مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۳۹۹)
دوره‌ی ۲-۳۶، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۹۱-۱۰۲

Original Article

بررسی خواص مکانیکی و رئولوژیکی بتن خودتراکم بازیافتی و تقویت آن با میکروسیلیس

محمود اکبری * **(استادیار)**
مهدی ظهرابی (کارشناس ارشد)
منیره قندهاری (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه کاشان

در پژوهش حاضر، تأثیر جایگزینی درصدهای مختلف ریزدانه و درشت‌دانه‌ی بازیافتی در خواص مکانیکی و رئولوژیکی بتن خودتراکم بررسی شده است. برای این منظور، در مرحله‌ی اول ابتدا یک طرح شاهد بتن خودتراکم با سنگ‌دانه‌های طبیعی ساخته شد. سپس در مرحله‌ی دوم و در دو فاز مجزا، ریزدانه و درشت‌دانه‌های بازیافتی با مقادیر ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪، جایگزین ریزدانه و درشت‌دانه‌های طبیعی شدند و آزمایش‌های بتن تازه و سخت شده انجام شدند. نتایج نشان می‌دهند طرح با جایگزینی ۲۵٪ ریزدانه‌ی بازیافتی و طرح با جایگزینی ۲۵٪ درشت‌دانه‌ی بازیافتی در هر فاز، کمترین تغییرات منفی از لحاظ خواص مکانیکی و رئولوژیکی را نسبت به طرح شاهد داشته است. در مرحله‌ی سوم، جهت بهبود خواص ضعیف شده، مقادیر ۵٪، ۷٫۵٪ و ۱۰٪ میکروسیلیس جایگزین وزن سیمان شد و نتایج نشان داد که طرح با جایگزینی ۲۵٪ سنگ‌دانه‌ی بازیافتی و ۵٪ میکروسیلیس، خواص نزدیک‌تری نسبت به طرح شاهد اولیه دارد و می‌تواند جایگزین مناسبی برای طرح شاهد باشد.

واژگان کلیدی: بتن خودتراکم، سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، میکروسیلیس، خواص مکانیکی، خواص رئولوژیکی.

makbari@kashanu.ac.ir
mehdizohrabi1368@yahoo.com
monirehghandehary@yahoo.com

۱. مقدمه

بتن به عنوان پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی در تمامی دنیا شناخته می‌شود، که استفاده از آن همچنان در حال افزایش است. با گسترش استفاده از بتن، اقتصاد و دوام و کیفیت آن اهمیت ویژه‌یی می‌یابد. در سازه‌های بتنی برای رسیدن به مقاومت مورد نیاز و کاهش تخلخل و هوای درون بتن، همچنین حصول پایایی، بتن به روش‌های مختلف لرزانده می‌شود. با استفاده‌ی روزافزون از بتن و کمبود کارگران ماهر ساختمانی و مشکلات عدیده در اجرا و متراکم‌سازی بتن، از جمله سروصدا و هزینه‌ی بالای امور اجرایی، به خصوص در موارد با تراکم بالای آرماتور، تراکم بتن به طورکامل و رضایت‌بخش صورت نمی‌گیرد و سبب ایجاد مشکلاتی در مقاومت‌های مکانیکی بتن می‌شود. لذا ساخت بتن بدون نیاز به امور اجرایی برای متراکم کردن، چالش مهمی در فناوری بتن بوده است؛ به نحوی که با استفاده از مواد افزودنی مختلف و تغییر در درصدهای مصالح به کار رفته و ایجاد بتن خودتراکم برای رفع نقایص ذکر شده اقدام شده است.[۱] ایده‌ی بتن خودتراکم اولین بار در سال ۱۹۸۶ در ژاپن توسط شخصی به نام اوکامورا[۱] مطرح شد[۲] و به تدریج از ژاپن به اروپا و سایر نقاط جهان توسعه یافت، تا جایی که امروزه مطالعات و پژوهش‌های زیادی در جهان در زمینه‌ی فناوری بتن، به این موضوع اختصاص یافته است. در مقایسه با ژاپن، مطالعات در اروپا و آمریکا اخیراً آغاز شده است و در حالی که اکنون در ژاپن به بتن خودتراکم از نقطه نظر بتن با مقاومت بالا نگاه می‌شود، در اروپا بتن خودتراکم با مقاومت متوسط همچنان مورد نظر است.[۳]

از طرفی، یکی دیگر از مسائل مهمی که در حال حاضر جهان را به خود مشغول داشته، مسئله‌ی بازیافت است. بازیافت یعنی استفاده‌ی مجدد از موادی که قبلاً مصرف شده‌اند. سازه‌های بتن مسلح، که در اثر عواملی نظیر: زلزله، انفجار، بتن نامرغوب از لحاظ ظاهر، مقاومت فشاری، فرسایش، ناپایداری و غیره نابود می‌شوند، بتن ضایعاتی را به وجود می‌آورند. بتن ضایعاتی می‌تواند دوباره خرد و به عنوان سنگ‌دانه‌ی بازیافتی در ساخت بتن استفاده شود. مطالعات درباره‌ی زمینه‌ی استفاده‌ی دوباره از بتن تخریب شده و مصالح ساختمانی به عنوان سنگ‌دانه‌هایی برای بتن جدید، به پایان جنگ جهانی دوم باز می‌گردد.[۴] از حدود ۲۰ سال پیش، بتن حاصل از تخریب شاهراه‌ها و ساختمان‌های بتن آرمه در آمریکا و اروپا وارد صنعت بازیافت شده است. بتن بیشترین حجم را در میان زباله‌های ساختمانی دارد. در آمریکا ۶۷٪ کل زباله‌های ساختمانی را بتن تشکیل می‌دهد.[۵] در جامعه‌ی اقتصادی اروپا، سالانه حدود ۵۰ میلیون تن بتن تخریب می‌شود. حدود ۱۱ میلیون تن بتن در انگلستان و حدود ۶۰ میلیون تن بتن در آمریکا، سالانه به محل‌های

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۶/۶، اصلاحیه ۱۳۹۷/۹/۷، پذیرش ۱۳۹۷/۹/۱۳.
DOI:10.24200/J30.2018.51399.2401

انباشت نخاله‌های ساختمانی حمل می‌شود. در عین حال، هرساله در آمریکا می‌توان حدود ۱۰ تا ۱۲ میلیون تن بتن را به نحوی مجدداً استفاده کرد.[۶]

از طرفی دیگر، سازه‌های مختلفی در جهان به سبب خواص و مزیت‌های بتن خودتراکم، از این نوع ساخته شده‌اند. پل معلق آکاشی کای کیو[۲] در کوبه[۳] و آواجی[۴] ژاپن، به طول ۳۹۱۰ متر و با حجم بتن‌ریزی قابل توجه ۲۹۰۰۰۰ مترمکعب از جمله‌ی آنهاست. استفاده از بتن خودتراکم در پروژه‌ی اخیر، سبب ۲۰٪ صرفه‌جویی زمانی (حدود ۲ سال) در ساخت، نسبت به بتن معمولی شده است.[۷] استفاده از بتن خودتراکم در ساخت دیواره‌های مخازن عظیم ال‌ان‌جی[۵] شرکت اوزاکا[۶] با حجم بتن‌ریزی حدود ۱۲۰۰۰ مترمکعب باعث ۶۷٪ صرفه‌جویی در هزینه‌ی امور اجرایی و ۱۸٪ صرفه‌جویی در زمان ساخت شده است.[۸] به علت تراکم بالای آرماتورها در ستون‌های طبقات اولیه‌ی برج ۷۰ طبقه‌ی لندمارک یوکوهامای[۷] ژاپن، این بخش از پروژه با حجم بتن‌ریزی بالغ بر حدود ۹۰۰ مترمکعب با بتن خودتراکم بتن‌ریزی شده است.[۹] سر در دانشگاه علم و صنعت ایران نیز از بتن خودتراکم ساخته شده است.

مطالعات متعددی روی خواص مکانیکی و رئولوژیکی بتن خودتراکم و همچنین بتن بازیافتی صورت گرفته است. در مطالعه‌یی در سال ۲۰۱۴، به بررسی تأثیر ظاهری رفتار سنگ‌دانه‌ی بازیافتی در خصوصیات بتن خودتراکم پرداخته شده است،[۱۰] که در آن از جایگزینی سنگ‌دانه‌های بازیافتی با ۴ مقدار مختلف به جای سنگ‌دانه‌های طبیعی در بتن خودتراکم استفاده شده است. همچنین در آن آزمایش‌های: اسلامپ، زمان T۵۰، قیف V [۸] و جعبه‌ی L [۹] بر روی بتن تازه خودتراکم انجام گرفته و پس از عمل‌آوری، آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی مستقیم و همچنین آزمون یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بررسی و نتیجه‌گیری شده است که در آزمایش‌های مربوط به بتن خودتراکم، با افزایش میزان سنگ‌دانه‌های بازیافتی، مقدار اسلامپ و زمان T۵۰ کاهش و مقادیر شاخص قیف V و جعبه‌ی L افزایش یافته است. در نتیجه، میزان کارآیی و روانی بتن خودتراکم کاهش یافته است. همچنین مقاومت کششی مستقیم نمونه‌ها در درصدهای مختلف کاهش چشمگیری نشان نداده است، اما با افزایش درصد سنگ‌دانه‌های بازیافتی، میزان مقاومت فشاری کاهش یافته است.

در مطالعه‌ی دیگری نیز در همان سال نشان داده شد که میزان جذب و دوام بتن ساخته شده با سنگ‌دانه‌های بازیافتی، نسبت به بتن با سنگ‌دانه‌های طبیعی بیشتر شده است.[۱۱] همچنین هی و ژانگ[۱۰] (۲۰۱۴)، به بررسی قدرت و انرژی شکست بتن خودتراکم و ویژگی‌های قدرت و معیار شکست دانه‌های بازیافتی تحت تنش سه‌محوری پرداختند و از قالب‌های مکعبی ۱۵ × ۱۵ × ۱۵ سانتی‌متر و درصدهای متفاوت سنگ‌دانه‌ها برای ساخت نمونه‌های بتنی حاوی مواد بازیافتی برای آزمایش سه محوری استفاده کردند. نتایج تجربی نشان داد که مقاومت فشاری برای بتن خودتراکم حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی در آزمایش سه‌محوری نسبت به تک‌محوری بالاتر از بتن معمولی بوده است. علاوه بر این، مقاومت نمونه‌ها به نسبت درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌های بازیافتی مرتبط است. لذا یک معیار شکست جدید با ۶ پارامتر برای بتن با سنگ‌دانه‌های بازیافتی، تحت حالت تنش سه محوری ارائه شد.[۱۲]

همچنین سیلوا[۱۱] و همکاران (۲۰۱۴)، خواص فیزیکی و ترکیب دانه‌های بازیافتی برای استفاده در بتن را بررسی کردند و سنگ‌دانه‌های بازیافتی به دست آمده از خرد کردن بتن‌های ضایعاتی را با توجه به برخی مشخصه‌ها، طبقه‌بندی کردند و نتیجه گرفتند که قسمتی از سنگ‌دانه‌ی بازیافتی برای بتن سازه‌یی و باقیمانده برای تولید آسفالت قابل استفاده هستند.[۱۳]

اکیب و صیاد (۲۰۱۵)، نیز خصوصیات مکانیکی بتن ساخته شده با سنگ‌دانه‌های بازیافتی را بررسی کردند و از ۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ از سنگ‌دانه‌های بازیافتی به جای سنگ‌دانه‌های طبیعی در بتن ساخته شده استفاده کردند و نتیجه گرفتند که جایگزینی سنگ‌دانه‌های بازیافتی تا ۵۰٪ به جای سنگ‌دانه‌های طبیعی، تأثیر زیادی در خصوصیات مکانیکی بتن ندارد. اما با افزایش درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌های بازیافتی، مقاومت فشاری تا ۱۱٪ و مقاومت کششی تا ۲۰٪ کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی، کارآیی و روانی بتن کاهش می‌یابد.[۱۴]

در مطالعه‌ی دیگری ۲۰۱۴ نیز تأثیر سنگ‌دانه‌های بازیافتی در خصوصیات مکانیکی بتن برای ۶ طرح اختلاط، که ۳ طرح با میکروسیلیس و ۳ طرح دیگر بدون میکروسیلیس بودند و ماسه‌ی بازیافتی در کلیه‌ی طرح‌ها جایگزین ماسه طبیعی شده بود، برای عمل‌آوری ۳، ۷ و ۲۸ روزه‌ی بتن بررسی شدند. نتایج به دست آمده نشان داد که در صورت استفاده از میکروسیلیس، مقاومت فشاری و کششی بتن نسبت به طرح‌هایی که فاقد میکروسیلیس هستند، ۲۰٪ و ۳۵٪ افزایش می‌یابد. اما در صورتی که از میکروسیلیس استفاده نشود، مقاومت فشاری و کششی بتن با مصالح بازیافتی نسبت به بتن ساخته شده با مصالح طبیعی کاهش می‌یابد.[۱۵] ویجایاساندرا[۱۲] و همکارانش (۲۰۱۸) نیز نشان دادند که استفاده از ۳۰٪ تا ۱۰۰٪ سنگ‌دانه‌های درشت بازیافتی به جای سنگ‌دانه‌های درشت طبیعی می‌تواند بین ۹٪ تا ۲۸٪ هزینه‌ی بتن را کاهش دهد.[۱۶]

همچنین ریواتی[۱۳] و همکارانش (۲۰۱۴) در بررسی خواص بتن خودتراکم تازه و سخت شده با سنگ‌دانه‌های بازیافتی، ۵ طرح بتن با ۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ از سنگ‌دانه‌های بازیافتی به جای سنگ‌دانه‌ی طبیعی ساختند و آزمایش‌های بتن تازه و سخت شده بر روی آنها انجام دادند و نتیجه گرفتند که خصوصیات بتن تازه با افزایش درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌های بازیافتی بحرانی‌تر می‌شود، ولی در محدوده‌ی استاندارد قرار دارد، اما با جایگزینی ۱۰۰٪ سنگ‌دانه‌ی بازیافتی به جای سنگ‌دانه‌ی طبیعی، مقاومت فشاری ۱۶٪ و مقاومت کششی ۵۸٪ کاهش می‌یابد.[۱۷] اوانجلیستا و بریتو[۱۴] (۲۰۰۷) نیز به بررسی خصوصیات مکانیکی بتن ساخته شده با ریزدانه‌های بازیافتی پرداختند و در ساخت طرح‌ها، مقادیر مختلفی از ریزدانه‌های بازیافتی را جایگزین ریزدانه‌های طبیعی کردند و خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها را برای ۷، ۲۸ و ۵۶ روز بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد در صورتی که از ریزدانه‌های بازیافتی تا ۳۰٪ به جای ریزدانه‌های طبیعی استفاده شود، تأثیر چندانی در خصوصیات مکانیکی بتن ندارد.[۱۸] کو و پون[۱۵] (۲۰۰۹)، نیز در پژوهش خود نشان دادند که ویژگی‌های بتن خودتراکم ساخته شده از ماسه‌ی رودخانه‌یی و ماسه‌ی بازیافتی (با ۱۰۰٪ درشت‌دانه‌های بازیافتی برای هر دو) تفاوت ناچیزی با هم دارند، یعنی می‌توان از ۱۰۰٪ درشت‌دانه و ریزدانه‌ی بازیافتی در بتن خودتراکم استفاده کرد.[۱۹] همچنین زوران[۱۶] و همکاران (۲۰۱۰)، در بررسی خصوصیات بتن خودتراکم با درشت‌دانه‌های بازیافتی بتن، ۳ نوع مخلوط بتن ساختند که سنگ‌دانه‌های درشت بازیافتی جایگزین ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ سنگ‌دانه‌های درشت طبیعی شدند و نتیجه گرفتند که خصوصیات هر سه نوع بتن خودتراکم ساخته شده، تفاوت ناچیزی با هم دارند و سنگ‌دانه‌های درشت بازیافتی می‌توانند در بتن خودتراکم استفاده شوند.[۲۰] در پژوهش مشابه دیگری در سال ۲۰۱۸ نیز تأثیر جایگزینی سنگ‌دانه‌های درشت بازیافتی در خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم با مقاومت معمولی، متوسط و زیاد بررسی و برای بهبود خواص مکانیکی بتن از خاکستر بادی و میکروسیلیس استفاده شد.[۲۱] منزی[۱۷] و همکاران (۲۰۱۷)، هم خواص درازمدت بتن خودتراکم بازیافتی مثل خزش و افت

را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تضعیف خواص مذکور به علت استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی وابسته به نوع و مقدار مورد استفاده‌ی آنهاست.[۲۲] کوان[۱۸] و همکاران (۲۰۱۷) نیز در مطالعات خود برای بهبود خواص بتن خودتراکم از آهک به عنوان فیلر (پرکننده) استفاده کردند.[۲۳]

در پژوهش حاضر، تأثیر جایگزینی درصدهای مختلف ریزدانه و درشت‌دانه‌ی بازیافتی در خواص مکانیکی و رئولوژیکی بتن خودتراکم بررسی شده است. همان طور که اشاره شد، در بیشتر مطالعات اخیر فقط یکی از فازهای درشت‌دانه یا ریزدانه‌ی بازیافتی بررسی شده است. به علاوه در پژوهش‌های پیشین فقط به بحث و بررسی در مورد آثار افزودن سنگ‌دانه‌ی بازیافتی پرداخته شده و برای بهبود خواص ضعیف شده، اقدامی صورت نگرفته است. در پژوهش حاضر به عنوان تکمیل فرایند پژوهش، در مرحله‌ی بعد با افزودن پوزولان میکروسیلیس به طرح اختلاط، سعی بر بهبود خواص مذکور شده است.

در ادامه‌ی نوشتار حاضر، برنامه‌ی آزمایشگاهی، شامل: مشخصات مصالح مصرفی، مراحل ساخت نمونه‌ها و مراحل مختلف پژوهش به همراه نتایج آزمایش‌های بتن تازه و بتن سخت شده ارائه شده است. در انتها، نیز جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

برنامه‌ی آزمایشگاهی پژوهش حاضر شامل سه مرحله بوده است: ۱ـ انتخاب طرح شاهد، ۲ـ جایگزینی سنگ‌دانه‌های بازیافتی به‌جای سنگ‌دانه‌های طبیعی و ارزیابی طرح‌های بتن بازیافتی، ۳ـ اضافه کردن میکروسیلیس به بتن‌های بازیافتی و ارزیابی طرح‌های بتن بازیافتی تقویت شده با میکروسیلیس.

جهت بررسی و ارزیابی طرح‌های اختلاط، آزمایش‌های بتن تازه برای بررسی خواص رئولوژیکی بتن و آزمایش‌های بتن سخت شده برای بررسی خواص مکانیکی بتن انجام شده است.

در مرحله‌ی اول، با توجه به ملاحظات خواص مکانیکی و رئولوژیکی، طرح شاهد بتن خودتراکم با سنگ‌دانه‌های طبیعی ساخته شد. مرحله‌ی دوم در دو فاز درشت‌دانه و ریزدانه، شامل جایگزینی ریزدانه و درشت‌دانه‌ی بازیافتی به‌جای ریزدانه و درشت‌دانه‌ی طبیعی به میزان ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ بوده است. همچنین در مرحله‌ی دوم، طرحی که کمترین تغییرات منفی از لحاظ خواص مکانیکی و رئولوژیکی با طرح شاهد داشت، برای مرحله‌ی بعد انتخاب شد. در مرحله‌ی سوم، بهترین طرح‌های مرحله‌ی دوم در فازهای درشت‌دانه و ریزدانه به طور جداگانه و افزودن پوزولان میکروسیلیس با درصدهای ۵٪، ۵/۷٪ و ۱۰٪ به جای سیمان انتخاب شدند. هدف از مرحله‌ی سوم، بهبود افت خواص مکانیکی و رئولوژیکی ناشی از افزودن سنگ‌دانه‌های بازیافتی بوده است.

قبل از تشریح جزئیات مراحل انجام پژوهش، مشخصات مصالح مصرفی در ساخت طرح‌های مختلف اختلاط بتن ارائه می‌شود.

۱.۲. مصالح

۱.۱.۲. سیمان

سیمان استفاده شده در پژوهش حاضر، سیمان تیپ ۱ـ۴۲۵ کارخانه‌ی سیمان اردستان است، علت استفاده از آن، کاربری زیاد آن در صنعت به خصوص در مورد پروژه‌های شهری نسبت به سیمان‌های دیگر است. مشخصات شیمیایی مبتنی بر نتایج آزمایش XRF و مشخصات فیزیکی سیمان اردستان به ترتیب در جدول ۱ و جدول ۲ ارائه شده است.

۲.۱.۲. سنگ‌دانه‌های طبیعی

تمام سنگ‌دانه‌های طبیعی، که برای بتن معمولی استفاده شدند، قابل مصرف در بتن خودتراکم نیز بودند. در مورد سنگ‌دانه‌های درشت (شن) معمولاً سعی می‌شود اندازه‌ی بیشینه‌ی آن ۱۹ـ۱۲ میلی‌متر باشد تا به خواص بتن خودتراکم آسیبی نزند. درشت‌دانه‌ی مورد استفاده در پژوهش حاضر از معدن سنگ آب نیل اصفهان تهیه شده است.

هر چه مقدار سنگ‌دانه‌های ریز (ماسه) در بتن خودتراکم در مقایسه با بتن معمولی بیشتر باشد، خواص خودتراکمی بیشتر تأمین می‌شود. ذرات ریزتر از ۰/۱۲۵ میلی‌متر به عنوان پودر تلقی می‌شوند و نقش پرکنندگی را ایفا می‌کنند و باعث بیشتر شدن روانی بتن می‌شوند. ماسه‌ی مورداستفاده در پژوهش حاضر از معدن محمدآباد اصفهان تهیه شده است.

مشخصات سنگ‌دانه‌های طبیعی، شامل: وزن مخصوص در حالت اشباع، درصد جذب آب، میزان سایش در آزمایش لوس‌آنجلس و همچنین نتایج آزمایش‌های تطویل و تورق در جدول ۳ ارائه شده است.

نمودار دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های طبیعی در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

۳.۱.۲. سنگ‌دانه‌های بازیافتی

بیشتر بتن‌ریزی‌های شهری و حجیم در کارخانجات بتن، آماده‌ی تولید و با تراک‌میکسرها حمل می‌شوند. پس از بتن‌ریزی سازه، معمولاً مقداری بتن انتهای تراک‌میکسر باقی می‌ماند، که توسط رانندگان در محیط‌های اطراف تخلیه می‌شود. سنگ‌دانه‌های بازیافتی مورد استفاده در پروژه‌ی حاضر از خرد و سرند کردن نخاله‌های بتنی ذکر شده در اندازه‌های ماسه، نخودی و بادامی به دست آمده‌اند. عملیات تهیه و سرند کردن سنگ‌دانه‌های بازیافتی در سنگ‌شکن فولادشهر اصفهان صورت گرفته است. در شکل ۲، مراحل مختلف تهیه‌ی سنگ‌دانه‌های باریافتی مشاهده می‌شود.

مشخصات سنگ‌دانه‌های بازیافتی، شامل: وزن مخصوص در حالت اشباع، درصد جذب آب، میزان سایش در آزمایش لوس‌آنجلس و همچنین نتایج آزمایش‌های تطویل و تورق در جدول ۴ ارائه شده است.

مقایسه‌ی نتایج ارائه شده در جدول‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد که میزان سایش

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان.

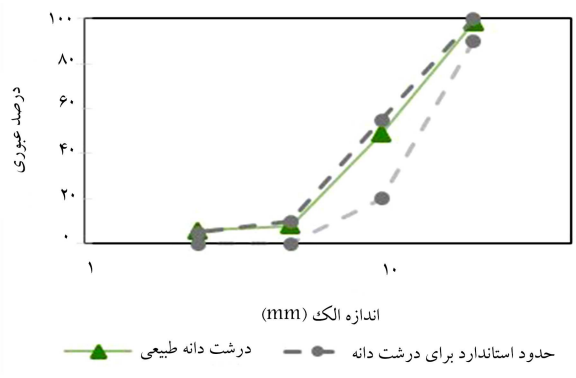
مشخصات	مقدار (٪)
Na_2O	۰/۲۲
K_2O	۰/۶۶
SO_3	۱/۳۵
MgO	۱/۶۲
CaO	۶۴/۱
FE_2O_3	۳/۸۱
Al_2O_3	۵/۱
SIO_2	۲۱/۸
C_3S	۵۵/۵۱
C_2S	۲۰/۶۴
C_3A	۷/۰۷
C_4AF	۱۱/۵۹
LOI	۱/۲

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سیمان.

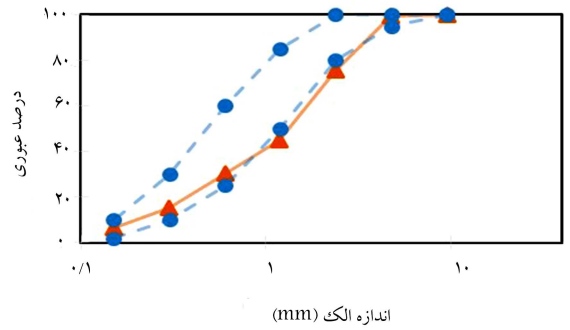
مشخصات	مقدار	استاندارد
زمان گیرش اولیه (دقیقه)	۱۰۰	کمینه‌ی ۴۵
زمان گیرش نهایی (دقیقه)	۱۴۵	بیشینه‌ی ۳۶۰
بلین (cm^2/gr)	۳۱۸۴	- - -

جدول ۳. مشخصات سنگ‌دانه‌های طبیعی.

مشخصات	مقدار
وزن مخصوص درشت‌دانه‌ی طبیعی (gr/cm^3)	۲/۵۸
وزن مخصوص ریزدانه‌ی طبیعی (gr/cm^3)	۲/۵۵
درصد جذب آب درشت‌دانه‌ی طبیعی (٪)	۱/۷
درصد جذب آب ریزدانه‌ی طبیعی (٪)	۴/۱
میزان سایش در آزمایش لوس‌آنجلس (٪)	۱۸/۲
درصد دانه‌های سوزنی (٪)	۱۵
درصد دانه‌های پولکی (٪)	۱۳/۸



الف) منحنی دانه بندی درشت دانه طبیعی؛



ب) منحنی دانه بندی ریزدانه طبیعی.

شکل ۱. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های طبیعی.

سنگ‌دانه‌های بازیافتی نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی بیشتر است. دلیل منطقی برای کمتر بودن مقاومت در برابر سایش و خرد شدن سنگ‌دانه‌های بازیافتی، شکستن آسان ملات خشک شده‌ی سیمان در آنهاست. طبق مشاهده‌های انجام شده پس از آزمایش لوس‌آنجلس روی سنگ‌دانه‌های بازیافتی، قسمت عمده‌یی از ملات خشک شده از سنگ‌دانه‌های قدیمی جدا و خرد شده است. در واقع، ناحیه‌ی اتصال ملات سیمان و سنگ‌دانه، نقطه‌ضعف سنگ‌دانه‌های بازیافتی است.

شکل ۲. نحوه‌ی تهیه‌ی سنگ‌دانه‌های بازیافتی.

جدول ۴. مشخصات سنگ‌دانه‌های بازیافتی.

مشخصات	مقدار
وزن مخصوص درشت‌دانه‌ی بازیافتی (gr/cm^3)	۲/۵۰
وزن مخصوص ریزدانه‌ی بازیافتی (gr/cm^3)	۲/۴۲
درصد جذب آب درشت‌دانه‌ی بازیافتی (٪)	۴/۹
درصد جذب آب ریزدانه‌ی بازیافتی (٪)	۷/۷
میزان سایش در آزمایش لوس‌آنجلس (٪)	۳۰/۴
درصد دانه‌های سوزنی (٪)	۱۹/۲
درصد دانه‌های پولکی (٪)	۱۴/۲

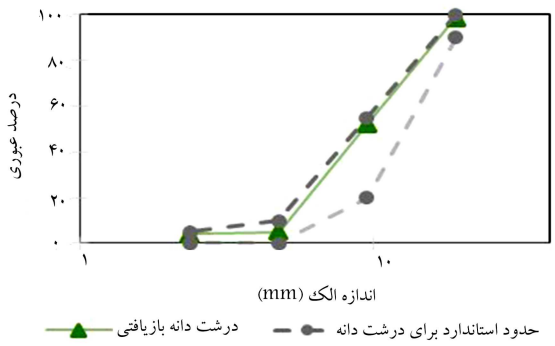
به علاوه نتایج نشان می‌دهند که شاخص تورق و تطویل سنگ‌دانه‌های بازیافتی تا حدودی نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی بالاتر است. اما به طور کلی شاخص تورق و تطویل برای هر دو نوع سنگ‌دانه از بیشینه‌ی مقدار مجاز (۴۰) بسیار پایین‌تر است. نمودار دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های بازیافتی در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

۴.۱.۲. میکروسیلیس

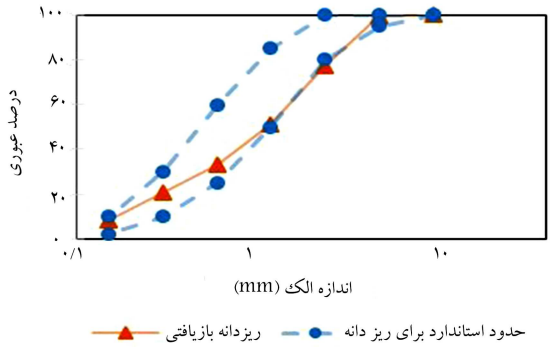
در جدول ۵، مشخصات شیمیایی مبتنی بر نتایج آزمایش XRF و در جدول ۶، مشخصات فیزیکی میکروسیلیس مورد استفاده در پژوهش حاضر،که توسط کارخانه‌ی سازنده ارائه شده است، مشاهده می‌شود.

۵.۱.۲. پودر سنگ

در بتن خودتراکم از پودر سنگ به عنوان عنصر پرکننده (فیلر) استفاده می‌شود. پودر سنگ مورد استفاده در پژوهش حاضر دارای چگالی ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و سطح مخصوص ۴۸۰ کیلوگرم بر مترمربع بوده است، که از معدن سپاهان اصفهان تهیه شده است. پرکننده‌هایی چون پودرسنگ به دلیل داشتن ذرات بسیار ریز، باعث پر کردن فضای خالی و حفره‌های موجود بین ذرات سیمان می‌شود؛ لذا باعث کاهش تخلخل و افزایش درجه‌ی توپری بتن می‌شوند. همچنین این دسته از عناصر پرکننده به دلیل داشتن سطح مخصوص بسیار زیاد، اصطکاک بین دانه‌یی را افزایش می‌دهند و باعث افزایش لزجت بتن می‌شوند. تجزیه‌ی شیمیایی پودر سنگ مبتنی بر نتایج آزمایش XRF در جدول ۷ ارائه شده است. مقدار بالای LOI، نشان‌دهنده‌ی درصد بالای مواد فرار در آزمایش XRF است.



الف) منحنی دانه بندی درشت دانه بازیافتی؛



ب) منحنی دانه بندی ریزدانه بازیافتی.

شکل ۳. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های بازیافتی.

جدول ۵. مشخصات شیمیایی میکروسیلیس.

مشخصات	مقدار(٪)
Na_2O	۰/۱۷
K_2O	۰/۸۶
MgO	۰/۲۷
CaO	۱/۸۵
FE_2O_3	۰/۵۹
SIO_2	۹۳/۹
LOI	۲/۰

جدول ۶. مشخصات فیزیکی میکروسیلیس.

مشخصات	مقدار
محدوده‌ی اندازه‌ی ذرات (mm)	۰/۱۵ ـ ۰/۰۵
وزن مخصوص متراکم (gr/cm^3)	۰/۶
وزن مخصوص غیرمتراکم (gr/cm^3)	۰/۳

۶.۱.۲. فوق روان‌کننده

در پژوهش حاضر، فوق روان‌کننده‌ی بتن بر پایه‌ی پلی کربوکسیلات با درصد مواد جامد ۴۵٪، ساخت شرکت پنتا استفاده شده است. درصد فوق روان‌کننده با توجه به کارآیی بالا در نسبت مخلوط تنظیم می‌شود. مشخصات فنی فوق‌روان‌کننده در جدول ۸ ارائه شده است، که توسط شرکت سازنده اندازه‌گیری و آزمایش شده است.

جدول ۷. مشخصات شیمیایی پودر سنگ.

مشخصات	مقدار (٪)
CaO	۵۴/۷۷
SiO_2	۱/۴۷
MgO	۰/۳۰
Al_2O_3	۰/۲۲
Fe_2O_3	۰/۲۹
SO_3	۰/۰۶
K_2O	۰/۰۸
Na_2O	۰/۰۵
LOI	۴۲/۲۳

جدول ۸. مشخصات شیمیایی فوق‌روان‌کننده.

مشخصات	خصوصیت
رنگ	قهوه‌ای روشن
قابلیت انحلال	در آب
حالت فیزیکی	مایع
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۱/۰۷ ± ۲
میزان یون کلراید	صفر
PH	۵/۵ ± ۵

۲.۲. مراحل ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

برای اختلاط و ساخت طرح‌های مختلف از میکسر استوانه‌یی کج‌شونده استفاده شده است. برای ساخت بتن خودتراکم، ابتدا مصالح درشت‌دانه و مقداری از مصالح ریزدانه به میکسر اضافه شد، سپس مقداری از آب طرح اختلاط به مصالح اضافه شد تا سطح آنها مرطوب شود. اختلاط مصالح دانه‌یی به مدت ۲ دقیقه در میکسر انجام گرفت و سپس سیمان و ریزدانه‌های باقیمانده به میکسر افزوده و همزمان آب باقیمانده به همراه روان‌کننده‌ی محلول در آن به مخلوط اضافه شد و اختلاط بتن به مدت ۳ دقیقه‌ی دیگر صورت گرفت. روند ساخت بتن‌های خودتراکم با سنگ‌دانه‌های بازیافتی مشابه بتن‌های خودتراکم معمولی است. در تمامی مراحل ساخت بتن با تغییر در زاویه‌ی دوران محور میکسر، بتن همگن و یکنواخت ساخته شد. بتن پس از تخلیه‌ی میکسر، ابتدا با بیلچه زیر و رو شد و بلافاصله پس از آن آزمایش‌های بتن تازه انجام شدند.

۳.۲. آزمایش‌های بتن تازه

آزمایش‌های بتن تازه برای ارزیابی خواص رئولوژیکی بتن، شامل: جعبه‌ی L، قیف V، جریان اسلامپ، T۵۰ و جعبه‌ی U است. محدوده‌ی مجاز خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم مطابق استاندارد EFNARC[۱۹]،[۲۴] در جدول ۹ ارائه شده است.

شاخص جعبه‌ی L، بیان‌گر قابلیت پرکنندگی و قابلیت عبور بتن خودتراکم است. هر چه شاخص جعبه‌ی L، به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده‌ی قابلیت پرکنندگی بهتر بتن خودتراکم و کمتر بودن تنش تسلیم بتن است. شاخص قیف V، معیاری برای تعیین قابلیت پرکنندگی و لزجت خمیری بتن است. اگر زمان تخلیه‌ی بتن از قیف بیشتر از ۱۲ ثانیه باشد، بیان‌گر لزجت خمیری زیاد است، در این صورت ممکن است تأمین کارآیی مورد نیاز بتن مشکل باشد. اگر زمان تخلیه‌ی بتن کمتر از ۶ ثانیه باشد، نشان‌دهنده‌ی لزجت کم و احتمال وقوع پدیده‌ی جدا شدگی است. شاخص جریان

جدول ۹. محدوده‌ی مجاز خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم.

نوع آزمایش	محدوده‌ی مجاز بر اساس استاندارد ***EFNARC***
جعبه‌ی L	۰٫۸ـ۱
قیف V (S)	۶ـ۱۲
جریان اسلامپ (mm)	۶۵۰ـ۸۰۰
T۵۰ (S)	۲ـ۵
جعبه‌ی U (mm)	۰ـ۳۰

اسلامپ، معیاری برای قابلیت جریان و پرکنندگی بتن است. اگر شاخص جریان اسلامپ کمتر از ۶۵۰ میلی‌متر باشد، نشان‌دهنده‌ی تنش تسلیم زیاد و کارپذیری کم بتن است. برعکس اگر شاخص جریان اسلامپ از ۸۰۰ میلی متر بیشتر باشد، تنش تسلیم کم است و احتمال جدا شدگی وجود دارد. شاخص T۵۰ برای تعیین لزجت خمیری بتن استفاده می‌شود. شاخص بیش از ۵ ثانیه، نشان‌دهنده‌ی لزجت خمیری زیاد بتن است. شاخص کمتر از ۲ ثانیه، لزجت کم بتن را نشان می‌دهد. در این موارد احتمال بروز جدا شدگی و آب انداختگی در بتن افزایش می‌یابد. آزمایش جعبه‌ی U سخت‌گیرانه‌ترین آزمایش بتن خودتراکم است و قابلیت عبور و پرشدگی و توانایی شکل‌پذیری بتن را مدل‌سازی می‌کند. شاخص مربوط به آزمایش اخیر، ترکیب مناسبی از لزجت و تنش تسلیم مورد نیاز است و هر چه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد، روانی و قابلیت عبور بتن بهتر خواهد بود و لزجت خمیری و تنش تسلیم بتن در محدوده‌ی بهینه قرار می‌گیرد. هر یک از آزمایش‌های بتن تازه، دست کم دو بار انجام شده و نتایج نهایی بر اساس میانگین‌گیری نتایج آزمایش‌ها به دست آمده است.

۴.۲. آزمایش‌های بتن سخت شده

آزمایش‌های بتن سخت شده برای ارزیابی خواص مکانیکی بتن، شامل آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی است. آزمایش‌های مورد نظر در پژوهش حاضر در سن ۲۸ روزه‌ی بتن و از میانگین‌گیری نتایج ۲ یا ۳ نمونه‌ی بتنی به دست آمده‌اند. در هر طرح اختلاط باید ۶۰ لیتر بتن ساخته شود. در هر طرح پس از انجام آزمایش‌های بتن تازه، ۳ قالب مکعبی ۱۵ × ۱۵ × ۱۵ سانتی‌متری و ۲ قالب استوانه‌یی با ارتفاع ۳۰ و قطر مقطع ۱۵ سانتی‌متری و ۲ قالب تیر با ابعاد ۱۰ × ۱۰ × ۵۰ سانتی‌متری به ترتیب برای اندازه‌گیری مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی تهیه و در سن ۲۸ روزگی آزمایش شدند. قالب‌های مکعبی و استوانه‌یی هرکدام در سه لایه‌ی بتن‌ریزی و هر لایه، ۲۵ ضربه کوبیده شدند. سپس با چکش لاستیکی ضربه‌هایی به بدنه‌ی قالب زده شدند تا هوای موجود در بتن خارج شود. تیرها هرکدام در دو لایه بتن‌ریزی شدند و با کمک ویبراتور، هر لایه متراکم و هوای موجود در آن خارج شده است. پس از اتمام قالب‌ریزی و تراکم، سطح نمونه‌های بتنی با گونی‌های مرطوب پوشانده شدند، تا از تبخیر آب بتن جلوگیری به عمل آید. نمونه‌های بتنی پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و به حوضچه‌ی عمل‌آوری منتقل شدند.

۳. ارائه و تفسیر نتایج آزمایشگاهی

۱.۳. مرحله‌ی اول: تهیه‌ی طرح اختلاط شاهد

در مرحله‌ی اول، چند طرح اختلاط بتن ساخته شد و با توجه به محدوده‌ی مجاز خواص رئولوژیک بتن خودتراکم بر اساس استاندارد EFNARC جدول ۹ و ملاحظات خواص مکانیکی مناسب، طرح شاهد انتخاب شد. نسبت مخلوط در طرح شاهد و نتایج آزمایش‌های بتن تازه و سخت شده‌ی طرح شاهد به ترتیب در جدول‌های ۱۰ الی ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۱۰. نسبت مخلوط در طرح شاهد.

مشخصات طرح	مقدار
نسبت آب به سیمان	۰٫۴۱
سیمان (kg)	۴۰۰
آب (kg)	۱۶۷
پودر سنگ (kg)	۱۰۰
فوق روان‌کننده (kg)	۳٫۸
ماسه‌ی طبیعی (kg)	۱۲۰۰
شن ۶ـ۱۹ (kg)	۵۳۰

جدول ۱۱. نتایج آزمایش‌های بتن تازه - طرح شاهد.

نوع آزمایش	مقدار
جعبه‌ی L	۰٫۹۳
قیف V (S)	۱۰٫۳۲
جریان اسلامپ (mm)	۶۷۰
T۵۰ (S)	۴٫۱۱
جعبه‌ی U (mm)	۲٫۹

جدول ۱۲. نتایج آزمایش‌های بتن سخت شده ـ طرح شاهد.

نوع آزمایش	مقدار
مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	۳۸٫۹۹
مقاومت کششی ۲۸ روزه (MPa)	۳٫۶۱
مقاومت خمشی ۲۸ روزه (MPa)	۳٫۹

مطابق جدول ۱۱، خواص رئولوژیکی طرح شاهد در محدوده‌ی مجاز بر اساس استاندارد EFNARC قرار دارد. همچنین با توجه به جدول ۱۲، طرح شاهد از لحاظ خواص مقاومتی نیز شرایط مناسبی دارد.

۲.۳. مرحله‌ی دوم: جایگزینی درشت‌دانه و ریزدانه‌ی طبیعی با درشت‌دانه و ریزدانه‌ی بازیافتی به میزان ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪

در مرحله‌ی دوم، هدف بررسی آثار مقادیر مختلف ریزدانه و درشت‌دانه‌های بازیافتی در بتن خودتراکم است. به همین منظور درصدهای مختلفی شامل ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، جایگزین سنگ‌دانه‌های طبیعی شدند. نسبت مخلوط طرح‌ها با درصدهای مختلف ریزدانه و درشت‌دانه‌ی بازیافتی در جدول ۱۳ ارائه شده است، که بر اساس جایگزینی وزنی ارائه شده‌اند. طرح‌هایی که مشخصه‌ی FRA [۲۰] و CRA [۲۱] دارند، به ترتیب نشان‌دهنده‌ی طرح‌های دارای ریزدانه‌ی بازیافتی و درشت‌دانه‌ی بازیافتی هستند و عدد جلوی آن نیز مقدار درصد سنگ‌دانه‌ی بازیافتی را نشان می‌دهد. طرح کنترل شاهد نیز با C [۲۲] نمایش داده می‌شود. در جدول‌های ۱۴ و ۱۵ نتایج آزمایش‌های بتن تازه و سخت شده‌ی مرحله‌ی دوم ارائه شده است.

با مشاهده‌ی جدول ۱۴ می‌توان دریافت که با افزایش مقادیر سنگ‌دانه‌ی بازیافتی از میزان روانی بتن کاسته شده و خواص رئولوژیکی بتن افت پیدا کرده

جدول ۱۳. نسبت مخلوط طرح‌های مرحله‌ی دوم.

معرف مخلوط	شن ۶ـ۱۹ (kg)	ماسه‌ی طبیعی (kg)	ریزدانه‌ی بازیافتی (kg)	درشت‌دانه‌ی بازیافتی (kg)	فوق روان‌کننده (kg)	پودر سنگ (kg)	سیمان (kg)	آب (kg)
C	۵۳۰	۱۲۰۰	۰	۰	۳/۸	۱۰۰	۴۰۰	۱۶۷
FRA۲۵	۵۳۰	۹۰۰	۳۰۰	۰	۳/۸	۱۰۰	۴۰۰	۱۶۷
FRA۵۰	۵۳۰	۶۰۰	۶۰۰	۰	۳/۸	۱۰۰	۴۰۰	۱۶۷
FRA۷۵	۵۳۰	۳۰۰	۹۰۰	۰	۳/۸	۱۰۰	۴۰۰	۱۶۷
FRA۱۰۰	۵۳۰	۰	۱۲۰۰	۰	۳/۸	۱۰۰	۴۰۰	۱۶۷
CRA۲۵	۳۹۷/۵	۱۲۰۰	۰	۱۳۲/۵	۳/۸	۱۰۰	۴۰۰	۱۶۷
CRA۵۰	۲۶۵	۱۲۰۰	۰	۲۶۵	۳/۸	۱۰۰	۴۰۰	۱۶۷
CRA۷۵	۱۳۲/۵	۱۲۰۰	۰	۳۹۷/۵	۳/۸	۱۰۰	۴۰۰	۱۶۷
CRA۱۰۰	۰	۱۲۰۰	۰	۵۳۰	۳/۸	۱۰۰	۴۰۰	۱۶۷

جدول ۱۴. نتایج آزمایش‌های بتن تازه – مرحله‌ی دوم.

نوع آزمایش	جعبه‌ی L	قیف V (S)	جریان اسلامپ (mm)	$T۵۰$ (S)	جعبه‌ی U (mm)
C	۰/۹۳	۱۰/۳۲	۶۷۰	۴/۱۱	۲/۹
FRA۲۵	۰/۸۹	۱۱/۸	۶۶۵	۴/۸	۱
FRA۵۰	۰/۸۸	۱۳/۶۹	۵۶۷	۷/۱۱	۱/۵
FRA۷۵	۰/۸۷	۲۰/۱۱	۶۲۱	۱۰/۱	۲/۱
FRA۱۰۰	۰/۸۱	۲۹/۳	۷۰۰	۱۲	۲/۶
CRA۲۵	۰/۸۷	۱۱/۹۳	۶۵۵	۴/۹۶	۳/۲
CRA۵۰	۰/۸۳	۱۵/۴۲	۶۲۳	۷/۶۵	۴/۱
CRA۷۵	۰/۸۱	۲۱/۴۵	۶۰۳	۱۱/۲۳	۵/۲
CRA۱۰۰	۰/۸	۳۱/۷	۵۸۷	۱۳/۵	۶/۱

جدول ۱۵. نتایج آزمایش های بتن سخت شده – مرحله‌ی دوم.

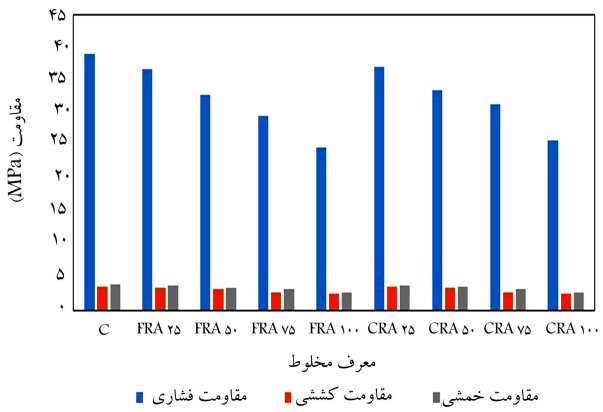
نوع آزمایش	مقاومت فشاری (MPa)	درصد کاهش	مقاومت کششی (MPa)	درصد کاهش	مقاومت کششی (MPa)	درصد کاهش
C	۳۸/۹۹	--	۳/۶۱	--	۳/۹	--
FRA۲۵	۳۶/۷	۶/۲۳	۳/۴۵	۴/۴۳	۳/۷۵	۳/۸۵
FRA۵۰	۳۲/۸۳	۱۵/۸	۳/۲۲	۱۰/۸	۳/۴۱	۱۲/۵۶
FRA۷۵	۲۹/۶	۲۴/۱	۲/۷	۲۵/۱	۳/۲	۱۷/۹۵
FRA۱۰۰	۲۴/۸	۳۶/۴	۲/۵	۳۰/۷	۲/۸	۲۸/۲
CRA۲۵	۳۷	۵/۱	۳/۵۵	۱/۶۶	۳/۸۱	۲/۳۱
CRA۵۰	۳۳/۵۱	۱۴	۳/۳۸	۶/۳۷	۳/۵۷	۸/۴۶
CRA۷۵	۳۱/۳۶	۱۹/۶	۲/۷۶	۲۳/۵۴	۳/۲۵	۱۶/۶۷
CRA۱۰۰	۲۵/۸۳	۳۳/۷۵	۲/۴۶	۳۱/۸	۲/۷۸	۲۸/۷۲

است. افت خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم با سنگ‌دانه‌های بازیافتی عمدتاً ناشی از دو عامل است: ۱ـ زبری سطحی بیشتر سنگ‌دانه‌های بازیافتی در مقایسه با سنگ‌دانه‌های طبیعی با توجه به نحوه‌ی فرایند تهیه‌ی آنها، که به موجب آن تنش برشی تسلیم بتن زیاد می‌شود، ۲ـ جذب آب بیشتر به علت وجود ریزدانه‌های بیشتر در بتن با سنگ‌دانه‌های بازیافتی در مقایسه با بتن با سنگ‌دانه‌های طبیعی.[۲۴-۲۸] البته با توجه به نمودارهای شکل‌های ۱ و ۳، منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های طبیعی و سنگ‌دانه‌های بازیافتی در مطالعه‌ی حاضر، شباهت زیادی به هم دارند. لذا به نظر می‌رسد عامل اول در مطالعه‌ی حاضر، نقش مهم‌تری در مقایسه با عامل دوم داشته باشد.

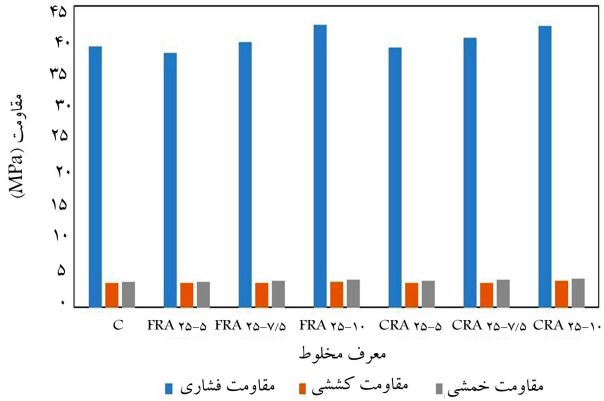
همان طورکه از جدول ۱۴ مشاهده می‌شود، افزایش درصد جایگزینی ریزدانه یا درشت‌دانه‌ی بازیافتی، هرکدام آثار خاص خود را دارند. در فاز درشت‌دانه، کلیه‌ی مشخصه‌های رئولوژیکی بتن خودتراکم با افزایش درصد جایگزینی افت کرده‌اند،

جدول ۱۶. نسبت مخلوط طرح‌های مرحله‌ی سوم.

معرف مخلوط	شن ۶ـ۱۹ (kg)	ماسه طبیعی (kg)	ریزدانه‌ی بازیافتی (kg)	درشت‌دانه‌ی بازیافتی (kg)	فوق روان‌کننده (kg)	پودر سنگ (kg)	سیمان (kg)	میکروسیلیس (kg)	آب (kg)
FRA۲۵	۵۳۰	۹۰۰	۳۰۰	۰	۳٫۸	۱۰۰	۴۰۰	۰	۱۶۷
FRA۲۵_۵	۵۳۰	۹۰۰	۳۰۰	۰	۳٫۸	۱۰۰	۳۸۰	۲۰	۱۶۷
FRA۲۵_۷/۵	۵۳۰	۹۰۰	۳۰۰	۰	۳٫۸	۱۰۰	۳۷۰	۳۰	۱۶۷
FRA۲۵_۱۰	۵۳۰	۹۰۰	۳۰۰	۰	۳٫۸	۱۰۰	۳۶۰	۴۰	۱۶۷
CRA۲۵	۳۹۷٫۵	۱۲۰۰	۰	۱۳۲٫۵	۳٫۸	۱۰۰	۴۰۰	۰	۱۶۷
CRA۲۵_۵	۳۹۷٫۵	۱۲۰۰	۰	۱۳۲٫۵	۳٫۸	۱۰۰	۳۸۰	۲۰	۱۶۷
CRA۲۵_۷/۵	۳۹۷٫۵	۱۲۰۰	۰	۱۳۲٫۵	۳٫۸	۱۰۰	۳۷۰	۳۰	۱۶۷
CRA۲۵_۱۰	۳۹۷٫۵	۱۲۰۰	۰	۱۳۲٫۵	۳٫۸	۱۰۰	۳۶۰	۴۰	۱۶۷



شکل ۴. تغییرات خواص مکانیکی بتن طرح‌های مرحله‌ی دوم.



شکل ۵. تغییرات خواص مکانیکی بتن طرح‌های مرحله‌ی سوم.

ولی در فاز ریزدانه بعضی از مشخصه‌های رئولوژیکی بتن مثل جریان اسلامپ یا جعبه‌ی U با افزایش درصد جایگزینی روند ثابت و مشخصی ندارند. عدم وجود روند مشخص در خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم بازیافتی در مطالعات پژوهشگران دیگر نیز مشاهده می‌شود.[۲۱و۲۲] در بتن با سنگ‌دانه‌های بازیافتی به علت جذب آب بیشتر سنگ‌دانه‌های بازیافتی، میزان کل آب طرح اختلاط بتن که شامل آب اضافی لازم برای اشباع کردن سنگ‌دانه‌هاست، در مقایسه با بتن با طرح اختلاط با سنگ‌دانه‌های معمولی بیشتر است. این میزان آب اضافی در بعضی از طرح‌های اختلاط بتن بازیافتی در همان ابتدا بعد از ساخت بتن جذب سنگ‌دانه‌ها نمی‌شود و در نتیجه باعث افزایش کارایی بتن می‌شود.[۲۲] به خصوص در مورد بتن با ریزدانه‌ی بازیافتی به علت جذب آب بیشتر ریزدانه‌ی بازیافتی در مقایسه با درشت‌دانه‌ی بازیافتی، این موضوع محتمل‌تر است. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که افت روانی و خواص رئولوژیکی ناشی از افزایش ریزدانه‌ی بازیافتی کمتر از افزایش مقادیر درشت‌دانه‌ی بازیافتی است. به عبارت دیگر، افزایش مقادیر ریزدانه‌های بازیافتی، آثار کمتری در روان بودن و خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم خواهند داشت.

در شکل ۴ و جدول ۱۵، تغییرات خواص مکانیکی بتن در طرح‌های مختلف مشاهده می‌شود، که مطابق آنها با افزایش مقادیر سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، خواص مکانیکی افت بیشتری پیدا کرده‌اند، به طوری که دو طرح اختلاط FRA۲۵ و CRA۲۵، که کمترین درصد جایگزینی با سنگ‌دانه‌های بازیافتی را داشته‌اند، کمترین افت مقاومت فشاری، کششی و خمشی را نسبت به طرح شاهد داشته‌اند. چسبندگی ضعیف بین ملات قدیمی و دانه‌ها، وجود ترک‌های عرضی در سنگ‌دانه‌های بازیافتی در فرایند تهیه‌ی سنگ‌دانه‌ها ناشی از خرد شدن و وجود ملات متخلخل ضعیف دور سنگ‌دانه‌ها باعث تضعیف خواص مکانیکی بتن می‌شود.[۲۶و۲۷] در واقع عوامل اخیر سبب می‌شوند پیوند ضعیفی بین بتن ناحیه‌ی انتقالی ITZ [۲۳] قدیمی و ناحیه‌ی انتقالی ITZ جدید ایجاد شود، که با افزایش درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌های بازیافتی، پیوند مذکور ضعیف‌تر می‌شود و در نتیجه خواص مکانیکی بتن افت بیشتری پیدا می‌کنند.[۲۹و۳۰]

علاوه بر این، کاهش افت خواص مکانیکی بتن در طرح‌های اختلاط بتن حاوی ریزدانه‌ی بازیافتی در مقایسه با درشت‌دانه‌ی بازیافتی بیشتر است. مثلاً با افزایش ۲۵٪ ریزدانه‌ی بازیافتی، ۶٫۲۳٪ کاهش مقاومت فشاری مشاهده شده است، در صورتی که با درصد درشت‌دانه‌ی مشابه، ۵٫۱٪ افت مقاومت فشاری به وجود آمده است. این اختلاف مقاومتی و خواص مکانیکی در تمامی درصدها مشهود و قابل مقایسه است. به عنوان نتیجه‌ی کلی می‌توان دریافت که بتن خودتراکم با ریزدانه‌ی بازیافتی، خواص رئولوژیکی و روانی بهتر و خواص مکانیکی و مقاومتی کمتری در مقایسه با بتن حاوی درشت‌دانه‌ی بازیافتی خواهد داشت. با بررسی و مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با محدوده‌های مجاز EFNARC می‌توان دریافت که فقط نتایج طرح با ۲۵٪ جایگزینی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی در هر دو فاز ریزدانه و درشت‌دانه در تمامی محدوده‌های مورد نظر است. به عبارت دیگر، با جایگزینی ۲۵٪ ریزدانه یا درشت‌دانه‌ی بازیافتی، خواص بتن خودتراکم قابل حصول است. علاوه بر این، این دو طرح کمترین افت مقاومت فشاری، کششی و خمشی را نسبت

جدول ۱۷. نتایج آزمایش‌های بتن تازه – مرحله‌ی سوم.

نوع آزمایش	جعبه‌ی L	قیف V (S)	جریان اسلامپ (mm)	T ۵۰ (S)	جعبه‌ی U (mm)
FRA۲۵	۰٫۸۹	۱۱٫۸	۶۶۵	۴٫۸	۱
FRA۲۵_۵	۰٫۸۶	۱۲٫۱۴	۶۵۴	۴٫۹۵	۲٫۵
FRA۲۵_۷٫۵	۰٫۸۲	۱۵٫۳۹	۶۳۱	۷٫۳۵	۴٫۶
FRA۲۵_۱۰	۰٫۷۶	۲۰٫۸	۶۲۳	۱۱٫۸۹	۶٫۵
CRA۲۵	۰٫۸۷	۱۱٫۹۳	۶۵۵	۴٫۹۶	۳٫۲
CRA۲۵_۵	۰٫۸۵	۱۲٫۳۲	۶۵۰	۵٫۰۳	۳٫۹
CRA۲۵_۷٫۵	۰٫۸۳	۱۶٫۷۶	۶۳۰	۸٫۱۵	۵٫۳
CRA۲۵_۱۰	۰٫۷۸	۲۲٫۶۷	۶۲۰	۱۲٫۸۵	۶٫۸

جدول ۱۸. نتایج آزمایش‌های بتن سخت شده – مرحله‌ی سوم.

نوع آزمایش	مقاومت فشاری (MPa)	درصد افزایش	مقاومت کششی (MPa)	درصد افزایش	مقاومت خمشی (MPa)	درصد افزایش
FRA۲۵	۳۶٫۷	--	۳٫۴۵	--	۳٫۷۵	--
FRA۲۵_۵	۳۸	۳٫۵۴	۳٫۵۹	۴٫۱	۳٫۸۵	۲٫۶۷
FRA۲۵_۷٫۵	۳۹٫۶	۷٫۹	۳٫۷۱	۷٫۵۴	۳٫۹۸	۶٫۱۳
FRA۲۵_۱۰	۴۲٫۱	۱۴٫۷۱	۳٫۸۹	۱۲٫۷۵	۴٫۱۶	۱۰٫۹۳
CRA۲۵	۳۷	--	۳٫۵۵	--	۳٫۸۱	--
CRA۲۵_۵	۳۸٫۷	۴٫۶	۳٫۶۰	۱٫۴۱	۳٫۹۲	۲٫۸۱
CRA۲۵_۷٫۵	۴۰٫۳	۸٫۹۱	۳٫۷۲	۴٫۷۹	۴٫۱۱	۷٫۸۷
CRA۲۵_۱۰	۴۲	۱۳٫۵۱	۳٫۹۱	۱۰٫۱۴	۴٫۲۶	۱۱٫۸۱

به طرح شاهد داشته‌اند. لذا دو طرح اختلاط FRA۲۵ و CRA۲۵ برای مرحله‌ی بعد پژوهش انتخاب شده‌اند.

۳.۳. مرحله‌ی سوم: افزودن پوزولان میکروسیلیس با درصدهای ۵، ۷٫۵ و ۱۰ به طرح‌های انتخابی مرحله‌ی دوم

با توجه به افت خواص مکانیکی بتن‌های حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی انتخابی مرحله‌ی قبل (طرح اختلاط‌های FRA۲۵ و CRA۲۵)، هدف از مرحله‌ی کنونی، بهبود خواص مکانیکی طرح‌های مذکور است، که برای تحقق آن از پوزولان میکروسیلیس در درصدهای ۵، ۷٫۵ و ۱۰ که جایگزین سیمان می‌شود، استفاده شده است. در طرح‌های اخیر، فقط مقادیر سیمان و میکروسیلیس تغییر کرده و مقادیر دیگر پارامترهای نسبت مخلوط ثابت بوده است. نسبت مخلوط طرح‌های مورد بررسی در مرحله‌ی سوم در جدول ۱۶ ارائه شده است.

مطابق جدول ۱۷، با افزایش مقادیر میکروسیلیس خواص رئولوژیکی دچار افت شده‌اند، که این افت ناشی از ریزساختار بودن و جذب آب بالای میکروسیلیس است.[۳۱] این افت هم در ریزدانه و هم در درشت‌دانه قابل مشاهده است. به عنوان نمونه، طرح‌های FRA۲۵_۵، FRA۲۵_۷٫۵ و FRA۲۵_۱۰ در آزمایش جریان اسلامپ دارای مقادیر ۶۵۴، ۶۳۱ و ۶۲۳ هستند. این روند نزولی کاهش جریان اسلامپ با افزایش درصد میکروسیلیس گواه بر افت روانی و کارایی و خواص رئولوژیکی بتن است. افزودن میکروسیلیس تا میزان ۵٪، اثر کمی در خواص رئولوژیکی داشته و بتن همچنان در محدوده‌ی خودتراکمی باقی مانده است، ولی با افزایش میکروسیلیس به درصدهای بالاتر، دیگر معیارهای بتن خودتراکم با استاندارد EFNARC تأمین نشده است. موارد ذکر شده برای درشت‌دانه‌های بازیافتی نیز قابل مشاهده است .

شکل ۵ و جدول ۱۸، تغییرات خواص مکانیکی بتن در طرح‌های مرحله‌ی سوم را نشان می‌دهد. بررسی شکل ۵ و جدول ۱۸ نشان می‌دهد افزایش میکروسیلیس تأثیر مستقیم در خواص مکانیکی بتن دارد، به نحوی که هم در فاز درشت‌دانه و هم در فاز ریزدانه‌ی بازیافتی، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن با افزایش درصد میکروسیلیس زیاد شده است. تقویت خواص مکانیکی بتن به دلیل بهبود چشمگیر ریزساختار خمیر سیمان و افزایش تراکم آن است.[۳۲] درصدهای افزایش ارائه شده در جدول در مقایسه با طرح اختلاط‌های مرحله‌ی دوم، بدون افزودنی میکروسیلیس محاسبه شده است.

مقایسه‌ی مقادیر مقاومت‌های ارائه شده در جدول ۱۸ با مقادیر مقاومت‌های طرح شاهد اولیه (طرح ۲ جدول ۱۲) نشان می‌دهد که طرح‌های FRA۲۵_۵ و CRA۲۵_۵ تقریباً شرایط مشابه طرح شاهد را دارند. به طور مشخص مقاومت فشاری، کششی و خمشی طرح FRA۲۵_۵ به ترتیب فقط ۲٫۵٪، ۰٫۶٪ و ۱٫۳٪ کمتر از طرح شاهد است. همچنین مقاومت فشاری و کششی طرح CRA۲۵_۵ به ترتیب فقط ۰٫۷٪ و ۰٫۳٪ کمتر از طرح شاهد است و مقاومت خمشی آن حتی ۰٫۵٪ از مقاومت خمشی طرح شاهد بیشتر است. بقیه‌ی طرح اختلاط‌ها با درصد میکروسیلیس بالاتر، عمدتاً خواص مقاومتی بالاتری نسبت به طرح شاهد دارند.

درمجموع طرح‌های FRA۲۵_۵ و CRA۲۵_۵، هم از لحاظ خواص مکانیکی و مقاومتی قابل قبول هستند و شرایط مشابه طرح شاهد را دارند و هم از لحاظ

خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم نیز مورد تأیید هستند. بررسی دقیق‌تر نشان می‌دهد طرح FRA۲۵_۵ از لحاظ خواص رئولوژیکی برتر از طرح CRA ۲۵_۵ است و طرح CRA۲۵_۵ از لحاظ خواص مکانیکی از طرح FRA۲۵_۵ برتر است.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر در دو فاز جداگانه، تأثیر جایگزینی درصدهای مختلف ریزدانه و درشت‌دانه‌ی بازیافتی در خواص مکانیکی و رئولوژیکی بتن خودتراکم بررسی شده و این نتایج به دست آمده است:

- با افزودن ریزدانه‌ی بازیافتی خواص رئولوژیکی افت پیدا می‌کند. در وضعیتی که میزان افزایش ریزدانه‌ی بازیافتی ۲۵٪ است، افت خواص رئولوژیکی بسیار ناچیز است و مشخصات خودتراکمی بتن همچنان در محدوده‌ی مجاز است. ولی با افزودن بیشتر ریزدانه‌ی بازیافتی، خواص رئولوژیکی افت بیشتری پیدا می‌کند. از طرف دیگر بتن با ۲۵٪ ریزدانه‌ی بازیافتی، دارای خواص مکانیکی و مقاومتی نزدیک به طرح شاهد است و افت ناچیزی در حدود ۴٪ تا ۶٪ دارد؛ ولی با افزایش بیشتر ریزدانه‌ی بازیافتی، افت مقاومت مذکور به اعداد بالاتری حتی تا حدود ۳۵٪ می‌رسد، که نامطلوب است.
- طرح با ۲۵٪ درشت‌دانه‌ی بازیافتی نیز مانند ۲۵٪ ریزدانه هم از لحاظ مقاومتی و هم از لحاظ خواص رئولوژیکی افت ناچیزی دارد و قابل قبول است. با افزودن ۲۵٪ درشت‌دانه‌ی بازیافتی، نتایج آزمایش‌های بتن تازه دچار افت ناچیزی می‌شوند، ولی همچنان از لحاظ خواص خودتراکمی در محدوده‌ی مناسب هستند. با افزودن مقادیر بیشتر درشت‌دانه‌ی بازیافتی، بتن از حالت خودتراکمی خارج می‌شود.
- طرح‌های ساخته شده با ریزدانه‌های بازیافتی، خواص رئولوژیکی بهتری نسبت به طرح‌های ساخته شده با درشت‌دانه‌ی بازیافتی دارند و از سوی دیگر، طرح‌هایی که با درشت‌دانه‌ی بازیافتی ساخته می‌شوند، خواص مکانیکی و مقاومتی بهتری نسبت به طرح با ریزدانه‌ی بازیافتی دارند.
- میزان مناسب برای جایگزینی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی (اعم از ریزدانه یا درشت‌دانه)، ۲۵٪ است؛ به نحوی که بتن دچار کمترین تغییرات منفی خواص رئولوژیکی و مکانیکی می‌شود.
- افزودن میکروسیلیس به بتن باعث افزایش خواص مکانیکی بتن بازیافتی و نیز سبب افت ناچیز در خواص رئولوژیکی بتن می‌شود. این افت ناشی از ریزساختار بودن و جذب آب بالای میکروسیلیس است. افزودن میکروسیلیس تا میزان ۵٪، اثر کمی در خواص رئولوژیکی دارد و بتن همچنان در محدوده‌ی خودتراکمی باقی می‌ماند، ولی با افزایش میکروسیلیس به درصدهای بالاتر، دیگر معیارهای بتن خودتراکم با استاندارد EFNARC تأمین نمی‌شود.
- به عنوان نتیجه‌ی کلی پژوهش حاضر، استفاده از ریزدانه و درشت‌دانه‌ی بازیافتی تا حدود ۲۵٪ و استفاده از میکروسیلیس تا حدود ۵٪ خواص مکانیکی و رئولوژیکی بتن خودتراکم را تغییر نمی‌دهد و می‌تواند جایگزین مناسبی برای بتن خودتراکم با سنگ‌دانه‌های طبیعی باشد.

شایان ذکر است با توجه به این‌که تمرکز پژوهش حاضر، بتن خودتراکم بوده است، خواص مکانیکی و ویژگی‌های رئولوژیکی بتن خودتراکم در پژوهش حاضر ملاحظه شد و بررسی خواص درازمدت بتن مثل خزش و انقباض مورد توجه قرار نگرفت. مطالعات نشان می‌دهند که متناسب با میزان استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی در بتن، ۳۰ تا ۶۰ درصد خزش بتن‌های بازیافتی نسبت به بتن‌های با سنگ‌دانه‌های طبیعی بیشتر است.[۳۳] به علاوه بتن‌های بازیافتی ۲۰ تا ۵۰ درصد سطح انقباض بالاتری نسبت به بتن‌های با سنگ‌دانه‌ی طبیعی دارند. در صورتی که از ریزدانه‌های بازیافتی در ساخت بتن استفاده شود، این اختلاف به ۷۰ تا ۱۰۰ درصد می‌رسد،[۳۴] که ناشی از پایداری کم ملات خشک شده‌ی بازیافتی در مقابل انقباض است. افزایش مقدار آب ملات سیمان به علت استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی در ساخت بتن نیز از دیگر عوامل بالاتر بودن انقباض بتن بازیافتی است.[۳۵] با استفاده‌ی درست از افزودنی‌ها و میزان صحیح مقدار آب می‌توان افزایش ذکر شده را کنترل کرد.[۳۳] البته در یک مطالعه نشان داده شده است که اثر سنگ‌دانه‌های بازیافتی در میزان خزش و انقباض در بتن بازیافتی خودتراکم در مقایسه با بتن بازیافتی متداول کمتر است.[۲۲]]در مجموع علی‌رغم همه‌ی مزایای استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی به دلیل صرفه‌جویی در هزینه و مسائل زیست‌محیطی، استفاده از آن در بتن خودتراکم با ملاحظه و کنترل ویژگی‌های درازمدت بتن باید صورت گیرد.

پانوشت‌ها

1. Okamura
2. Akashi-Kaiko
3. Kobe
4. Awaji
5. LNG
6. Osaka
7. Yokohama Landmark
8. V funnel
9. L box
10. He and Zhang
11. Silva
12. Wijayasundara
13. Revathi
14. Evangelista and Brito
15. Kou & Poon
16. Zoran
17. Manzi
18. Kwan
19. european guidelines for self-compacting concrete
20. fine recycled aggregates
21. coarse recycled aggregates
22. control
23. interfacial transition zone

منابع (References)

1. Zhu, W. and Bartos, P. J.M. "Permeation properties of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research*, **33**(6), pp. 921-926 (2003).
2. Okamura, H. and Ouchi, M. "Self compacting concrete development, present use and future", *Proceedings of 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp. 3-13 (2003).
3. Alghadi, N.S. and Nasharuddin, K. "Development of self-compacting concrete using contrast constant factorial design", *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, **25**(2), pp. 105-112 (2010).
4. Malhotra, V.M. and Nevill, A. "Symposium on concrete thechnology in the use of demolition waste in concrete", *Wain Wright*, **26**, pp. 179-197 (1995).
5. Frondistion- Yannas, S. "Economics of concrete recycling in the UnitedSates", *Advanced Research institute problems in the Recycling concrete, France*, **25-28**, pp.163-186 (1980).
6. Hansen, T.C. (Editor), *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*, RILEM (The international – union of testing and research laboratories formaterials and structures), Reports 6, Chapman and Hall, London(1992).
7. Okamura, H. "Self–compacting high performance concrete", *Concrete International*, **19**, pp. 50-54 (1997).
8. *Standard, A. S. T. M. C78 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*, ASTM Standards 4, pp.1-3, no.2 (2002).
9. Oamura, A. and Ouchi, M. "Self-compacting concrete", *Journal of Advanced Concrete Technology*, **1**(1), pp. 5-15 (2003).
10. Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Algın, Z. and et al. "Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates", *Constr. Build. Mater.*, **64**, pp. 172-183 (2014).
11. Song, H. and Ryou, J.S. "Hybrid techniques for quality improvement of recycled fine aggregate", *Constr.and Build. Mater.*, **72**, pp. 56-64 (2014).
12. He, Z.J. and Zhang, J.X. "Strength characteristics and failure criterion of plain recycled aggregate concrete under triaxial stress states", *Constr.and Build. Mater.*, **54**, pp. 354-362 (2014).
13. Silva, R.V., Brito, J.D. and Dhir, R.K. "Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production", *Constr. and Build. Mater.*, **65**, pp. 201-217 (2014).
14. Akib, S.M. and Sayyad, S.U. "Properties of concrete made with recycled coarse aggregate", *International Journal of Informative & Futuristic Research*, **2**(10), pp. 3755-3761 (2015).
15. Khoshkenari, A.G., Shafigh, P., Moghimi, M. and et al. "The role of 0–2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete", *Materials & Design*, **64**, pp. 345-354 (2014).
16. Wijayasundara, M., Mendis, P. and Crawford, R. "Net incremental indirect external benefit of manufacturing recycled aggregate concrete", *Waste Management*, **78**, pp. 279-291, (2018).
17. Revathi, P., Selvi, R.S. and Velin, S.S. "Investigations on fresh and hardened properties of recycled aggregate self compacting concrete", *Journal of The Institution of Engineers*, **94**, pp. 94-102 (2014).
18. Evangelista, L. and Brito, J.de "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates", *Cement Concrete Res.*, **29**(5), pp. 397-401 (2007).
19. Kou, S.C. and Poon, C.S. "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates", *Cement & Concrete Composites*, **31**(9), pp. 622-627 (2009).
20. Grdic, Z.J., Gordana, A., Toplicic-Curcic, I. M.D. and et al. "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate", *Construction and Building Materials*, **24**, pp. 1129-1133 (2010).
21. Singh, R.B. and Singh, B. "Rheological behaviour of different grades of self-compacting concrete containing recycled aggregates", *Construction and Building Materials*, **161**, pp. 354-364 (2018).
22. Manzi, S., Mazzotti, C. and Chiara Bignozzi, M. "Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate: Study of the long-term properties", *Construction and Building Materials*, **157**, pp. 582-590, (2017).
23. Kwan, A.K.H. and Ling, S.K. "Filler technology for improving robustness and reducing cementitious paste volume of SCC", *Construction and Building Materials*, **153**, pp. 875-885 (2017).
24. EFNAEC, February "Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete", European federation of specialist construction chemicals and concerte system (2002).
25. Hadiwidodo, Y.S. and Mohd. S. "Review of testing methods for self-compacting concrete", *International Conference on Construction and Building Technology (ICCBT)*, **5**, pp. 69-82 (2008).
26. Leite, M., Gualberto, J., Filho, F. and et al. "Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate", *Materials and structures*, **46**(10), pp. 1765-1778 (2013).
27. Safiuddin, M.D., Salam, M.A. and Jumaat, M.Z. "Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **11**(4), pp. 1023-1041 (2011).
28. Silva, Y.F., Robayo, R.A., Mattey, P.E. and et al. "Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete", *Construction and Building Materials*, **124**, pp. 639-644 (2016).
29. Katz, A. "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete", *Cement and Concrete Research*, **33**(5), pp. 703-711 (2003).
30. Sim, J. and Park, C. "Mechanical properties of recycled Kim, Y., aggregate concrete with deformed steel re-bar", *Journal of Marine Science and Technology*, **20**(3), pp. 274-280 (2012).

31. Mazloom, M., Ramezanianpour, A.A. and Brooks, J.J. "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete", *Cement and Concrete Composites*, **26**(4), pp. 347-357 (2004).
32. Cong, X., Gong, S., Darwin, D. and et al. "Roll of silica fume in compressive strength of cement paste, mortar and concrete", *ACI Materials Journal*, **89**(4), pp. 375-387 (1992).
33. Chisholm, D. "Best practice guide for the use of recycled aggregates in new concrete", 14, *Cement & Concrete Association of New Zealand*, pp. 31-34 (2011).
34. Rao, M.C., Bhattacharyya, S.K. and Barai, S.V. "Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete", *Materials and Structures*, **44**(1), pp. 205-220 (2011).
35. WRAP, "Performance related approach and engineering properties of concrete containing recycled aggregates: WRAP aggregate research programme", (Accessed from: www.wrap.org.uk).