

تأثیر سنگ‌دانه‌های حاصل از بتن‌های بازیافتی، شیشه و پلاستیک‌های زائد در خواص بتن

محمود نیلی* (دانشیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا

نادر بیگلری جو (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهرداد رزم آرا (کارشناس)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۴)
دوره ۲ - ۳۱، شماره ۱/۲، ص. ۱۱۱-۱۱۹، (پادداست نشی)

امروزه افزایش تولید زباله‌های ساختمانی، دفن و بازیافت آنها یکی از مسائل مهم زیست‌محیطی به شمار می‌آید. از انواع زباله‌های ساختمانی می‌توان به بتن تخریبی، شیشه و پلاستیک اشاره کرد. در این پژوهش دانه‌های حاصل از بتن تخریبی جایگزین بخشی از درشت‌دانه و ریزدانه شده‌اند. ضمناً شیشه و پلاستیک خرد شده نیز به عنوان جایگزین بخشی از ریزدانه به کار رفته است. مقاومت‌های فشاری، کششی، خمشی، مقاومت الکتریکی، کارایی، جذب آب، وزن مخصوص بتن سخت شده و بسامد طبیعی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که امکان کاربرد سنگ‌دانه‌های حاصل از بتن‌های تخریبی و شیشه‌های بازیافتی در بتن‌های جدید وجود دارد، در حالی که جایگزینی پلاستیک به عنوان جایگزین بخشی از ریزدانه باعث کاهش نسبی خواص مکانیکی مخلوط‌های بتنی شده است.

واژگان کلیدی: سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، شیشه، پلاستیک، خواص مکانیکی، روانی، مقاومت الکتریکی، جذب آب.

nili36@yahoo.co.uk
nader.biglari@gmail.com
mehrdaad.razmara@gmail.com

۱. مقدمه

تولید دانه‌های سنگی کاهش می‌یابد و در نتیجه منابع سنگی موجود در طبیعت کمتر استفاده می‌شود و هزینه‌های تولید مصالح سنگی نیز کاهش می‌یابد و نیز موجب کاهش مصرف انرژی می‌شود. در این راستا شناخت کافی از تأثیر این مواد بازیافتی در خواص مکانیکی، فیزیکی و دوام بتن‌های بازیافتی بسیار ارزشمند است، که در ادامه به بخشی از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه اشاره می‌شود.

پژوهش‌های انجام شده بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ بر روی خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی منجر به نتایج قابل توجهی در این خصوص شده است. جذب آب بالا، چگالی کم و پوکی زیاد بتن‌های بازیافتی از جمله نتایج پژوهش‌های مذکور است. به علاوه براساس پژوهشی در اردن، جایگزینی شیشه با مصالح سنگی ریزدانه باعث اندک افزایش در پارامترهای مکانیکی بتن شده است. سایر پژوهشگران نیز نشان دادند با جایگزینی سنگ‌دانه‌های حاصل از بتن‌های تخریبی (با مقاومت بالا) می‌توان بتن‌های پر مقاومت ساخت. در پژوهش دیگری هم که در سال ۲۰۰۲ انجام شده است، پژوهشگران رابطه‌ی مستقیمی بین افزایش تخلخل بتن، با افزایش درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌های حاصل از بتن تخریبی یافته‌اند.^[۱-۷] در سال ۲۰۰۷ هم بررسی پارامترهای مؤثر در دوام بتن‌های ساخته شده با سنگ‌دانه‌های بازیافتی در مقابل سیکل‌های ذوب و انجماد صورت گرفته است. نتایج پژوهش حاکی از آن بود که بتن‌های ساخته شده با سنگ‌دانه‌های حاصل از بتن تخریبی عملکرد خوبی در

امروزه با توجه به رشد جمعیت و پیشرفت صنعت، نیاز به ساخت و ساز در کشور ایران افزایش یافته است. این ساخت و ساز منجر به تخریب ساختمان‌ها و بناهای قدیمی و به وجود آمدن حجم عظیمی از زباله‌های ساختمانی شده است. از طرفی عوامل طبیعی همچون زلزله و سیل، حجم زیادی از زباله‌های ساختمانی را تولید می‌کند. این زباله‌های ساختمانی شامل: بتن، شیشه، پلاستیک، کاشی، سرامیک، فلزات، عایق‌ها و سایر مصالح می‌شوند. بسیاری از این مواد برای مدت طولانی در طبیعت باقی می‌مانند و بعضی نیز تجدیدناپذیرند و ممکن است صدها یا شاید هزاران سال در طبیعت باقی بمانند یا روند بسیار کندی در بازیافت داشته باشند. از این رو اتخاذ سیاست‌های زیست‌محیطی در جهت استفاده از این مواد در بتن‌های بازیافتی روز به روز در سرتاسر دنیا رو به افزایش است.^[۱] هدف اصلی از ساخت این بتن‌ها، دفن برخی از زباله‌های ساختمانی به عنوان جایگزینی از مصالح سنگی و صرفه‌جویی در مصرف سنگ‌دانه‌های طبیعی است. بازیافت این زباله‌ها می‌تواند به حل مشکل دفن این زباله‌ها و صرفه‌جویی در مصرف مصالح سنگی کمک کند، در نتیجه محیط زیست از وجود این مصالح که عمدتاً قابل بازیافت هم نیستند، حفاظت می‌شود و هزینه‌های مربوط به دفن آن‌ها کاهش می‌یابد. از طرفی نیاز به

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱۷/۱، اصلاحیه ۱۳۹۲/۴/۳۰، پذیرش ۱۳۹۲/۶/۱۷.

(استاندارد شماره ۸۷۵۳ ایران یا ASTM C ۱۲۶۰) در هنگام استفاده از شیشه به‌عنوان جایگزین سنگ‌دانه توصیه می‌شود.

شیشه‌ی مورد نیاز در این مطالعه، از شیشه‌های ساختمان‌های تخریب‌شده در استان همدان تهیه شده است. شیشه‌ها خرد و دانه‌بندی شدند. پلاستیک‌ها غالباً از پلاستیک‌های بطری نوشابه و آب معدنی بودند که پس از مصرف به دور انداخته می‌شوند (PET). این پلاستیک‌ها پس از شستشو، برش و دانه‌بندی شدند و سپس در بتن مورد استفاده قرار گرفتند. بیشینه اندازه‌ی شیشه و پلاستیک بازآفرینی به ترتیب به ۴٫۷۵ و ۶٫۳۵ میلی‌متر محدود شده است.

در شکل ۱، دانه‌بندی ماسه‌ی طبیعی (NS) و پلاستیک زائد (WP) و در شکل ۲، دانه‌بندی شن طبیعی (NG) و درشت‌دانه‌ی حاصل از بتن بازآفرینی (RCA-C) نشان داده شده است. متذکر می‌شود که ریزدانه‌ی حاصل از بتن تخریبی (RCA-F) و شیشه‌ی زائد (WG) به نحوی تهیه شده است که منحنی‌های دانه‌بندی آنها بر منحنی دانه‌بندی ماسه منطبق شود.

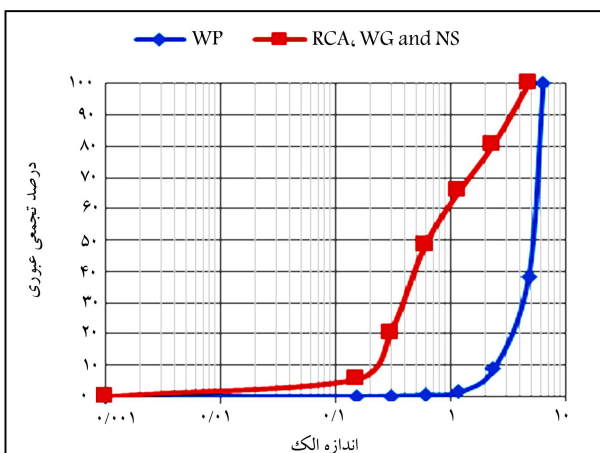
همان‌گونه که مشاهده می‌شود مصالح درشت‌دانه‌ی بازآفرینی به نحوی تهیه شده است که با منحنی دانه‌بندی شن طبیعی کاملاً مطابقت دارد. شکل ۳، نیز پلاستیک و شیشه‌ی خردشده (جایگزین ریزدانه) را نشان می‌دهد. جدول‌های ۱ الی ۳ براساس نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده‌اند و ویژگی‌های چگالی توده‌ی، وزن

یخبندان به علت جذب آب بالا و تخلخل بتن‌ها نداشته‌اند.^[۸] همچنین تأثیر بتن مادر تخریب‌شده در خواص بتن‌های تولیدشده با سنگ‌دانه‌ی بازآفرینی از دیگر مواردی بود که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن بود که نسبت مستقیم بین مقاومت بتن جدید با مقاومت بتن تخریب‌شده وجود دارد، به طوری که با افزایش مقاومت بتن مادر، مقاومت بتن ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌ی حاصل از تخریب بتن مادر نیز افزایش می‌یابد.^[۹] در سال ۲۰۰۸ مشکل اصلی تولید بتن‌های بازآفرینی، چگالی کم، تخلخل و جذب آب بالای سنگ‌دانه‌های بازآفرینی اعلام شد و وجود ملات ثانویه سخت‌شده بر روی سنگ‌دانه‌های بازآفرینی را دلیل جذب آب زیاد اعلام کردند.^[۱۰] نتایج آزمایش‌های درازمدت نیز نشان داد که در رده‌ی مقاومتی یکسان، بتن‌های بازآفرینی در مقایسه با بتن‌های معمولی، جمع‌شدگی بیشتری دارند.^[۱۱،۱۲] پژوهش‌های اخیر (سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲) نیز نشان داده‌اند که با جایگزینی PET (پلی اتیلن ترفتالات) با مصالح سنگی ریزدانه و درشت‌دانه تا ۵٪ جایگزینی، مقاومت مکانیکی اندکی کاهش می‌یابد؛ در حالی‌که پارامترهای روانی تقریباً بدون تغییر می‌مانند. از طرفی با بررسی شرایط مختلف عمل‌آوری (در محیط طبیعی، در آزمایشگاه و در محفظه‌های مرطوب)، بدترین نتایج مرتبط با عمل‌آوری‌های خشک است.^[۱۳،۱۴]

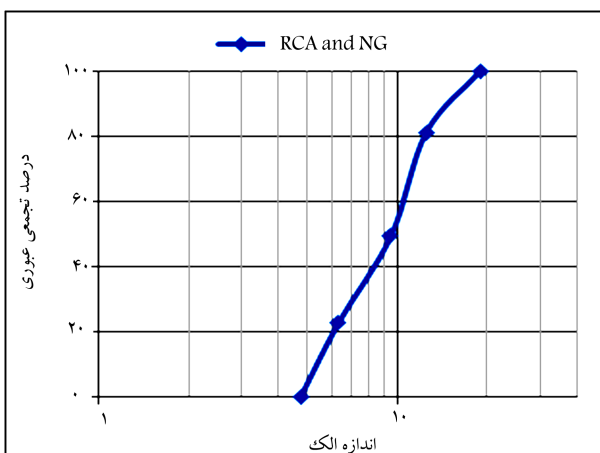
این پژوهش در نظر دارد با نگاه زیست‌محیطی، پتانسیل استفاده از مواد زائد در بتن را مورد بررسی قرار دهد، لذا علاوه بر سنگ‌دانه‌های بازآفرینی از بتن‌های تخریب‌شده، شیشه و پلاستیک زائد نیز به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگ‌دانه در بتن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بتن‌های تخریب‌شده از جدول‌های بتنی به‌عنوان جایگزین بخشی از درشت‌دانه و ریزدانه، و شیشه و پلاستیک نیز جایگزین درصدی از ماسه‌مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مقاومت فشاری، کششی و خمشی، مقاومت الکتریکی، بسامد طبیعی در مدول کشسانی دینامیکی و همچنین ویژگی‌هایی همچون روانی، وزن مخصوص بتن سخت‌شده و جذب آب نمونه‌های بتن اندازه‌گیری شده‌اند.

۲. مصالح مورد استفاده

در این پژوهش از سیمان پرتلند نوع ۱ (منطبق بر استاندارد ASTM C ۱۵۰) استفاده شده است.^[۱۵] همچنین از ریزدانه‌ی آهکی با مدول نرمی ۲٫۴۶ و درشت‌دانه‌ی شکسته‌ی آهکی با بیشینه‌ی اندازه‌ی ۱۹ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است. از بتن تخریبی به جای قسمتی از ریزدانه و درشت‌دانه‌ی بتن استفاده شده است تا بتوان مقایسه‌ی مناسبی بین آنها انجام داد. جهت بررسی خواص بتن‌های بازآفرینی، از جایگزینی شیشه و پلاستیک‌های زائد به جای قسمتی از ریزدانه‌ی بتن استفاده شده است، زیرا طبق پژوهش‌های صورت‌گرفته، استفاده از درشت‌دانه‌ی شیشه و پلاستیک باعث بروز ویژگی‌های نامطلوب در بتن می‌شود.^[۱۶،۱۷] یکی از دلایل اصلی کاهش ویژگی‌های دوام و مقاومتی بتن، افزایش تخلخل بتن است. براساس این پژوهش‌ها، جایگزینی شیشه در اندازه‌های درشت، باعث انبساط‌های نامطلوب واکنش قلیایی سیلیسی (ASR) در بتن می‌شود. براساس این پژوهش‌ها حتی استفاده از سیمان‌های با قلیانیت کم نیز از این انبساط‌ها جلوگیری نمی‌کند. بعضی پژوهشگران استفاده از سنگ‌دانه‌های شیشه‌ی متخلخل یا عوامل ایجادکننده‌ی هوای عمدی را مؤثر دانسته‌اند. از سوی دیگر، استفاده از دوده‌ی سیلیسی، خاکستر بادی و سرباره نیز به‌عنوان عوامل مؤثر در کاهش واکنش مذکور معرفی شده‌اند.^[۱۶] براساس پژوهش‌های پیشین، تأثیر مخرب ASR در اندازه‌های ریز شیشه به مقدار کمینه می‌رسد.^[۱۶،۱۷] به‌ر حال انجام آزمایش‌های درازمدت واکنش قلیایی - سیلیسی



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی ریزدانه‌های مصرفی در بتن.



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی درشت‌دانه‌های مصرفی در بتن.



پلاستیک جایگزین ریزدانه در بتن

شیشه جایگزین ریزدانه در بتن

شکل ۳. شیشه و پلاستیک جایگزین ریزدانه در بتن.

جدول ۱. مقایسه‌ی مشخصات سنگ‌دانه‌های درشت طبیعی و حاصل از بتن تخریبی.

جذب آب (%)		میزان رطوبت (%)		وزن مخصوص ظاهری (gr/cm ³)		چگالی توده‌یی (gr/cm ³)		مشخصات فیزیکی (mm)
RCA-C	N.G.	RCA-C	N.G.	RCA-C	N.G.	RCA-C	N.G.	
۴,۷۲	۰,۶۰	۱,۳۷	۰,۲۲	۲,۴۸	۲,۷۰	۱,۲۷	۱,۴۶	۱۲,۵-۱۹
۵,۵۶	۰,۵۲	۱,۴۸	۰,۲۰	۲,۴۶	۲,۷۰	۱,۲۵	۱,۴۶	۹,۵-۱۲,۵
۶,۰۰	۰,۴۸	۱,۷۱	۰,۲۴	۲,۴۶	۲,۷۰	۱,۲۳	۱,۴۷	۶,۳۵-۹,۵
۷,۶۲	۰,۷۸	۲,۱۴	۰,۲۸	۲,۴۲	۲,۶۹	۱,۲۰	۱,۵۰	۴,۷۵-۶,۳۵

جدول ۲. مقایسه‌ی مشخصات سنگ‌دانه‌های ریز طبیعی و حاصل از بتن تخریبی.

جذب آب (%)		میزان رطوبت (%)		وزن مخصوص ظاهری (gr/cm ³)		چگالی توده‌یی (gr/cm ³)		مشخصات فیزیکی (mm)
RCA-F	N.G.	RCA-F	N.G.	RCA-F	N.G.	RCA-F	N.G.	
۷,۱۴	۰,۷۵	۲,۰۰	۰,۴۵	۲,۳۹	۲,۷۰	۱,۲۰	۱,۵۵	۲,۳۶-۴,۷۵
۸,۵۰	۱,۰۱	۲,۶۷	۰,۸۶	۲,۳۹	۲,۷۰	۱,۱۷	۱,۵۳	۱,۱۸-۲,۳۶
۶۴,۱۲	۴,۶۱	۴,۸۳	۱,۳۷	۲,۳۴	۲,۵۵	۱,۱۴	۱,۵۰	۰,۶-۱,۱۸
۱۷,۳۴	۵,۶۰	۵,۷۹	۱,۷۸	۲,۳۳	۲,۵۵	۱,۱۱	۱,۴۷	۰,۳-۰,۶
۲۲,۲۰	۷,۰۴	۷,۷۶	۲,۷۷	۲,۰۷	۲,۵۱	۱,۱۰	۱,۴۴	۰,۱۵-۰,۳

جدول ۳. مشخصات سنگ‌دانه‌های ریز حاصل از شیشه و پلاستیک.

جدول ۳. مشخصات سنگ‌دانه‌های ریز حاصل از شیشه و پلاستیک.

مشخصات فیزیکی (mm)	چگالی توده‌یی (gr/cm ³)	وزن مخصوص ظاهری (gr/cm ³)
۲,۳۶-۴,۷۵	۱,۴۷	۲,۷۳
۱,۱۸-۲,۳۶	۱,۳۷	۲,۳۳
۰,۶-۱,۱۸	۱,۳۴	۲,۲۰
۰,۳-۰,۶	۱,۲۷	۲,۱۶
۰,۱۵-۰,۳	۱,۲۲	۲,۱۳
۰,۱۵-۴,۷۵	۰,۳۶	-

است، عنوان کرد. به علاوه با کاهش اندازه‌ی RCA، اختلاف در مشخصات مذکور افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، RCA ریزدانه موجب جذب آب بیشتر و چگالی توده‌یی کمتر می‌شود، که خود موجب جمع‌شدگی بیشتر می‌شود. در مورد پلاستیک هم می‌توان گفت که از سنگ‌دانه‌های طبیعی بسیار سبک‌تر هستند و در نتیجه باعث کاهش وزن بتن ساخته‌شده می‌شود. در مورد شیشه نیز می‌توان گفت که وزن مخصوص آن نزدیک به سنگ‌دانه‌ی طبیعی است، در حالی‌که جذب آب آن نیز همانند پلاستیک برابر صفر است.

مخصوص ظاهری، جذب آب و میزان رطوبت سنگ‌دانه‌های طبیعی و مواد زائد برای سنگ‌دانه‌های مذکور را براساس آزمایش‌های استاندارد نشان می‌دهند. [۱۸-۲۱]

با مقایسه‌ی جدول‌های ۱ الی ۳ مشخص است که استفاده از RCA موجب افزایش جذب آب و کاهش چگالی توده‌یی و وزن مخصوص ظاهری می‌شود، که مهم‌ترین دلیل این اختلاف را می‌توان در میزان ملاتی که به سنگ‌دانه چسبیده

۳. روش انجام پژوهش

۳.۱. ساخت و قالب‌گیری نمونه‌ها و آماده‌سازی آنها

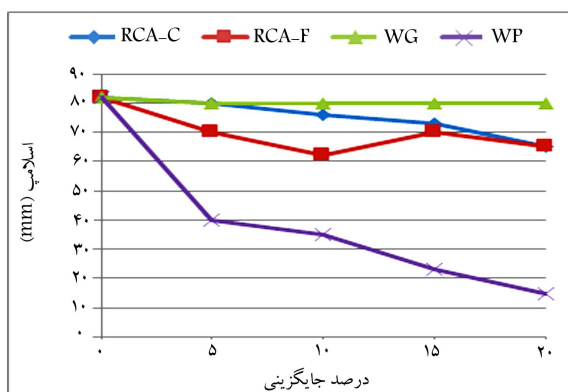
از قالب‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰ × ۱۰۰ × ۱۰۰ میلی‌متر جهت ارزیابی مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی و جذب آب استفاده شده است. مقاومت کششی بتن‌ها به روش برزیلی و بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۱۵۰ × ۳۰۰ میلی‌متر

۴. نتایج

۴.۱. اسلامپ بتن تازه

به منظور بررسی ویژگی‌های بتن تازه، میزان کارایی اندازه‌گیری و برای سنجش آن از آزمایش اسلامپ مطابق استاندارد ASTM C۱۴۳ استفاده شده است. [۱۳] میزان اسلامپ طرح‌های مخلوط بر حسب درصد جایگزینی مواد در شکل ۴ نشان داده شده است.

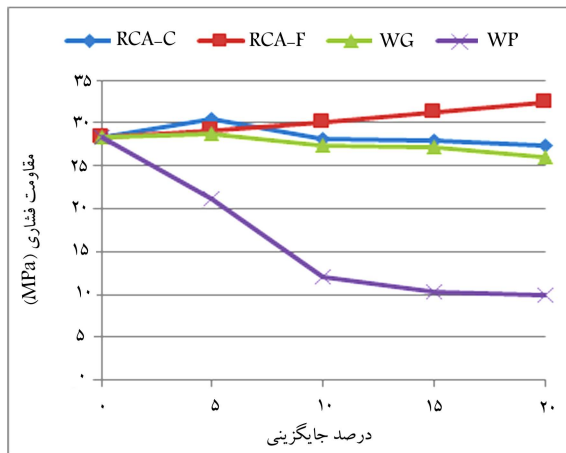
همان‌طور که مشاهده می‌شود، جایگزین کردن شیشه در طرح‌های مخلوط بتن هیچ‌گونه تأثیر منفی در میزان اسلامپ نداشته است. علت این امر را می‌توان به شکل و بافت دانه‌های شیشه و نیز میزان جذب آب مربوط دانست. از سوی دیگر، اسلامپ مخلوط‌های بتن حاوی پلاستیک متناسب با میزان جایگزینی به شدت کاهش یافته است.



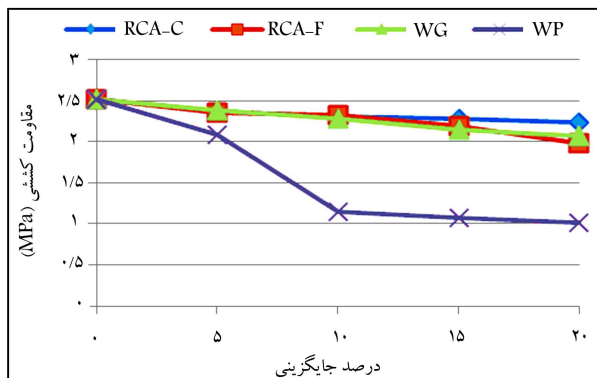
شکل ۴. تأثیر درصد مواد جایگزین در میزان اسلامپ بتن.

جدول ۴. طرح اختلاط مربوط به جایگزینی قسمتی از سنگدانه‌های درشت دانه و ریزدانه بتن با استفاده از دانه‌های به دست آمده از شیشه، پلاستیک و بتن تخریبی.

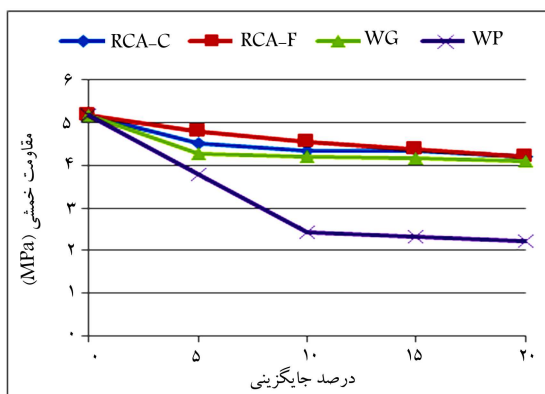
ردیف	علامت اختصاری	درصد جایگزین	درشت دانه‌های طبیعی (kg/m ^۳)	درشت دانه‌های جایگزین (kg/m ^۳)	ریزدانه‌های طبیعی (kg/m ^۳)	ریزدانه‌های جایگزین (kg/m ^۳)	آب (kg/m ^۳)	عیار سیمان (kg/m ^۳)
۱	Ref.	۰	۹۶۴	۰	۸۴۰	۰	۲۰۵	۳۳۶
۲	RCA-C۵	۵	۹۱۶	۴۸	۸۴۰	۰	۲۰۵	۳۳۶
۳	RCA-C۱۰	۱۰	۸۶۸	۹۶	۸۴۰	۰	۲۰۵	۳۳۶
۴	RCA-C۱۵	۱۵	۸۱۹	۱۴۵	۸۴۰	۰	۲۰۵	۳۳۶
۵	RCA-C۲۰	۲۰	۷۷۱	۱۹۳	۸۴۰	۰	۲۰۵	۳۳۶
۶	RCA-F۵	۵	۹۶۴	۰	۷۹۸	۴۲	۲۰۵	۳۳۶
۷	RCA-F۱۰	۱۰	۹۶۴	۰	۷۵۶	۸۴	۲۰۵	۳۳۶
۸	RCA-F۱۵	۱۵	۹۶۴	۰	۷۱۴	۱۲۶	۲۰۵	۳۳۶
۹	RCA-F۲۰	۲۰	۹۶۴	۰	۶۷۲	۱۶۸	۲۰۵	۳۳۶
۱۰	WG-۵	۵	۹۶۴	۰	۷۹۸	۴۲	۲۰۵	۳۳۶
۱۱	WG-۱۰	۱۰	۹۶۴	۰	۷۵۶	۸۴	۲۰۵	۳۳۶
۱۲	WG-۱۵	۱۵	۹۶۴	۰	۷۱۴	۱۲۶	۲۰۵	۳۳۶
۱۳	WG-۲۰	۲۰	۹۶۴	۰	۶۷۲	۱۶۸	۲۰۵	۳۳۶
۱۴	WP-۵	۵	۹۶۴	۰	۷۹۸	۴۲	۲۰۵	۳۳۶
۱۵	WP-۱۰	۱۰	۹۶۴	۰	۷۵۶	۸۴	۲۰۵	۳۳۶
۱۶	WP-۱۵	۱۵	۹۶۴	۰	۷۱۴	۱۲۶	۲۰۵	۳۳۶
۱۷	WP-۲۰	۲۰	۹۶۴	۰	۶۷۲	۱۶۸	۲۰۵	۳۳۶



شکل ۵. تأثیر درصد مواد جایگزین بر مقاومت فشاری.



شکل ۶. اثر مواد زائد شیشه، پلاستیک و بتن تخریبی جایگزین شده با دانه‌های سنگی در مقاومت کششی بتن.



شکل ۷. اثر مواد زائد شیشه، پلاستیک و بتن تخریبی جایگزین شده با دانه‌های سنگی در مقاومت خمشی بتن.

بتن را به میزان کمتر از ۲۰٪ کاهش داده‌اند. این در حالی است که پلاستیک به جز در ۵٪ جایگزینی، کاهش قابل توجهی را در مقاومت کششی و خمشی ایجاد کرده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، در بتن بازیافتی، درشت دانه‌های بتن تخریبی در مقایسه با ریزدانه‌های بتن تخریبی عملکرد مناسب‌تری در کشش و خمش داشته‌اند. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب نحوه انجام آزمایش‌های مقاومت کششی و مقاومت خمشی را نشان می‌دهند.

درخصوص جایگزینی بتن‌های تخریب‌شده با ریزدانه یا درشت‌دانه در بتن شاهد کاهش اسلامپ هستیم و البته جایگزینی ریزدانه با بتن‌های تخریب‌شده در کاهش اسلامپ مؤثرتر عمل کرده است. دلیل این امر بالا بودن سطح ویژه ماسه در مقایسه با درشت‌دانه و همچنین حجم بیشتر ملات چسبیده به ریزدانه در مقایسه با درشت‌دانه است. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که بتن‌های حاوی بتن تخریبی درشت‌دانه، بتن تخریبی ریزدانه و شیشه به‌عنوان بخشی از دانه‌های سنگی، کارایی قابل قبولی در مقایسه با بتن‌های مرجع دارند.

۲.۴. مقاومت فشاری

شکل ۵، نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌هایی که توسط مواد زائد شیشه، پلاستیک و بتن‌های تخریبی جایگزین دانه‌های سنگی بتن (در سن ۲۸ روز) شده‌اند، را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری نمونه‌های تهیه‌شده با پلاستیک زائد، متناسب با میزان درصد جایگزینی کاهش یافته است، به طوری که با جایگزینی بیش از ۵٪، مقاومت فشاری کاهش چشمگیری داشته و عملاً از حالت سازه‌یی خارج شده است. از دلایل این کاهش مقاومت می‌توان به تأثیر منفی پلاستیک در همگنی بتن و عدم اتصال با سایر اجزاء بتن اشاره کرد. دلیل بعدی، عدم توانایی در تراکم مناسب و در نتیجه تخلخل بیشتر بتن است. از سوی دیگر، نتایج نشان داده‌شده در شکل حاکی از آن است که با جایگزینی سنگ‌دانه‌ی حاصل از بتن بازیافتی به‌عنوان بخشی از ریزدانه، مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن نسبت به نمونه‌های مرجع افزایش یافته است. دلیل این امر را می‌توان ناشی از زبری ریزدانه‌ی بازیافتی و افزایش حجم ملات در سطح ریزدانه‌ها دانست. با جایگزینی بتن تخریب‌شده به‌عنوان بخشی از درشت‌دانه، شاهد کاهش ناچیزی در مقاومت فشاری هستیم. این کاهش در ۲۰٪ میزان جایگزینی، حدود ۵٪ بوده است، که مقدار ناچیزی است.

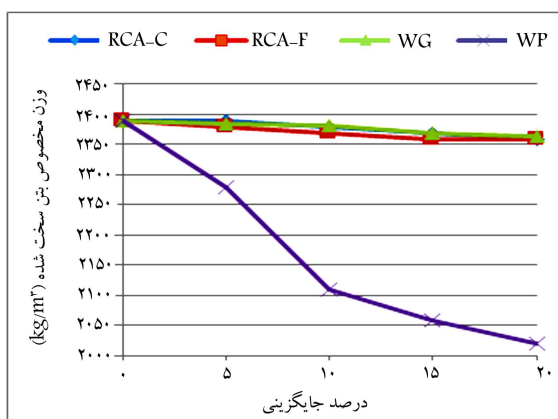
شیشه‌ی زائد (WG) جایگزین دانه‌های ریز بتن نیز رفتاری مشابه درشت‌دانه‌ی ناشی از بتن تخریبی روی مقاومت فشاری بتن داشته است. دلیل این موضوع سختی بالای شیشه و عدم جذب آب آن است.

۳.۴. مقاومت کششی و خمشی

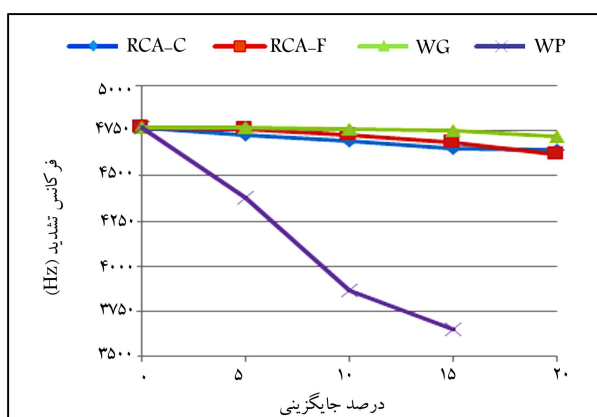
نتایج آزمایش مقاومت کششی و خمشی در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، مصالح زائد جایگزین، اثر یکسان در مقاومت کششی و خمشی بتن بازیافتی داشته‌اند. پلاستیک بیشترین کاهش را در مقاومت کششی و خمشی دارد. این در حالی است که سایر مصالح جایگزین، اثری شبیه به هم در رفتار خمشی و کششی بتن بازیافتی داشته‌اند.

بتن ساخته‌شده با ریزدانه‌ی حاصل از بتن تخریبی کمترین کاهش را در مقاومت کششی و بتن ساخته‌شده با درشت‌دانه‌ی حاصل از بتن تخریبی کمترین کاهش را در مقاومت خمشی داشته است. علت این امر، وجود خمیر سیمان چسبیده به دانه‌های سنگی بازیافتی و در نتیجه مقاومت پیوستگی بیشتر است. کاهش در مقاومت کششی و خمشی برای بتن‌های حاوی درشت‌دانه‌ی بتن تخریبی در ۲۰٪ جایگزینی به ترتیب برابر ۱۱٪ و ۱۹٪ است. این مقادیر کاهش مقاومت برای بتن‌های بازیافتی حاوی ریزدانه‌ی بتن تخریبی به ترتیب برابر ۲۱٪ و ۱۹٪ است.

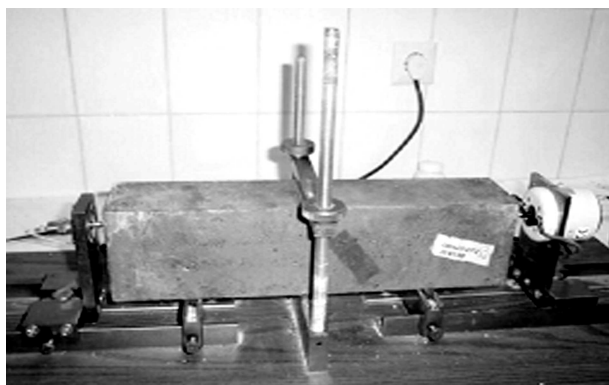
تأثیر جایگزینی شیشه‌ی بازیافتی با ماسه در مقاومت کششی و خمشی نمونه‌ها تقریباً یکسان ارزیابی می‌شود. در مجموع می‌توان گفت که به جز پلاستیک، سایر مصالح زائد جایگزین، رفتار نسبتاً مناسبی در خمش و کشش داشته‌اند و مقاومت



شکل ۱۰. اثر مواد زائد شیشه، پلاستیک و بتن تخریبی جایگزین شده با دانه‌های سنگی در وزن مخصوص بتن سخت شده.



شکل ۱۱. اثر مواد زائد شیشه، پلاستیک و بتن تخریبی جایگزین شده با دانه‌های سنگی در بسامد طبیعی.

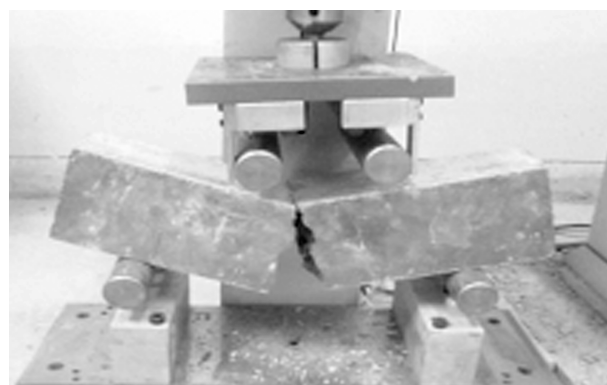


شکل ۱۲. دستگاه اندازه‌گیری بسامد طبیعی نمونه.

است. در این آزمایش علاوه بر یافتن بسامد تشدید در بتن، می‌توان به میزان تخلخل و فضاهای خالی نیز پی برد. مطابق شکل ۱۱، به جز پلاستیک سایر مصالح جایگزین اثر تقریباً یکسانی در بسامد تشدید داشته‌اند و عمدتاً کاهش محسوس در افت بسامد تشدید دیده نمی‌شود (کمتر از ۳٪ در ۲۰٪ جایگزینی مصالح سنگی). شیشه در این زمینه به دلیل پرکردن فضاهای خالی بهترین عملکرد را داشته و پلاستیک به دلیل افزایش فضاهای خالی، بسامد تشدید را به طور محسوس کاهش



شکل ۸. نحوه انجام آزمایش مقاومت کششی به روش برزلی.



شکل ۹. نحوه انجام آزمایش مقاومت خمشی.

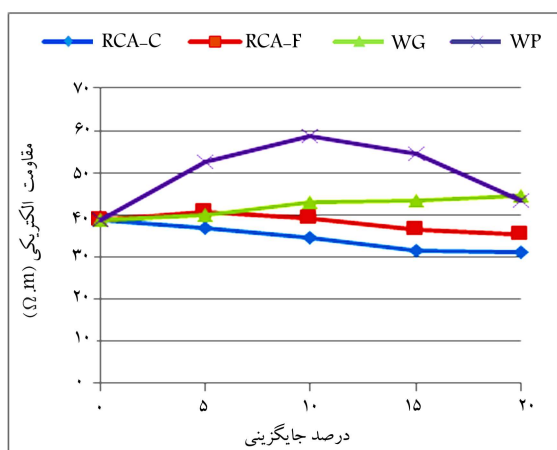
۴.۴. وزن مخصوص بتن سخت شده

اثر مواد زائد جایگزین دانه‌های سنگی در وزن مخصوص بتن سخت شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است، که مطابق آن تأثیر شیشه و بتن‌های تخریبی جایگزین روی وزن مخصوص بتن سخت شده شبیه هم بوده و کاهش کمی (کمتر از ۲٪ در ۲۰٪ جایگزینی سنگ‌دانه) در وزن مخصوص بتن سخت شده ایجاد کرده‌اند. این در حالی است که پلاستیک با بیش از ۵٪ جایگزینی بیش از ۱۵٪ وزن مخصوص بتن را کاهش داده است. علت این امر در پایین بودن وزن مخصوص پلاستیک در مقایسه با سایر مصالح جایگزین است. می‌توان گفت استفاده از پلاستیک زائد در بتن علاوه بر دفن این ماده، به کاهش وزن مخصوص بتن نیز کمک خواهد کرد، که این کاهش وزن مخصوص به کاهش وزن کلی ساختمان و در نتیجه کاهش ریسک زلزله منجر خواهد شد.

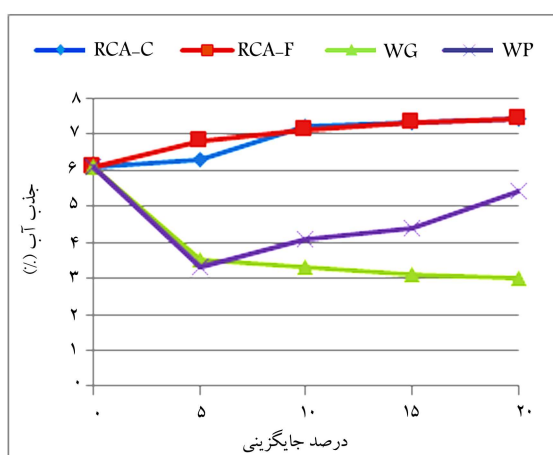
۵.۴. اثر مواد زائد جایگزین دانه‌های سنگی در بسامد تشدید

شکل ۱۱، نتایج مربوط به بسامد تشدید و شکل ۱۲، دستگاه مربوط به این آزمایش را نشان می‌دهد. کاهش بسامد تشدید، نشانه‌ی افزایش فضاهای خالی در بتن

داده است؛ به طوری که در ۲۰٪ جایگزینی، اندازه‌گیری بسامد تشدید ممکن نبوده است.



شکل ۱۳. اثر مواد زائد شیشه، پلاستیک و بتن تخریبی جایگزین شده با دانه‌ی سنگی در مقاومت الکتریکی.



شکل ۱۴. اثر مواد زائد شیشه، پلاستیک و بتن تخریبی جایگزین شده با دانه‌های سنگی در میزان جذب آب.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش از دانه‌های سنگی حاصل از تخریب بتن، شیشه و پلاستیک زائد به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگ‌دانه‌های بتن استفاده شده است. هدف از انجام آزمایش‌ها، شناخت بهتر بتن‌های حاوی مواد زائد به منظور دهن مواد زائد در بتن جهت حفظ محیط زیست، کاهش مصرف دانه‌های سنگی طبیعی در بتن، کاهش مصرف انرژی و شناخت عملکرد بتن‌های بازیافتی بوده است. به طوری که بازیافت مصالح زائد علاوه بر کاهش هزینه‌های دهن آنها، ما را در داشتن محیط زیستی پاک کمک می‌کند. نتایج به‌دست آمده‌ی پژوهش به این قرار است:

- جایگزینی شیشه به‌عنوان بخشی از سنگ‌دانه‌های ریز، باعث تسهیل در پرداخت سطوح بتن شده و هیچ‌گونه تأثیر منفی در میزان اسلامپ نداشته است.
- استفاده از سنگ‌دانه‌ی بازیافتی حاصل از تخریب بتن به‌عنوان بخشی از درشت‌دانه یا ریزدانه باعث کاهش ناچیز در اسلامپ بتن شده است.
- پلاستیک بازیافت شده، روانی بتن را شدیداً کاهش داده است؛ به نحوی که

۶.۴. اثر مواد زائد جایگزین دانه‌های سنگی در مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی بتن، بیانگر مقاومت بتن در برابر عبور جریان الکتریکی از آن است. مقاومت الکتریکی بتن یک آزمایش غیرمخرب مواد است که برای نشان دادن و بازرسی بتن سازه‌ها به ویژه از نظر پتانسیل خوردگی آرماتورها به‌کار می‌رود. [۲۴] نتایج مقاومت الکتریکی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، جریان الکتریکی بین دو الکتروود که به طور موازی در دو طرف بتن مورد آزمایش قرار دارد، تحت اختلاف پتانسیل ۵ ولت به‌وجود می‌آید. مقاومت الکتریکی بتن تابع عوامل مختلفی شامل: رطوبت، میزان نمک، دما، نسبت آب به سیمان، عیار سیمان، نوع و مقدار مواد افزودنی، توزیع سنگ‌دانه‌ها، پیچ و خم حفره‌های مویی‌ی موجود و نیز سایز حفره‌ها، سن نمونه، نوع سنگ‌دانه‌ها، کیفیت ناحیه‌ی انتقالی، وجود ترک‌ها حاوی آب و طریقه‌ی عمل‌آوری است. [۲۵-۲۸]

به دلیل عایق بودن پلاستیک، مقاومت الکتریکی بتن افزایش می‌یابد. بنابراین تا ۱۰٪ جایگزینی پلاستیک، مقاومت الکتریکی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. دلیل کاهش مقاومت الکتریکی، افزایش منافذ موجود در بتن است، زیرا تراکم بتن با مشکل مواجه و بتن حاصله متخلخل می‌شود. در مجموع، جایگزینی پلاستیک موجب افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود. چنان‌که مقاومت الکتریکی بتن با جایگزینی ۲۰٪ پلاستیک از بتن مرجع بیشتر است. جایگزینی شیشه باعث افزایش بیش از ۱۵٪ مقاومت الکتریکی در مقایسه با بتن مرجع می‌شود. افزایش مقاومت الکتریکی بتن حاوی شیشه احتمالاً به دلیل جنس شیشه (سیلیس) و نیز به دلیل افزایش تراکم بتن و پرشدن منافذ موجود است، که رسانایی را کاهش می‌دهد. از طرفی بتن حاوی سنگ‌دانه‌های بتن تخریبی، مقاومت الکتریکی را کاهش می‌دهد، که دلیل اصلی آن عدم تراکم مناسب نسبت به بتن شاهد و در نتیجه، کاهش مقاومت الکتریکی است. جایگزینی مصالح ریزدانه‌ی حاصل از بتن تخریبی اثر کاهشی کمتری نسبت به مصالح درشت‌دانه‌ی حاصل از بتن تخریبی در مقاومت الکتریکی دارد. نتایج کلی حاکی از آن است که جایگزینی مواد زائد پلاستیک و شیشه علی‌رغم مقاومت فشاری نسبتاً کم در مقایسه با جایگزینی مواد ریزدانه و درشت‌دانه‌ی حاصل از بتن تخریبی، موجب افزایش مقاومت الکتریکی شده است.

۷.۴. اثر مواد زائد جایگزین دانه‌های سنگی در جذب آب

به منظور بررسی بیشتر تأثیر سنگ‌دانه‌های زائد در مشخصات فیزیکی و مکانیکی، میزان جذب آب بتن‌های حاوی مواد زائد شیشه، پلاستیک و بتن تخریبی اندازه‌گیری شده است. شکل ۱۴، نتایج تأثیر مواد زائد مختلف در جذب آب را ارائه می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که جایگزینی پلاستیک و شیشه به‌عنوان سنگ‌دانه‌ی ریز موجب کاهش جذب آب بتن می‌شود. اما روند کلی جذب آب با افزایش جایگزینی پلاستیک رو به رشد است و دلیل آن را می‌توان افزایش تخلخل بتن به دلیل عدم تراکم مناسب هم‌زمان با افزایش جایگزینی دانست. با افزایش جایگزینی شیشه، روند جذب آب رو به کاهش است و روند رو به کاهش به معنی این است که افزایش جایگزینی شیشه موجب کاهش منافذ موجود در بتن می‌شود. جایگزینی سنگ‌دانه‌های ریز و درشت حاصل از بتن تخریبی موجب افزایش جذب آب می‌شود، که دلیل آن را می‌توان منافذ بیشتر بتن و نیز جذب آب خمیر چسبیده به سنگ‌دانه عنوان کرد.

کاهش بسیار کمی داشته است. پلاستیک به میزان قابل توجهی بسامد طبیعی را کاهش داده است.

- مقاومت الکتریکی بتن حاوی پلاستیک و شیشه نسبت به بتن شاهد افزایش یافته است، در حالی که جایگزینی بتن تخریبی موجب کاهش ناچیز مقاومت الکتریکی شده است.

- جایگزینی پلاستیک و شیشه باعث کاهش جذب آب بتن شده است، در حالی که جایگزینی بتن تخریبی به جای سنگ‌دانه، موجب افزایش جذب آب شده است. دلیل اصلی کاهش جذب آب بتن‌های حاوی شیشه و پلاستیک، عدم جذب آب این مصالح به‌عنوان سنگ‌دانه در بتن است، در حالی که خود بتن‌های حاوی سنگ‌دانه‌های بتن تخریبی (RCA)، جذب آب بالاتری نسبت به سنگ‌دانه‌ی طبیعی دارند، در نتیجه در مجموع جذب آب بتن افزایش یافته است.

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان دریافت که بتن‌های ساخته شده با بتن‌های تخریبی و شیشه به‌عنوان جایگزین بخشی از دانه‌های سنگی بتن، عملکرد قابل قبولی در مقایسه با بتن‌های ساخته شده با سنگ‌دانه‌های طبیعی از خود نشان داده‌اند. استفاده از پلاستیک زائد به‌عنوان بخشی از ریزدانه فقط در بتن‌های با مقاومت کم باید مورد استفاده قرار گیرد.

اسلامپ بتن‌هایی که در آنها ۲۰٪ ماسه با پلاستیک جایگزین شده است، به ۱/۸ سانتی‌متر کاهش یافته است.

- به‌کارگیری شیشه و سنگ‌دانه‌ی بازیافتی تأثیر مهمی در چگالی بتن نداشته است، در حالی که بتن‌های حاوی پلاستیک (به میزان ۲۰٪) باعث کاهش چگالی به میزان ۲۰٪ شده است.

- مقاومت فشاری بتن‌های حاوی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی و یا شیشه، کاهش جزئی در مقایسه با بتن‌های مرجع داشتند. دلیل اصلی این امر، مقاومت نسبی مناسب شیشه و سنگ‌دانه‌های بازیافتی است، که در رقابت با سنگ‌دانه‌های طبیعی، عملکرد نسبتاً مشابهی دارند. در حالی که به‌کارگیری پلاستیک به دلیل شکل ورقه‌یی آنها و ضعف در مقاومت پیوستگی باعث افت شدید در مقاومت فشاری شده است.

- مقاومت کششی و خمشی در تمام بتن‌های حاوی مصالح جایگزین، با کاهش همراه بوده است؛ که این موضوع در پلاستیک شدیدتر از سایر مصالح بوده است.

- بسامد طبیعی نمونه‌های حاوی شیشه و بتن تخریبی جایگزین بخشی از سنگ‌دانه،

منابع (References)

1. Batayneh, M., Marie, I. and Asi, I. "Use of selected waste material in concrete mixes", *Waste Management*, **27**(12), pp. 1870-1876 (2007).
2. Ajdukiewicz, A. and Kliszczewicz, A. "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC", *Cement & Concrete Composites*, **24**(2), pp. 269-279 (2002).
3. Go'mez-Sobero'n, J.M.V. "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. An experimental study", *Cement and Concrete Research*, **32**(8), pp. 1301-1311 (2002).
4. Sani, D., Moriconi, G., Fava, G. and Corinaldesi, V. "Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates", *Waste Management*, **25**(2), pp. 177-182 (2005).
5. Topcu, I.B. and Canbaz, M. "Properties of concrete containing waste glass", *Cement and Concrete Research*, **34**(2), pp. 267-274 (2004).
6. Gonza'lez-Fonteboia, B. and Marti'nez-Abella, F. "Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties", *Building and Environment*, **43**(3), pp. 429-437 (2008).
7. Casuccio, M., Torrijos, M.C., Giaccio, G. and Zerbino, R. "Failure mechanism of recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, **22**(7), pp. 1500-1506 (2008).
8. Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F. and Wirquin, E. "Frost resistance of recycled aggregate concrete", *Cement and Concrete Research*, **34**(10), pp. 1927-1932 (2004).
9. Padmini, A.K., Ramamurthy, K. and Mathews, M.S. "Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, **23**(2), pp. 829-836 (February 2009).
10. Tam, V.W., Wang, K. and Tamba, C.M. "Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis", *Journal of Hazardous Materials*, **152**(2), pp. 703-714 (2008).
11. Saikia, N. and de Brito, J. "Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review", *Construction and Building Materials*, **34**, pp. 385-401 (2012).
12. Akçaözog'lu, S., Atis, C.D. and Akçaözog'lu, K. "An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete", *Waste Management*, **30**(2), pp. 285-290 (2010).
13. Frigione, M. "Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete", *Waste Management*, **30**(6), pp. 1101-1106 (2010).
14. Silva, R.V., de Brito, J. and Saikia, N. "Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates", *Cement & Concrete Composites*, **35**(1), pp. 23-31 (2012).
15. American Society for Testing and Materials, *Standard Specification for Portland Cement 1*, ASTM C150, Annual book of ASTM standards (1979).
16. Shi, C. and Zheng, K. "A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete", *Resources, Conservation and Recycling*, **52**(2), pp. 234-247 (2007).

17. Ismail, Z.Z. and AL-Hashmi, E.A. "Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement", *Waste Management*, **28**(11), pp. 2041-2047 (2007).
18. American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*, ASTM C29, Annual book of ASTM standards (1979).
19. American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate*, ASTM C127, Annual Book of ASTM Standards (1979).
20. American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate*, ASTM C128, Annual Book of ASTM Standards (1979).
21. American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*, ASTM C566, Annual Book of ASTM Standards (1979).
22. American Society for Testing and Materials, *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*, ASTM C192, Annual Book of ASTM Standards (1979).
23. American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*, ASTM C143, Annual Book of ASTM Standards (1979).
24. RILEM, TC 154-EMC. "Electrochemical technique for measuring metallic corrosion", *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, pp. 603-611 (2000).
25. Khayat, K.H., Vanhove, Y., Pavate, T.V. and Jolicoeur, C. "Multi-electrode conductivity method to evaluate static stability of flowable and self-consolidating concrete", *ACI Materials Journal*, **104**(4), pp. 424-433 (2007).
26. Advanced Concrete Technology, *Testing and Quality* (2003).
27. Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures, International Atomic Energy Agency, Vienna (2002).
28. Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete, ASTM C1760-12 (2012).