تحقیقات بتن
سال چهاردهم، شمارهٔ چهارم
زمستان ۱۴۰۰
ص ۱۱۶ – ۱۰۱
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۴

بررسی اثرات کاربرد مصالح ریزدانه و درشت‌دانه‌ی بازیافتی حاصل از بتن ضایعاتی به روی خصوصیات بتن خودتراکم

سمیه ملایی*
استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بناب، بناب، ایران.
روژین ناصح
دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد، مهندسی سازه، دانشگاه بناب، بناب، آذربایجان شرقی، ایران.

چکیده

در اینجا امکان استفاده از سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی، که به‌صورت تصادفی از بتن‌های ضایعاتی مختلف در سطح استان کرمانشاه جمع‌آوری شده، در تهیه بتن خودتراکم بررسی شده‌است. نمونه‌های بتن خودتراکم شامل درصدهای مختلف درشت‌دانه بازیافتی، ریزدانه بازیافتی و ترکیبی از هر دو در طرح اختلاط‌های مختلف تهیه‌گردید. طبق نتایج، طرح‌هایی که با استفاده از مصالح درشت‌دانهٔ بازیافتی تهیه شد دارای مشخصات مکانیکی بهتری نسبت به مخلوط‌های تهیه‌شده از ریزدانه‌ی بازیافتی بود؛ بطوری که، مقاومت فشاری با جایگزینی صفر تا ۱۰۰ درصد از سنگ‌دانه‌ها با مصالح بازیافتی از ٤٢٥ تا ٢٥٦ kg/cm^2 کاهش داشته است. این کاهش در مخلوط‌های تهشه شده از ریزدانه و درشت‌دانهٔ بازیافتی به‌طور هم‌زمان، حدود ۲۱-٦ درصد نسبت به مخلوط‌هایی که در آنها از درشت‌دانه و ریزدانه به طور مجزا استفاده گردید بیشتر بود. برای نتایج مقاومت کششی و خمشی نیز روند مشابهی مشاهده شد. همچنین، با افزایش مقدار ریزدانه و درشت‌دانه بازیافتی خواص رئولوژیکی بتن تازه نسبت به حالت استفاده از سنگ‌دانه‌های طبیعی افت داشت؛ به‌طوری‌که ، ریزدانهٔ بازیافتی تأثیر بیشتری در افت خواص بتن تازه در مقایسه با درشت‌دانهٔ بازیافتی داشت. در نمونه‌هایی که بیش از ۸۰٪ سنگ‌دانه با مصالح بازیافتی جایگزین شده بود، اسلامپ حدود ٤٠٠ mm به‌دست آمد که نشان می‌دهد بتن خواص خودتراکمی خود را از دست داده است.

واژه‌های کلیدی: **بتن‌خودتراکم، سنگ‌دانه بازیافتی، بتن تازه، بتن سخت‌شده.**

* نویسنده مسئول: s.mollaei@ubonab.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه بتن نه تنها به‌عنوان پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی، بلکه به منزلهٔ محلی برای دفن ضایعات نیز محسوب می‌شود. سالانه میلیون‌ها تن ضایعات صنعتی و ساختمانی همانند نخاله‌های ساختمانی، پلاستیک، شیشه و فلزات، آسفالت، لاستیک، و ... در سراسر جهان تولید می‌شود که دفن آن‌ها متضمن هزینه‌های بالا و همچنین نارضایتی مردم محلی و سازمان‌های حامی محیط زیست است [۱-۳]. راه حل هوشمندانه‌ای که محققین توسعه پایدار در این رابطه پیشنهاد کرده‌اند مصرف این محصولات در زمینه‌های کاربردی مختلف از جمله در تهیه بتن است [۴]. براساس برنامه ساخت و ساز بهینه در افق ۲۰۲۰ اروپا [۵] حدود ۵ درصد از مصالح ساختمانی مصرفی در ساختمان‌های جدید از مصالح بازیافتی تامین می‌شود و پیش‌بینی می‌شود برای سال‌های آینده تا ۹۰ درصد مصالح ساختمانی مصرفی در پروژه‌های عمرانی در اروپا از بازیافت ضایعات ساختمانی تولید گردد [۶].

استفاده از ضایعات در بتن با جایگزین نمودن آنها با بخشی از مصالح سنگی و یا سیمان مصرفی ممکن می‌شود. در بسیاری از موارد اضافه نمودن مواد بازیافتی علاوه بر فوایدی که برای حفظ محیط زیست به همراه دارد موجب نأثیرات بهبوددهنده بر روی خواص محصولات نهایی نیز شده است. در اینجا، به‌طور مشخص استفاده از بتن بازیافتی مدنظر قرار دارد. چراکه، بتن بیشترین حجم را در میان زباله‌های ساختمانی دارد به‌طوری‌که در آمریکا حدود ۶۷ درصد کل زباله‌های ساختمانی را به خود اختصاص داده است. در اروپا سالانه حدود ۵۰ میلیون تن بتن تخریب می‌شود و حدود ۶۰ میلیون تن بتن نیز سالانه در آمریکا به محل انباشت نخاله‌های ساختمانی حمل می‌شود [۷،۳].

اگر قطعات بتنی خرد شده و از میلگردهای آن جدا شود، می‌توان از آن به جای سنگ‌دانهٔ طبیعی در ساخت بتن جدید استفاده کرد؛ به چنین سنگ‌دانه‌هایی، سنگ‌دانه بتن بازیافتی[1] (RCA) گفته می‌شود. کاهش مصرف مصالح، از جمله سیمان و سنگ‌دانه‌های طبیعی، به‌عنوان عامل مهم ایجاد توسعه پایدار در صنعت بتن به شمار می‌رود. یکی از انواع پرکاربرد بتن، بتن خود تراکم یا خود متراکم[2] (SCC) است که دارای مزایایی از قبیل کارایی بالا، عدم نیاز به لرزاندن، قابلیت پرکنندگی بالا، مقاومت در برابر جداشدگی، اجرای سریع، کاهش نیروی انسانی و ... است [۸-۱۰]. بتن خود متراکم نخست در دهه ۹۰ میلادی توسط اوکامورا[3] در ژاپن پیشنهاد گردید و نتایج قابل قبولی را از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی از خود نشان داد. در تحقیقات اولیه در این زمینه، با ثابت نگه‌داشتن مقدار سنگ‌دانه‌های درشت در حد ۵۰ درصد حجم مواد جامد و سنگ‌دانه‌های ریز در حد ۴۰ درصد حجم ملات، و با تنظیم نسبت آب به سیمان و با افزودن مقادیری از فوق روان‌کننده توانستند به خاصیت خود متراکمی بتن دست یابند [۹،۱۰]. در اینجا نیز تهیه بتن خوتراکم به‌عنوان هدف اصلی مدنظر قرار دارد.

هرچندکه تحقیقات اولیه در زمینه استفاده مجدد از بتن و مصالح ساختمانی تخریب شده، به‌عنوان سنگ‌دانه در ساخت بتن جدید، به پایان جنگ جهانی دوم باز می‌گردد؛ با توجه به اهمیت روزافزون این موضوع، در سال‌های اخیر نیز تحقیقات گسترده‌ای جهت به‌کارگیری مصالح بازیافتی در ساخت بتن صورت پذیرفته است. در مطالعه‌ای که به روی کاربرد سنگ‌دانه بازیافتی در بتن خود تراکم توسط ماکول[4] انجام یافته است، تاکید اصلی به روی مقایسهٔ صرفهٔ اقتصادی بتن خودتراکم ساخته شده با سنگ‌دانه طبیعی و بازیافتی برای کارخانه‌های بتن آماده بوده است [۱۱]. طبق نتایج حاصل، هزینه‌ی تمام شده‌ی سنگ‌دانه‌های بازیافتی نمی‌تواند کمتر از سنگ‌دانه طبیعی باشد اما درنظر گرفتن مزایای اقتصادی دیگر سنگ‌دانه‌های بازیافتی نظیر کاربرد مجدد بتن ضایعاتی و منافع زیست‌محیطی آن باید در مطالعات گسترده‌تری بررسی گردد [۱۱]. وانگ[5] و همکاران در مقاله‌ای به پیش‌بینی مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن‌های حاوی ریزدانه و درشت‌دانه‌های بازیافتی پرداختند [۱۲]. همچنین، آزمایش‌های اسلامپ، مقاومت فشاری و مقاومت کششی بر روی نمونه‌های مورد بررسی صورت پذیرفت. آنها مدل‌هایی پیشنهاد دادند که می‌تواند پیش‌بینی مؤثری از مدول الاستیسته و مقاومت کششی بتن‌های حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی ارائه دهد [۱۲]. اصلانی[6] و همکاران در

[1] Recycled concrete aggregate
[2] Self-Compacting Concrete
[3] H. Okamura
[4] Makul
[5] Wang
[6] Aslani

پژوهشی به بررسی نأثیر سنگ‌دانه‌های بازیافتی و خرده لاستیک بر روی بتن‌های خود متراکم با عملکرد بالا پرداختند [۱۳]. بدین منظور برای بررسی بتن تازه آزمایشات جریان اسلامپ، T_{50} و حلقه J صورت گرفته و برای بتن‌های سخت شده نیز آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی در سنین ۷ و ۲۸ روزه صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که با افزایش درصد سنگ‌دانه‌های بازیافتی، کارایی و توانایی عبور از میلگردها کاهش می‌یابد که به منظور بهبود این نقص از مواد افزودنی مثل دوده سیلیسی و خاکستر بادی استفاده شد [۱۳].

عابد[1] و همکاران در تحقیقی به بررسی مشخصات مقاومت فشاری و انبساطی بتن‌های حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی پرداختند [۱۴]. آنها به استفاده از ضایعات بتن آلوده به گچ، که ممکن است به حملهٔ سولفاتی در بتن جدید منجر گردد، پرداختند. نتایج نشان داد که هر چه درصد سنگ‌دانه بازیافتی بیشتر باشد، مقاومت فشاری کمتر خواهد بود، و مقاومت‌های کششی و خمشی نیز روند مشابه مقاومت فشاری را طی می‌کنند. ژو[2] و همکاران در مطالعه‌ای دیگر به ارزیابی دوام بتن‌های حاوی ۱۰۰٪ سنگ‌دانه‌های بازیافتی پرداختند [۱۵]. نتایج نشان می‌دهد که کیفیت RCA که بر دوام بتن نأثیر می‌گذارد با افزایش تعداد چرخه‌های بازیافت بدتر می‌شود.به‌طوری که ، معیارهای دوام (مقاومت تحت ذوب و انجماد، ضریب نفوذپذیری یون کلراید و عمق کربوناسیون) به‌تدریج با افزایش تعداد چرخه‌های بازیافت کاهش می‌یابد [۱۵].

هاما و هلال[3] به بررسی مصرف پلاستیک در بتن‌های خودتراکم پرداختند [۱۶]. آن‌ها ذرات پلاستیک را در ابعاد و درصدهای مختلف به بتن اضافه کرده و مشاهده کردند که استفاده از پلاستیک موجب کاهش روانی و مقاومت فشاری بتن می‌گردد [۱۶]. مانزی[4] و همکاران جمع‌شدگی و خزش را در بتن خودمتراکم، که در آن بخشی از سنگ‌دانه‌ها از مصالح بازیافتی تأمین شده بود، بررسی کرده‌اند [۱۷]. طبق نتایج بدست آمده، با استفاده از ضایعات بتن با عیار ۳۵۰ با طرح اختلاط مشابه بتن اولیه و با همان عیار تا ۲۳,۵٪ نسبت به بتن اولیه افت مقاومت فشاری روی داده است. آنها مشاهده کردند که نسبت خلل و فرج بتن بازیافتی نسبت به بتن اولیه به شدت بالاتر بوده و در نتیجه جذب آب افزایش یافته و کارایی آن افت داشته است [۱۷].

بوی[5] و همکاران در پژوهشی به بهبود مشخصات مکانیکی بتن‌های حاوی سنگ‌دانه بازیافتی در ترکیب با سنگ‌دانه‌های طبیعی پرداختند [۱۸]. آن‌ها روش ترکیب جدیدی را بین سنگ‌دانهٔ حاصل از بتن بازیافتی و سنگ‌دانه طبیعی برای بهبود کیفیت بتن ارائه دادند. با استفاده از این روش، مقدار سنگ‌دانه-های بازیافتی را می‌توان تا ۵۰٪ در بتن افزایش داد در حالی که در روش‌های متداول مقدار آن محدود به کمتر از ۳۰٪ می‌باشد [۱۸].

رادویچ[6] و همکاران از سنگ‌دانه‌های بتن ضایعاتی در ساخت بتن آسفالتی استفاده کرده و دریافتند که مخلوط‌های حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی دارای سختی کمتری نسبت به مخلوط‌های حاوی سنگ‌دانه‌های طبیعی هستند، اما مقاومت در برابر تغییر شکل آنها تفاوت قابل توجهی ندارد [۱۹].

در ایران نیز مطالعاتی در زمینه‌ی استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی در بتن انجام شده است. از آن جمله، شربی و خلیل‌زاده در پژوهشی به بررسی خواص مکانیکی بتن حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی بتنی و پودر لاستیک ضایعاتی پرداختند [۲۰]. نتایج نشان داد که با افزایش درصد سنگ دانه‌های بازیافتی و پودر لاستیک، افت مقاومت فشاری بتن مشاهده می‌شود که با جایگزینی بخشی از سیمان با میکروسیلیس، می‌توان این افت مقاومت را جبران کرد [۲۰]. طاهرخانی و سازگار سنگ‌دانه‌های ریزدانه و درشت‌دانه بدست آمده از بتن ضایعاتی را در طرح‌های مختلفی از بتن غلتکی استفاده کرده‌اند [۲۱]. آنها به این نتیجه رسیدند که اندکی افت مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در بتن دارای سنگ‌دانه بازیافتی مشاهده می‌شود اما در خصوصیات مقاومت خمشی و میزان انرژی جذب شده، نسبت به بتن غلتکی بدون سنگ‌دانهٔ بازیافتی، بهبود مشاهده می‌شود [۲۱].

اسفندی نأثیر کاربرد نانو ذرات سیلیس و الیاف پلی وینیل الکل را به روی خصوصیات مکانیکی بتن ساخته شده از سنگ‌دانه بازیافتی بررسی کرد [۲۲]. طبق نتایج حاصل، استفاده از نانو سیلیس و الیاف

[1] Abed
[2] Zhu
[3] Hama & Hilal
[4] Manzi
[5] Bui
[6] Radevic

پلی وینیل الکل روش مناسبی جهت بهبود خصوصیات مکانیکی بتن ساخته شده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی نسبت به بتن تهیه شده با مصالح سنگی طبیعی است [۲۲]. احمدی و همکاران تأثیر استفاده از مواد صنعتی شامل درصدهای مختلف زئولیت، متاکائولن و میکروسیلیس را بر کارایی و مقاومت بتن خود متراکم مطالعه کرده‌اند [۲۳]. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از زئولیت، میکروسیلیس و متاکائولن در بتن خودمتراکم در کنار استفاده از روان‌کننده مناسب، مشکلات ناپایداری از قبیل انسداد، جداشدگی و آب انداختگی را کاهش می‌دهد [۲۳]. در مطالعه‌ای دیگر، اسماعیل‌نیا و فریدی به استفاده از سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی به همراه زئولیت به‌عنوان یک پوزولان طبیعی در بتن خودتراکم پرداختند [۲۴]. آنها جایگزینی مطلوب برای پوزولان زئولیت با سیمان را در محدوده ۱۰ تا ۲۰٪ پیشنهاد کردند [۲۴].

با مرور مطالعات گذشته مشخص می‌شود که جایگزینی سنگ‌دانه طبیعی در بتن با سنگ‌دانه‌های بازیافتی حاصل از ضایعات بتنی، به‌طور کلی موجب افت مشخصات مکانیکی بتن می‌شود. با این وجود، مطالعات روی بتن‌های خودتراکم کمتر انجام شده است. بنابراین، در اینجا نمونه‌های بتن خودتراکم شامل درصدهای مختلف درشت‌دانه و ریزدانه بازیافتی و ترکیبی از هر دو تهیه شده و در حالت تازه و سخت شده تحت آزمایش‌های مختلف قرار گرفته است. برای جبران افت مقاومت ناشی از جایگزینی سنگ‌دانه‌های طبیعی با سنگ‌دانه ضایعاتی، از خاکستر بادی استفاده شده و هدف آن بود که با انجام آزمایش‌های بتن خودتراکم در فاز تازه و در سنین مختلف، میزان اثر ریزدانه‌های بازیافتی و درشت‌دانه‌های بازیافتی با یکدیگر مقایسه گردد. هدف دیگر این مطالعه، عدم دخالت در انتخاب سنگ‌دانه‌های بازیافتی و در نتیجه، بتن ضایعاتی مصرفی در اینجا کاملا تصادفی از سطح استان کرمانشاه انتخاب شده که می‌تواند به سراسر کشور نیز تعمیم داده شود.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از توصیه‌ها و الزاماتی که کمیته اروپایی EN در استاندارد خود برای طرح اختلاط بتن خود تراکم ارائه کرده استفاده شده است [۲۶،۲۵]. بدین ترتیب که یک طرح اختلاط بدون مصالح بازیافتی به‌عنوان طرح کنترل تهیه گردید. سپس، با جایگزینی درصدهای مختلف مصالح ریزدانه و درشت دانه به‌صورت جداگانه و همچنین به‌صورت ترکیبی، طرح اختلاط‌های دیگری معرفی شد. در ادامه، مشخصات بتن خود تراکم تازه و سخت شده مورد آزمایش قرار گرفت. کمیته اروپایی EN که در سال ۲۰۰۲ از طرف مؤسسه EFNARC توصیه‌هایی درباره طرح مخلوط بتن خودتراکم مطرح کرده بود، از سال ۲۰۰۵ با حضور چندین شرکت مطرح اروپایی پیشنهاداتی را برای ویرایش و تکمیل راهنمای قبلی ارائه کرد [۲۷]. محدوده نسبت‌های پیشنهادی برای دستیابی به بتن خودتراکم در جدول ۱ آمده است.

جدول۱- مقادیر پیشنهادی کمیته اروپا در طرح اختلاط بتن

مصالح	محدوده پیشنهادی به‌صورت حجمی Lit/m^3	محدوده پیشنهادی وزنی Kg/m^3
مواد پودری	-	380-600
خمیر	380-300	-
آب	210-150	150-210
سنگ‌دانه درشت	360-270	750-1000
سنگ‌دانه ریز	-	48 تا 55 درصد وزن سنگ‌دانه‌ها
نسبت آب به مواد پودری	0.85-1.1	-

مصالح مصرفی در این مطالعه شامل آب آشامیدنی شهر بوکان، سیمان پاکتی تیپ ۲ محصول کارخانه سیمان کاوان بوکان و فوق روان‌کننده با نام تجاری SRF-521 محصول شرکت البرز شیمی آسیا بود. خاکستر بادی مصرفی در اینجا محصول شرکت DIRK از کشور هند بوده و از شرکت واسطه‌ای در ایران تهیه گردید.

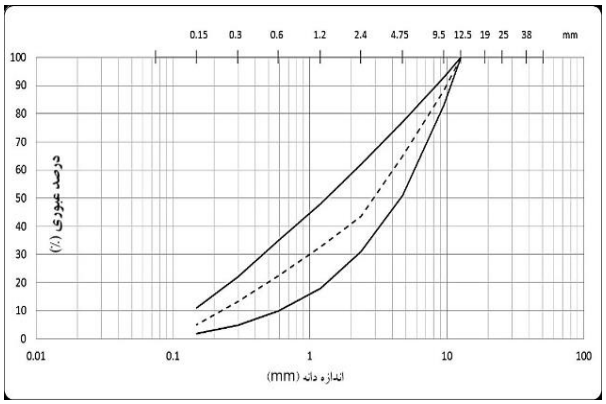
بر اساس آیین‌نامه ACI-318 مواد پودری که اندازه آنها کوچک تر از الک ۱۰۰ است، به‌عنوان پودر در بتن خود تراکم محسوب می‌شوند؛ این مواد به دو گروه خنثی و پوزولانی با خصوصیات هیدرولیکی (مانند سرباره) تقسیم می‌شوند [۲۸]. دراین مطالعه از پودر سنگ آهک بعنوان مواد پودری استفاده شده است. سنگ‌دانه‌های بازیافتی مصرفی در این پروژه از کارخانه بازیافت نخاله‌های ساختمانی کرمانشاه تهیه گردید که از سطح استان به‌طور تصادفی جمع‌آوری شده بود. ماسه شسته‌ی میاندوآب

بعنوان مصالح ریزدانه استفاده شده (الک 3/8-in) و همچنین مصالح درشت دانه مصرفی در این پروژه (الک $1\frac{1}{2}\,in$) از کارخانه سنگ شکنی در شهرستان بوکان تامین شده است. عموماً دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ای که در محدوده‌ی توصیه شده توسط ASTM-C33باشد، برای بیشتر بتن‌ها رضایت بخش است [۲۹]. در اینجا، برای تمامی طرح‌ها از یک نوع دانه‌بندی برای مصالح ریزدانه و درشت دانه استفاده شده که در محدوده‌ی پیشنهادی ASTM C33 است. در جدول ۲ اندزه الک‌ها و درصد مانده روی هر الک که در ASTM پیشنهاد شده و همچنین شکل ۱ نمودار دانه‌بندی مصالح مصرفی (ترکیب درشت‌دانه و ریزدانه) در این مطالعه آورده شده است.

جدول ۲- دانه‌بندی مخلوط مصالح درشت دانه و ریز دانه

شماره الک	اندازه سوراخ (mm)	وزن مانده
2 in	50.80	0.00
1/2 in–1	38.10	0.00
1 in	25.40	0.00
3/4 in	19.10	0.00
1/2 in	12.70	0.00
3/8 in	9.52	117.45
n0 4	4.76	232.55
no 8	2.36	215.44
no 16	1.19	108.12
no 30	0.59	102.54
no 50	0.30	91.24
no 100	0.15	81.17
no 200	0.08	38.09
pan	0.00	13.40

نتایج سایر آزمایش‌های انجام گرفته به روی مصالح درشت‌دانه و ریزدانه بازیافتی تهیه شده از کارخانه بازیافت بتن کرمانشاه، قبل از ساخت نمونه‌های بتن خودمتراکم، در جدولهای ۳ و ۴ خلاصه شده است. مشاهده می شود که تمامی نتایج در محدودهٔ قابل قبول جهت مصرف در بتن می‌باشد. همچنین، دانه‌بندی این مصالح درشت‌دانه و ریزدانه بطور جداگانه طبق توصیه استاندارد ملی شماره ۴۹۷۷ [۳۰] نیز سنجیده شده که در ردیف ۱۳ هر جدول قابل مشاهده است. جهت مشاهده جزئیات بیشتر در خصوص روند انجام این آزمایش‌ها می‌توانید به مرجع [۳۱] مراجعه کنید.



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی سنگ‌دانه مصرفی

در این پژوهش، در تمامی طرح اختلاط‌ها مقدار آب، سیمان، پودر سنگ آهک ، خاکستر بادی، فوق روان کننده و همچنین نمودار دانه‌بندی مصالح مصرفی ثابت نگه داشته شده است و یک طرح اختلاط، به‌عنوان مخلوط کنترل، بدون هیچگونه مصالح بازیافتی تهیه شده است.

در جدول ۵ تمامی طرح اختلاط‌های مدنظر در این مطالعه آورده شده است. نام‌گذاری طرح‌های اختلاط در جدول ۱ به گونه‌ای است که عدد اول از چپ نشان دهنده‌ی درصد ریزدانه‌ی بازیافتی (از کل ریزدانه مصرفی در ساخت بتن) بوده و عدد دوم نیز نمایانگر درصد درشت‌دانه بازیافتی (از کل درشت‌دانه مصرفی در بتن) است؛ به‌عنوان مثال نام M-RF40-RC40 معرف طرحی است که در آن ۴۰٪ از ریزدانه‌های مصرفی از نوع ریزدانه بازیافتی بوده و همچنین برای ۴۰٪ از درشت‌دانه مصرفی نیز از درشت دانه بازیافتی استفاده شده است.

در این مطالعه، آزمایش‌های انجام گرفته به‌روی بتن خود تراکم (SCC) در فاز تازه، طبق توصیه‌های استاندارد EFNARC، شامل آزمایش اسلامپ[1] [۳۳]، T50 [۳۳] و جعبه‌ی L[2] [۳۴] بود. میزان روانی SCC را می‌توان با انجام آزمایش افت شامل جریان اسلامپ و T50 مورد ارزیابی قرار داد. با توجه به درجه‌بندی‌هایی که در آیین‌نامه‌های جدید مطرح شده، در آزمایش اسلامپ برای توانایی پرکنندگی سه رده تعریف شده است [۲۷].

[1] SLUMP-FLOW

[2] L-BOX

جدول ۳- آزمایش‌های مصالح درشت‌دانه بازیافتی تهیه شده از کارخانه بازیافت بتن کرمانشاه

ردیف	ویژگی/ شرح آزمون		حدود قابل قبول طبق استاندارد ۳۰۲ [۳۲]	نتیجه آزمون در این مطالعه	روش آزمون
۱	مواد زیان آور – کلوخه های رسی و ذرات سسست (حداکثر) ، (درصد جرمی نسبت به کل نمونه)		طبق جدول شماره ۴ – ۲ ٪	۱,۴	استاندارد ملی شماره ۴۹۷۸
۲	مواد زیان آور – مواد ریزتر ازالک ۷۵ میکرون یا نمره ۲۰۰ (حداکثر) ، (درصد جرمی نسبت به کل نمونه)		طبق جدول شماره ۴ – ۱ ٪ و اگر عاری از رس یا شیل باشد ۱/۵٪	۱,۳	استاندارد ملی شماره ۴۴۶
۳	دانه های هم پهن و هم دراز (در حالت ۱ به ۳ کولیس تناسبی) – درصد جرمی		حداکثر ۱۵ درصد جرمی	۸	استاندارد ملی شماره ۱۱۲۶۹
٤	درصد شکستگی	آزمون شده در دو جهت ٪	طبق بند ۵ – ۸ – ۱۵± درصد نسبت به مقدار اعلام شده	۱۰۰	استاندارد ملی شماره ۱۱۵۶۸
۵	سایش (لس آنجلس)		حداکثر ۵۰ ٪	۳۸	استاندارد ملی شماره ۴۴۸
٦	مواد زیان آور – زغال سنگ و لگنیت (حداکثر) ، (درصد جرمی نسبت به کل نمونه)	طبق جدول ۴	۰/۵ درصد جرمی	۰,۱	استانداردملی شماره ۴۹۸۴
	چرت (با وزن مخصوص ذرات اشباع با سطح خشک کمتر از ۲,۴)		۳ درصد جرمی	۰,۱۸	
	مجموع کلوخه های رسی و ذرات سست و چرت		۳ درصد جرمی	۱,۵۸	
۷	مواد زیان آور – ترکیبات حاوی سولفور کل	طبق جدول ۴	سنگ‌دانه کوره آهن گدازی=۲	۰,۲	استانداردملی شماره ۱ – ۱۹۰۳۸
۸	مواد زیان آور – کلریدهای محلول درآب cl-	طبق جدول ۴	(CL0/02) برای شرایط حاد و مهاجم کلریدی ۰/۰۲ (CL0/04) برای شرایط غیرحاد وغیر مهاجم کلریدی ۰/۰۴	۰,۰۱۳	استانداردملی شماره ۱ – ۱۹۰۳۸
۹	سلامت سنگ‌دانه – درصد افت وزنی ٪ (حداکثر)	طبق بند۵-۴	در برابرسولفات سدیم۱۲٪ دربرابر سولفات منیزیم ۱۸٪	۴,۱۹	استانداردملی شماره ۴۴۹
۱۰	وزن مخصوص مصالح در حالت SSD (چگالی اشباع با سطح خشک) تن بر مترمکعب		ASTM C127_88 ۲,۴ تا ۳ تن بر متر مکعب	۲,۵	استاندارد ملی شماره ۴۹۸۲
۱۱	درصد جذب آب		–	۴,۸	استاندارد ملی شماره ۴۹۸۲
۱۲	دانه بندی (درصد جرمی عبوری)	۱-6الک ۳۷/۵ میلیمتر			استاندارد ملی شماره ۴۹۷۷
		۱-7الک ۲۵ میلیمتر	100	100	
		۱-8الک ۱۹میلیمتر	100-90	98.3	
		۱-9الک۱۲/۵ میلیمتر	-	47.3	
		۱-10الک ۹/۵ میلیمتر	55-20	23.6	
		۱-11الک ۴/۷۵ میلیمتر	10-0	1.2	
		۱-12الک ۲/۳۶ میلیمتر	5-0	0.8	
		۱-13الک ۱/۱۸ میلیمتر	-	0.6	

جدول ۴- آزمایش‌های مصالح ریزانه بازیافتی تهیه شده از کارخانه بازیافت بتن کرمانشاه

ردیف	ویژگی/شرح آزمون		حدود قابل قبول طبق استاندارد ۳۰۲		نتیجه آزمون در این مطالعه	روش آزمون
			رده ۱	رده ۲		
۱	ضریب (مدول) نرمی	مدول نرمی آزمون شده		طبق بند ۴-۲	۴,۲۲	استاندارد ملی شماره ۳۰۲
۲	مواد زیان آور – کلوخه های رسی و ذرات سسست (حداکثر)، (برحسب درصد جرمی نسبت به کل نمونه)			طبق جدول ۲ -۳ ٪	۱,۴	استاندارد ملی شماره ۴۹۷۸
۳	مواد زیان آور – مواد ریزتر ازالک ۷۵ میکرون (حداکثر)، (برحسب درصد جرمی نسبت به کل نمونه)		طبق بند ۴-۲-۵	*برای بتن در معرض سایش ۳٪ واگر عاری از رس باشد ۵ ٪ *برای سایر بتن ها ۵ ٪ و اگر عاری از رس باشد ۷ ٪	۵,۱	استاندارد ملی شماره ۴۴۶
٤	درصد فضای خالی سنگ‌دانه های ریز غیر متراکم (درصد جرمی)		طبق بند ۴-۶	±۱۵ ٪ نسبت به مقدار اعلام شده توسط تولید کننده	۳۴,۲	استاندارد ASTM C1252
۵	مواد زیان آور – زغال سنگ ولگنیت (حداکثر) (برحسب درصد جرمی نسبت به کل نمونه)		طبق جدول ۲	*سطح ظاهری بتن مهم باشد ۰/۵ ٪ *سایر انواع بتن ۱ ٪	۰,۱۹	استاندارد ملی شماره ۴۹۸۴
٦	مواد زیان آور – ناخالصی های آلی (حداکثر)، (برحسب درصد جرمی نسبت به کل نمونه)		طبق بند۴-۳-۲	*داشتن رنگ تیره (غیر قابل قبول) *تغییر رنگ جزیی (قابل قبول)	قابل قبول	استاندارد ملی شماره ۴۹۷۹
۷	مواد زیان آور – ترکیبات حاوی سولفور (حداکثر)، (درصد جرمی نسبت به کل نمونه)	سولفات قابل حل در اسید	طبق جدول ۲	سنگ‌دانه کوره آهن کدازی=۱ سایر سنگ‌دانه ها =۰/۸	۰,۲۴	استاندارد ملی شماره ۱ – ۱۹۰۳۸
		سولفور کل		سنگ‌دانه کوره آهن کدازی=۲ سایر سنگ‌دانه ها =۱	۰,۲۸	
۸	مواد زیان آور – کلریدهای محلول درآب -cl (حداکثر)، (برحسب درصد جرمی نسبت به کل نمونه)		طبق جدول ۲	(CL0/02) برای شرایط حاد و مهاجم کلریدی ۰/۰۲ (CL0/04) برای شرایط غیرحاد و غیر مهاجم کلریدی ۰/۰۴	۰,۰۱۵	استاندارد ملی شماره ۱ – ۱۹۰۳۸
۹	سلامت سنگ‌دانه – درصد افت جرمی ٪ (حداکثر)		طبق بند ۴-۴	*در برابر سولفات سدیم ۱۰ ٪ *در برابرسولفات منیزیم ۱۵ ٪	۶,۴	استاندارد ملی شماره ۴۴۹
۱۰	وزن مخصوص در حالت SSD (چگالی اشباع با سطح خشک) تن بر مترمکعب			ASTM C127_88 ۲,۴ تا ۳ تن بر متر مکعب	۲,۶۳	استاندارد ملی شماره ۴۹۸۰
۱۱	درصد جذب آب			–	۱,۲۲	استاندارد ملی شماره ۴۹۸۰
۱۳	دانه بندی (درصد جرمی عبوری)	1-1الک ۹/۵ میلیمتر	100	100	99.5	استاندارد ملی شماره ۴۹۷۷
		1-2الک ۴/۷۵ میلیمتر	100- 95	100- 89	80.8	
		1-3الک ۲/۳۶ میلیمتر	100- 80	100- 60	47.3	
		1-4الک ۱/۱۸ میلیمتر	85- 50	80- 30	26.1	
		1-5الک ۰/۶ میلیمتر (۶۰۰ میکرون)	60- 25	50- 15	13.9	
		1-6الک ۰/۳ میلیمتر (۳۰۰میکرون)	30- 5	30- 5	6.5	
		1-7الک ۰/۱۵ میلیمتر (۱۵۰ میکرون)	10- 2	10- 2	3	
		1-8الک ۰/۰۷۵ میلیمتر (۷۵ میکرون)	3 - 0	3 - 0	1.8	

جدول ۵- مشخصات نسبت های اختلاط (در هر مترمکعب بتن)

نام طرح	سیمان (kg)	فوق روان کننده (kg)	آب (kg)	پودر سنگ (kg)	fly ash (kg)	ماسه طبیعی (kg)	شن طبیعی (kg)	ماسه بازیافتی (kg)	شن بازیافتی (kg)
M-RF0-RC0	450	4.5	210	45	67.5	1135.5	484.8	0.0	0.0
M-RF20-RC0	450	4.5	210	45	67.5	908.4	484.8	210	0.0
M-RF40-RC0	450	4.5	210	45	67.5	681.3	484.8	420	0.0
M-RF60-RC0	450	4.5	210	45	67.5	454.2	484.8	630.1	0.0
M-RF80-RC0	450	4.5	210	45	67.5	227.1	484.8	840.1	0.0
M-RF100-RC0	450	4.5	210	45	67.5	0.00	484.8	1050.1	0.0
M-RF0-RC20	450	4.5	210	45	67.5	1135.5	387.9	0.0	89.7
M-RF0-RC40	450	4.5	210	45	67.5	1135.5	290.9	0.0	179.3
M-RF0-RC60	450	4.5	210	45	67.5	1135.5	193.9	0.0	268.9
M-RF0-RC80	450	4.5	210	45	67.5	1135.5	97	0.0	358.6
M-RF0-RC100	450	4.5	210	45	67.5	1135.5	0.0	0.0	448.2
M-RF20-RC20	450	4.5	210	45	67.5	908.4	387.9	210	89.6
M-RF40-RC40	450	4.5	210	45	67.5	681.3	290.9	420	179.3
M-RF60-RC60	450	4.5	210	45	67.5	454.2	193.9	630.1	268.9
M-RF80-RC80	450	4.5	210	45	67.5	227.1	97	840.1	358.6
M-RF100-RC100	450	4.5	210	45	67.5	0.0	0.0	1050.1	448.2

الف) رده SF1 : در این رده قطر پخش جریان، حدود ۵۵۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر می‌باشد. این رده، برای بتن‌ریزی با سیستم پمپ تزریقی (مثل پوشش تونل‌ها) و همچنین مقاطع کوچکی که مانع از جریان افقی می‌شوند (مانند شمع‌ها و بعضی از پی‌های عمیق) مناسب است.

ب) رده SF2 : قطر جریان در این رده، حدود ۶۰۰ تا ۷۵۰ میلیمتر می‌باشد. این رده برای بسیاری از کارهای عمومی نظیر دیوارها و ستون‌ها مناسب است.

ج) رده SF3 : قطر جریان در این رده، حدود ۷۶۰ تا ۸۵۰ میلیمتر می‌باشد. این رده برای کاربردهای قائم در سازه‌های با میلگردهای متراکم مناسب است.

برای بیان توانایی پرکنندگی و تأمین ویسکوزیته لازم نیز در آزمایش T50 از دو رده VS1 و VS2 استفاده می‌شود:

الف) رده VS1 : بیانگر توانایی پرکنندگی بالا، حتی با وجود آرماتوربندی متراکم می‌باشد. در این حالت بتن به راحتی مسطح شده و یک سطح تمام شده بسیار باکیفیت ایجاد نماید. حدود مجاز زمان T50 در این رده بصورت $T50 \leq 2$ sec می‌باشد.

ب) رده VS2: این رده هیچ حد بالایی ندارد ولی با افزایش بیشتر آن، سطح تمام شده از کیفیت کمتری برخوردار است و حدود T50 در آن به‌صورت $T50 \geq 2$ sec می‌باشد.

برای اندازه‌گیری قابلیت عبور و پرکنندگی بتن تازه، از آزمایش جعبه L استفاده می‌شود. در این آزمایش همچنین می‌توان امکان جداشدگی دانه‌های بتن را به‌صورت چشمی مشاهده نمود. طبق نتایج آزمایش جعبهL معمولاً برای بیان توانایی عبور بتن خودتراکم، دو رده به‌صورت زیر مطرح می‌شود [۳۵]:

رده PA1: برای سازه‌های با آرماتوربندی با فاصله ۸۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر که در آن نسبت h2/h1 (نسبت انسداد) بزرگتر از ۰/۸ می‌باشد (با حضور دو میلگرد).

رده PA2: برای سازه‌های با آرماتوربندی با فاصله ۶۰ تا ۸۰ میلی-متر که در آن نسبت h2/h1 بزرگتر از ۰/۸ می‌باشد (با حضور سه میلگرد).

در اینجا، برای تعیین مشخصات مکانیکی بتن‌های خودتراکم سخت شده آزمایش‌های انجام گرفته شامل آزمایش مقاومت فشاری [۳۶]، مقاومت کششی (شکافت)[1] [۳۷]، مقاومت خمشی [۳۸] و تعیین مدول الاستیسیته و نسبت پواسون [۳۹] است. همچنین منحنی تنش- کرنش برای تعدادی از نمونه‌ها ترسیم گردید. برای انجام آزمایش مقاومت کششی و مدول الاستیسیته از نمونه‌های استوانه استاندارد ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر استفاده شده، برای آزمایش

[1] Splitting Tensile Strength

مقاومت فشاری (در سنین ۷ و ۲۸ روزه) نمونه‌های مکعبی ۱۵۰*۱۵۰*۱۵۰ میلمتر تهیه گردید و همچنین برای آزمایش مقاومت خمشی تیرهای استاندارد به ابعاد ۵۰۰*۱۵۰*۱۵۰ میلمتر استفاده شد. نحوه‌ی ساخت و عمل آوری نمونه‌ها طبق الزامات ASTM-C192 [۴۰] بود. تصویر تعدادی از نمونه‌ها در حال عمل آوری در محیط آزمایشگاه در شکل ۲ نشان داده شده است. لازم ذکر است که از هر طرح اختلاط، یک نمونه مکعبی به‌عنوان شاهد در آزمایشگاه نگهداری می‌شود.

شکل ۲- نمونه‌ای از عمل آوری نمونه‌ها در آزمایشگاه

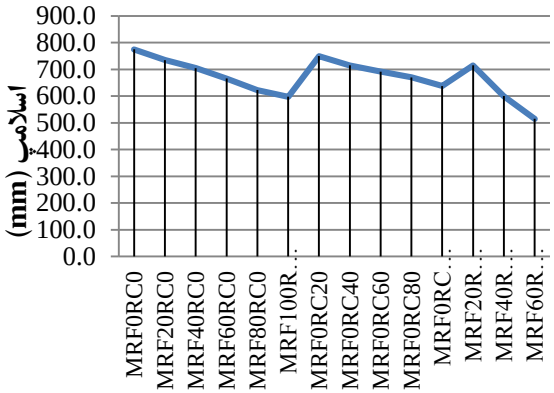
جزئیات بیشتر درخصوص ویژگی‌های سنگ‌دانه‌های بازیافتی و نمونه‌های بتن خودتراکم تهیه شده در این پروژه‌ی تحقیقاتی را می‌توانید در منبع [۳۱] ببینید.

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- نتایج آزمایش‌های بتن تازه

نتایج آزمایش‌های بتن تازه شامل آزمایش جریان اسلامپ، T50 و L-BOX به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۶، شکل ۴ و جدول ۷، شکل ۵ و جدول ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد (طبق شکل ۳ و جدول ۶) که با افزایش مقدار ریزدانه بازیافتی و درشت دانه بازیافتی از خواص رئولوژی بتن خود تراکم کاسته شده است. در آزمایش T50 (شکل ۴ و جدول ۷) و L-BOX (شکل ۵ و جدول ۸) نیز این موضوع مشاهده می‌گردد.

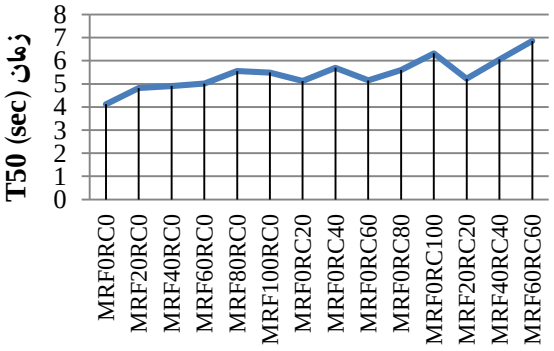
این نتایج با مشاهدات اصلانی و همکاران [۱۳] هماهنگ است. در آزمایش‌های آنها به منظور کاهش اثر منفی سنگ‌دانه بازیافتی بر خواص بتن تازه از افزودنی دوده سیلیسی و خاکستر بادی استفاده شده است.



شکل ۳- نتایج آزمایش جریان اسلامپ

جدول ۶- نتایج آزمایش جریان اسلامپ

شماره طرح	نام طرح	SLUMP (mm)
1	MRF0RC0	775.0
2	MRF20RC0	735.0
3	MRF40RC0	705.0
4	MRF60RC0	666.0
5	MRF80RC0	623.0
6	MRF100RC0	598.0
7	MRF0RC20	750.0
8	MRF0RC40	715.0
9	MRF0RC60	692.0
10	MRF0RC80	670.0
11	MRF0RC100	638.0
12	MRF20RC20	715.0
13	MRF40RC40	600.0
14	MRF60RC60	515.0
15	MRF80RC80	-
16	MRF100RC100	-



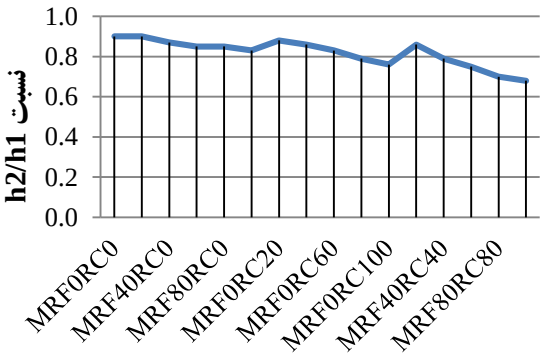
شکل ۴- نتایج آزمون T50

در طرح اختلاط‌های شماره ۱۵ و ۱۶، که بیشترین مقادیر سنگ‌دانه‌های بازیافتی را دارند، به لحاظ خواص رئولوژی اصولاً می‌توان گفت که بتن خود تراکمی ایجاد نشده است؛ مقدار

اسلامپ برای این دو طرح حدود ۴۰۰ میلیمتر بدست آمده است. به همین دلیل در نتایج آزمایش اسلامپ بتن خودتراکم گزارش نشده است. همچنین، ریزدانه بازیافتی تأثیر قابل توجهی در کاهش خواص بتن تازه در مقایسه با درشت‌دانه بازیافتی داشته است؛ یعنی، شدت افت مشخصات رئولوژیک بتن با افزایش ریزدانه‌ی بازیافتی بیشتر از شدت اثر درشت‌دانه بازیافتی است.

جدول ۷- نتایج آزمون T50

شماره طرح	نام طرح	T50 (sec)
1	MRF0RC0	4.12
2	MRF20RC0	4.82
3	MRF40RC0	4.91
4	MRF60RC0	5.01
5	MRF80RC0	5.55
6	MRF100RC0	5.49
7	MRF0RC20	5.12
8	MRF0RC40	5.70
9	MRF0RC60	5.15
10	MRF0RC80	5.60
11	MRF0RC100	6.32
12	MRF20RC20	5.22
13	MRF40RC40	6.06
14	MRF60RC60	6.85
15	MRF80RC80	-
16	MRF100RC100	-



شکل ۵- نتایج آزمایش L- BOX

۳-۲- نتایج آزمایش‌های بتن سخت شده

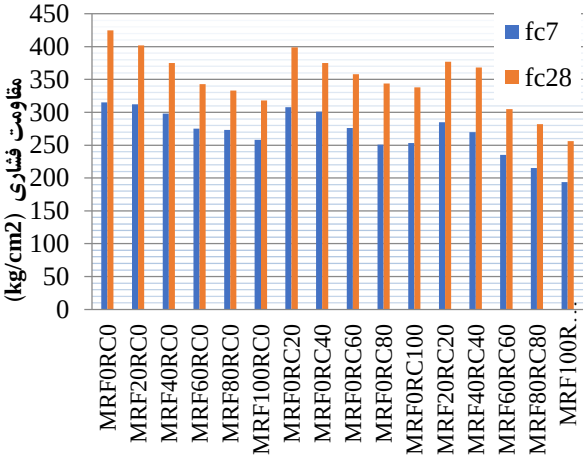
نتایج آزمایش‌های بتن سخت شده شامل آزمایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی به ترتیب در شکل ۶ و جدول ۹، شکل ۷ و جدول ۱۰، شکل ۸ و جدول ۱۱ نشان داده شده است. با بررسی مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول ۹ و شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد که در طرح شماره ۶ که ۱۰۰ درصد مصالح ریزدانه جایگزین شده ۲۴ درصد مقاومت فشاری کاهش پیدا کرده و در طرح شماره ۱۱ که ۱۰۰ درصد مصالح درشت دانه جایگزین شده ۲۵ درصد مقاومت فشاری کاهش پیدا کرده و همچنین در طرح شماره ۱۶، که ۱۰۰ درصد تمام ریزدانه و درشت دانه جایگزین شده ۳۵ درصد مقاومت فشاری کاهش پیدا کرده است.

جدول ۸- نتایج آزمایش L- BOX

شماره طرح	نام طرح	L-BOX
1	MRF0RC0	0.90
2	MRF20RC0	0.90
3	MRF40RC0	0.87
4	MRF60RC0	0.85
5	MRF80RC0	0.85
6	MRF100RC0	0.83
7	MRF0RC20	0.88
8	MRF0RC40	0.86
9	MRF0RC60	0.83
10	MRF0RC80	0.79
11	MRF0RC100	0.76
12	MRF20RC20	0.86
13	MRF40RC40	0.79
14	MRF60RC60	0.75
15	MRF80RC80	0.70
16	MRF100RC100	0.68

مطالعات عابد و همکاران [۱۴] نتایج نشان داده بود که هر چه درصد سنگ‌دانه بازیافتی بیشتر باشد، مقاومت فشاری کمتر خواهد بود که با نتایج مطالعه حاضر نیز مطابقت دارد. همچنین، طبق مشاهدات عابد و همکاران کاهش مقاومت فشاری برای جایگزینی ریزدانه بازیافتی نسبت به درشت دانه، کمتر است. در ادامه، این اثر کاهشی برای ریزدانه و درست‌دانه بازیافتی مصرفی در این مطالعه ارزیابی خواهدشد.

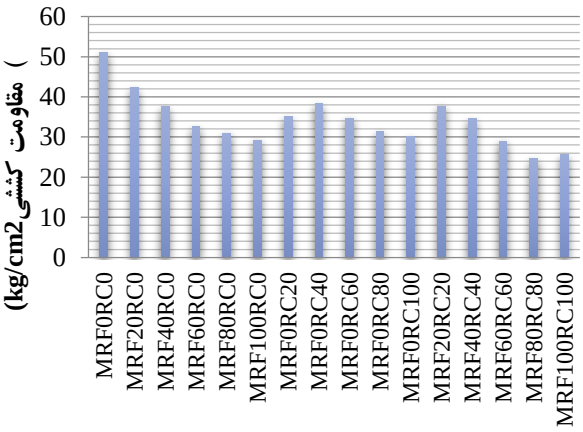
جدول‌های ۹ تا ۱۱ و همچنین شکل‌های ۶ تا ۸ نشان می‌دهند که با جایگزینی مصالح بازیافتی بجای سنگ‌دانه‌های طبیعی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی کاهش می‌یابد. همچنین، در حالتی که از ترکیب مصالح درشت دانه و ریزدانه بازیافتی استفاده شده، اثر کاهنده‌ی آن بیشتر از حالت درشت دانه و ریزدانه که به طور مجزا استفاده شده است؛ برای درک بهتر این اثر، مقادیر مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی به تفکیک کاربرد ریزدانه یا درشت‌دانه بازیافتی و یا ترکیبی از هر دو در شکل‌های ۹ تا ۱۱ به ترتیب نشان داده شده است.



شکل ۶- مقاومت فشاری۷ و۲۸ روزه نمونه‌ها

جدول ۹- مقاومت فشاری۷ و۲۸ روزه نمونه‌ها

شماره	نام طرح	f_c-7 days (Kg/cm2)	f_c-28 days (Kg/cm2)
1	MRF0RC0	315.00	425.00
2	MRF20RC0	312.00	402.00
3	MRF40RC0	298.00	375.00
4	MRF60RC0	275.00	343.00
5	MRF80RC0	273.00	333.00
6	MRF100RC0	258.00	318.00
7	MRF0RC20	308.00	399.00
8	MRF0RC40	301.00	375.00
9	MRF0RC60	276.00	358.00
10	MRF0RC80	251.00	344.00
11	MRF0RC100	253.00	338.00
12	MRF20RC20	285.00	377.00
13	MRF40RC40	270.00	368.00
14	MRF60RC60	235.00	305.00
15	MRF80RC80	215.00	282.00
16	MRF100RC100	194.00	256.00

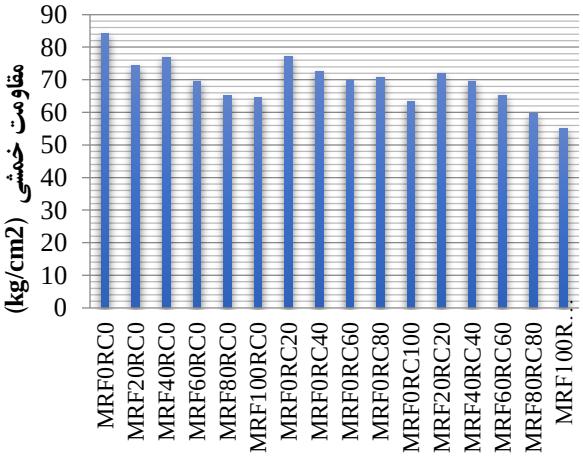


شکل ۷- نتایج مقاومت کششی

جدول ۱۰- نتایج تست مقاومت کششی نمونه‌ها

شماره	نام طرح	F_t (kg/cm^2)
1	MRF0RC0	51.00
2	MRF20RC0	42.2
3	MRF40RC0	37.5
4	MRF60RC0	32.5
5	MRF80RC0	30.9
6	MRF100RC0	29.2
7	MRF0RC20	35.1
8	MRF0RC40	38.2
9	MRF0RC60	34.7
10	MRF0RC80	31.3
11	MRF0RC100	30.0
12	MRF20RC20	37.7
13	MRF40RC40	34.5
14	MRF60RC60	28.9
15	MRF80RC80	24.5
16	MRF100RC100	25.6

برای مثال، طبق شکل ۹، مقاومت فشاری طرحی که بدون سنگ‌دانه‌های بازیافتی تهیه شده ۴۲۵ kg/cm^2 است که با جایگزین ۴۰٪ از کل سنگ‌دانه با مصالح بازیافتی مقاومت به ۳۶۸ kg/cm^2 رسیده است (۱۳٪ کاهش). درحالی‌که اگر فقط ریزدانه و یا درشت‌دانه به همین مقدار جایگزین شده، مقدار مقاومت فشاری ۳۷۵ kg/cm^2 بود (۱۱٪ کاهش). این روند در تمامی درصدهای جایگزینی مشاهده می‌شود.



شکل ۸- نتایج مقاومت خمشی

مقاومت کششی و مقاومت خمشی با افزایش درصد جایگزینی در تمامی طرح‌ها روند کاهشی داشته که با مطالعات عابد و همکاران [۱۴]

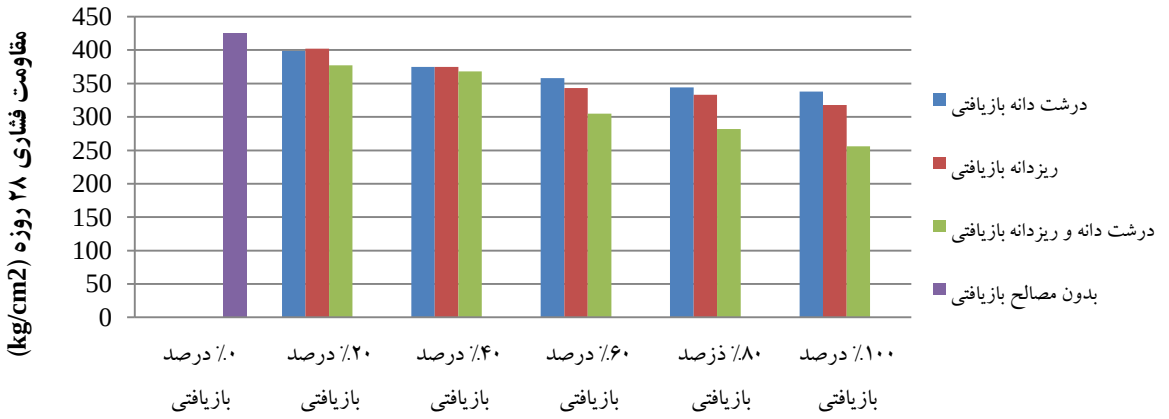
مطابقت دارد. ولی نمی‌توان به طور قطع در مورد ریزدانه و درشت دانه اظهار نظر کرد که در کدام مورد این کاهش قابل ملاحظه‌تر بوده است.

جدول ۱۱- نتایج تست مقاومت خمشی نمونه‌ها

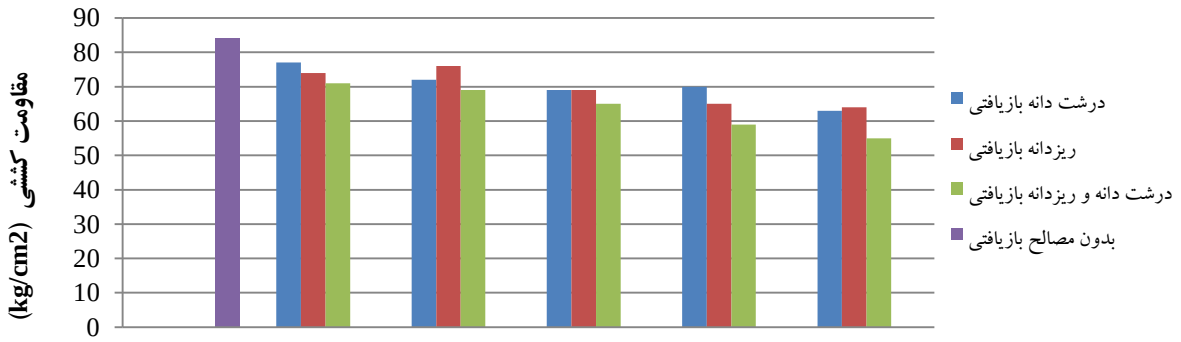
شماره طرح	نام طرح	F_b (kg/cm^2)
1	MRF0RC0	84.2
2	MRF20RC0	74.3
3	MRF40RC0	76.9
4	MRF60RC0	69.5
5	MRF80RC0	65.1
6	MRF100RC0	64.5
7	MRF0RC20	77.0
8	MRF0RC40	72.6
9	MRF0RC60	69.8
10	MRF0RC80	70.8
11	MRF0RC100	63.2
12	MRF20RC20	71.9
13	MRF40RC40	69.4
14	MRF60RC60	65.3
15	MRF80RC80	59.5
16	MRF100RC100	55.0

در ادامه، نمودار تنش-کرنش برای ۴ عدد از طرح اختلاط‌ها ترسیم شده و نتایج آن در شکل ۱۲ آورده شده است. طبق شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که جایگزینی مصالح بازیافتی بجای سنگ‌دانه طبیعی سبب افت نمودار (کاهش مقدار حداکثر و کاهش شیب) شده است؛ این امر با مشاهدات سیلوا و همکاران [۴۱] مطابقت دارد اما نتایج مطالعات وانگ و همکاران [۱۲] اثر ریزدانه بازیافتی به‌روی مدول الاستیسیته را اندک نشان داده بود. همچنین، طاهرخانی و سازگار [۲۱] اثرات بهبوددهندگی سنگ‌دانه بازیافتی را بر مدول الاستیسیته بتن خودتراکم گزارش کرده‌اند. بنابراین، به منظور نتیجه‌گیری بهتر در خصوص اثر درصدهای جایگزینی سنگ‌دانه‌های بازیافتی به جای ریزدانه و درشت‌دانه بتن خودتراکم بر مدول الاستیسیته آن نیاز به انجام مطالعات بیشتر وجود دارد.

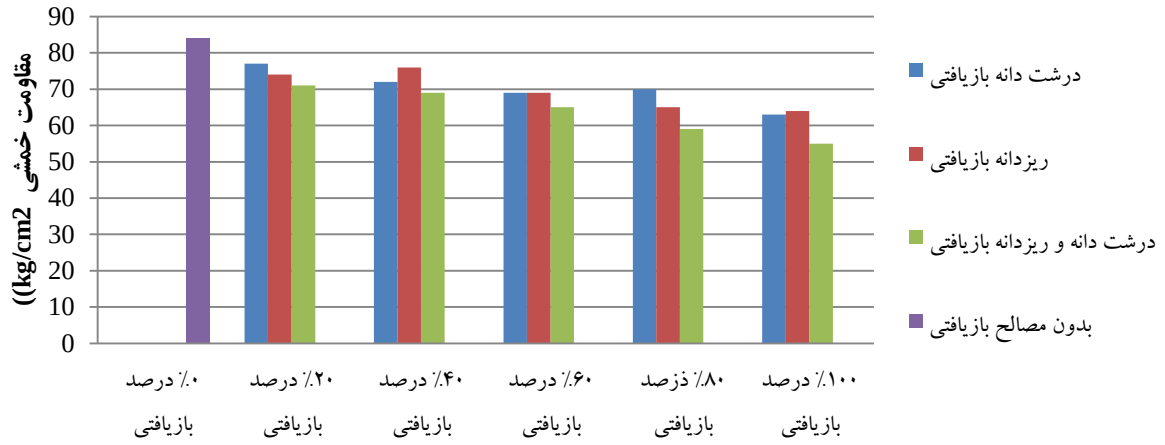
در جدول ۱۲ مقادیر به‌دست آمده برای نسبت پواسون و مدول الاستیسیته برای این ۴ طرح اختلاط خلاصه شده است. مشاهده می‌شود که کاربرد ریزدانه بازیافتی سبب کاهش بیشتری در مقدار E و ν نسبت به درشت دانه بازیافتی شده است.



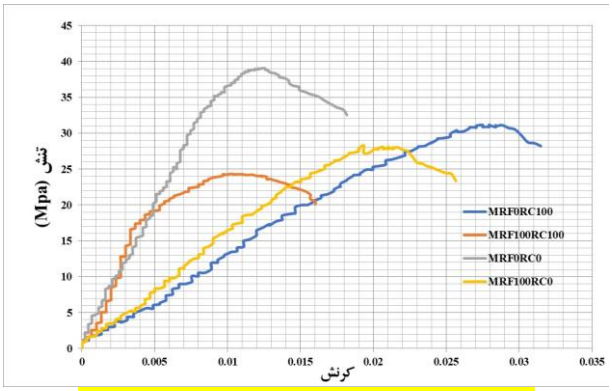
شکل ۹- مقایسه مقاومت فشاری با درصدهای جایگزینی مختلف



شکل ۱۰- مقایسه مقاومت کششی با درصدهای جایگزینی مختلف



شکل ۱۱- مقایسه مقاومت خمشی با درصدهای جایگزینی مختلف



شکل ۱۲- نمودار تنش-کرنش طرح‌های مختلف

جدول ۱۲- نسبت پواسون و مدول الاستیسیته طرح‌های مختلف

Poisson ratio	E (GPa)	
0/33	18/63	MRF0RC0
0/29	12/23	MRF100RC0
0/3	14/3	MRF0RC100
0/26	11/76	MRF100RC100

٤- نتیجه‌گیری

در این مقاله، جایگزینی درصدهای مختلف سنگ‌دانه در بتن خودتراکم با مصالح بازیافتی بطور آزمایشگاهی مطالعه شده است. این اثرات به تفکیک جایگزینی فقط بخش ریزدانه، فقط بخش درشت دانه و ترکیب هر دو بطور جداگانه بررسی شده است. نتایج نهایی حاصل از این تحقیق را بطور خلاصه می‌توان به شرح زیر بیان نمود.

اصولاً کاربرد سنگ‌دانهٔ بازیافتی بجای سنگ‌دانه طبیعی سبب افت خواص رئولوژیکی بتن خود تراکم در فاز تازه شده و خصوصیات میکانیکی بتن خود تراکم را نیز کاهش می‌دهد. به‌طوری که، طرح‌هایی که با استفاده از مصالح درشت‌دانه‌ی بازیافتی تهیه شد دارای مقاومت فشاری بالاتری نسبت به مخلوط‌های تهیه شده از ریزدانه‌ی بازیافتی بوده است. در تمامی تست‌های بتن سخت شده، در مخلوط‌هایی که از ریزدانه و درشت‌دانه‌ی بازیافتی به طور همزمان استفاده شده بود نسبت به مخلوط‌هایی که در آنها از درشت‌دانه و ریزدانه به طور مجزا استفاده شده عملکرد ضعیف‌تری از نظر مقاومت فشاری، کششی و خمشی مشاهده شد. همچنین، در مورد آزمایش‌های بتن در فاز تازه، مشاهده گردید که با افزایش مقدار ریزدانه و درشت‌دانه بازیافتی، اسلامپ، زمان T50 و پرکنندگی بتن خودتراکم نسبت به حالت استفاده از سنگ‌دانه‌های طبیعی افت پیدا می‌کند؛ بطوری که، ریزدانه‌ی بازیافتی تأثیر بیشتری در افت خواص بتن تازه در مقایسه با درشت‌دانه‌ی بازیافتی داشته است. با این وجود، در بسیاری از طرح‌ها مقادیر کاهش خصوصیات بتن خودتراکم حاصل به قدری نیست که نتوان از آن به‌عنوان یک بتن سازه‌ای استفاده کرد. برای ادامه‌ی این مطالعات می‌توان اثر عیار و نوع سیمان مصرفی و انواع افزودنی‌ها، بر خواص بتن‌های خود متراکم تهیه شده با سنگ‌دانه بازیافتی را بررسی کرد.

٥- مراجع

[1] Meyer, C., The greening of the concrete industry. Cement Conc. Compos, 2009. 31(8): p.601–605.

[2] Liu, J., E. Gong, D. Wang, X. Lai, and J. Zhu, Attitudes and behaviour towards construction waste minimization: a comparative analysis between China and the USA. Environmental Science and

Pollution Research, 2019. 26(14): p. 13681-13690.
[3] Ostyakova, A., and D. Mazurin, Management of the waste of construction and demolition. in: IOP Conference Series; Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2021. p. 012103.
[۴] برنجیان، ج.، ا. لطفی عمران، ا. مرزآرا، و م. حسن نژاد، بررسی خواص بتن مقاومت بالا با سنگ‌دانه‌های بازیافتی. سومین کنگره بین المللی عمران ، معماری و توسعه شهری، ۱۳۹۴. تهران.
[5] Pacheco-Torgal, F., Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework Programme Horizon 2020. Construction and building materials, 2014. 51: p. 151-162.
[6] Silva, R.V., J.De Brito, and R.K.Dhir, Properties and composition recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. Construction and Building Materials, 2014. 65: p. 201-217.
[7] Hansen, T.C., (Editor), Recycling of Demolition and Masonry. 1992: CRC Press.
[8] Hubertova, M., Self-Compacting Light Concrete with Liapor Aggregates. In: Young Researchers' Forum: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK, 2005. p. 103-112
[۹] نادری، م.، تحقیقات در بتن خودمتراکم. ۱۳۹۰: انتشارات نگاران نور.
[10] Muller, H.S., and M. Haist, First General Technical Approval Self Compacting Lightweight Concrete. Bundesverband Leichtzuschlang Industrie e.V.Gerhard Koch Straβe 2. Ostfildem, 2004.
[11] Makul, N., Modified Cost-Benefit Analysis of the Production of Ready-Mixed Self-Consolidating Concrete Prepared with a Recycled Concrete Aggregate. Journal of Construction Engineering and Management, 2021. 147(4): p. 04021021.
[12] Wang, Y., K. Zhang, Y. Geng, Q. Wang, and S. Zhang, Prediction of the elastic modulus and the splitting tensile strength of concrete incorporating both fine and coarse recycled aggregate. Journal of Construction and Building Materials, 2019. 215. Pp 332–346.
[13] Aslani, F., G. Ma, D. Yim Wan, and G. Muselin, Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. Journal of Cleaner Production, 2018. 182: p. 553-566.
[14] Abed, M., R. Names, and B. Tayeh, Properties of self-compacting high-strength concrete containing multiple use of recycled aggregate. Journal of King Saud University–Engineering Sciences, 2018.
[15] Zhu, P., Y. Hao, H. Liu, D. Wei, S. Liu, and L. Gu, Durability evaluation of three generations of 100% repeatedly recycled coarse aggregate concrete. Journal of Construction and Building Materials, 2019. 210: p. 442–450.
[16] Hama, S., and N. Hilal, Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste as partial replacement of sand. International Journal of Sustainable Built Environment, 2017. 6: p. 299–308
[17] Manzi, S., C. Mazzotti, and M.C. Bignozzi, Self-compacting Concrete with Recycled Concrete Aggregate: Study of the Long-Term Properties. Construction and Building Materials, 2017. 157: p. 582-590.
[18] Bui, N., T. Satomi, and H. Takahashi, Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete basing on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate. Journal of Construction and Building Materials, 2017. 148: p. 376–385.
[19] Radevic, A., A. Durekovic, D. Zakic, and D. Mladenovic, Effects of recycled concrete aggregate on stiffness and rutting resistance of asphalt concrete. Construction and Building Materials, 2017. 136: p. 386-393.
[۲۰] شربی نیازی, ح., ا. خلیل زاده وحیدی, بررسی خواص بتن حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی و لاستیک ضایعاتی و میکروسیلیس. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۱۴۰۰. *پذیرفته شده برای انتشار.*
[۲۱] طاهرخانی، ح.، و ح. سازگار، بررسی خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی روسازی حاوی سنگ‌دانه های بتن بازیافتی. نشریه مهندسی حمل و نقل، ۱۳۹۸. ۱۰(۴): ص. ۸۰۶-۷۸۷.
[۲۲] اسفندی سرافراز, م.، بررسی تأثیر نانوسیلیس و الیاف پلی وینیل الکل بر بهبود مشخصات مکانیکی و ریزساختار بتن ساخته شده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی. تحقیقات بتن, ۱۳۹۹. ۱۳(۲): ص. ۱۰۵-۱۱۷.
[۲۳] احمدی، ج.، بیگدلو، و م. سلیمانی‌راد، تأثیر استفاده از زئولیت، میکروسیلیس ومتاکائولن برکارایی ومقاومت بتن خودتراکم. نشریه مهندسی عمران ومحیط زیست، ۱۳۹۶. ۴۷(۳): ص. ۷-۱.
[۲۴] اسماعیل‌نیاعمران, م., و فریدی, رابط مقاومت فشاری با مقاومت کششی و ضریب کشسانی دربتن خودتراکم حاوی سنگ‌دانه بازیافتی و زئولیت طبیعی. تحقیقات بتن، ۱۳۹۳. ۷(۱): ۷-۲۲.

[25] EFNARC., Specification and Guidelines for self-compacting concrete. Association House, Surrey, 2002.
[26] EFNARC., Specification Guidelines for Self-Compacting Concrete. Uk: European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures, 2001.
[27] EFNARC. The European guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use. European Federation of Specialist Construction and Concrete Systems, 2005.
[28] ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019.
[29] ASTM C33. Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM International, West Conshohocken, 2018.
[۳۰] استاندارد ملی ایران شماره ۴۹۷۷. آزمایش دانه بندی سنگ‌دانه های ریز و درشت. سازمان ملی استاندارد ایران، ۱۳۹۳.
[۳۲] استاندارد ملی ایران شماره ۳۰۲. ویژگی های سنگ‌دانه های بتن. سازمان ملی استاندارد ایران، ۱۳۹۴.
[33] EN 12350-8. Testing fresh concrete- Part 8: Self-compacting concrete - Slump-flow. European Committee for Standardization, 2019.
[34] EN 12350-10. Testing fresh concrete. Self-compacting concrete. L-box test. European Committee for Standardization, 2010.
[۳۵] صالحی مبین، ج. رساله دکتری: بررسی آزمایشگاهی رفتار اتصالات تیر به ستون بتنی درجا با بتن خودتراکم تحت بارگذاری رفت و برگشتی. ۱۳۹۵: دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، به راهنمایی م.ت. کاظمی.
[36] EN 12390-3. Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens. European Committee for Standardization, 2010.
[37] ASTM C 496. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, 2004.
[38] ASTM C293. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete. ASTM International, West Conshohocken, 2004.
[39] ASTM C469. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM International, West Conshohocken, 2014.
[40] ASTM C192. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. ASTM International, West Conshohocken, 2019.
[41] Silva, R. V., De Brito, J., and Dhir, R. K., Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. Journal of Cleaner Production, 2016. 112: 2171-2186.

Effects of Fine and Coarse Aggregates Recycled from Waste Concrete on the Properties of Self-Compacting Concrete

Somayeh Mollaei *
Assistant professor, Department of civil engineering, University of Bonab, Bonab, Iran.
Rojin Naseh
M.Sc., Department of Civil Engineering, University of Bonab, Bonab, East Azerbaijan, Iran.

Abstract

One of the ways of using the waste materials in concrete mixture is replacing the aggregates with recycled materials. In many cases, the addition of recycled materials has led to improving effects on the properties of the final products besides the benefits it brings to the environmental health. In this study, the possibility of using recycled aggregates, prepared from the recycling plant of Kermanshah, in the production of self-compacting concrete is investigated. Recycled aggregates were randomly collected from the whole Kermanshah province remaining from destruction of buildings or natural disasters. Here, self-compacting concrete samples including different percentages of the recycled coarse and fine aggregates, and a combination of both were prepared in the form of 16 different mix designs. Fresh concrete tests including slump flow, T50 and L-BOX, and hardened concrete tests including compressive, tensile and flexural strength tests, as well as modulus of elasticity and Poisson ratio tests were performed. In this study, fly ash was used to retrieve for the probable reduction in the concrete strength due to the use of randomly collected recycled aggregates instead of natural aggregates. The results showed that the mixtures prepared using recycled coarse aggregates had better mechanical properties in compare to the mixtures prepared using recycled fine aggregates. In all hardened concrete tests, the performance of the mixtures prepared using the combination of recycled fine and coarse aggregates together, was significantly worse than those using the coarse or fine aggregates, separately. Also, in the case of fresh phase concrete tests, it was observed that with increasing the amount of recycled fine and coarse aggregates, the rheological properties of self-compacting concrete decrease compared to the mixtures prepared using natural aggregates. Therefore, the recycled fine aggregates have more effects on the reduction of the properties of fresh concrete compared to the recycled coarse aggregates.

Keywords: Self-Compacting Concrete (SCC), Recycled Aggregates, Fresh Concrete, Hardened Concrete.

* Corresponding Author: s.mollaei@ubonab.ac.ir