J. Analysis of Structure and Earthquake
Volum 20, Issue 1, spring 2023
Issn: 2821-0999
وبگاه مجله: www.civil-strj.maragheh.iau.ir
فصلنامه علمی آنالیز سازه - زلزله
دوره ۲۰، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲

Comparison of the Effect of Silica Fume and Fly Ash on the Mechanical Properties of Masonry Recycled Concretes

Mostafa Azhdarizadeh*
Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
Fathollah Sajedi
Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
Mohammad Sirous Pakbaz
Chamran University, Ahvaz, Iran Department of Civil Engineering, Shahid

m.azhdarizadeh@gmail.com
DOI 10.30495/CIVIL.2023.701859

Keywords:
Recycled Concrete (RC),
Mechanical Properties,
Recycled Masonry Coarse Aggregates (RMCA),
Silica Fume (SF),
Fly Ash (FA).

Abstract

The present study is devoted to the study of the effect of replacing silica-fume (SF) and fly ash (FA) pozzolans on the mechanical properties of recycled concrete (RC) made from recycled masonry coarse aggregates (RMCA). In manufactured concretes, natural aggregates were replaced by RMCA at different percentages. In order to improve the mechanical properties of these concretes, different percentages of SF and FA were substituted for part of the cement. Slump and specific gravity tests were performed on fresh concrete and compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity, and ultrasonic pulse velocity tests were performed on the hardened concrete. The results indicate that replacement of SF and FA increased the slump and decreased the specific weight of the concretes. Also, the results revealed that replacing 5% and 10% SF improved some mechanical properties of recycled concrete containing 50% of RMCA. Replacement of 15% SF, in concrete containing 25% of RMCA resulted in the close mechanical properties of RC compared with CC without pozzolans. Also, the test results demonstrated that replacing different percentages of Fly Ash, could not improve the mechanical properties of RC.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

مقایسه تاثیر میکروسیلیس و خاکستربادی بر خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی بنایی

مصطفی اژدری زاده
گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
سید فتح‌اله ساجدی
گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
محمد سیروس پاکباز
گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران
m.azhdarizadeh@gmail.com

تاریخ دریافت : ۰۲ دی ۱۴۰۱ تاریخ پذیرش: ۲۰ فروردین ۱۴۰۲

چکیده

پژوهش حاضر، به مطالعه تاثیر جایگزینی پوزولان‌های میکروسیلیس و خاکستربادی بر خواص مکانیکی بتن‌هایبازیافتی ساخته شده از درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی پرداخته است.در بتن‌های ساخته شده، درشت‌دانه‌های بنایی بازیافت شده در درصدهای مختلف جایگزین درشت‌دانه‌های طبیعی شدند. جهت ارتقاء خواص مکانیکی این بتن‌ها، درصدهای مختلفی از میکروسیلیس و خاکستربادی جایگزین بخشی از سیمان شدند. آزمایش‌هایاسلامپ و وزن مخصوص بر روی بتن‌های تازه و آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم‌شدن، ضریب ارتجاعی استاتیکی و سرعت انتشار امواج فراصوت بر روی بتن‌های سخت شدهانجام شد. نتایج حاکی از این است که جایگزینی میکروسیلیس و خاکستربادی، باعث افزایش اسلامپ و کاهش وزن مخصوص بتن‌ها گردید.همچنین نتایج نشان داد که جایگزینی ٪۵ و ٪۱۰ میکروسیلیس، برخی خواص مکانیکی بتن‌های٪۵۰ بازیافتی راارتقاءبخشید. در جایگزینی ٪۱۵ میکروسیلیس، جایگزینی ٪۲۵ از درشت‌دانه‌های بنایی بازیافت شده، نزدیکی خواص مکانیکی بتن بازیافتی در مقایسه با بتنمعمولی بدون پوزولان را نتیجه داد. هم‌چنین نتایج نشان داد که، جایگزینی درصدهای مختلف خاکستربادی، نتوانست خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی را ارتقاء دهد.

کلید واژگان: بتن بازیافتی، خواص مکانیکی، درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی، میکروسیلیس، خاکستربادی.

۱-مقدمه

صنعت ساخت و ساز، یکی از بزرگترین صنایع در جهان است که نقش عمده‌ای در آلودگی محیط زیست دارد[۱]. بتن یکی از اصلی‌ترین مواد در صنعت ساخت‌وساز است که هر ساله در دنیا حدود ۱۵ میلیارد تن تولید و مصرف[۲]. سرعت و افزایش مصرف سنگدانه‌های طبیعی از یک طرف، و از طرفی دیگر زباله‌های ناشی از ساخت و ساز وتخریب، در آینده‌ای نزدیک باعث ایجاد چالش‌های جدید در حفاظت از محیط زیست می گردد[۳]. میزان تولید زباله‌ها و نخاله‌های ساختمانی در کشور آمریکا به حدود ۱۴۰ میلیون تن رسیده و اتحادیه اروپا میزان تولید زباله‌های ساختمانی در هر سال را برابر ۹۷۰ میلیون تن، معادل ۲ تن به ازای هر شهروند اعلام کرده است[۴].Leite نشان داد که سنگدانه‌های حاصل از ساخت‌وساز و تخریب برای ساخت بتن مناسب می‌باشند لذا امروزه استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در صنعت ساختمان، می‌تواند اثرات بسزایی در دست‌یابی به یک توسعه پایدار در این صنعت داشته باشد[۵].با توجه به اینکه ٪ (۷۵-۶۰) حجم بتن را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند و با توجه به امکان‌پذیر بودن بازیافت زباله‌های ساختمانی و همچنین مزایای زیست محیطی و اقتصادی آن، بازیافت زباله‌های ناشی از ساخت و ساز و تخریب به عنوان یک منبع جدید جهت تامین سنگدانه‌های مصرفی در ساخت بتن،توجه بسیاری رابه خود جلب کرده است[۶].

استفاده از بتن حاوی نخاله‌های بنایی بازیافتی در صنعت ساخت‌وساز، علاوه بر بارگذاری استاتیکی، توانایی قرارگیری آن در معرض انواع بارهای دینامیکی را نیز دارد [۷]. در ایران سابقه پژوهش در زمینه بتنهای بازیافتی به حدود یک دهه می‌رسد. آمار ثبت شده مقالات موجود در زمینه این بتن‌ها، گویای آن است که کانون توجه به مطالعات از سال ۱۳۸۴ شکل گرفته و تاکنون مجموع مقالات چاپ شده در همایش‌ها و مجلات ارائه شده ۱۱۰ مورد ثبت شده‌اند. با نگاهی اجمالی به عناوین مقالات ارائه شده به زبان فارسی می‌توان دریافت که کانون تمرکز این مطالعات بر خواص مکانیکی بتن‌های با سنگدانه‌های بازیافتی بتنی بوده و مطالعات بسیار کم‌تری در خصوص بتن‌های با سنگدانه‌های بازیافتی بنایی انجام پذیرفته که نه تنها در زمینه شناخت رفتار درازمدت این بتن‌ها توجهی نشده، بلکه حتی در بخش خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم‌شدن، ضریب ارتجاعی استاتیکی، سرعت امواج فراصوت و .... نیاز به توسعه پژوهش وجود دارد.

عوامل مختلفی می‌تواند بر خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی موثر باشند. از این قبیل می‌توان به تاثیر جایگزینی میزان سنگدانه‌ها[۸] و تاثیر مواد افزودنی شیمیایی[۹] اشاره نمود. در خصوص تاثیر جایگزینی میزان سنگدانه‌ها، محققان هنوز به یک وحدت نظر دست نیافته‌اند. گرچه اکثر محققان بر این نظر متفقند که در جایگزینی‌های تا ٪۳۰ برای سنگدانه های بازیافتی درشت و حداکثر ٪۲۰ برای سنگدانه‌های‌بازیافتی ریز تاثیر محسوسی در مقاومت فشاری رخ نخواهد داد اما رفته‌رفته با افزایش درصد جایگزینی، از مقاومت فشاری نیز کاسته خواهدشد[۱۰]. برخی مطالعات نیز نشان داده که امکان دست‌یابی به مقاومتی بالاتر از مقاومت بتن معمولی در جایگزینی‌های ٪۵۰ نیز وجود دارد و هم‌چنین دست‌یابی به مقاومت‌های مورد نیاز طراحی در جایگزینی‌های تا ٪ ۱۰۰ نیز امری ممکن است[۱۱].

در خصوص تاثیر مواد افزودنی شیمیایی، هر یک از محققان تلاش کردند تا برای بهبود کیفیت بتن بازیافتی، از مواد افزودنی خاصی نیز استفاده نمایند و هر یک درصد مشخصی از جایگزینی را نیز به عنوان درصد بهینه جایگزینی سیمان معرفی نمودند. Kou et al.[۹] در پژوهش خود تاثیر به‌کارگیری میکروسیلیس را به میزان ٪۱۰ وزن سیمان با افزایش جایگزینی‌های مختلف مصالح بازیافتی بررسی کرده و نشان دادند که در تمام مخلوط‌های بتنی، زمانی که ٪۱۰ میکروسیلیس افزوده می‌شود، مقاومت فشاری حدود ٪۱۰ نیز افزایش خواهد یافت. مقیمی و همکاران با اسـتفاده از جایگزینی سیمان با ٪۱۰ میکروسیلیس و با به‌کارگیری فوق‌روان‌کننده، یک نوع بتن بازیافتی ساختند که مقاومت فشاری آن ٪۳۹ از بتن مرجع بیش‌تر بود[۱۲].مطالعات انجام شده توسط Kou and Poonنیز نشان داد که در صورت استفاده از پوزولان‌خاکستربادی، جایگزینی‌های تا سقف ٪۵۰ می‌تواند منجر به ساخت بتن بازیافتی با کیفیت مطلوب گردد[۱۳]؛ ولی در تحقیق دیگری، Kou et al. نشان دادند که استفاده از پوزولان خاکستربادی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، منجر به کاهش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی می‌گردد که این نتیجه می‌تواند با افزایش میزان جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی متفاوت باشد [۱۴].

این تحقیق تلاش می‌کند تا تاثیر درصدهای مختلف جایگزینی میکروسیلیس و خاکستربادی بر خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی ساخته شده از درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی را مورد بررسی قرار دهد.

۱- برنامه آزمایشگاهی

۱-۱- مصالح و مواد مصرفی

۱-۱-۱ سیمان و مواد پوزولانی

در جدول ۱ ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی استفاده شده در تحقیق شامل سیمان نوع ۲ ازکارخانه رامهرمز در استان خوزستان، میکروسیلیس و خاکستربادی رده F ارائه شده است. میکروسیلیس مصرفی در تحقیق متعلق به کارخانه‌های تولید آلیاژ فروسیلیس از شهرستان ازنا در استان لرستان می‌باشد. خاکستربادی نیز به عنوان یک محصول وارداتی و از شرکت تامین کننده محصولات بتنی کلینیک بتن ایران تهیه شده است.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی مصرف شده در تحقیق (٪)

مواد سیمانی	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	LOI
سیمان	۱۹/۸	۳/۹	۳/۱	۶۵/۳	۲/۵	۲/۸	۲/۲
میکروسیلیس	۹۴/۷	۰/۹	۱/۲	۰/۵	۱/۰	۰/۱	–
خاکستربادیرده F	۵۶/۷	۵/۱	۲۷/۸	۲/۶	۵/۱	۰/۶۸	۳/۷

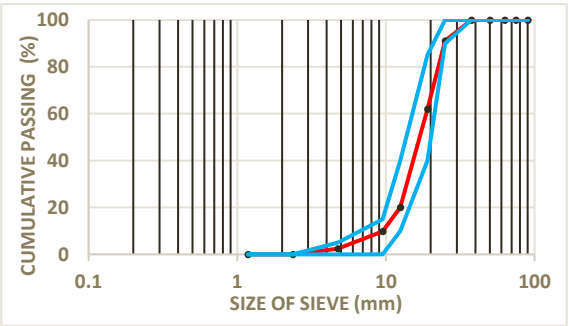
۱-۱-۲ آب و فوق روان کننده

آب مصرفی در تحقیق، آب شرب اهواز بوده که برای دستیابی به کارایی مطلوب از فوق‌روان‌کننده پایه پلی‌کربکسیلات با چگالی۳ ۱/۱±۰/۰۲g/cmاستفاده شد. درصد بهینه استفاده از فوق‌روان‌کننده مربوطه، معادل ۱٪ وزنی مصالح سیمانی بوده است.

۱-۱-۳ سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی

سنگدانه‌های طبیعی استفاده شده در این تحقیق شامل ریزدانه‌های طبیعی با حداکثر اندازه ۴ میلی‌متر و درشت‌دانه‌های طبیعی شکسته شده با حداکثر قطر ۱۹ میلی‌متر با میزان جذب آب ۲/۵۳٪ وزنی و چگالیخشک شده در کوره به مقدار ۲/۵۷ تن درمترمکعب می‌باشند. میزان توزیعسنگدانه‌ها در مخلوط به نحوی است که ۵۵٪ از سنگدانه‌ها درمحدوده درشت‌دانه و ۴۵٪ از آن‌ها در محدوده ریزدانه قرار گرفته‌اند. درشت دانه‌های بنایی بازیافتی شامل قطعات شکسته شده آجر، پلاستر سیمان، سنگ، کاشی و سرامیک بوده که از ساختمان‌های تخریب شده دراهواز حاصل شدند. در ابتدا، از دپوهای مختلف، نخاله‌های بنایی به مقدار موردنیاز جمع‌آوری گردید و سپس ضایعات آن‌ها از قبیل خاک، گچ، شیشه و فلزات جداسازی گردیدند. توسط دستگاه خردکننده (شکل ۱)، تمامی نخاله‌ها خرد شده و پس از الک‌کردن، دانه‌بندی شدند. درشت-دانه‌های بنایی بازیافتی تهیه شده، دارای حداکثر قطر اسمی ۱۹ میلی‌متر، میزان جذب آب ۱۵/۲۲٪ وزنی و چگالی خشک شده در کوره بهمقدار ۱/۰۴ تن در مترمکعب می‌باشند. شکل۲ بیانگر منحنی دانه‌بندی درشت-دانه‌های بازیافتی بنایی مصرفی در تحقیق می‌باشد. مشخصات شیمیایی و فیزیکی هر یک از سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی بنایی استفاده شده در تحقیق در جدول ۲ و ۳ ارائه شده است.

شکل ۱- دستگاه خردکن سنگدانه‌های بازیافتی



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی درشت‌دانه‌های بازیافتیبنایی تحقیق

جدول شماره ۲- مشخصات شیمیایی سنگدانه های بازیافتی استفاده شده در تحقیق

نوع سنگدانه	Fe_2O_3	MnO	CaO	K_2O	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Na_2O	SO_3	CO_3
درشت دانه بازیافتی بنایی	۵/۳۶	۰/۱۱	۲۵/۹	۰/۹	۴۰/۸۷	۶/۴۴	۵/۷۲	۰/۵۸	۰/۵۴	۱۲/۷
درشت دانه طبیعی	۰/۸	–	۵۱/۳	۰/۱	۴/۸۴	۱/۲۵	۰/۶۴	۰/۲۲	–	–

جدول شماره ۳- مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگدانه های بازیافتی استفاده شده در تحقیق

نوع سنگدانه	جذب آب (٪)	چگالی خشک شده در کوره (تن بر متر مکعب)	ضریب لوس آنجلس
درشت دانه بازیافتی بنایی	۱۵/۲۲	۱/۰۴	۳۸
درشت دانه طبیعی	۲/۵۳	۲/۵۷	۲۳

۱-۲- طرح اختلاط‌های تحقیق

برای مطالعه خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی، ۲۸طرح اختلاط با درصدهای مختلف جایگزینی از درشت دانه‌های بازیافتی بنایی و پوزولان های میکروسیلیس و خاکستربادی ساخته شدند. در تمامی طرح‌ها نسبت آب به سیمان معادل ۰/۳۶ و میزان مواد سیمانی ۴۲۰کیلوگرم بر مترمکعب ثابت نگه داشته شده است. فرآیند اختلاطمصالح براساس فرآیند اختلاط سه مرحله‌ای ارائه شده توسط ساجدی و جلیلی‌فر [۱۵] انجام شده که قرابت زیادی با فرآیند دو مرحله‌ای تعریف شده توسط Tam et al.دارد [۱۶]. جزئیات طرح اختلاط استفاده شده در تحقیق، در جدول ۴ ارائه گردیده است. قابل ذکر است نمایه‌های CC و RC به ترتیب معرف بتن معمولی و بتن بازیافتی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی بنایی می‌باشند و برای پوزولان‌میکروسیلیس و خاکستربادی به‌ترتیب از نمایه-SF و FA و عدد مندرج پس از نمایه نیز بیانگر درصدجایگزینی پوزولان با سیمان بر حسب وزن سیمان می‌باشد. مطابق برنامه تحقیق، علاوه بر جایگزین کردن درشت دانه‌های طبیعی با درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی در درصدهای ٪۲۵، ٪۵۰ و ٪۱۰۰ بر مبنای وزن سنگدانه‌های طبیعی، میکروسیلیس در درصدهای ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ و خاکستربادی نیز در درصدهای ٪۱۵، ٪۲۵ و ٪۳۵ وزن سیمان با سیمان جایگزین شده است.

۱-۳- نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها

طرح اختلاط پیش‌بینی شده بر مبنای طرح ملی مخلوطبتن ایران[۱۷]و برای دست‌یابی به بتن معمولی با مقاومتمشخصه در سن ۲۸ روزه۴۰ مگاپاسکال بوده است. جهت ارتقای خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی از میکروسیلیس در جایگزینی‌های ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ و خاکستربادی نیز در درصدهای ٪۱۵، ٪۲۵ و ٪۳۵ وزن سیمان استفاده شده است. جزئیات طرح اختلاط‌های استفاده شده در تحقیق در جدول ۴ ارائه شده است. در مجموع ۲۵۲ نمونه بتنی مکعبی و استوانه‌ای استاندارد در قالب ۲۸ طرح اختلاط، ساخته شدند. اسلامپ و وزن مخصوص بتن مرجع و بتن های بازیافتی در حالات تازه و سخت شده در جدول ۵ ارائه شده‌اند . پس ازساخت، تمامی نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی قرارداده شده و پس از گذشت ۲۴ ساعت اقدام به بازنمودن قالب‌ها گردید و تا سررسیدهای تعیین شده، نمونه‌ها مطابق بااستاندارد ASTM C192[۱۸]در حوضچه آب با دمای2°C25± عمل‌آوری شدند.

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی استاندارد مطابق با ASTM C109[۱۹]، آزمایش تعیین مقاومت کششی دو نیم‌شدن بر روی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد مطابق با ASTM C496 [۲۰] و آزمایش تعیین ضریب ارتجاعی استاتیکی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد بر اساس ASTM C469[۲۱] و هم‌چنین آزمایش سرعت امواج فراصوت براساسASTM C597[۲۲] انجام گردید.

جدول ۴-جزئیات طرح اختلاط‌های استفاده شده در تحقیق (کیلوگرم)

طرح اختلاط	سیمان	میکروسیلیس	خاکستربادی	آب	فوق روان‌کننده	ماسه	شن طبیعی	شن بازیافتی
CC	۴۲۰	–	–	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۹۳۷	–
RC25	۴۲۰	–	–	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۷۰۳	۲۳۴
RC50	۴۲۰	–	–	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۴۶۸/۵	۴۶۸/۵
RC100	۴۲۰	–	–	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	–	۹۳۷
RC0-SF5	۳۹۹	۲۱	–	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۹۳۷	–
RC25-SF5	۳۹۹	۲۱	–	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۷۰۳	۲۳۴
RC50-SF5	۳۹۹	۲۱	–	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۴۶۸/۵	۴۶۸/۵
RC100-SF5	۳۹۹	۲۱	–	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	–	۹۳۷
RC0-SF10	۳۷۸	۴۲	–	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۹۳۷	–
RC25-SF10	۳۷۸	۴۲	–	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۷۰۳	۲۳۴
RC50-SF10	۳۷۸	۴۲	–	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۴۶۸/۵	۴۶۸/۵
RC100-SF10	۳۷۸	۴۲	–	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	–	۹۳۷
RC0-SF15	۳۵۷	۶۳	–	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۹۳۷	–
RC25-SF15	۳۵۷	۶۳	–	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۷۰۳	۲۳۴
RC50-SF15	۳۵۷	۶۳	–	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۴۶۸/۵	۴۶۸/۵
RC100-SF15	۳۵۷	۶۳	–	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	–	۹۳۷
RC0-FA15	۳۵۷	–	۶۳	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۹۳۷	–
RC25- FA15	۳۵۷	–	۶۳	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۷۰۳	۲۳۴
RC50- FA15	۳۵۷	–	۶۳	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۴۶۸/۵	۴۶۸/۵
RC100- FA15	۳۵۷	–	۶۳	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	–	۹۳۷
RC0- FA25	۳۱۵	–	۱۰۵	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۹۳۷	–
RC25- FA25	۳۱۵	–	۱۰۵	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۷۰۳	۲۳۴
RC50- FA25	۳۱۵	–	۱۰۵	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۴۶۸/۵	۴۶۸/۵
RC100- FA25	۳۱۵	–	۱۰۵	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	–	۹۳۷
RC0- FA35	۲۷۳	–	۱۴۷	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۹۳۷	–
RC25- FA35	۲۷۳	–	۱۴۷	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۷۰۳	۲۳۴
RC50- FA35	۲۷۳	–	۱۴۷	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۴۶۸/۵	۴۶۸/۵
RC100-FA35	۲۷۳	–	۱۴۷	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	–	۹۳۷

جدول ۵–اسلامپ و وزن مخصوص بتن مرجع و بتن‌های بازیافتی در حالات تازه و سخت شده

عنوان طرح اختلاط	اسلامپ (میلی‌متر)	میانگین وزن مخصوص بتن تازه (تن بر مترمکعب)	میانگین وزن مخصوص بتن سخت‌شده (تن بر مترمکعب)
CC	۹۵	۲/۵۱	۲/۴۲
RC25	۹۵	۲/۴۶	۲/۳۴
RC50	۹۰	۲/۴۰	۲/۲۵
RC100	۸۰	۲/۳۰	۲/۱۰
RC0-SF5	۱۱۰	۲/۵۰	۲/۴۳
RC25-SF5	۱۰۰	۲/۴۹	۲/۳۴
RC50-SF5	۹۵	۲/۴۴	۲/۳۱
RC100-SF5	۹۰	۲/۳۲	۲/۱۲
RC0-SF10	۱۱۰	۲/۴۸	۲/۴۲
RC25-SF10	۱۱۰	۲/۵۰	۲/۴۴
RC50-SF10	۹۵	۲/۴۶	۲/۳۱
RC100-SF10	۹۵	۲/۳۲	۲/۱۸
RC0-SF15	۱۱۵	۲/۴۸	۲/۴۱
RC25-SF15	۱۱۵	۲/۳۷	۲/۳۳
RC50-SF15	۱۱۰	۲/۳۸	۲/۳۴
RC100-SF15	۱۰۵	۲/۳۱	۲/۱۵
RC0-FA15	۱۱۵	۲/۴۸	۲/۴۰
RC25- FA15	۱۱۵	۲/۴۰	۲/۳۱
RC50- FA15	۱۰۵	۲/۴۰	۲/۳۴
RC100- FA15	۹۵	۲/۳۳	۲/۱۵
RC0- FA25	۱۱۵	۲/۴۸	۲/۴۲
RC25- FA25	۱۱۰	۲/۳۷	۲/۳۱
RC50- FA25	۹۵	۲/۳۶	۲/۳۵
RC100- FA25	۹۰	۲/۳۰	۲/۱۶
RC0- FA35	۱۱۵	۲/۴۱	۲/۴۰
RC25- FA35	۱۱۵	۲/۳۶	۲/۲۹
RC50- FA35	۱۰۵	۲/۳۱	۲/۲۷
RC100-FA35	۹۵	۲/۲۹	۲/۱۷

۲- نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آن‌ها

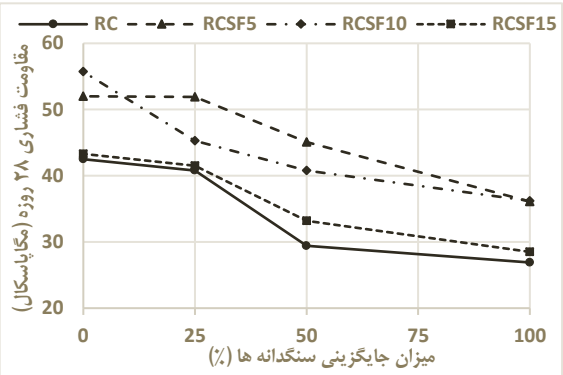
۲-۱- مقاومت فشاری در سن ۲۸روزه

جدول ۶ و نمودارهای ۱و ۲ به ترتیب نشان‌دهنده مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه بتن‌طبیعی و بتن بازیافتی حاوی پوزولان میکروسیلیس و خاکستر بادی می‌باشند. در بتن‌های بدون پوزولان، تا جایگزینی ٪۲۵ درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی، مقاومت فشاری افت محسوسی نداشته و مقاومت فشاری هدف (۴۰ مگاپاسکال) تامین گردیده است. در جایگزینی ٪۵۰ درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی، مطالعات پیشین نشان داده که حدود ٪۲۴ افت مقاومت فشاری را به دنبال دارد[۲۳] که نتایج این تحقیق، ضمن تأیید این نتایج، نشان داد که در این درصد از جایگزینی مقاومت فشاری بتن ٪۲۸ افت داشته و به ۲۹/۴ مگاپاسکال رسید و جایگزینی ٪۱۰۰ درشت‌دانه‌های بازیافتی نیز باعث شده تا مقاومت فشاری از مقاومت هدف بسیار کم‌تر شده و با ٪ ۳۳ افت نسبت به بتن معمولی به ۲۶/۹مگاپاسکال برسد. در بتن‌های طبیعی، بیش‌ترین مقاومت حاصله در بتن حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس می‌باشد، درحالی‌که در بتن‌های بازیافتی، بیش‌ترین مقاومت اخذ شده در بتن با ٪۲۵ درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی مربوط به بتن حاوی ٪۵ میکروسیلیس می‌باشد. در جایگزینی‌های ٪۲۵ درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی، در تمام درصدهای جایگزینی میکروسیلیس، مقاومت فشاری هدف (۴۰ مگاپاسکال) کسب شده است درصورتیکه، در هیچ یک از درصدهای جایگزینی خاکستر بادی، مقاومت فشاری هدف محقق نشد.

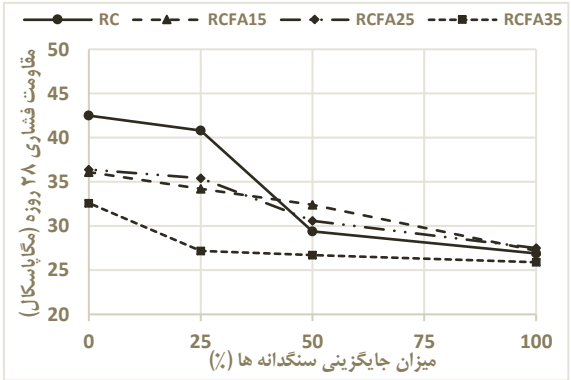
در جایگزینی‌های ٪۵۰ درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی، در جایگزینی‌های ٪۵ و ٪۱۰ میکروسیلیس، باعث شد تاحفرات موجود در سنگدانه‌های بازیافتی و ناحیه انتقال به نحو مطلوبی پرشده وکیفیت ناحیه انتقال ارتقاء یابد که باعث بهبود کیفیت بتن شده و مقاومت فشاری هدف محقق گردید، درحالی‌که بتن‌های ٪۵۰ بازیافتی حاوی تمام درصدهای جایگزینی خاکستربادی، با مقاومت فشاری هدف، اختلاف معناداری داشتند. در جایگزینی‌های ٪۱۰۰ درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی،ترک‌ها در ناحیه انتقال بسیار زیاد شده ودرمرز ناحیه انتقال ناپیوستگی زیادی به شکل حفره و نیز توده‌های نامتراکم وجود داشت لذا در هیچ‌یک از درصدهای جایگزینی میکروسیلیس و خاکستر بادی، مقاومت فشاری حاصله به مقاومت فشاری هدف نزدیک نبوده و اختلاف زیادی مشاهده گردید.

جدول ۶- مقاومت فشاریبتن‌های معمولی و بازیافتی (مگاپاسکال)

طرح اختلاط	میزان جایگزینی سنگدانه‌ها (٪)			
	۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
RC	۴۲/۵	۴۰/۸	۲۹/۴	۲۶/۹
RC-SF5	۵۲/۰	۵۱/۹	۴۵/۱	۳۶/۱
RC-SF10	۵۵/۷	۴۵/۳	۴۰/۸	۳۶/۲
RC-SF15	۴۳/۳	۴۱/۵	۳۳/۲	۲۸/۵
RC-FA15	۳۶/۱	۳۴/۲	۳۲/۴	۲۷/۲
RC-FA25	۳۶/۴	۳۵/۴	۳۰/۶	۲۷/۵
RC-FA35	۳۲/۶	۲۷/۲	۲۶/۷	۲۵/۹



نمودار ۱- تغییرات مقاومت فشاری بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی میکروسیلیس



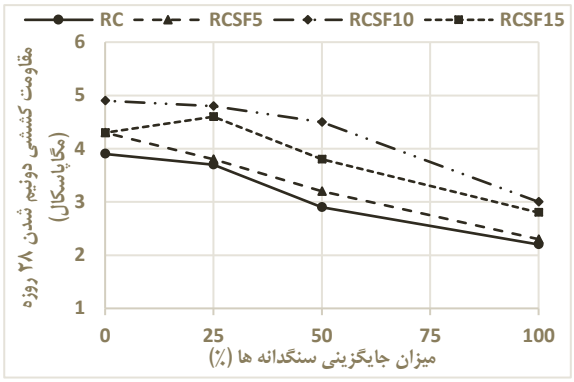
نمودار ۲- تغییرات مقاومت فشاری بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی خاکستربادی

۳-۲-مقاومت کششی دونیم‌شدن در سن ۲۸روزه

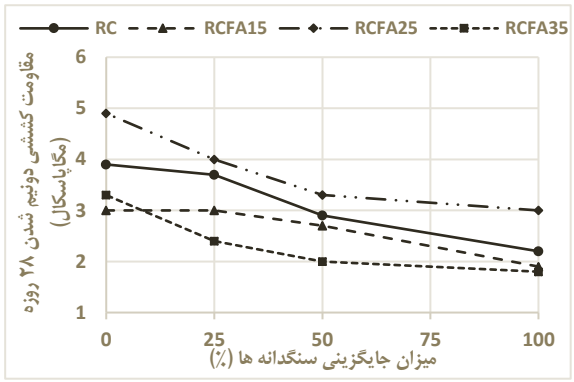
جدول۷و نمودارهای ۳ و ۴ به ترتیب نشان‌دهنده مقاومت کششی دونیم شدن در سن ۲۸ روزه بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی پوزولان میکروسیلیس و خاکستربادی می‌باشند. بیش‌ترین و کم‌ترین مقاومت کسب شده، ۴/۹ و ۱/۸ که به ترتیب مربوط به بتن معمولی با ٪۱۰ میکروسیلیس و بتن ٪۱۰۰ بازیافتی حاوی ٪۲۵ و ٪۳۵ خاکستربادی می‌باشد. در بتن بدون پوزولان، جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی باعث افت ٪۴۴ مقاومت کششی نسبت به بتن معمولی شده است. در جایگزینی‌های٪۱۰ و ٪۱۵ میکروسیلیس، تا جایگزینی ٪۲۵ درشت دانه های بازیافتی، مقاومت کششی دونیم‌شدن بیش‌تری نسبت به بتن معمولی مشاهده گردید و هم‌چنین در جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس، تا جایگزینی حتی٪۵۰ درشت‌دانه‌های بازیافتی، مقاومت کششی دونیم‌شدن نسبت به بتن معمولی بیش‌تر بوده است وسایر درصدهای جایگزینی میکروسیلیس تاثیر محسوسی در بهبود مقاومت کششی دونیم‌شدن نسبت به بتن معمولی نداشتند ولی نسبت به بتن‌های مشابه بدون پوزولان از مقاومت بیش‌تری برخوردار بودند ولی تمام درصدهای جایگزینی خاکستربادی در مقایسه با بتن مرجع و هم‌چنین بتن‌های بازیافتی بدون پوزولان، از مقاومت کششی دونیم‌شدن کمتری برخوردار بودند.

جدول ۷- مقاومت کششی دونیم‌شدن بتن‌های معمولی و بازیافتی (مگاپاسکال)

طرح اختلاط	میزان جایگزینی سنگدانه‌ها (٪)			
	۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
RC	۳/۹	۳/۷	۲/۹	۲/۲
RC-SF5	۴/۳	۳/۸	۳/۲	۲/۳
RC-SF10	۴/۹	۴/۸	۴/۵	۳/۰
RC-SF15	۴/۳	۴/۶	۳/۸	۲/۸
RC-FA15	۳/۰	۳/۰	۲/۷	۱/۹
RC-FA25	۳/۲	۲/۷	۱/۹	۱/۸
RC-FA35	۳/۳	۲/۴	۲/۰	۱/۸



نمودار ۳-تغییرات مقاومت کششی دونیم‌شدن بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی میکروسیلیس



نمودار ۴- تغییرات مقاومت کششی دونیم‌شدن بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی خاکستربادی

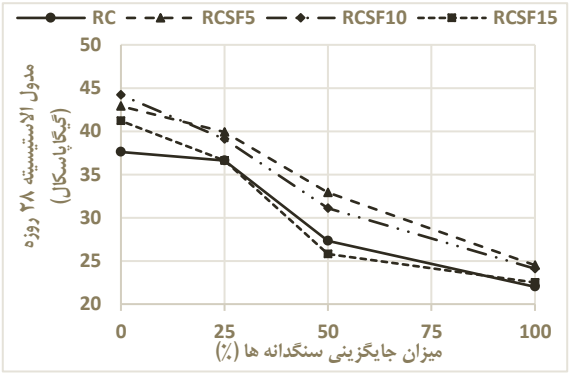
۳-۳ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸روزه

جدول۸و نمودارهای ۵ و ۶ به ترتیب نشان‌دهنده ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی پوزولان میکروسیلیسو خاکستربادیمی‌باشند.بیش‌ترین و کم‌ترین ضریب ارتجاعی کسب شده، ۴۴/۲ و ۲۱/۸ که به ترتیب مربوط به بتن معمولی با ٪۱۰ میکروسیلیس و بتن ٪۱۰۰ بازیافتی حاوی ٪۱۵ خاکستربادی می‌باشد. در جایگزینی‌های٪۵ و ٪۱۰ میکروسیلیس، تا جایگزینی ٪۲۵ درشت-دانه‌های بازیافتی،ضریب ارتجاعی بیش‌تری نسبت بهبتن معمولی مشاهده گردید، ولی در دیگر درصدهای جایگزینی، ضریب ارتجاعی به-دست آمده از ضریب ارتجاعی بتن معمولی بدون پوزولان هم کم‌تر بوده است. درصد مطلوب جایگزینی ٪۵میکروسیلیس در بتن معمولی به نحوی است که در مقایسه بابتن معمولی بدون پوزولان ٪۱۴ رشد و در بتن‌های ٪۲۵، ٪۵۰ و ٪۱۰۰بازیافتی در مقایسه با بتن بازیافتی مشابه بدون پوزولان بهترتیب ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۱۱ رشد را نشان می‌دهد ولی در بتن‌های ٪۲۵، ٪۵۰ و ٪۱۰۰بازیافتی حاوی درصدهای مختلف خاکستربادی، ضریب ارتجاعی استاتیکی کمتری مشاهده گردید و فقط

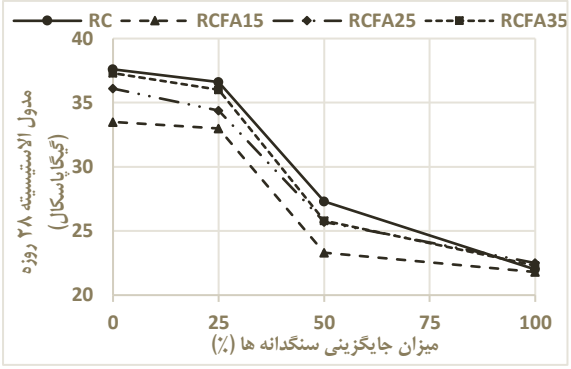
در جایگزینی ٪۳۵ خاکستربادی، نسبت به بتن‌های مشابه بدون پوزولان، تقریباً برابر بودند.

جدول ۸- ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن‌های معمولی و بازیافتی (گیگاپاسکال)

طرح اختلاط	میزان جایگزینی سنگدانه‌ها (٪)			
	۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
RC	۳۷/۶	۳۶/۶	۲۷/۳	۲۲/۰
RC-SF5	۴۲/۹	۳۹/۹	۳۲/۹	۲۴/۵
RC-SF10	۴۴/۲	۳۹/۱	۳۱/۱	۲۴/۱
RC-SF15	۴۱/۲	۳۶/۶	۲۵/۸	۲۲/۵
RC-FA15	۳۳/۵	۳۳/۰	۲۳/۳	۲۱/۸
RC-FA25	۳۶/۱	۳۴/۴	۲۵/۷	۲۲/۵
RC-FA35	۳۷/۳	۳۶/۰	۲۵/۸	۲۲/۳



نمودار ۵-تغییرات ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی میکروسیلیس



نمودار ۶-تغییرات ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی خاکستربادی

۳-۴-سرعت انتشار امواج فراصوت در سن ۲۸روزه

حدود تعریف شده روی نمودارها، معرف بازه‌های تعیین کیفیت بتن‌ها براساسیافته‌های Whitehurst می‌باشدکه در جدول ۹ارائه شده است[۲۴]. درجدول ۱۰و نمودارهای ۷ و ۸ نیز به ترتیب نتایج سرعت انتشار امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی پوزولان میکروسیلیس و خاکستر بادی را نشان می دهد.

جدول ۹- نتایج سرعت انتشار امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه ارائه شده توسط وایتهورست [۲۴]

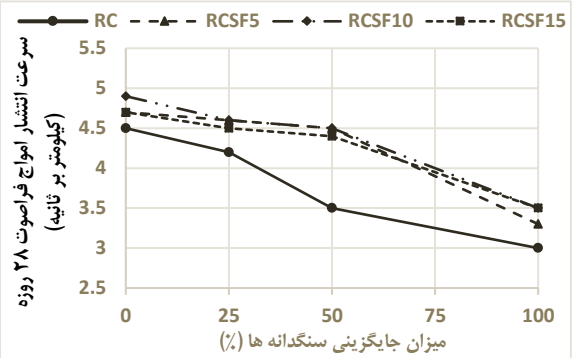
سطح کیفی	عالی	خوب	مشکوک	ضعیف	خیلی ضعیف
سرعت انتشار امواج (کیلومتر بر ثانیه)	>۴/۵	۴/۵- ۳/۵	۳/۵-۳	۳-۲	<۲

بر اساس جداول و نمودارها، دیده می‌شود که بتن طبیعی بدون پوزولان در محدوده کیفی بتن خوب قرار گرفته استو با افزودن تمام درصدهای جایگزینی میکروسیلیس (٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵)، بتن به محدوده کیفی عالی ارتقاء پیدا می‌کند ولی در جایگزینی خاکستربادی، فقط جایگزینی ٪۱۵ خاکستربادی باعث ارتقاء کیفیت بتن طبیعی از خوب به عالی شده است و در دیگر درصدهای جایگزینی، بتن هم‌چنان در محدوده کیفی خوب قرار دارد. در جایگزینی ٪۲۵ درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی به‌جای درشت‌دانه‌های طبیعی، در جایگزینی ٪۵ و ٪۱۰ میکروسیلیس، باز هم بتن در محدوده کیفی عالی قرار دارد ولی در جایگزینی ٪۱۵ میکروسیلیس و تمام درصدهای جایگزینی خاکستر بادی، بتن در محدوده کیفی خوب واقع شد. در جایگزینی‌های ٪۵۰ مصالح بازیافتی، بتن‌های حاوی ٪۵ و ٪۱۰ میکروسیلیس هم‌چنان در محدوده مرز کیفی عالی باقی‌ماندند و بتن حاوی ٪۱۵ میکروسیلیس در محدوده کیفی خوب باقی‌ماند ولی تمام درصدهای جایگزینی خاکستربادی در بتن‌های ٪۵۰ بازیافتی به محدوده بتن مشکوک تنزل کیفیت پیدا نمودند. در جایگزینی ٪۱۰۰ مصالح بازیافتی، بتن‌های حاوی درصدهای مختلف میکروسیلیس، در محدوده کیفی مشکوک قرار گرفتند ولی بتن های حاوی درصدهای مختلف خاکستربادی، به محدوده کیفی ضعیف تنزل پیدا کرده و از بتن ٪۱۰۰ بازیافتی بدون پوزولان

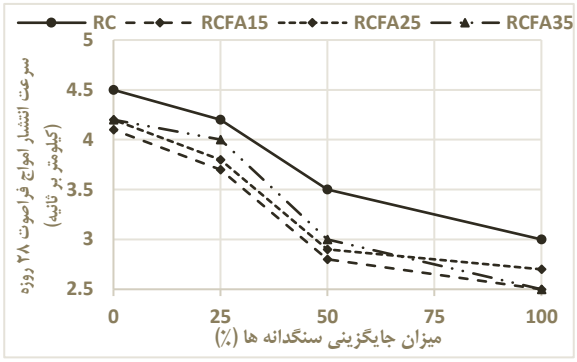
کیفیت پایین‌تری پیدا کردند. در بتن‌های طبیعی بدون پوزولان نیز، با افزایش میزان جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی به جای درشت‌دانه‌های طبیعی، از کیفیت بتن کاسته شده و در محدوده بتن‌های مشکوک و مرز ضعیف واقع شدند. در مجموع از منظر سرعت انتشار امواج فراصوت، بتن طبیعی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس و بتن‌های ٪۱۰۰ بازیافتی حاوی ٪۱۵ و ٪۳۵ خاکستربادی به ترتیب با داشتن سرعت انتشار امواج فراصوت ۴/۹ و ۲/۵ کیلومتر بر ثانیه، به‌ترتیب با کیفیت‌ترین و بی‌کیفیت‌ترین بتن‌ها نتیجه دادند.

جدول ۱۰- سرعت انتشار امواج فراصوت بتن‌های معمولی و بازیافتی (کیلومتربر ثانیه)

طرح اختلاط	میزان جایگزینی سنگدانه‌ها (٪)			
	۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
RC	۴/۵	۴/۲	۳/۵	۳/۰
RC-SF5	۴/۷	۴/۶	۴/۵	۳/۳
RC-SF10	۴/۹	۴/۶	۴/۵	۳/۵
RC-SF15	۴/۷	۴/۵	۴/۴	۳/۵
RC-FA15	۴/۱	۳/۷	۲/۸	۲/۵
RC-FA25	۴/۲	۳/۸	۲/۹	۲/۷
RC-FA35	۴/۲	۴/۰	۳/۰	۲/۵



نمودار ۷ – تغییرات سرعت انتشار امواج فراصوت بتن های معمولی و بازیافتی حاوی میکروسیلیس



نمودار ۸–تغییرات سرعت انتشار امواج فراصوتبتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی خاکستربادی

۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در زمینه خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی، محققان هنوز به یک وحدت نظر دست نیافته‌اند. گرچه اکثر محققان بر این نظر متفقند که جایگزینی‌های کم و در بازه تا ٪۳۰ از درشت‌دانه‌های بازیافتی نمی‌تواند تاثیرات محسوسی بر خواص مکانیکی بتن‌ها از خود برجای بگذارند[۲۵] ولی برخی از مطالعات نیز نشان دادند که امکان دست‌یابی به مقاومتی بالاتر از مقاومت بتن معمولی در جایگزینی‌های ٪۵۰ نیز وجود دارد[۱۱].نتایج این تحقیق نیز نشان داد که جایگزینی ٪۲۵ مصالحبازیافتی تاثیری بر مقاومت فشاری ندارد واستفاده از ٪۵ میکروسیلیس باعث شده حتی درجایگزینی ٪۵۰ درشت-دانه‌های بازیافتی بنایی، مقاومت فشاریاز بتن بدون پوزولان نیز بیش‌تر شود. هم‌چنین با استفاده از ٪۱۰ میکروسیلیس درجایگزینی ٪۵۰ درشت-دانه‌های بازیافتی بنایی، مقاومت فشاری به‌دست آمده با مقاومت فشاری هدف (۴۰ مگاپاسکال) برابری می‌کند ولی در بتن‌های ٪۲۵ و ٪۵۰ بازیافتی حاوی درصدهای مختلف خاکستربادی کاهش مقاومت نسبت به بتن معمولی مشاهده شد. در جایگزینی ٪۱۰۰ درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی بدون پوزولان،٪۴۳ افتدر مقاومت فشاری دیده شد،درحالی که برخی مراجع این افت مقاومت در بتن‌های ٪۱۰۰ بازیافتی بتنی را تا ٪۳۰ گزارش کرده‌اند [۲۶]. از نتایج قابل توجه اخذ شده استفاده از جایگزینی ٪۵ میکروسیلیس در مخلوط‌های بتنی، افزایش درصد رشد مقاومت در بتن‌های بازیافتی نسبت به بتن بدون پوزولان مشابه با افزایش میزان جایگزینی سنگدانه‌ها می‌باشد، به نحوی‌که میزان بهبود مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه بتن٪۲۵ بازیافتی حاوی ٪۵ میکروسیلیس در مقایسه با بتن ٪۲۵ بازیافتی بدون پوزولان، ٪۲۷ است، درحالی که این نسبت با افزایش میزان درشت‌دانه‌های بازیافتی برای بتن‌های ٪۵۰ بازیافتی به ٪۵۳ رسیده است که این نتیجه نشان می‌دهد که به علت ریزی بسیار زیاد ذرات میکروسیلیس و متعاقبا افزایش قابلیت پرکنندگی بیش‌تر آن‌ها،

از شدت بروز وتوسعه حفرات در بتن‌های تماما بازیافتی کاسته شده و منجر به بهبود محسوس‌تر مقاومت فشاری این بتن‌ها گردید. در صورتیکه استفاده از پوزولان خاکستربادی، به عنوان جایگزین بخشی از سیمان منجر به کاهش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی شد و با افزایش میزان خاکستربادی، از مقاومت فشاری بتن‌ها نیز کاسته شد که این مساله ممکن است به واسطه افزایش نسبت آب به سیمان باشد.

در زمینه مقاومت کششی‌دونیم‌شدن، مطالعات آماری قبلی انجام شده، نشان داده که در اثر جایگزینی کامل سنگدانه‌های بازیافتی، امکان وقوع افت ٪۴۰ وجود دارد[۲۷]. تحقیق حاضر نیز ضمن تائید این نتیجه، نشان داد که در صورت جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های طبیعی، بدون حضور هرگونه پوزولان، کاهش ۴۵٪ مقاومت کششی دونیم‌شدن در مقایسه با بتن معمولی رخ می‌دهد. با این حال استفاده از درصد بهینه جایگزینی میکروسیلیس (٪۱۰)، باعث شد تا در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی۳۹٪ افت در مقاومت کششی دونیم‌شدنرخ دهد. نکته مهم این است که در جایگزینی‌های ۵٪ و ۱۰٪ میکروسیلیس در بتن ساخته شده از سنگدانه‌های طبیعی، مقاومت کششی‌دونیم‌شدن به‌ترتیب ۱۰٪ و ۲۴٪ افزایش یافته است ولی در جایگزینی‌های ۱۵٪ و ۲۵٪ خاکستربادی، ، مقاومت کششی‌دونیم‌شدن به‌ترتیب ۲۳٪ و ۱۸٪ کاهش یافته است.

در ارتباط با ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن‌های بازیافتی، هرگونه افزایش میزان سنگدانه‌های بازیافتی منجر به کاهش این ضریب شده است که این نتیجه را می‌توان به علت پایین‌تر بودن ضریب ارتجاعی استاتیکی سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی دانست. در بتن‌های ساخته شده از سنگدانه‌های طبیعی، جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس بهترین رفتار ارتجاعی را از خود نشان داده و باعث شده تا عملکرد بتن حدود ۱۹٪ بهبود پیدا کند، ولی در جایگزینی ٪۳۵ خاکستربادی به عنوان بهترین رفتار ارتجاعی، حدود ٪۱ افت مشاهده شد. در بتن‌های بازیافتی، جایگزینی ۵٪ میکروسیلیس، بهترین رفتار را نسبت به دیگر جایگزینی‌ها از خود نشان داده و باعث گردید که افت خواص بتن در اثر جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی کم‌تر از بقیه بتن‌ها باشد. نتایج نشان دادند که در جایگزینی ۵۰٪سنگدانه‌های بازیافتی بنایی، تمام بتن‌های بازیافتی نسبت به بتن ساخته شده از سنگدانه‌های طبیعی بدون پوزولان از ضریب ارتجاعی استاتیکی کم‌تری برخوردار شدند، ولی در جایگزینی ۲۵٪، عملکرد قابل قبولی از خود نشان دادند که این نتیجه نشان می‌دهد که تاثیر نامطلوب سنگدانه‌های بازیافتی در جایگزینی‌های بالاتر سنگدانه‌ها بر تاثیر بهبودبخشی پوزولان بر ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن‌ها اثرگذارتر بوده است. این نتیجه وقتی خود را بیش‌تر نشان می‌دهد که در جایگزینی ۱۰۰٪ درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی و بدون توجه به میزان افزودنی، نتایج حاصله برای ضریب ارتجاعی استاتیکی تمام بتن‌ها بسیار نزدیک به‌هم می‌باشد.

نتایج آزمایش تعیین سرعت انتشار امواج فراصوت، نشانداد که با افزایش میزان سنگدانه‌های بازیافتی بنایی در بتن، از سرعت انتشار امواج کاسته می‌شود. دست‌یابی به این نتیجه را می‌توان به کاهش چگالی سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی دانست. به علاوه به دست آمد که جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی، منجر به کاهش ۳۵٪ سرعت انتشار امواج فرصوت گردید، با این حال استفاده از میکروسیلیس و تراکم حاصله در بتن‌های بازیافتی، موثر واقع شده به نحوی که در جایگزینی‌های ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس به ترتیب ۳۰٪، ۲۸٪ و ٪۲۵ کاهش سرعت انتشار امواج فراصوت در جایگزینی کامل سنگدانه‌ها نسبت به بتن معمولی مشاهده شد ولی استفاده از خاکستربادی نتوانست کیفیت بتن‌ها را بهبود ببخشد.

نتایج

در این تحقیق برخی از خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی ساختهشده از درصدهای مختلف درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی مورد بررسی قرار گرفت. جهت بهبود خواص مکانیکی، میکروسیلیس و خاکستربادی در درصدهای مختلف جایگزین بخشی ازسیمان شدند.در مجموع ۸۴نمونه مکعبی و ۱۶۸ نمونه استوانه‌ای استاندارد در قالب ۲۸ طرح اختلاط ساخته شدند و آزمایش مقاومت فشاری،کششی دونیم‌شدن، ضریب ارتجاعی استاتیکی و سرعت انتشار امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه بر روی نمونه‌ها انجام گردیدند. نتایج کلیدی به شرح زیر می‌باشند:

- به‌دلیل افزایش میزان جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی ناشی از تخلخل زیاد و نیز سطح خشن آن‌ها در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی، میزان اسلامپ بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با بتن‌های معمولی کاهش پیدا کرد.
- استفاده از پوزولان میکروسیلیس و خاکستربادی سبب گردید تا حفرات ریز موجود در سنگدانه‌ها و ملات سیمانپیر گردیده و همچنین با توجه به کوچک‌تر بودن اندازه ذرات پوزولان‌های میکروسیلیس و خاکستربادی نسبت به سیمان، باعث گردید تا اسلامپ بتن‌های حاوی این پوزولان‌ها در مقایسه با سیمان های بدون پوزولان بیشتر شود.
- از آنجایی که چگالی سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه های طبیعی کم‌تر می‌باشند، باعث شد تا چگالی بتن‌های دارای سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با بتن‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی کاهش یابد.
- مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ٪۲۵ بازیافتی بدون پوزولان در مقایسه با بتن معمولی تقریبا بدون تغییر باقیمانده درحالی‌که جایگزینی‌های ٪۵۰ و ٪۱۰۰ ازمصالح بازیافتی به دلیل ضعف فیزیکی سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی، ترک‌ها در ناحیه انتقال افزایش یافته و در مرز ناحیه انتقال ناپیوستگی زیادی به شکل حفره

و نیز توده‌های نامتراکم به وجود بیاید و باعث افت در مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ٪۳۰ و ٪ ۳۷ گردید.

- مصرف ٪۵ و ٪۱۰ میکروسیلیس در بتن ساخته شده از سنگدانه‌های طبیعی، باعث شد تا حفرات موجود در ناحیه انتقال به نحو مطلوبی پر شده وکیفیت ناحیه انتقال ارتقاء یابد که باعث شده تا مقاومت فشاری بتن از مرز ۵۰ مگاپاسکال عبور کند در صورتیکه استفاده از تمام درصدهای جایگزینی خاکستربادی، نتوانست به نحو مطلوبی ناحیه انتقال را بهبود بخشده و باعث بهبود مقاومت فشاری بتن‌های طبیعی گردد.
- استفاده از ٪۵ و ٪۱۰ میکروسیلیس در بتن‌های ٪۲۵ و ٪۵۰ بازیافتی باعث شد تاحفرات موجود در سنگدانه‌های بازیافتی و ناحیه انتقال به نحو مطلوبی پرشده وکیفیت ناحیه انتقال ارتقاء یابد که باعث بهبود کیفیت بتن در سن ۲۸ روزه شده و توانسته به مقاومت مشخصه ۴۰ مگاپاسکال برسند، ولی در جایگزینی ٪۱۵ میکروسیلیس، فقط جایگزینی ٪۲۵ مصالح بازیافتی، مقاومت مشخصه ۴۰ مگاپاسکال را کسب کرد که می‌توان چنین استنباط کرد که احتمالاً به دلیل افزایش زیاد ذرات میکروسیلیس، برخی از ذرات این پوزولان در ماتریس سیمانی واکنش شیمیایی نداده و نتوانسته مقاومت فشاری را در حد مطلوب بهبود دهد.
- استفاده از تمام درصدهای جایگزینی خاکستربادی، نتوانست باعث بهبودی مقاومت فشاری گردد ودلیل احتمالی آن مشخصات شیمیایی پوزولان خاکستربادی بوده که نتوانسته به طور مطلوب با ژل‌های سیلیکاتی واکنش مناسبی بوجود بیاورد و باعث ارتقاء ملات سیمانی گردد.
- تمام بتن‌های حاوی میکروسیلیس در مقایسه با بتن‌های مشابه بدون پوزولان، از مقاومت کششی دونیم‌شدگی بیش‌تری برخوردار بودند که دلیل آن چگال‌تر بودن ملات سیمانی در بتن‌های حاوی میکروسیلیس در مقایسه با بتن‌های بدون پوزولان می‌باشد؛ در صورتیکه استفاده از تمام درصدهای جایگزینی خاکستربادی، باعث شد تا مقاومت کششی دونیم‌شدگی بتن‌ها از بتن‌های مشابه بدون پوزولان کمتر شود.
- تقریبا در هرمیزان جایگزینی از مصالح بازیافتی بنایی، استفاده از میکروسیلیس باعث افزایش ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن نسبت به حالت بدونپوزولان شده است؛ در صورتیکه استفاده از تمام درصدهای جایگزینی خاکستربادی، باعث شد تا ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن‌ها از بتن‌های مشابه بدون پوزولان کمتر شود.
- در مقایسه با مقاومت‌های فشاری و کششیدونیم‌شدن، افت در ضریب ارتجاعی استاتیکی بهمقدار بیش‌تری تحت تاثیر افزایش میزان سنگدانه‌های بازیافتی می‌باشد زیرا سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی از سختی پایین‌تری برخوردار بوده و به همین دلیل از شکل‌پذیری بیش‌تری نسبت به سنگدانه‌های معمولی برخوردار می‌باشند.
- بتن‌های طبیعی حاوی تمام درصدهای جایگزینی میکروسیلیس، از منظر سرعت انتشار امواج فراصوت در محدوده سطح کیفی عالی قرار گرفتند زیرا حفرات موجود درسنگدانه‌های بازیافتی و ناحیه انتقال به نحو مطلوبی پرشده و باعث گردیده که بتن چگالی به‌وجود بیاید در صورتیکه استفاده از خاکستربادی نتوانست باعث بهبود کیفیت بتن معمولی بشود و در محدوده خوب باقی ماند.
- در جایگزینی ٪۲۵ از درشت‌دانه‌های بازیافتی بنایی و در تمام درصدهای جایگزینی میکروسیلیس، بتن‌ها در محدوده سطح کیفی عالی قرار گرفتند، ولی با افزایش میزان جایگزینی سنگدانه‌ها به ٪۵۰، تمام بتن‌ها به محدوده کیفی خوب تنزل نمودند؛ در صورتیکه استفاده از تمام درصدهای جایگزینی خاکستربادی، باعث شد تا در جایگزینی ٪۲۵ و ٪۵۰، تمام بتن‌ها در محدوده خوب و مشکوک قرار گیرند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همکاری‌های خوبب چینگ پلنت شرکت فولاد خوزستان و آزمایشگاه مکانیک خاک استان خوزستان برای در اختیار قرار دادن مصالح، تجهیزات آزمایشگاهی و امکانات مورد نیاز تشکر می‌نمایند.

مراجع

[1] De brito, J, Saikia, N. Sustainable Development in Concrete Production. Part of the Green Energy and Technology book series, Recycled Aggregate in Concrete, 2012;p.p. 1-22.

[2] Huda, SB, Alam, SF. Mechanical Behavior Of Three Generations Of 100% Repeated Recycled Coarse Aggregate Concrete, Constr Build Mater., 2014; 65: 574–582.

[3] Yehia, S, Helal, K, Abusharkh, A, Zaher, A. Istaitiyeh, H. Strength and Durability Evaluation of Recycled Aggregate Concrete. Concr, Struct, Mater., 2015; 9 (2): 219–239.

[4] Hansen, TC. Recycling of Demolition and Masonry, RLLEM (The international union of testing and Research laboratories for materials and structure), Reports, 1992.

[5] Leite, MB. Evaluation of the mechanical properties of concrete produced with recycled aggregates from construction and demolition wastes. PhD Thesis, Brazil, Federal University of Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2001.

[6] Taylor, PC. Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State of the Practice Manual. National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University, 2007.

[7] Douglas, E, Bilodeau, A , Brandstetr, J. Alkali activated ground granulated blast-furnace slag concrete: Preliminary investigation, Cement and Concrete Research., 1991; 21: 101-108.

[8] Rao, A, Jha, K N, Misre, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. Resources, Conservation, Recycling. 2007; 50: 71-78.

[9] Kou, SC, Poon, CS, Chan, D. Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete. Materials and Structures. 2007; 41(7): 1191-1201.

[10] Dhir, RK, Kevin, A. Suitability and practicality of using coarse RCA in normal and high-strength concrete. 1st International Conference on Sustainable Construction, Waste Management, University of Bath, 2004.

[11] Suvash Chandra, P. Data on optimum recycle aggregate content in production of new structural concrete. 2017; 15: 987–992.

[12] Moghimi, M, Shafigh, P, Branjian, J, Omati, K. Experimental study of the effect of using micro-silica and super-plasticizer on mechanical properties of recycled concrete made from crushed concrete. Journal of Civil Engineering, 2010.

[13] Kou, SC, Poon, CS. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. Cement and Concrete Composites. 2013; 37: 12-19.

[14] Kou, SC, Poon, CS, Chan, D. Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. Journal of Materials in Civil Engineering. 2007; 19(9): 709-717.

[15] Sajedi, F, Jalilifar, H. Investigation on Mechanical Properties of Recycled Concrete Containing Natural Zeolite. International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS). 2017; 4 (3): 77-81.

[16] Tam, T, Vivian WY, Gao, XF, Chi, M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. Cement and concrete research. 2005; 35(6):1195-1203.

[17] Iranian Management Organization. Iranian Concrete Code (ICC). 6ed, 120, Tehran, Iran, 2003.

[18] ASTM C192 / C192M-16a. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken, 2016.

[19] ASTM C192 / C192M-16a. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. ASTM International, West Conshohocken, 2016.

[20] ASTM C469 / C469M-14. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression. ASTM International, West Conshohocken, 2014.

[21] ASTM C109/C109M-07. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2- in. or [50-mm] Cube Specimens). ASTM International, West Conshohocken, 2007.

[22] ASTM C496 / C496M-11. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, 2004.

[23] De Brito, J, Pereira, AS, Correia, JR. Mechanical behavior of non-structural concrete made with recycled heavy aggregate. Cem, Concr, Compos. 2005; 27:429-433.

[24] ASTM C597-16, Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete. ASTM International, West Conshohocken, 2016.

[25] Medina, C, Frías, M, Sánchez de Rojas, M. Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. Construction and Building Materials, 2012; 31: 112-118.

[26] Etxeberria, A, Miren, E, Vázquez, A, Marí, N X, Barra, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. Cement and concrete research. 2007; 37(5): 735-742.

[27] Silva, RV, De Brito, J, Dhir, RK. Tensile strength behavior of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials. 2015; 83: 108-118.