برابر پوسته‌شدگی طبقه‌بندی

پانویس‌ها

1. recycled concrete aggregate
2. pop-out
3. present serviceability index
4. polycarboxylic ether

5. interfacial transition zone
6. aggressive
7. Mehta & Monteiro
8. Verbeck and Klieger

منابع (References)

- Pereira, L. "Construction and demolition waste recycling: the case of the Portuguese northern region", Master Thesis in Civil Engineering, Minho University, Braga, Portugal (2002).
- Costa, U. and Ursella, P. "Construction and demolition waste recycling in Italy", *International Conference on the Environmental and Technical Implicationd of Construction*, **5**, pp. 231-239 (2003).
- Sancheze de Juan, M.. and Gutiérrez, P.A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate", *Constr. Build. Mater*, **23**(2), pp. 872-877 (2009).
- Gokce, A., Nagataki, S., Saeki, T. and Hisada, M. "Identification of frost-susceptible recycled concrete aggregates for durability of concrete", *Constr. Build. Mater*, **25**(5), pp. 2426-2431 (2011).
- Yang, J., Du, Q. and Bao, Y. "Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay brick", *Constr. and Build. Mater*, **25**(4), pp. 1935-1945 (2011).
- Kwan, W.H., Ramli, M., Kam, K.J. and et al. "Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties", *Constr. and Build. Mater*, **26**(1), pp. 565-573 (2012).
- Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M. and et al. "Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete", *Waste Manage*, **30**(11), pp. 2255-2264 (2010).
- Courard, L., Michel, F. and Delhez, P. "Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete", *Constr. and Build. Mater*, **24**(3), pp. 390-395 (2010).
- Gonzalez-Fonteboia, B., Martinez-Abella, F., Eiras-Lopez, J. and et al. "Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete", *Materials and Structures*, **44**(10), pp. 1759-1770 (2011).
- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S. and et al. "Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates", *Constr. Build. Mater*, **23**(11), pp. 3382-3387 (2009).
- Evangelista, L. and De Brito, J. "Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates", *Cem. and Concr. Compos*, **32**(1), pp. 9-14 (2010).
- Khatib, J.M. "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate", *Cem. and Concr. Res*, **35**(4), pp. 763-769 (2005).
- Yaprak, H., Aruntas, H.Y., Demir, I. and et al. "Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties", *Int. J. Phys. Sci*, **6**(10), pp. 2455-2461 (2011).
- Evangelista, L. and De Brito, J. "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates", *Cem. and Concr. Compos*, **29**(5), pp. 397-401 (2007).
- Cartuxo, F., De Brito, J., Evangelista, L. and et al. "Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates-Influence of the superplasticizer", *Constr. and Build. Mater*, **89**, pp. 36-47 (2015).
- Zega, C.J. and Di Miao, A.A. "Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements", *Waste Manage*, **31**(11), pp. 2336-2340 (2011).
- Pereira, P., Evangelista, L. and de Brito, J. "The effect of superplasticizers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates", *Constr. Build. Mater*, **28**(1), pp. 722-729 (2012).
- Mark, B.Snyder. *Concrete Pavement Recycling and the Use of Recycled Concrete Aggregate in Concrete Paving Mixtures*, CP Road Map, pp.2-4 (2016).
- Jiménez, J.R., Ayuso, J. and López, M. "Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing", *Constr. and Build. Mater*, **40**, pp. 679-690 (2013).
- Le, T., Rémond, S., Ze Saout, G. and et al. "Fresh behavior of mortar based on recycled sand-Influence of moisture condition", *Constr. and Build. Mater*, **106**, pp. 35-42 (2016).
- Ledesma, E.F., Jiménez, J.R., Fernández, J.M. and et al. "Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates", *Constr. and Build. Mater*, **71**, pp. 289-298 (2014).
- FHWA 2004, "Recycled concrete aggregate – federal highway administratio national review", Federal Highway Administration. Washington, D.C. (www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/rca.cfm). Last accessed 2/04/2017).
- Page, C.L. and Page, M.M. *Durability of concrete and cement composites*, Elsevier publication, pp.283-311 (2007).
- Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F. and Wirquin, E. "Frost resistance of recycled aggregate concrete", *Cem. Concr. Res*, **34**(10), pp. 1927-1932 (2004).
- Bogas, J., Alexandre, J., De Brito, and et al. "Freeze-thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates", *Journal of Cleaner Production*, **115**, pp. 294-306 (2016).
- Gokce, A., Nagataki, S., Saeki, T. and et al. "Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: the role of air-content in demolished concrete", *Cem. and Concr. Res*, **34**(5), pp. 799-806 (2004).
- Topçu, I.B. and Sengel, S. "properties of concretes produced with waste concrete aggregate", *Cem. and Concr. Res*, **34**(8), pp. 1307-1312 (2004).
- Nagataki, S. and Iida, K. *Recycling of demolished concrete*, ACI Special Publication, 200, Reston, USA, pp. 1-20 (2001).
- Naik, T.R., Kraus, R.N., Ramme, B.W. and et al. "Decoding salt-scaling resistance: laboratory and field evaluation of concrete containing up to 70% class C and class F fly ash", *Journal of ASTM International*, **2**(7), pp. 1-12 (2005).
- ASTM C672, *Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals*, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia (2014).
- Ministry of Transportation of Ontario Standard LS-412 R17, *Method of Test for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals*, (2011).

32. ASTM C192, *Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory*, West Conshohocken (PA), ASTM International (2010).
33. Ferreira, L., De Brito, J. and Barra, M. "Influence of pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on structural concretes mechanical and durability properties", *Mag. Concr. Res*, **63**(8), pp. 617-627 (2011).
34. Casuccio, M., Torrijos, M.C., Giaccio, G. and et al. "Failure mechanism of recycled aggregate concrete", *Constr. and Build. Mater*, **22**(7), pp. 1500-1506 (2008).
35. Etxeberria, M., Vázquez, E., Mari, A. and et al. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete", *Cement and concrete Res*, **37**(5), pp. 735-742 (2007).
36. Poon, C.S.; Shui, Z.H. and Lam, L. "Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates?", *Constr. and Build. Mater.*, 18(6), pp. 461-468 (2004).
37. ASTM C642, "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete", Annual book of ASTM standards, pp. 4 (2012).
38. EN BS 12390-3, "Testing Hardened Concrete: Compressive Strength of Test Specimens", British Standard Institution, London (2009).
39. ASTM C496, "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens", United States, ASTM International (2010).
40. ASTM C293, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Centre-Point Loading)", ASTM International, West Conshohocken (2012).
41. Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. "Concrete: Structure, Properties, and Materials", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1993).
42. Verbeck, G.J. and Klieger, P. "Studies of 'salt' scaling of concrete", Highway Research Board Bulletin (1957).
43. Neville, A.M. "Behavior of concrete in saturated and weak solutions of magnesium sulphate or calcium chloride", *J. of Mater*, **4**(4), pp. 781-816 (1969).
44. Binbin, Y. *Durability of Reinforced Concrete in the Presence of Chloride Ions*, Rijksuniversiteit Gent, pp. 322 (1988).
45. Pigeon, M. and Pleau, R. "Durability of concrete in cold climates", CRC Press (2010).