

بررسی برخی خصوصیات مکانیکی بتن‌های بازیافتی حاوی دوده سیلیس

ابراهیم قیاسوند^۱، علیمرد جوزیان^۲، پویا اعلائیان^۳، ابراهیم رجبی^۴، عبدالمجید اسماعیلی^۲، مهدی نظری^۴
۱ استادیار دانشکده فنی کبودرآهنگ، دانشگاه بوعلی سینا
۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اراک
۳ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه آزاد ملایر
۴ دانشجوی کارشناسی دانشکده فنی کبودرآهنگ، دانشگاه بوعلی سینا

چکیده

حرکت به سمت توسعه پایدار در صنعت سیمان و بتن، از اقداماتی است که لازم است مورد توجه دست‌اندرکاران این صنعت قرار گیرد. استفاده از مواد مکمل سیمانی، به عنوان جایگزین کلینکر و مصالح سنگی بازیافتی از بتن‌های قدیمی، به عنوان جایگزین تمام یا بخشی از مصالح سنگی مصرفی در بتن‌های جدید را می‌توان در این راستا قلمداد نمود. مقاله حاضر به ارزیابی برخی خصوصیات مکانیکی بتن‌های بازیافتی (صفر، ۴۰ و ۸۰ درصد مصالح سنگی درشت با مصالح سنگی بازیافتی درشت جایگزین شده‌اند) حاوی دوده سیلیس (صفر، ۴ و ۸ درصد) پرداخته است. جهت انجام این پژوهش، پس از تهیه سنگدانه‌های بازیافتی حاصل از نمونه‌های بتنی اخذ شده از ساختمان‌های بتنی ساخته شده در شهرستان همدان و سایر مصالح مصرفی و ساخت نمونه‌ها، اقدام به انجام آزمایش‌هایی چون مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته نمودیم. نتایج این پژوهش نشان داد، استفاده از مصالح بازیافتی، خواص مکانیکی این بتن‌ها را به میزان مشهودی تضعیف نمود. ضمناً استفاده از پوزولان مصنوعی دوده سیلیس خواص مکانیکی کلیه بتن‌ها را بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: بتن‌های بازیافتی، مصالح سنگی، دوده سیلیس، خواص مکانیکی

۱ مقدمه

در سال‌های اخیر، سرمایه‌گذاری‌های هنگفت صورت گرفته در صنعت ساختمان بواسطه افزایش نیاز بشر به ساخت و ساز، نیاز به مصالح ساختمانی مناسب را به شدت افزایش داده است. به عنوان مثال، مصرف سالیانه شن و ماسه در ایالات متحده نزدیک به ۱۵۰ میلیون تن تخمین زده شده است. سنگدانه‌ها به عنوان یکی از عناصر اصلی تشکیل‌دهنده بتن که قسمت اعظم آن را تشکیل می‌دهد (۷۰ تا ۸۰ درصد حجم بتن توسط سنگدانه‌ها پر می‌شود)، تأثیر بسزایی در خصوصیات مقاومتی و مکانیکی آن دارند. در صورتی که بتوان بخشی از این مصالح سنگی را با مصالح بازیافتی جایگزین نماییم، گام بزرگی در جهت حفظ معادن شن و ماسه در سطح دنیا و به طور کلی حرکت به سمت توسعه پایدار برداشته‌ایم [۱]. بر اساس گزارش‌های انجمن تخریب اروپا، از مجموع ۲۰۰ میلیون تن زباله تولید شده در طی یک سال، حدود ۳۰ درصد بازیافت می‌شود. ضمناً انجمن بازیافت مصالح و مواد ساختمانی آمریکا، تخمین می‌زند که سالانه حدود ۱۰۰ میلیون تن بتن در آمریکا بازیافت می‌شود [۲]. در سال ۲۰۰۰، بیش از ۹۵ درصد مصالح سنگی بازیافتی در کشور ژاپن، به عنوان مصالح مصرفی در بستر راه‌ها مورد استفاده قرار گرفت [۳]. برجسته‌ترین ویژگی مصالح سنگی بازیافتی اتصال خمیر سیمان با این نوع از سنگدانه‌هاست که آنرا متخلخل و ناهمگن کرده و تراکم آن را در بتن را کمتر می‌نماید [۴]. برخی محققین نشان دادند حدود ۲۰ درصد خمیر سیمان به این نوع سنگدانه‌ها چسبیده است [۵]. *Abdelfatah* و *Tabsh* نشان داد زمانی که مصالح سنگی بازیافتی جایگزین درشت‌دانه طبیعی می‌شود، جهت دستیابی به روانی (اسلامپ) یکسان در مقایسه با بتن طبیعی، نیاز به حدود ۱۰ درصد آب اضافی است [۲]. طبیعت متخلخل مصالح سنگی بازیافتی باعث جذب آب بالاتر آن‌ها شده است. به بیان دیگر، ظرفیت جذب آب مصالح سنگی بازیافتی دو تا سه برابر بیشتر از سنگدانه‌های طبیعی است و ممکن است تا ۱۲ درصد نیز متغییر باشد. با توجه به برخی از توصیه‌های کمیته بین‌المللی، مصالح سنگی بازیافتی درشت‌دانه با داشتن ظرفیت جذب آب بیش از ۷ درصد و ریزدانه بیش از ۱۳ درصد برای بتن مناسب است [۱]. *Limbachiya* و همکاران در مطالعه خود نشان دادند که چگالی سنگدانه‌های بازیافتی در حالت اشباع با سطح خشک در حدود ۸ درصد پایین‌تر از سنگدانه‌های طبیعی است و جذب آب آن‌ها دو برابر بیشتر از سنگدانه‌های طبیعی است [۶]. محققین مختلفی در رابطه با خواص مکانیکی بتن‌های ساخته‌شده از مصالح سنگی بازیافتی فعالیت نموده‌اند. نتایج پژوهش این محققین نشان می‌دهد با افزایش میزان جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با مصالح سنگی بازیافتی، خواص مکانیکی بتن تضعیف می‌شود. هرچند این تضعیف خصوصیات مکانیکی، هنگامی که سطح جایگزینی مصالح سنگی بازیافتی کمتر از ۴۰ درصد باشد، چندان محسوس نیست [۱، ۷ و ۸]. از جمله دلایل تضعیف خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی می‌توان به افزایش تخلخل، ضعیف شدن ناحیه انتقالی و وجود ترک در این نوع بتن‌ها نسبت داد.

Xiao و همکاران در سال ۲۰۰۹، بتن‌های بازیافتی را متشکل از پنج فاز مندرج در ذیل می‌دانند:

- مصالح طبیعی
- ملات سیمان سخت شده قدیمی
- ملات سیمان سخت شده جدید
- ناحیه انتقالی بین ملات سخت شده قدیمی و سنگدانه‌های سخت (ناحیه انتقالی قدیمی)
- ناحیه انتقالی بین سنگدانه بازیافتی و ملات سخت شده جدید (ناحیه انتقالی جدید)

این محققین بیان نمودند بتن‌های بازیافتی دارای دو فاز بیشتر نسبت به بتن‌های معمول است [۹].

در پژوهش حاضر، برخی خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته) بتن‌های بازیافتی حاوی دوده سیلیس مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از افزودن دوده سیلیس به این نوع از بتن بهبود خواص این بتن‌ها بوده است.

۲ برنامه آزمایشگاهی

۲-۱ مصالح مصرفی

سیمان پرتلند نوع دو مورد استفاده در این پژوهش، از کارخانه سیمان حکمتانه تهیه شد. ضمناً دوده سیلیسی مصرفی نیز با وزن مخصوص ۲۱۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب از شهرستان ازنا تأمین شده است. در این تحقیق از دو نوع سنگدانه طبیعی و بازیافتی با حداکثر اندازه‌ی ۱۹ میلی‌متر به عنوان درشت‌دانه استفاده گردید. سنگدانه‌های بازیافتی از نمونه‌های بتنی جمع‌آوری شده از ساختمان‌های بتنی ساخته شده در شهرستان همدان تهیه شد. به این منظور پس از جمع‌آوری نمونه‌ها، آنها به یک واحد تولیدی شن و ماسه انتقال یافت و سپس نسبت به شکستن و تأمین مصالح سنگی درشت‌دانه از آنها اقدام نمودیم. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی در جدول ۲-۳ ارائه شده است.

در جداول ۱ و ۲ به ترتیب، ویژگی‌های سیمان و سنگدانه‌های مصرفی در این پژوهش ارائه شده است. ضمناً طرح مخلوط بتن‌های مورد بررسی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و شیمیایی اجزای سازنده سیمان پرتلند تپ ۲

| سیمان | مشخصه | سیمان | مشخصه |
|-------|---|-------|---|
| 0.52 | Sodium oxide (Na ₂ O) (%) | 63.54 | Calcium oxide (CaO) (%) |
| 0.15 | Titanium oxide (TiO ₂) (%) | 21.44 | Silicon dioxide (SiO ₂) (%) |
| 0.05 | Phosphorus oxide (P ₂ O ₅) (%) | 1.48 | Magnesium oxide (MgO) (%) |
| 1.4 | LOI (%) | 4.52 | Aluminium oxide (Al ₂ O ₃) (%) |
| 3.15 | Specific Gravity | 3.69 | Ferric oxide (Fe ₂ O ₃) (%) |
| ۳۲۵۰ | Blaine (cm ² /gr) | 2.26 | Sulphate oxide (SO ₃) (%) |
| | | 0.72 | Potassium oxide (K ₂ O) (%) |

جدول ۲: مشخصات فیزیکی سنگدانه

| مقدار | مشخصه |
|------------------------|--|
| ۲۶۵۰ kg/m ³ | جرم مخصوص شن طبیعی (در حالت اشباع با سطح خشک) |
| ۲۵۲۶ kg/m ³ | جرم مخصوص شن بازیافتی (در حالت اشباع با سطح خشک) |
| ۲۵۷۰ kg/m ³ | جرم مخصوص ماسه (در حالت اشباع با سطح خشک) |
| ۱/۵ | جذب آب شن طبیعی (درصد) |
| ۴ | جذب آب شن بازیافتی (درصد) |
| ۲/۶ | جذب آب ماسه (درصد) |

جدول ۳: طرح مخلوط بتن‌های مورد بررسی در پژوهش

| طرح مخلوط | درصد مصالح سنگی | | | وزن اجزای سازنده (کیلوگرم) | | | | | |
|-----------|-----------------|----------|-------------|----------------------------|------------|---------|------------|----------|-------------|
| | ماسه | شن طبیعی | شن بازیافتی | سیمان | میکروسیلیس | آب آزاد | ماسه طبیعی | شن طبیعی | شن بازیافتی |
| C-0-0 | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۰ | ۳۷۵ | ۰ | ۱۷۸/۱۲۵ | ۹۷۸/۷ | ۸۰۰/۶ | ۰ |
| C-0-40 | ۱۰۰ | ۶۰ | ۴۰ | ۳۷۵ | ۰ | ۱۷۸/۱۲۵ | ۹۷۰/۳ | ۴۷۶/۳ | ۳۱۷/۶ |
| C-0-80 | ۱۰۰ | ۲۰ | ۸۰ | ۳۷۵ | ۰ | ۱۷۸/۱۲۵ | ۹۶۱/۹ | ۱۵۷/۴ | ۶۲۹/۶ |
| C-4-0 | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۰ | ۳۶۰ | ۱۵ | ۱۷۸/۱۲۵ | ۹۷۵/۶ | ۷۹۸/۳ | ۰ |
| C-4-40 | ۱۰۰ | ۶۰ | ۴۰ | ۳۶۰ | ۱۵ | ۱۷۸/۱۲۵ | ۹۶۷/۳ | ۴۷۴/۹ | ۳۱۶/۶ |
| C-4-80 | ۱۰۰ | ۲۰ | ۸۰ | ۳۶۰ | ۱۵ | ۱۷۸/۱۲۵ | ۹۵۸/۹ | ۱۵۶/۹ | ۶۲۷/۷ |
| C-8-0 | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۰ | ۳۴۵ | ۳۰ | ۱۷۸/۱۲۵ | ۹۷۲/۶ | ۷۹۵/۸ | ۰ |
| C-8-40 | ۱۰۰ | ۶۰ | ۴۰ | ۳۴۵ | ۳۰ | ۱۷۸/۱۲۵ | ۹۶۴/۳ | ۴۷۳/۴ | ۳۱۵/۶ |
| C-8-80 | ۱۰۰ | ۲۰ | ۸۰ | ۳۴۵ | ۳۰ | ۱۷۸/۱۲۵ | ۹۵۶ | ۱۵۶/۴ | ۶۲۵/۶ |

۲-۲ روش انجام آزمایش‌ها

در پژوهش حاضر، آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی به روش دونیم‌شدن و مدول الاستیسیته انجام شد. در ادامه، روش انجام و جزئیات مربوط به این آزمایش‌ها ذکر شده است:

- مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با استفاده از نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز تعیین شد. به این منظور، نمونه‌های بتنی پس از گذشت ۲۴ ساعت از زمان ریختن در داخل قالب، از قالب بیرون آمده و تا سن انجام آزمایش، در محلول آب و آهک اشباع عمل‌آوری شدند.

- آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای در این پژوهش بر روی آزمونه‌های $8 \times 10 \times 40$ سانتی‌متری انجام شد. به این منظور، نیرو به‌صورت پیوسته و با سرعتی یکنواخت افزایش یافت تا نمونه گسیخته شود. لازم به یادآوری است چنانچه سطح نمونه که زیر تیغه‌های بارگذاری است ناصاف باشد باید قبل از آزمایش آن را صاف کرد تا تیغه‌ها در تمام سطح با بتن در تماس باشند. این آزمایش نیز در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد.

- آزمایش مقاومت کششی بتن با روش غیر مستقیم (به روش دونیم‌شدن) در سنین ۲۸ و ۹۰ روز، مطابق با استاندارد ملی ایران به شماره ۶۰۴۷ [۱۰] انجام شد. در این آزمایش نمونه بتنی استوانه‌ای از پهلوی به نحوی بین صفحات دستگاه آزمایش قرار می‌گیرد که محور آن افقی باشد. سپس بار افزایش یافته تا شکستگی به‌صورت دو نیم شدن، به وجود آید. مقاومت کششی از این روش، از رابطه ۱ قابل محاسبه است.

$$T = \frac{2P}{\pi d} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه، T تنش کششی (kg/cm^2)، P حداکثر نیروی وارده (kg)، l طول نمونه و d قطر نمونه است.

- آزمایش مدول الاستیسیته بتن در این پژوهش در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و مطابق با استاندارد ملی ایران به شماره ۳۲۰۱-۱۰ [۱۱] انجام شد.

در شکل ۱، تصاویری از آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش ارائه شده است.



ب) آزمایش مقاومت خمشی



الف) آزمایش مقاومت فشاری



ب) آزمایش مدول الاستیسیته



الف) آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

شکل ۱ - تصاویری از انجام آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش

۳ شرح و تفسیر نتایج

۳-۱ مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری مرتبط با طرح مخلوط‌های مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۴، ارائه شده است.

جدول ۴: مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های مورد بررسی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز

| مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) | | طرح مخلوط |
|--|---------|-----------|
| ۹۰ روزه | ۲۸ روزه | |
| ۵۹۰ | ۵۱۰ | C-0-0 |
| ۵۴۵ | ۵۰۰ | C-0-40 |
| ۵۴۰ | ۴۸۰ | C-0-80 |
| ۷۰۵ | ۵۸۵ | C-4-0 |
| ۶۵۰ | ۵۹۰ | C-4-40 |
| ۵۷۵ | ۵۱۰ | C-4-80 |
| ۶۵۰ | ۵۶۵ | C-8-0 |
| ۶۰۰ | ۵۰۰ | C-8-40 |
| ۵۶۵ | ۴۹۰ | C-8-80 |

با دقت در نتایج، می‌توان بیان نمود استفاده از مصالح سنگی بازیافتی منجر به کاهش مقاومت فشاری در بتن‌های مورد بررسی، به میزان قابل ملاحظه‌ای نشده است. به عنوان مثال، جایگزینی ۸۰ درصد مصالح سنگی درشت با مصالح سنگی بازیافتی تنها منجر به کاهش ۸ درصدی مقاومت در سن ۹۰ روز شده است. همچنین، استفاده از دوده سیلیس منجر به افزایش مقاومت فشاری در کلیه بتن‌ها (حاوی صفر، ۴۰ و ۸۰ درصد شن بازیافتی) شده است. این افزایش مقاومت را می‌توان به بهبود ریزساختار بتن و تقویت ناحیه انتقالی به دلیل وجود دوده سیلیس نسبت داد. با ملاحظه دقیق نتایج ملاحظه می‌شود بیشترین و کمترین مقدار مقاومت فشاری در سن ۹۰ روز، به ترتیب مربوط به طرح مخلوط‌های C-4-0 و C-0-80 می‌باشد. علاوه بر این، استفاده از ۴ درصد دوده سیلیس به عنوان جایگزین سیمان در مقایسه با ۸ درصد، در بهبود مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی موثرتر بوده است. این موضوع را می‌توان به جذب آب بالای دوده سیلیس نسبت داد که می‌تواند در کنار اثرات مثبت استفاده از آن در بتن، به عنوان یکی از نقاط ضعف این پوزولان مصنوعی شمرده شود.

۳-۲ مقاومت کششی غیر مستقیم

نتایج مقاومت کششی کلیه نمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روز، در جدول ۵ ارائه شده است. با دقت در نتایج ملاحظه می‌شود در هر دو سن، با افزایش مقادیر جایگزینی مصالح سنگی با مصالح سنگی بازیافتی، از میزان مقاومت کششی کاسته شده است. به طور مثال، در سن ۹۰ روز، مقاومت کششی نمونه C-8-80 از نمونه C-8-0، ۱۷ درصد کمتر شده است. این موضوع را می‌توان به تضعیف ناحیه انتقالی در بتن‌های بازیافتی نسبت داد. به عبارت دیگر، به نظر می‌رسد مقاومت کششی در مقایسه با مقاومت فشاری، به خصوصیات ناحیه انتقالی حساس‌تر است. همچنین استفاده از دوده سیلیس تا حدودی از نرخ کاهش مقاومت کششی با افزایش سنگدانه‌های بازیافتی کاسته است. مسلماً این پدیده به بهبود خصوصیات ناحیه انتقالی به دلیل انجام واکنش‌های پوزولانی مرتبط است.

جدول ۵: مقاومت کششی طرح مخلوط‌های مورد بررسی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز

| مقاومت کششی (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) | | طرح مخلوط |
|---|---------|-----------|
| ۹۰ روزه | ۲۸ روزه | |
| ۵۳ | ۵۱ | C-0-0 |
| ۴۸ | ۴۶ | C-0-40 |
| ۳۹ | ۳۵ | C-0-80 |
| ۴۷ | ۴۴ | C-4-0 |
| ۴۲ | ۴۱ | C-4-40 |
| ۴۱ | ۳۷ | C-4-80 |
| ۴۷ | ۴۳ | C-8-0 |
| ۴۳ | ۴۰ | C-8-40 |
| ۳۹ | ۳۶ | C-8-80 |

۳-۳ مقاومت خمشی

نتایج مقاومت خمشی کلیه نمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روز، در جدول ۶ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در مقایسه با نتایج مقاومت فشاری و کششی غیر مستقیم که در بخش‌های ۱-۳ و ۲-۳ ارائه شد، مقاومت خمشی نمونه‌ها به میزان کمتری متاثر از سنگدانه‌های بازیافتی بوده است. به طور مثال در سن ۹۰ روز، استفاده از ۸۰ درصد شن بازیافتی به جای شن طبیعی، تنها منجر به کاهش ۵ درصدی مقاومت خمشی شده است. همچنین استفاده از پوزولان مصنوعی دوده سیلیس منجر به افزایش مقاومت خمشی نمونه‌ها شده است. با دقت در نتایج ملاحظه می‌شود کمترین و بیشترین مقاومت خمشی نمونه‌ها در سن ۹۰ روز، به ترتیب متعلق به طرح مخلوط‌های C-0-80 و C-8-0 می‌باشد.

جدول ۶: مقاومت خمشی طرح مخلوط‌های مورد بررسی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز

| مقاومت خمشی (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) | | طرح مخلوط |
|---|---------|-----------|
| ۹۰ روزه | ۲۸ روزه | |
| ۶۳ | ۵۴ | C-0-0 |
| ۶۴ | ۵۸ | C-0-40 |
| ۶۰ | ۵۹ | C-0-80 |
| ۷۳ | ۶۸ | C-4-0 |
| ۷۴ | ۷۰ | C-4-40 |
| ۷۱ | ۶۷ | C-4-80 |
| ۷۹ | ۶۷ | C-8-0 |
| ۷۱ | ۶۱ | C-8-40 |
| ۶۸ | ۶۰ | C-8-80 |

۳-۴ مدل الاستیسیته

نتایج آزمایش مدل الاستیسیته طرح مخلوط‌های مورد بررسی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز در جدول ۷ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش سن (از ۲۸ به ۹۰ روز)، به دلیل انجام بیشتر واکنش‌های هیدراسیون، مدل الاستیسیته همانند سایر مشخصه‌های مورد بررسی در این پژوهش نظیر مقاومت فشاری، کششی و خمشی افزایش یافته است. هم‌چنین با افزایش مصالح سنگی بازیافتی در کلیه طرح‌ها (دارا و فاقد دوده سیلیس)، از میزان مدل الاستیسیته کاسته شده است. به طور مثال، در سن ۹۰ روز، مدل الاستیسیته طرح C-0-80 در مقایسه با طرح C-0-0، حدود ۱۳ درصد کاهش یافته است. از این رو می‌توان عنوان نمود علی‌رغم استفاده از ۸۰ درصد شن بازیافتی به جای شن طبیعی، تنها حدود ۱۳ درصد مدل الاستیسیته کاهش یافته است. علاوه بر این، استفاده از پوزولان مصنوعی دوده سیلیس منجر به افزایش مدل الاستیسیته بتن شده است. با دقت در نتایج ملاحظه می‌شود در سن ۹۰ روز، کمترین و بیشترین میزان مدل الاستیسیته مرتبط با طرح‌های C-0-0 و C-8-0 می‌باشد.

جدول ۷: مدل الاستیسیته طرح مخلوط‌های مورد بررسی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز

| طرح مخلوط | مقاومت خمشی (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) | |
|-----------|---|---------|
| | ۲۸ روزه | ۹۰ روزه |
| C-0-0 | ۲۳۳۵۳۰ | ۲۵۳۸۴۰ |
| C-0-40 | ۲۲۷۴۱۰ | ۲۴۹۳۶۰ |
| C-0-80 | ۲۰۰۵۵۰ | ۲۲۰۱۵۰ |
| C-4-0 | ۲۳۶۱۷۰ | ۲۵۹۱۵۰ |
| C-4-40 | ۲۲۹۶۶۰ | ۲۵۲۰۴۰ |
| C-4-80 | ۲۲۲۱۵۷ | ۲۳۹۱۸۰ |
| C-8-0 | ۲۵۵۷۴۰ | ۲۷۴۱۵۰ |
| C-8-40 | ۲۴۲۴۸۰ | ۲۶۰۴۴۰ |
| C-8-80 | ۲۲۵۳۹۰ | ۲۴۰۶۳۰ |

۴ نتیجه‌گیری

- مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت مندرج در ذیل بیان نمود :
- با جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با مصالح سنگی بازیافتی تا سقف ۴۰ درصد، کاهش خواص مکانیکی محسوسی رخ نمی‌دهد و حتی در برخی موارد شاهد بهبود خواص نیز بوده‌ایم.
- استفاده از دوده سیلیس توانسته بخش قابل ملاحظه‌ای از کاهش خواص مکانیکی در بتن‌های بازیافتی را جبران نماید و حتی در برخی طرح‌ها نیز نسبت به نمونه شاهد (C-0-0)، با بهبود خواص مواجه باشیم.
- تضعیف خواص مکانیکی نمونه‌های بتن‌های بازیافتی با افزایش مصالح سنگی جایگزین را می‌توان به عواملی چون : افزایش تخلخل در این بتن‌ها، وجود ترک‌های بیشتر و ناحیه انتقالی ضعیف‌تر در آن‌ها نسبت داد.
- بهبود خواص مکانیکی در طرح مخلوط‌های مورد بررسی به دلیل حضور پوزولان مصنوعی دوده سیلیسی را می‌توان به انجام واکنش‌های موثر پوزولانی، پر شدن بهتر منافذ، افزایش چسبندگی و بهبود ناحیه انتقالی نسبت داد.

مراجع

- [1] Behera Monalisa, Bhattacharyya S.K, Minocha A.K, Deoliya R, Maiti S., “*Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review*”, Construction and Building Materials, 2014, 68, pp. 501-516.
- [2] Tabsh Sami W, Abdelfatah Akmal S., “*Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete*”, Construction and Building Materials, 2009, 23, pp. 1163-1167.
- [3] Sonawane Tushar R, Pimplikar Sunil S., “*Use of recycled aggregate in concrete*”, Mechanical and Civil Engineering, 2013, pp.52-59.
- [4] Butler L, West J.S, Tighe S.L., “*The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement*”, Cement and Concrete Research, 2011,41(10) , pp.1037-1049.
- [5] Nassar Roz-Ud-Din, Soroushian Parviz., “*Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement*”, Construction and Building Materials, 2012,29, pp. 368-377.
- [6] Limbachiya, M. C., Leelawat, T., & Dhir, R. K., “*Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete*”, Materials and Structures, 2000, 33, pp. 574-580.
- [7] Tam Vivian W.Y, Tam C.M., Le K.N., “*Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches*”, Resources, Conservation and Recycling , 2007,50, pp.82-101.
- [8] Tam Vivian W.Y, Tam C.M, Wang Y., “*Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach*”, Construction and Building Materials, 2007, 21 (10), pp. 1928-1939.
- [9] Xiao J Z, Liu Q, Tam V., “*Numerical simulation on damage and failure of recycled aggregate concrete with a lattice model*”. Key Engineering Materials, 2009, 417-418: pp. 689-692.

[۱۰] استاندارد ملی ایران به شماره ۶۰۴۷، تعیین مقاومت کششی دونیم کردن آزمون‌های استوانه‌ای بتن، سازمان ملی استاندارد ایران، ۱۳۹۴.

[۱۱] استاندارد ملی ایران به شماره ۳۲۰۱-۱۰، تعیین مدول الاستیسیته استاتیکی در آزمون فشار، سازمان ملی استاندارد ایران، ۱۳۹۲.