



## بررسی خواص بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی و لاستیک ضایعاتی به همراه میکروسیلیس

حسین شربی نیازی، ابراهیم خلیل زاده وحیدی\*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران .

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۸  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۵  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۳/۰۵

### کلمات کلیدی:

خواص مکانیکی  
سنگدانه های بازیافتی بتنی  
لاستیک ضایعاتی  
میکروسیلیس  
جذب آب

**خلاصه:** هدف اصلی در این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی خواص مکانیکی بتن حاوی سنگدانه های بازیافتی بتنی و لاستیک ضایعاتی به همراه میکروسیلیس می باشد. بدین منظور سنگدانه های بازیافتی بتنی به میزان ۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد وزنی جایگزین درشت دانه و میکروسیلیس به میزان ۱۰ درصد وزنی سیمان، جایگزین سیمان شده است. همچنین در دو نمونه آزمایشگاهی دارای ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی بتنی، یکی در حالت بدون میکروسیلیس و دیگری با میکروسیلیس از لاستیک ضایعاتی به میزان ۳۰ درصد حجمی ماسه جایگزین سنگ دانه ریز، استفاده شده است. در گام بعدی مقدار اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، نمودار تنش- کرنش، چگالی و نفوذپذیری نمونه ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می دهد که وجود سنگدانه های بازیافتی سبب کاهش ۳/۲ تا ۱۴/۵ درصدی مقاومت فشاری و همچنین افزودن پودر لاستیک به نمونه دارای ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی، سبب کاهش ۷۱ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع (نمونه با سنگدانه های طبیعی بدون میکروسیلیس) شده است. همه ی نمونه های دارای میکروسیلیس نسبت به نمونه های مشابه بدون میکروسیلیس، مقاومت فشاری بیشتری دارند. بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه ی دارای ۲۵ درصد سنگدانه بازیافتی و میکروسیلیس است که نسبت به نمونه مرجع ۹/۶ درصد بیشتر است. نمونه حاوی ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی در حضور و در غیاب پودر لاستیک به ترتیب ۵۵ و ۷۲ درصد، مقاومت کششی کمتری و به ترتیب ۳۰ و ۶۷ درصد مقاومت خمشی کمتری نسبت به نمونه مرجع دارند. کمترین جذب آب، برای نمونه بدون سنگدانه های بازیافتی دارای میکروسیلیس و به میزان ۰/۵ درصد است.

شد، به عبارت بهتر در صورت بازیافت بتن ضایعاتی، تعداد ماشین آلات مورد نیاز برای تولید و تامین سنگدانه های طبیعی کاهش می یابد، بنابراین انرژی کمتری مصرف می شود [۵]. از طرفی با توجه به اینکه یکی از روش های مدیریت مصالح ضایعاتی ساختمانی، دفن آن ها در خاک می باشد، محل دفن آن ها به شدت در حال پر شدن می باشد و با بازیافت آن ها دیگر نیازی به دفن نیست [۶]. همچنین در صنعت ساختمان سازی، هزینه ساخت مهم ترین فاکتور می باشد و هر راهی برای کاهش هزینه ساخت ایده آل می باشد، که با بازیافت مصالح ساختمانی در هزینه دفع و یا حمل و نقل به صورت مستقیم و غیرمستقیم صرفه جویی خواهد شد [۷]. با توجه به مزایای فراوان بازیافت مواد و مصالح ساختمانی و استفاده مجدد از آن، به عبارت بهتر به دلیل ضرورت و اهمیت استفاده از سنگدانه های بازیافتی، در سال های گذشته مطالعات آزمایشگاهی متعددی بر روی استفاده از مواد بازیافتی نظیر لاستیک ها، سنگدانه های بازیافتی بتنی، پلاستیک ها، خرده شیشه و .... در ساخت بتن انجام شده است، که از آن جمله می توان به موارد زیر اشاره نمود.

### ۱- مقدمه

استفاده از بتن در سراسر دنیا روز به روز در حال افزایش می باشد. به همین دلیل در آینده ای نزدیک با کمبود سنگدانه های طبیعی مواجه خواهیم شد و ناگزیر باید به دنبال یافتن جایگزینی مناسب برای سنگدانه های طبیعی باشیم [۲ و ۱]. از طرفی با توجه به تعداد زیاد ساختمان های بتنی قدیمی و تخریب آن ها و تولید زباله، که برای محیط زیست مضر می باشد، می توان این مصالح را بازیافت نموده و به عنوان سنگدانه در بتن استفاده کرد. در کشورهای اروپایی و آمریکا سالانه میلیون ها تن ضایعات بتنی ایجاد می شود که می توان آن ها را در بتن استفاده نمود [۴ و ۳]. در کشور عزیزمان ایران، نیز مقادیر زیادی ضایعات ساختمانی تولید می شود که جهت جلوگیری از ورود آن به محیط زیست و آلودگی آن، باید به صورت مناسب بازیافت گردند. بازیافت مواد مخصوصاً مصالح ساختمانی مزایای فراوانی دارد، از جمله آن که بازیافت سبب عدم نیاز با منابع طبیعی و صرفه جویی در انرژی خواهد

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: khalilzadeh@razi.ac.ir



منظور بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی بتنی استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نمونه‌های دارای مواد افزودنی ضایعاتی جایگزین سیمان نسبت به نمونه مرجع خواص مکانیکی و دوام بهتری دارد. همچنین نتایج نشان داد که خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج، خاکستر نیشکر به ترتیب باعث افزایش مقاومت فشاری و خمشی به میزان ۱۵ تا ۲۴ درصدی، ۱۲ تا ۲۵ درصدی و ۱۳ تا ۲۰ درصدی نسبت به نمونه مرجع، شده‌اند.

در سال ۲۰۱۶ Kapoor و همکاران [۱۱] به بررسی اثر مواد معدنی جایگزین سیمان بر بتن خودمترکم دارای سنگدانه‌های بازیافتی بتنی پرداختند. برای این منظور از سنگدانه‌های بازیافتی بتنی به میزان ۵۰ و ۱۰۰ درصد جایگزین سنگدانه‌های طبیعی و از میکروسیلیس و متاکائولین به صورت جداگانه و به میزان ۱۰ درصد وزنی سیمان استفاده کرده‌اند. در نهایت میزان اسلامپ، مقاومت فشاری، نفوذپذیری یون کلراید، جذب سطحی اولیه، نفوذ آب و جذب آب موئینه بتن اندازه‌گیری و مقایسه شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد زمانی که از سنگدانه‌های بازیافتی به میزان ۱۰۰ درصد جایگزین سنگدانه طبیعی استفاده شده است، مقاومت فشاری نمونه ۲۸ روزه به مقدار ۱۳ درصد کاهش می‌یابد. اما هنگامی که از میکروسیلیس یا متاکائولین استفاده شده است میزان کاهش مقاومت به ترتیب به ۸ و ۳ درصد نزول پیدا می‌کند. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که اضافه کردن میکروسیلیس و متاکائولین به نمونه‌های دارای سنگدانه‌های بازیافتی، موجب بهبود دوام نسبت به نمونه‌های مشابه بدون میکروسیلیس و یا متاکائولین خواهد شد. البته در مورد بهبود دوام بتن، اثر متاکائولین بیشتر از میکروسیلیس می‌باشد. در سال ۲۰۱۵ Akib و همکاران [۱۲] خصوصیات مکانیکی بتن ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از جایگزین کردن ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد از سنگدانه‌های بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی در بتن استفاده کردند. نتایج به دست آمده از انجام آزمایش‌ها نشان داد که جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی تا ۵۰ درصد به جای سنگدانه‌های طبیعی تاثیر زیادی در خصوصیات مکانیکی بتن ندارد. اما با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی بیشتر از ۵۰ درصد، مقاومت فشاری تا ۱۱ درصد و مقاومت کششی تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

در سال ۲۰۱۳ Revati و همکاران [۱۳] به بررسی ویژگی‌های بتن خودمترکم دارای سنگدانه‌های بازیافتی با درصدهای متفاوت پرداختند. آن‌ها مشاهده نمودند با افزایش مقدار سنگدانه‌ها بازیافتی ویژگی‌های مکانیکی

در سال ۲۰۱۹ کاظمیان و همکاران [۸] به بررسی ویژگی‌های مکانیکی و شکست بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی تمیز شده و تمیز نشده پرداختند. هدف اصلی آن‌ها بررسی اثر سالم‌سازی سطح سنگدانه بر خواص مکانیکی بتن بود. برای این منظور ابتدا همه سنگدانه‌ها شسته شده و در دمای محیط خشکانده شده‌اند. سپس برای اینکه سیمان چسبیده شده به سنگدانه‌ها برداشته شود از محلول اسیدی هیدروکلراید استفاده شده است. در مرحله بعدی برای بالا بردن چسپندگی سنگدانه‌ها، آن‌ها در محلول ۵ درصد متاسیلیکات کلسیم خیسانده شده‌اند. در نهایت آزمایشات فشاری، خمشی و شکست نمونه‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داد که نمونه بتن دارای سنگدانه‌های بازیافتی با سطح تمیز شده، نسبت به نمونه‌های بتنی دارای سنگدانه بازیافتی تمیز نشده، مقاومت خمشی بیشتری و همچنین رفتار شکست بعد از گسترش ترک بهتری دارند.

در سال ۲۰۱۹ جوکار و همکاران [۹] به بررسی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی بتن حاوی خرده لاستیک و زئولیت طبیعی پرداختند. هدف اصلی این پژوهش بهبود خصوصیات مکانیکی بتن حاوی خرده لاستیک با افزودن زئولیت طبیعی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان بوده است. مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، وزن مخصوص و مدول الاستیسیته نمونه‌ها با درصدهای مختلف جایگزینی، مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج به دست آمده، برای تمامی درصدهای اضافه شده خرده لاستیک، خصوصیات مکانیکی در مقایسه با نمونه مرجع تضعیف شد. خصوصیات مکانیکی نمونه‌هایی که فقط از خرده لاستیک در ساخت آن‌ها استفاده شده است، نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته است، ولی نمونه دارای ۵ درصد خرده لاستیک، مقاومت خمشی بیشتری نسبت به نمونه مرجع داشته است. در حالی که افزودن زئولیت موجب ارتقاء خصوصیات مکانیکی در تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع شد. در مقایسه با نمونه مرجع، بهترین عملکرد در مقاومت فشاری در نمونه حاوی ۵ درصد خرده لاستیک و ۱۵ درصد زئولیت و بهترین عملکرد در مقاومت خمشی در نمونه حاوی ۵ درصد خرده لاستیک و ۱۰ درصد زئولیت حاصل شد.

در سال ۲۰۱۸ Jindal و همکاران [۱۰] به بررسی بتن روسازی دارای سنگدانه‌های ضایعاتی ساختمانی جایگزین سنگدانه طبیعی و مواد افزودنی ضایعاتی صنعتی و کشاورزی جایگزین سیمان، پرداختند. برای این منظور در این تحقیق از خاکستر بادی به عنوان مواد ضایعاتی صنعتی و از خاکستر پوسته برنج و خاکستر باگاس نیشکر به عنوان مواد ضایعاتی کشاورزی به

چگالی بتن سخت شده و نفوذپذیری نمونه‌ها بررسی شده است.

## ۲- مصالح مورد استفاده و طرح اختلاط

### ۲-۱- ویژگی مصالح مورد استفاده

در این تحقیق از آب شرب شهر ایلام جهت شست و شوی سنگدانه‌ها و تهیه نمونه‌های بتنی و همچنین از سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان ایلام با چگالی ظاهری ۳۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شده است. سنگدانه‌های طبیعی مورد استفاده در این آزمایش از معادن استان ایلام استخراج شده‌اند، که شامل شن بادامی و شن نخودی با چگالی ظاهری ۲۶۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ماسه با چگالی ظاهری ۲۵۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب است که بزرگ‌ترین سایز استفاده شده آن‌ها، در این آزمایش به ترتیب ۱۹، ۹/۵ و ۴/۵ میلی‌متر می‌باشد که بر اساس استاندارد ASTM-C33 [۱۶] دانه‌بندی شده است. همچنین سنگدانه بتنی بازیافتی با چگالی ظاهری ۲۶۲۴ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شده در این آزمایش حاصل تخریب ساختمان‌های بتنی بوده که پس از خرد شدن مطابق استاندارد ASTM-C33 دانه‌بندی شده‌اند. با توجه به اهداف از پیش تعیین شده، در تحقیق حاضر از خرده لاستیک ضایعاتی به عنوان جایگزین سنگدانه‌ی ریز طبیعی استفاده خواهد شد. در این تحقیق، مقدار لاستیک ضایعاتی، ۳۰ درصد حجمی مقدار سنگدانه ریز طبیعی می‌باشد. همچنین لاستیک ضایعاتی مورد استفاده در این آزمایش نیز به صورت پودر از شهرستان اشتهارد استان البرز تهیه گردید و بزرگ‌ترین قطر و چگالی آن به ترتیب ۲ میلی‌متر و ۸۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب بود. شکل ۱ منحنی دانه‌بندی مصالح مورد استفاده را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه استفاده از مواد ضایعاتی در بتن موجب کاهش خصوصیات بتن سخت شده خواهد شد [۹] و استفاده از مواد معدنی پوزولانی نظیر میکروسیلیس می‌تواند مقداری از این کاهش را بهبود ببخشد [۱۱]، در این تحقیق به منظور بهبود خصوصیات بتن دارای سنگدانه‌های بازیافتی از میکروسیلیس و طبق تحقیقات گذشتگان [۱۱] به میزان ۱۰ درصد وزنی سیمان، استفاده خواهد شد. همچنین از فوق روان کننده جهت کاهش آب مصرفی و تامین کارایی مورد نیاز بتن، استفاده شده است.

### ۲-۲- ام‌گذاری نمونه‌های آزمایشگاهی و تهیه طرح اختلاط

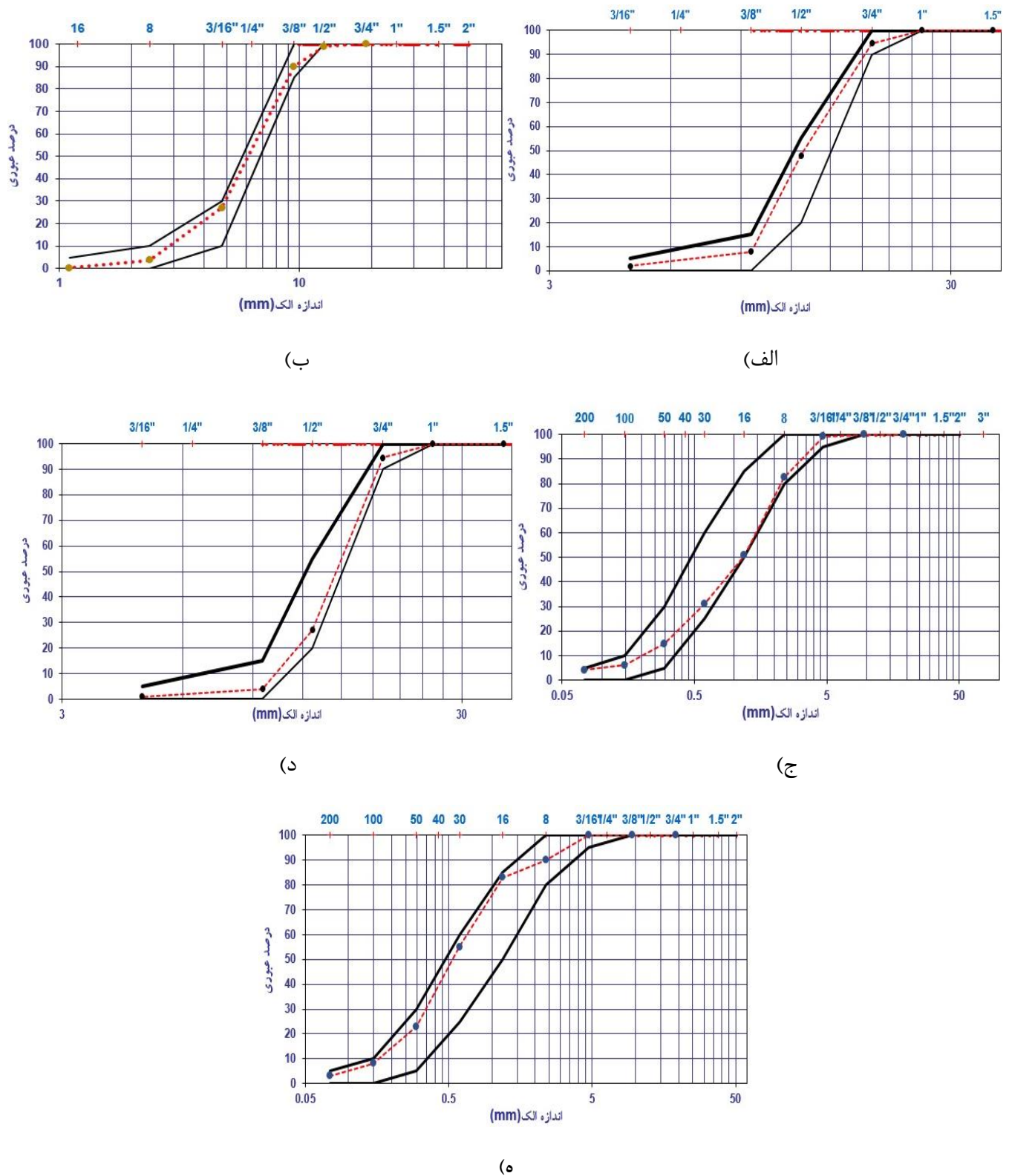
در مقاله حاضر متناسب با اهداف تعیین شده، در مجموع خواص ۱۰ نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات هر یک از نمونه‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

بتن خودمتراکم افت می‌کند، به گونه‌ای که با جایگزین نمودن صددرصد سنگدانه‌های بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی، مقاومت فشاری و کششی به ترتیب ۱۶ و ۵۸ درصد کاهش می‌یابد.

در سال ۱۳۹۸ عبدالقیوم دهواری و همکاران [۱۴] به بررسی تاثیر استفاده از سنگدانه‌های ضایعاتی بتنی بر روی خصوصیات مکانیکی و دوام در محیط‌های خورنده پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که مقدار درصد پهنه سنگدانه‌های درشت دانه، برای یک محیط با خورندگی بالا حدود ۲۰/۳۳ درصد است.

در سال ۱۳۹۵ علی شاهینی و همکاران [۱۵] اثر اسید سولفوریک بر خصوصیات مکانیکی بتن حاوی خرده لاستیک و پت (پلاستیک پلی اتیلن ترفتلات) ضایعاتی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که جایگزینی پت ضایعاتی با سنگدانه‌های طبیعی تاثیر مثبتی بر روی مقاومت بتن تحت اثر اسید سولفوریک دارد.

با توجه تحقیقات دیگر محققین، استفاده از سنگدانه‌های ضایعاتی بتنی به عنوان جایگزین سنگدانه‌های طبیعی موجب افت خصوصیات مکانیکی بتن سخت شده خواهد شد. در رابطه با این موضوع، اگر چه پژوهشگران مطالعات زیادی انجام داده‌اند، اما اثر استفاده همزمان از درصد‌های مختلف سنگدانه‌های بازیافتی بتنی و میکروسیلیس و یا اثر استفاده همزمان سنگدانه‌ی بتنی بازیافتی و لاستیک ضایعاتی و میکروسیلیس، به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارت بهتر نوآوری در این تحقیق، پاسخ به این سوال است که، "اثر استفاده میکروسیلیس بر بتن دارای درصد‌های مختلف سنگدانه بازیافتی بتنی جایگزین شده درشت دانه طبیعی به چه صورت است؟"، همچنین "اثر استفاده همزمان لاستیک ضایعاتی به عنوان جایگزین ریز دانه طبیعی و سنگدانه بازیافتی بتنی به عنوان جایگزین سیمان به چه صورت است؟". بنابراین با توجه به تحقیقات گذشتگان، هدف اصلی در این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی اثر سنگدانه‌های بازیافتی بتنی و لاستیک ضایعاتی به همراه میکروسیلیس بر روی خواص بتن سخت شده می‌باشد. برای این منظور از سنگدانه‌های بازیافتی بتنی به میزان ۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد وزنی جایگزین درشت دانه و از میکروسیلیس به میزان ۱۰ درصد وزنی سیمان، جایگزین سیمان، استفاده شده است. همچنین در دو نمونه آزمایشگاهی یکی دارای میکروسیلیس و دیگری بدون میکروسیلیس ولی هر دو حاوی ۵۰ درصد سنگدانه بتنی بازیافتی، پودر لاستیک ضایعاتی به میزان ۳۰ درصد حجمی ماسه، جایگزین ماسه شده است. در گام بعدی اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، نمودار تنش-کرنش،



شکل ۱. الف) منحنی دانه‌بندی شن بادامی ب) منحنی دانه‌بندی شن نخودی ج) منحنی دانه‌بندی ماسه د) منحنی دانه‌بندی سنگدانه بازیافتی ه) منحنی دانه‌بندی سنگدانه لاستیک ضایعاتی

Fig. 1. (a) Gradation curve of almond gravel, (b) Gradation curve of pea gravel, (c) Gradation curve of sand, (d) Gradation curve of recycled aggregate, (e) Gradation curve of waste rubber aggregates,

جدول ۱. مشخصات نمونه های آزمایشگاهی

Table 1. Specifications of experimental specimens

ردیف	نمونه	مشخصات نمونه ها
۱	C0	نمونه مرجع (نمونه بدون سنگدانه بازیافتی و میکروسیلیس)
۲	CW25	نمونه دارای ۲۵ درصد سنگدانه بازیافتی بتنی
۳	CW50	نمونه دارای ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی بتنی
۴	CW100	نمونه دارای ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی بتنی
۵	CW50T10	نمونه دارای ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی بتنی و ۱۰ درصد خرده لاستیک ضایعاتی
۶	C0SF	نمونه مرجع دارای میکروسیلیس
۷	CW25SF	نمونه دارای ۲۵ درصد سنگدانه بازیافتی بتنی به همراه میکروسیلیس
۸	CW50SF	نمونه دارای ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی بتنی به همراه میکروسیلیس
۹	CW100SF	نمونه دارای ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی بتنی به همراه میکروسیلیس
۱۰	CW50T10SF	نمونه دارای ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی بتنی و ۱۰ درصد خرده لاستیک ضایعاتی به همراه میکروسیلیس

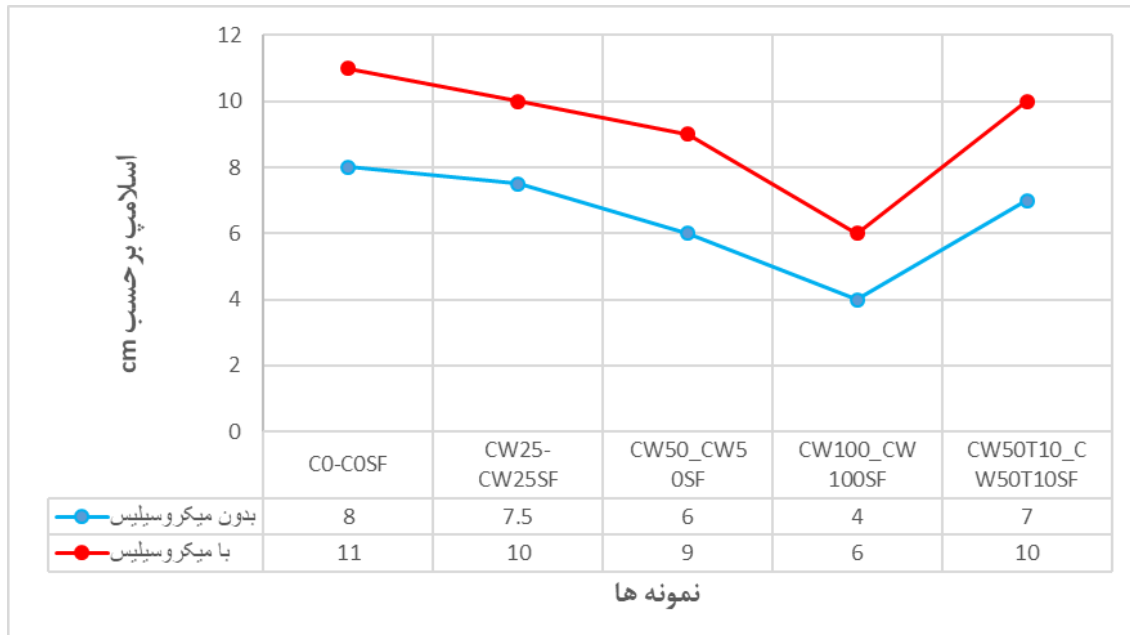
جدول ۲. طرح اختلاط نمونه های آزمایشگاهی برای یک متر مکعب بتن

Table 2. Mixture proportions of experimental specimens for one cubic meter of concrete

ردیف	نمونه	سیمان (kg)	آب (kg)	شن بادامی (kg)	شن نخودی (kg)	ماسه طبیعی (kg)	سنگدانه بازیافتی (kg)	پودر لاستیک (kg)	میکروسیلیس (kg)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
۱	C0	۳۴۰	۱۵۳	۵۴۹/۰۵	۲۵۶/۷۳	۱۱۰۰/۷۶	۰	۰	۰	۲۴۰۳
۲	CW25	۳۴۰	۱۵۳	۴۱۱/۷۹	۲۵۶/۷۳	۱۱۰۰/۷۶	۱۳۶/۴۶	۰	۰	۲۴۰۲
۳	CW50	۳۴۰	۱۵۳	۲۷۴/۵۴	۲۵۶/۷۳	۱۱۰۰/۷۶	۲۷۲/۹۲	۰	۰	۲۴۰۱
۴	CW100	۳۴۰	۱۵۳	۰	۲۵۶/۷۳	۱۱۰۰/۷۶	۵۴۵/۸۴	۰	۰	۲۳۹۹
۵	CW50T10	۳۴۰	۱۵۳	۲۷۴/۵۲	۲۵۱/۳۱	۷۶۹/۶۲	۲۷۲/۹۲	۱۰۷/۸۱	۰	۲۱۷۲
۶	C0SF	۳۰۶	۱۵۳	۵۳۷/۴۷	۲۵۱/۳۱	۱۱۰۰/۳۷	۰	۰	۳۴	۲۳۸۵
۷	CW25SF	۳۰۶	۱۵۳	۴۰۳/۱	۲۵۱/۳۱	۱۱۰۰/۳۷	۱۳۳/۵۸	۰	۳۴	۲۳۸۴
۸	CW50SF	۳۰۶	۱۵۳	۲۶۸/۶۷	۲۵۱/۳۱	۱۱۰۰/۳۷	۲۶۷/۱۶	۰	۳۴	۲۳۸۳
۹	CW100SF	۳۰۶	۱۵۳	۰	۲۵۱/۳۱	۱۱۰۰/۳۷	۵۳۴/۳۲	۰	۳۴	۲۳۸۲
۱۰	CW50T10SF	۳۰۶	۱۵۳	۲۶۸/۷۳	۲۵۱/۳۱	۷۶۹/۲۴	۲۶۷/۱۶	۱۰۷/۱۳	۳۴	۲۱۵۹

نسبت وزنی سیمان به آب برابر ۰/۴۵ و مقدار فوق روان کننده نیز ثابت و برابر ۳/۰۶ کیلوگرم برای یک متر مکعب بتن، است.

در این تحقیق برای طرح اختلاط بتن از آیین نامه ACI استفاده شده است. طرح اختلاط برای یک متر مکعب بتن جهت تهیه نمونه های مختلف مطابق جدول ۲ است. لازم به توضیح می باشد که در تمام طرح اختلاط ها،



شکل ۲. نمودار اسلامپ نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و بدون میکروسیلیس

Fig. 2. Slump curve of experimental specimens containing microsilica and without microsilica

مقدار اسلامپ نسبت به نمونه مرجع کاهش بیشتری می‌یابد. در مطالعات انجام شده بر روی بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، مشاهده شده است که در صورت استفاده از سنگدانه‌های ضایعاتی بتنی کاملاً خشک، به دلیل جذب آب آزاد توسط سنگدانه‌های بازیافتی، کارایی افت داشته است [۲۱-۱۸]. همچنین افزودن میکروسیلیس به نمونه‌های آزمایشگاهی سبب افزایش اسلامپ می‌شود. علت این امر می‌تواند این باشد که میکروسیلیس اساساً یک ماده پوزولانی قوی است که باعث افزایش چسبندگی سیمان به سنگدانه‌ها و مانع جذب آب سنگدانه‌ها و در نتیجه باعث افزایش اسلامپ می‌شود [۲۲]. لازم به ذکر است که افزودن لاستیک ضایعاتی به بتن حاوی ۵۰ درصد سنگدانه ضایعاتی بتن در حضور میکروسیلیس و در غیاب میکروسیلیس موجب افزایش اسلامپ در هر دو حالت می‌شود، که به نظر می‌رسد علت افزایش اسلامپ نمونه‌ها، جذب آب پایین پودر لاستیک بوده است.

### ۳-۲- چگالی بتن سخت شده

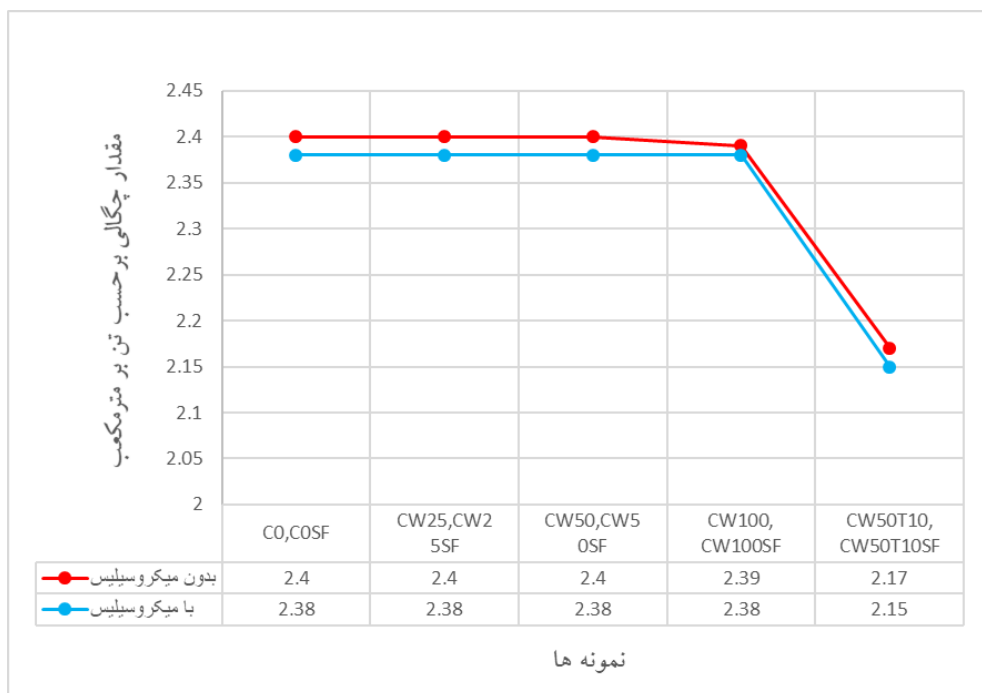
ارزیابی چگالی بتن سخت شده از این جهت اهمیت دارد که هر چه مقدار آن کمتر باشد، بار مرده سازه کمتر است و نیروی کمتری حین زلزله به ساختمان وارد می‌شود. در این پژوهش برای تعیین چگالی از نمونه‌های ۲۸ روزه مکعبی  $150 \times 150 \times 150$  میلی‌مترمکعب استفاده شده است. مطابق

پس از تعیین طرح اختلاط‌های اولیه و ارزیابی آن‌ها، نمونه‌های بتنی در نزدیک محل ساخت بتن قالب‌گیری شدند. برای مترکم نمودن بتن در قالب‌ها، از روش میله زنی استفاده شده است. پس از قالب‌گیری نمونه‌ها، آن‌ها را بر روی سطح صلبی و به دور از ارتعاش و مزاحمت قرار داده و با استفاده از پارچه مرطوبی پوشانده شدند. پس از ۲۴ ساعت قالب‌ها را باز نموده و نمونه‌های بتنی به صورت مناسبی عمل‌آوری شدند. پس از عمل‌آوری نمونه‌ها، بر اساس ضوابط موجود در استانداردهای آزمایش اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و جذب آب انجام خواهد گرفت که با توجه به اینکه مراحل انجام آزمایش‌ها در هر یک از دستورالعمل‌ها ذکر شده است، از بیان مجدد آن در این مقاله خودداری شده است.

### ۳-۳- ارائه و تفسیر نتایج

#### ۳-۱- اسلامپ

در این پژوهش جهت تعیین اسلامپ بتن تازه، از روش ارائه شده در استاندارد ASTM-C143 [۱۷] استفاده شده است. شکل ۲ نتایج آزمایش اسلامپ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲ استفاده از سنگدانه حاصل از بتن ضایعاتی در نمونه‌هایی که بدون میکروسیلیس هستند، سبب کاهش اسلامپ شده‌اند و همچنین با افزایش درصد سنگدانه‌های بتنی بازیافتی



شکل ۳. چگالی نمونه های مکعبی ۲۸ روزه

Fig. 3. Density of experimental specimens after 28 days

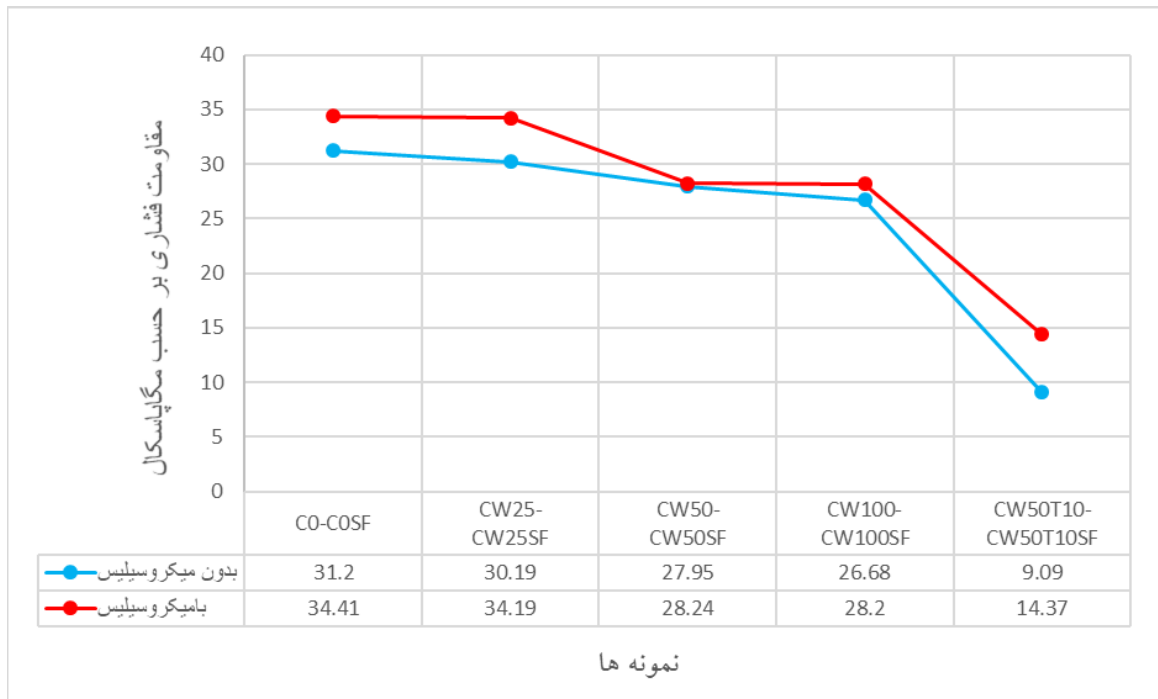
احتمالی کاهش مقاومت فشاری این است که، اولاً سنگدانه‌های ضایعاتی بتنی جذب آب بالایی دارند ثانیاً سنگدانه‌های بازیافتی بتنی تراکم پایینی دارند و ثالثاً ملات قدیمی (ملات موجود بر روی سنگدانه بتنی بازیافتی) چسبیده به سنگدانه بازیافتی بتنی سطحی ضعیف‌تر از سطح سنگدانه‌های طبیعی دارند. لازم به ذکر است که بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه بتن دارای سنگدانه بازیافتی بتنی، بر کاهش مقاومت فشاری اجماع نظر دارند. با اضافه کردن میکروسیلیس به نمونه مرجع، به دلیل خاصیت پوزولانی قوی میکروسیلیس که سبب افزایش چسبندگی سیمان به سنگدانه‌ها شده است [۲۴]، مقاومت فشاری حدود ۱۰ درصد افزایش یافته است. همچنین اضافه کردن میکروسیلیس به نمونه‌های دارای سنگدانه بازیافتی موجب افزایش مقاومت فشاری شده است. با اضافه کردن سنگدانه بازیافتی به بتن در غیاب میکروسیلیس، مقاومت فشاری از  $\frac{3}{2}$  تا  $\frac{14}{5}$  درصد نسبت به نمونه مرجع، کاهش می‌یابد. در همه‌ی نمونه‌ها، افزودن میکروسیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های مشابه بدون میکروسیلیس شده است. افزودن میکروسیلیس به نمونه‌های دارای ۲۵ درصد سنگدانه بازیافتی سبب افزایش مقاومت فشاری بتن به میزان  $\frac{9}{6}$  درصد نسبت به نمونه مرجع شده است، در حالی که افزودن میکروسیلیس به نمونه‌های دارای ۵۰ و ۱۰۰

شکل ۳ که نتایج آزمایش چگالی بتن سخت شده را نشان می‌دهد، با افزایش درصد سنگدانه‌های بازیافتی، مقدار چگالی تقریباً یکسان است. همچنین بر اساس شکل ۳، افزودن میکروسیلیس به تنهایی و همچنین افزودن لاستیک ضایعاتی، به نمونه‌های دارای سنگدانه ضایعاتی سبب کاهش مقدار چگالی بتن، نسبت به نمونه‌های مشابه خواهد شد. کمترین چگالی مربوط به نمونه دارای ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی، خرده لاستیک ضایعاتی و میکروسیلیس و به میزان ۱۱ درصد کمتر از چگالی نمونه مرجع می‌باشد.

### ۳-۳- مقاومت فشاری

در این آزمایش برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی با ابعاد  $150 \times 150 \times 150$  میلی‌متر مکعب در سن ۲۸ روزه از روش ارائه شده در استاندارد (BS 1881:Part 116) [۲۳] استفاده شده و نتایج آن در شکل ۷ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان داده شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۴ شاهد کاهش مقاومت در نتیجه جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی هستیم که در این بین بیشترین کاهش مقاومت را با جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی با  $\frac{14}{5}$  درصد کاهش مقاومت در مقایسه با نمونه مرجع است. علت



شکل ۴. مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه حاوی میکروسیلیس و بدون میکروسیلیس

Fig. 4. Compressive strength of experimental specimens containing microsilica and without microsilica after 28 days

میکروسیلیس به نمونه‌های دارای سنگدانه بازیافتی سبب بهبود آن شده است، به گونه‌ای که مقاومت کششی نمونه دارای ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی در غیاب و در حضور میکروسیلیس به ترتیب به میزان ۱۴ و ۶ درصد نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته است. همچنین افزودن پودر لاستیک به نمونه‌ی دارای ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی، کاهش مقاومت کششی را شدت بخشیده است، به طوری که نمونه‌های دارای پودر لاستیک در غیاب و در حضور میکروسیلیس ۷۲ و ۵۵ درصد، مقاومت کششی کمتری نسبت به نمونه مرجع دارند.

### ۳-۵- مقاومت خمشی

این آزمایش با استفاده از استاندارد ASTM-C293 [۲۳] و اعمال بار نقطه‌ای مرکزی بر روی نمونه‌های بتنی منشوری به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۶۰۰ میلی‌مترمکعب به صورت تیر ساده با طول دهانه ۴۵۰ میلی‌متر (معادل سه برابر ارتفاع مقطع) انجام شد. نتایج آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.

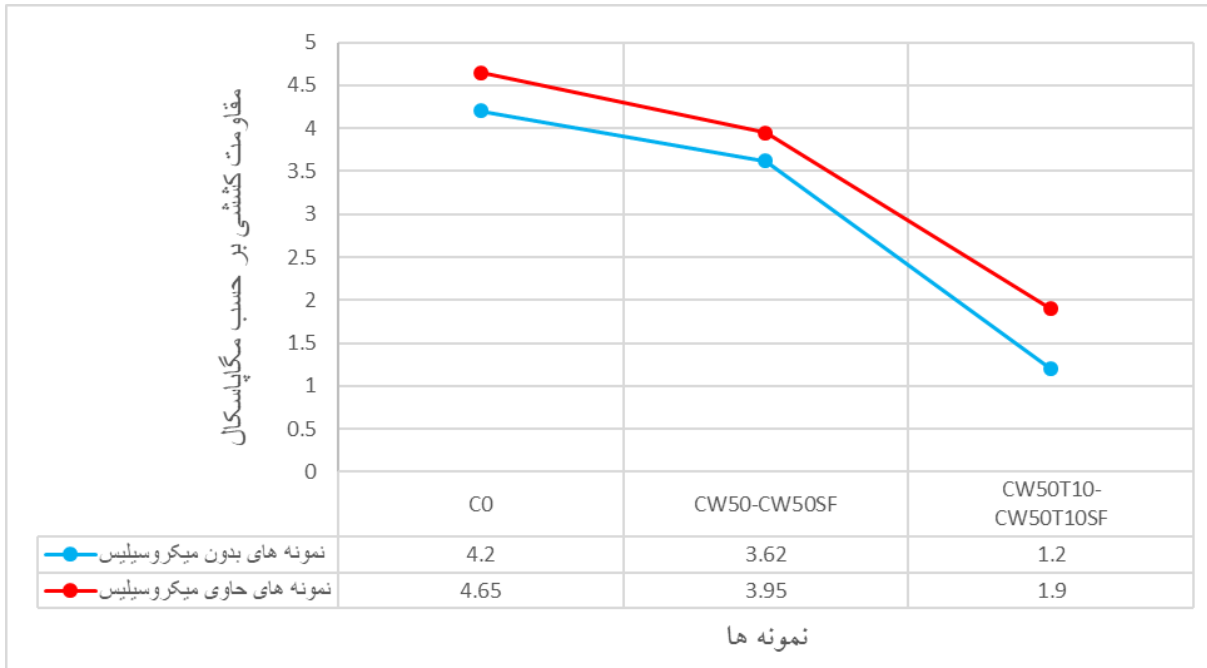
درصد سنگدانه بازیافتی سبب کاهش مقاومت فشاری بتن به ترتیب به مقدار ۱۰ و ۹ درصد نسبت به نمونه مرجع شده است. در ضمن افزودن ۳۰ درصد پودر لاستیک به نمونه‌ی دارای ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی، در غیاب و در حضور میکروسیلیس، سبب کاهش مقاومت فشاری به میزان ۷۱ و ۵۸ درصد نسبت به نمونه مرجع شده است.

### ۳-۴- مقاومت کششی

این آزمایش که به آزمایش برزیلی نیز معروف است با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد با ارتفاع ۳۰ و قطر ۱۵ سانتی‌متر برای ۵ طرح اختلاط با سن ۲۸ روزه بر اساس استاندارد ASTM-C496 [۲۳] به طریق دو نیم شدن نمونه‌های بتنی صورت گرفت. در شکل ۵ نتایج آزمایش کششی نشان داده شده است.

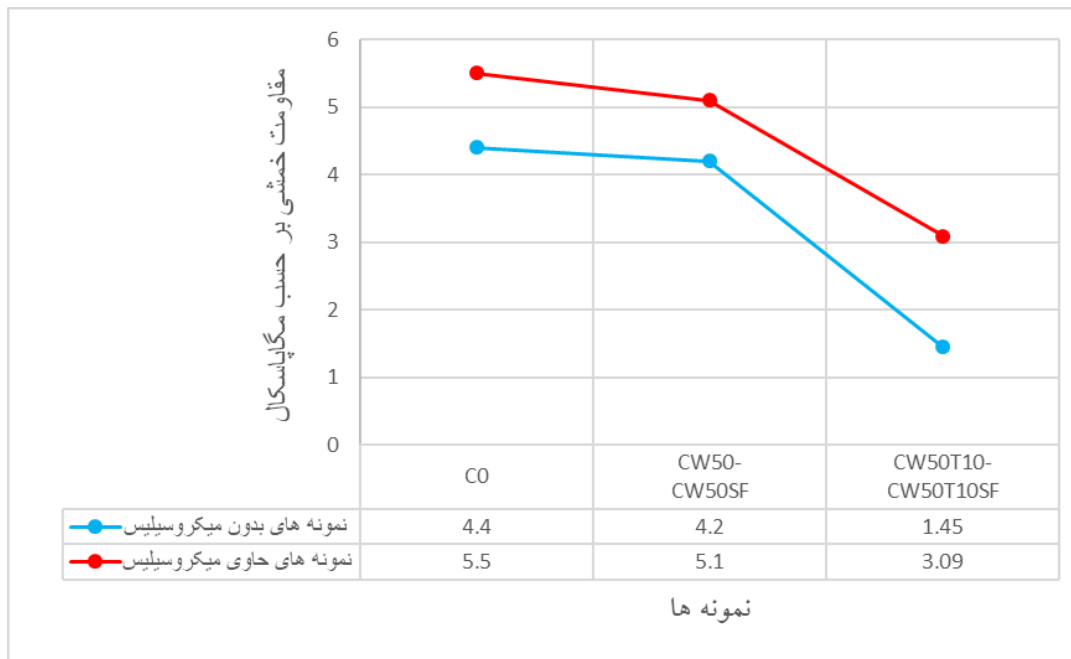
با توجه به شکل ۵ اضافه کردن میکروسیلیس به نمونه مرجع، سبب افزایش مقاومت کششی به میزان ۱۱ درصد شده است. استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی سبب کاهش مقاومت کششی و اضافه کردن





شکل ۵. مقاومت کششی نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و بدون میکروسیلیس

### 5. Tensile strength of experimental specimens containing microsilica and without microsilica



شکل ۶. مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و بدون میکروسیلیس

Fig. 6. Flexural strength of experimental specimens containing microsilica and without microsilica



شکل ۷. جذب آب نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و بدون میکروسیلیس

Fig. 7. Water absorption of experimental specimens containing microsilica and without microsilica

میکروسیلیس به دلیل افزایش چسبندگی سیمان به سنگدانه و پر شدن خلل و فرج سنگدانه‌ها، جذب آب کاهش می‌یابد که در این بین بیشترین کاهش جذب آب در مقایسه با نمونه مشابه ولی بدون میکروسیلیس مربوط به نمونه با سنگدانه طبیعی و میکروسیلیس و کمترین میزان کاهش جذب آب با اضافه کردن میکروسیلیس مربوط به نمونه با ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی و پودر لاستیک می‌باشد.

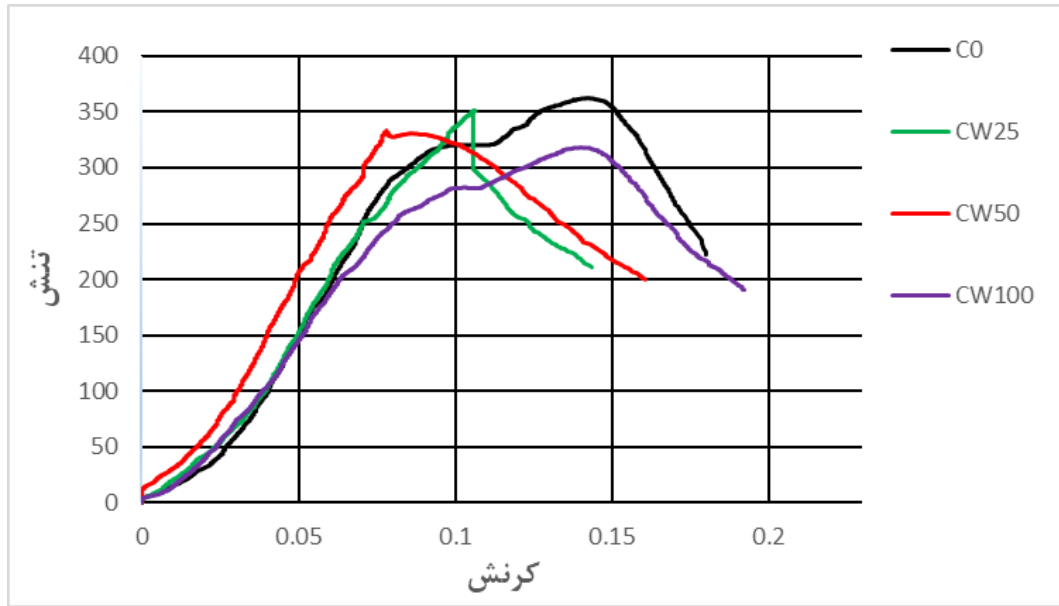
مطابق شکل ۶ با اضافه کردن سنگدانه بازیافتی تا ۵۰ درصد، شاهد ۵ درصد کاهش مقاومت و با اضافه کردن پودر لاستیک، شاهد ۶۷ درصد کاهش مقاومت نسبت به نمونه مرجع بودیم. با اضافه کردن میکروسیلیس این کاهش مقاومت بهبود یافت، به طوری که حتی برای نمونه با ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی، ۱۶ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه مرجع مشاهده شد. همچنین برای نمونه حاوی پودر لاستیک به همراه میکروسیلیس، ۳۰ درصد کاهش مقاومت نسبت به نمونه مرجع حاصل شد.

### ۳-۷- نمودار تنش-کرنش

یکی از نکات مهم در مرحله طراحی سازه، داشتن اطلاعات دقیق مربوط به خصوصیات رفتاری مصالح است. نمودار تنش-کرنش یکی از شیوه‌های نمایش گرافیکی ارتباط تنش و کرنش، که دو مفهوم اساسی در علم مقاومت مصالح هستند، می‌باشد. با تجزیه و تحلیل نمودار تنش-کرنش می‌توان پارامترهای مهمی از جمله چقرمگی (مساحت زیر نمودار تنش-کرنش)، شیب اولیه نمودار تنش-کرنش، کرنش گسیختگی و تردی یا نرمی مصالح را مورد ارزیابی قرار داد [۲۵]. در این پژوهش برای ترسیم نمودار تنش-کرنش، از نتایج نمونه مکعبی ۲۸ روزه تحت آزمایش فشار استفاده شده است. در شکل ۸ تا ۱۰ نمودار تنش کرنش نمونه‌ها با هم مقایسه شده‌اند.

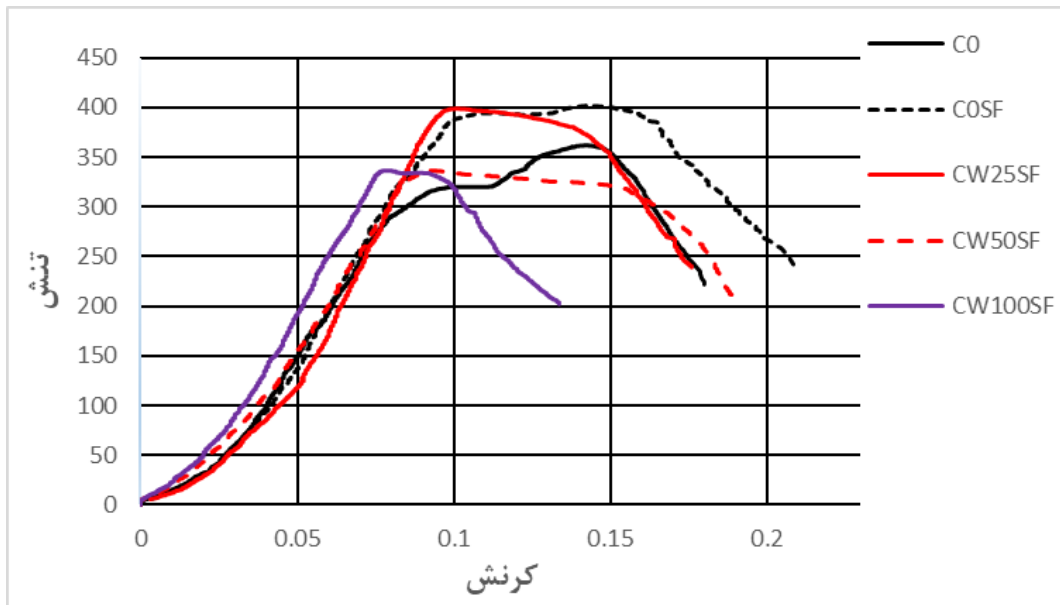
### ۳-۶- جذب آب

آزمایش جذب آب بر روی ۱۰ نمونه مکعبی ۲۸ روزه و بر اساس استاندارد ASTM-C642 [۲۳] انجام گرفت. نتایج آزمایش جذب آب در شکل ۷ نشان داده شده است. با افزایش درصد سنگدانه‌های بازیافتی و اضافه کردن پودر لاستیک به مخلوط بتن به دلیل افزایش اسلامپ و به مرور زمان با تبخیر شدن آب موجود در بتن، حفراتی در آن به وجود می‌آید، که باعث افزایش جذب آب در نمونه‌ها می‌شود. بیشترین جذب آب مربوط به نمونه دارای ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی و ۳۰ درصد حجمی ماسه پودر لاستیک ضایعاتی می‌باشد و کمترین مقدار مربوط به نمونه بتن معمولی با میکروسیلیس، می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود با اضافه کردن



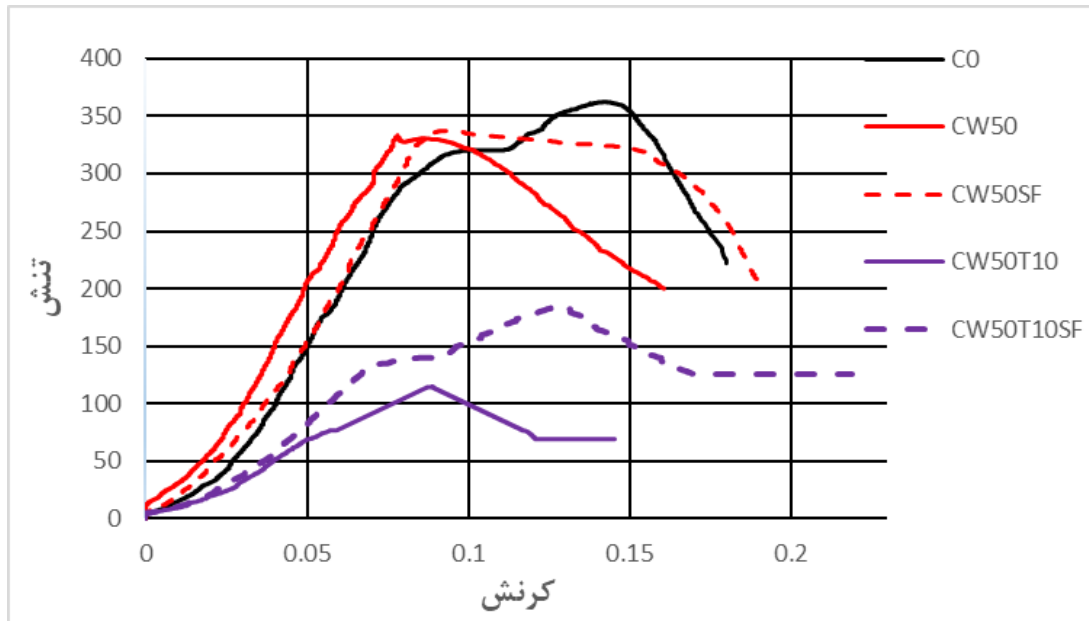
شکل ۸. مقایسه نمودار تنش-کرنش نمونه مرجع با نمونه های دارای سنگدانه بازیافتی

Fig. 8. Comparison of stress-strain curve of reference specimen with specimens with recycled aggregate



شکل ۹. مقایسه نمودار تنش-کرنش نمونه مرجع با نمونه های دارای سنگدانه بازیافتی و میکروسیلیس

Fig. 9. Comparison of stress-strain curve of reference specimen with specimens with recycled aggregate and with microsilica



شکل ۱۰. مقایسه نمودار تنش-کرنش نمونه مرجع با نمونه های دارای سنگدانه بازیافتی و خرده لاستیک

Fig. 10. Comparison of stress-strain curve of reference specimen with specimens with recycled aggregate and with crumb rubber

افزودن لاستیک ضایعاتی شیب اولیه به شدت کاهش یافته است. افزودن لاستیک باعث کاهش مقاومت بتن شده است به همین دلیل در نمونه های دارای لاستیک ضایعاتی جذب انرژی به شدت کاهش یافته است. لاستیک ضایعاتی اثر خوبی بر روی کرنش گسیختگی نمونه های بتنی داشته است.

#### ۴- نتیجه گیری

هدف اصلی در این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی خواص مکانیکی بتن حاوی سنگدانه های بازیافتی بتنی و لاستیک ضایعاتی به همراه میکروسیلیس بوده است. برای این منظور از خرده بتن ضایعاتی به عنوان جایگزین شن و به میزان ۰ و ۲۵ و ۵۰ و ۱۰۰ درصد وزنی شن، همچنین از میکروسیلیس به میزان ۱۰ درصد وزنی سیمان، جایگزین سیمان، استفاده شده است. ضمناً برای بررسی اثر لاستیک ضایعاتی در دو نمونه دارای ۵۰ درصد سنگدانه ضایعاتی بتنی، به میزان ۳۰ درصد حجمی ماسه از لاستیک ضایعاتی نیز استفاده شده است. بعد از تهیه طرح اختلاط و ساخت و عمل آوری نمونه ها، اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، نمودار تنش-کرنش، چگالی، مورد ارزیابی و سنجش قرار گرفته است. در ادامه نتایج این تحقیق به صورت خلاصه آورده شده است.

علت احتمالی شیب نرم در ابتدای همه نمودارها نشست ابتدایی نمونه در هنگام اعمال نیرو می باشد. بر اساس شکل ۸، تقریباً شیب اولیه همه نمونه ها با هم برابر است. نمونه دارای ۲۵ و ۵۰ درصد بتن ضایعاتی تردتر از سایر نمونه ها هستند به عبارت بهتر کرنش گسیختگی کمی دارند، به این دلیل که سنگدانه های ضایعاتی بتنی و سنگدانه های طبیعی پیوند ضعیف تری با یکدیگر دارند. همچنین نمونه دارای ۱۰۰ درصد سنگدانه ضایعاتی بتنی، رفتاری شبیه به نمونه مرجع دارد. در بین همه نمونه ها، با توجه به مساحت زیر نمودارها، نمونه مرجع دارای بیشترین و نمونه با ۲۵ درصد سنگدانه بازیافتی بتنی کمترین جذب انرژی را دارد. در شکل ۹ نمودار تنش-کرنش نمونه مرجع با نمونه های دارای سنگدانه بازیافتی و میکروسیلیس مقایسه شده است. بر اساس این شکل شیب اولیه همه نمونه ها تقریباً با هم برابر است. همانطور که نشان داده شده است با افزایش درصد سنگدانه های ضایعاتی بتنی، مقدار کرنش گسیختگی کم شده است، به گونه ای که نمونه دارای ۲۵ درصد سنگدانه ضایعاتی بتنی، بیشترین و نمونه دارای ۱۰۰ درصد سنگدانه ضایعاتی بتنی، کمترین کرنش گسیختگی را دارد. نمونه دارای ۲۵ درصد سنگدانه بتنی و ۱۰ درصد میکروسیلیس از سایر نمونه ها رفتار بهتری دارد. در شکل ۱۰ نمودار تنش-کرنش نمونه مرجع با نمونه های دارای سنگدانه بازیافتی با و بدون خرده لاستیک مقایسه شده است. بر اساس این شکل با

و ۵۰ درصد بتن ضایعاتی تردتر از سایر نمونه‌ها هستند. نمونه دارای ۱۰۰ درصد سنگدانه ضایعاتی بتنی رفتاری شبیه به نمونه مرجع دارد. در همه نمونه‌ها افزودن میکروسیلیس سبب افزایش جذب انرژی نسبت به نمونه‌های مشابه بدون میکروسیلیس شده است.

## منابع

- [1] K.Y. Ann, H. Moon, Y. Kim, J. Ryou, Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials, *Waste Management*, 28(6) (2008) 993-999.
- [2] P. Awoyera, U. Okoro, Filler-ability of highly active metakaolin for improving morphology and strength characteristics of recycled aggregate concrete, *Silicon*, 11(4) (2019) 1971-1978.
- [3] T.C. Hansen, *Recycling of demolished concrete and masonry*, CRC Press, 1992.
- [4] J. Liu, E. Gong, D. Wang, X. Lai, J. Zhu, Attitudes and behaviour towards construction waste minimisation: a comparative analysis between China and the USA, *Environmental Science and Pollution Research*, 26(14) (2019) 13681-13690.
- [5] V.K. Atkuri, G.R. Rao, Strength properties of ceramic waste concrete, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2021, pp. 012017.
- [6] A. Ostyakova, D. Mazurin, Management of the waste of construction and demolition, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2021, pp. 012103.
- [7] N. Makul, 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*, 147(4) (2021) 04021021.
- [8] F. Kazemian, H. Rooholamini, A. Hassani, Mechanical and fracture properties of concrete containing treated and untreated recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, 209 (2019) 690-700.
- [9] F. Jokar, M. Khorram, G. Karimi, N. Hataf, Experimental investigation of mechanical properties of crumbed

۱-در نمونه‌ی دارای ۲۵ و ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی بدون میکروسیلیس، مقاومت فشاری به ترتیب  $3/2$  و  $14/5$  درصد نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته است. همچنین افزودن پودر لاستیک به نمونه‌ها سبب کاهش بیشتر مقاومت فشاری، نسبت به نمونه‌ی مرجع شده است. بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌ی دارای ۲۵ درصد سنگدانه بازیافتی حاوی میکروسیلیس است که نسبت به نمونه مرجع  $9/6$  درصد بیشتر است.

۲-با توجه به نتایج آزمایش، مقاومت کششی در نمونه دارای  $50\%$  سنگدانه بازیافتی،  $14\%$  و نمونه با  $50\%$  سنگدانه بازیافتی و پودر لاستیک،  $72\%$  کاهش مقاومت کششی در مقایسه با نمونه مرجع به دست آمد که با اضافه کردن میکروسیلیس به نمونه‌های مذکور این کاهش مقاومت برای نمونه با  $50\%$  سنگدانه بازیافتی،  $9\%$  و برای نمونه با  $50\%$  سنگدانه بازیافتی و پودر لاستیک،  $55\%$  بود.

۳-نتایج آزمایش مقاومت خمشی بدین صورت بود که برای نمونه با  $50\%$  سنگدانه بازیافتی  $5\%$  و برای نمونه با  $50\%$  سنگدانه بازیافتی و پودر لاستیک  $77\%$  کاهش مقاومت نسبت به نمونه مرجع مشاهده شد که با اضافه کردن میکروسیلیس به نمونه‌های مذکور نمونه با  $50\%$  سنگدانه بازیافتی شاهد افزایش مقاومت تا  $13\%$  بیشتر از نمونه مرجع می‌باشیم. همچنین برای نمونه با  $50\%$  سنگدانه بازیافتی و پودر لاستیک در مقایسه با نمونه مرجع  $53\%$  کاهش مقاومت مشاهده می‌شود.

۴-کمترین جذب آب مربوط به نمونه بدون سنگدانه‌های بازیافتی دارای میکروسیلیس با  $5/0$  درصد و بیشترین جذب آب مربوط به نمونه با  $50\%$  سنگدانه طبیعی و پودر لاستیک با  $1/8$  مشاهده شد. با اضافه کردن میکروسیلیس به نمونه‌ها جذب آب در همه نمونه‌ها کاهش یافت.

۵-کمترین کاهش اسلامپ مربوط به نمونه با  $25\%$  سنگدانه بازیافتی به مقدار  $6\%$  و بیشترین کاهش اسلامپ مربوط به نمونه با  $100\%$  سنگدانه بازیافتی به مقدار  $50\%$  نسبت به نمونه مرجع می‌باشد. بیشترین اسلامپ، مربوط به نمونه با  $25\%$  سنگدانه طبیعی و میکروسیلیس که  $27\%$  بیشتر از نمونه مرجع می‌باشد.

۶-افزودن سنگدانه بتنی ضایعاتی و میکروسیلیس تاثیر چشمگیری بر روی مقدار چگالی بتن نداشتند، در حالی که افزودن ضایعات لاستیک به همراه میکروسیلیس باعث کاهش  $11$  درصدی چگالی نسبت به نمونه مرجع شد.

۷-تقریباً شیب اولیه نمودار تنش-کرنش در همه نمونه‌های دارای سنگدانه ضایعاتی بدون میکروسیلیس، با هم برابر است. نمونه دارای ۲۵

- [18] L. Ferreira, J. Brito, M. Barra, Influence of pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on structural concrete's mechanical and durability properties, *Magazine of Concrete Research*.
- [19] G. Azúa, M. González, P. Arroyo, Y. Kurama, Recycled coarse aggregates from precast plant and building demolitions: Environmental and economic modeling through stochastic simulations, *Journal of Cleaner Production*, 210 (2019) 1425-1434.
- [20] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, M. Barra, Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cement and concrete research*, 37(5) (2007) 735-742.
- [21] C.S. Poon, Z. Shui, L. Lam, Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 18(6) (2004) 461-468.
- [22] C. Shi, Y. Li, J. Zhang, W. Li, L. Chong, Z. Xie, Performance enhancement of recycled concrete aggregate—a review, *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016) 466-472.
- [23] C. Rocco, G. Guinea, J. Planas, M. Elices, Review of the splitting-test standards from a fracture mechanics point of view, *Cement and concrete research*, 31(1) (2001) 73-82.
- [24] U. Sharma, A. Khatri, A. Kanoungo, Use of micro-silica as additive to concrete-state of art, *International Journal of Civil Engineering Research*, 5(1) (2014) 9-12.
- [25] L.Á.d. Oliveira Júnior, V.E.d.S. Borges, A.R. Danin, D.V.R. Machado, D.d.L. Araújo, M.K. El Debs, P.F. Rodrigues, Stress-strain curves for steel fiber-reinforced concrete in compression, *Matéria (Rio de Janeiro)*, 15(2) (2010) 260-266.
- rubber concrete containing natural zeolite, *Construction and Building Materials*, 208 (2019) 651-658.
- [10] A. Jindal, G. Ransinchung, Behavioural study of pavement quality concrete containing construction, industrial and agricultural wastes, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(5) (2018) 488-501.
- [11] K. Kapoor, S. Singh, B. Singh, Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures, *Construction and Building Materials*, 128 (2016) 67-76.
- [12] S. Akib, S. Sayyad, Properties of concrete made with recycled coarse aggregate, *International Journal of Informative and Futuristic Research*, 689(2) (2015) 10.
- [13] P. Revathi, R. Selvi, S. Velin, Investigations on fresh and hardened properties of recycled aggregate self compacting concrete, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 94(3) (2013) 179-185.
- [14] a.g. dehvari, M. Miri, M.R. Sohrabi, Determining Optimum Percent of Recycled Concrete Coarse Aggregates used in Corrosive Environment Based on Kriging Model, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(3) (2021) 5-5.
- [15] A. Shahini, M. Yaghobi Sarsakhti, H. Janfeshan Araghi, Sulfuric Acid Effect on the Mechanical Properties of Concrete Containing Crumb Tires and PET, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(1) (2018) 111-120.
- [16] E.S. Berney, D.M. Smith, Mechanical and physical properties of ASTM C33 Sand, (2008).
- [17] P. Conshohocken, ASTM International, Atanasova, B., Langlois, D., Nicklaus, S., Chabanet, C. et Etiévant, P, (2004).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Shorbi Niazi, E. Khalilzadeh Vahidi, *Investigation of Properties of Concrete Containing Recycled Aggregates and Waste Rubber with Micro Silica*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(3) (2022) 1151-1164.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19279.7123

