تحقیقات بتن
سال دوازدهم، شمارهٔ سوم
پائیز ۹۸
ص ۱۳۶ – ۱۲۱
تاریخ دریافت: ۹۷/۹/۲۱
تاریخ پذیرش: ۹۸/۲/۹

یادداشت پژوهشی

مطالعه آزمایشگاهی برخی خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی حاوی میکروسیلیس، خاکستربادی و زئولیت طبیعی

حسن جلیلی‌فر
دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
سیدفتح اله ساجدی*
دانشیار گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

چکیده

پژوهش حاضر به مطالعه تاثیر جایگزینی سطوح مختلف درشت‌دانه‌های بتنی بازیافت شده بر رفتار مکانیکی بتن‌های بازیافتی پرداخته است. در بتن‌های ساخته شده سنگدانه‌های طبیعی در سه سطح ٪۲۵، ٪۵۰ و ٪۱۰۰ با درشت‌دانه بتنی بازیافت شده جایگزین شده‌اند. جهت ارتقاء خواص مکانیکی این بتن‌ها، هر یک از پوزولان‌های میکروسیلیس، خاکستربادی و زئولیت طبیعی در سه سطح مختلف با سیمان جایگزین شده است. در مجموع ۳۶۰ نمونه بتنی مکعبی و استوانه‌ای در قالب ۴۰ نسبت مخلوط، ساخته شده و آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم‌شدن، تعیین ضریب ارتجاعی استاتیکی و تعیین سرعت انتشار امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه انجام گردید. نتایج نشان داد که بدون استفاده از مواد پوزولانی، تا سطح جایگزینی ٪۲۵ از درشت‌دانه‌های بازیافتی، مقاومت‌های فشاری و کششی بدون تغییر باقی می‌مانند؛ در حالی که در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌ها، مقاومت فشاری تا ٪۱۸ و مقاومت کششی تا ٪۲۳ افت کردند. استفاده از میکروسیلیس به ویژه در سطح جایگزینی ٪۱۰، منجر به عملکرد بسیار مناسب بتن‌های بازیافتی شد و باعث گردید تا مقاومت فشاری بتن تماماً بازیافتی ٪۱۷ از مقاومت فشاری بتن معمولی بیش‌تر شود. دو ماده دیگر پوزولانی استفاده شده نیز هر یک به نسبت کم‌تر و در بازه‌های جایگزینی محدودتری از جایگزینی مصالح بازیافتی، در بهبود خواص مکانیکی این بتن‌ها موثر واقع شدند.

واژه‌های کلیدی: **بتن بازیافتی، خواص مکانیکی، میکروسیلیس، خاکستربادی، زئولیت طبیعی.**

* نویسنده مسئول : f_sajedi@yahoo.com, sajedi@iauahvaz.ac.ir

۱- مقدمه

بی‌شک بر کسی پوشیده نیست که روند استخراج بیش از حد منابع طبیعی مورد نیاز تهیه بتن در آینده باعث می‌شود که امکان دسترسی به این منابع با محدودیت مواجه گردد. قطعا امکان کاهش دسترسی به سنگدانه‌های طبیعی با افزایش قیمت تمام‌شده بتن روبرو خواهد شد. گرچه ممکن است اندیشه برخی از پژوهشگران به دلیل دسترسی بسیار ساده و ارزان به سنگدانه‌های طبیعی در برخی مناطق، با موضوع استفاده از بتن‌های بازیافتی چندان قرابتی نداشته باشد، اما باید به مقوله استفاده از سنگدانه-های بازیافتی در تولید بتن‌های با کیفیت به صورت یک موضوع عمومی توجه کرد، چرا که دیر یا زود امکان دسترسی آسان و ارزان به این منابع از میان خواهد رفت. ترویج این نگاه که با تغییراتی در ساختار سنگدانه‌های بازیافتی و با رعایت برخی شرایط می‌توان به بتنی با کیفیت مطلوب دست یافت، می‌تواند در کنار تامین منافع زیست‌محیطی، باعث کاهش هزینه‌های ساخت گردد و امکان دست‌یابی به توسعه پایدار در صنعت ساخت بتن را مقدور سازد.

در حالی که آیین‌نامه‌های موجود در ایران در رابطه با استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی سخنی به میان نیاورده‌اند، بسیاری از آیین-نامه‌های معتبر موجود در دنیا محدوده معینی را برای استفاده از هر دسته از این سنگدانه‌ها بیان کرده‌اند [۴-۱]. اجماع نظر تمام مطالعات گذشته در زمینه استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی دال بر این امر است که با افزایش میزان جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، میزان مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. میزان این کاهش به نوع، اندازه و کیفیت سنگدانه‌ها وابسته می‌باشد. در این راستا در برخی مطالعات نشان داده شده است که برای سنگدانه‌های بازیافتی درشت‌دانه، جایگزینی حداکثر ٪۳۰ و برای ریزدانه‌های بازیافتی تا حداکثر ٪۲۰، مقاومت فشاری کاهش نمی‌یابد[۵]. اما رفته‌رفته با افزایش میزان سطح جایگزینی از مقاومت فشاری نیز کاسته خواهد شد[۸-۶]. هم‌چنین به طور میانگین برای بتن‌های بازیافتی با جایگزینی ٪۱۰۰ درشت‌دانه بازیافتی و یا ٪۵۰ از ریزدانه بازیافتی، بین ٪۲۰ تا ٪۳۰ کاهش مقاومت نسبت به بتن معمولی ثبت شده است[۹، ۶].

بسیاری از محققین در پژوهش‌های خود استفاده از مواد افزودنی جایگزین سیمان را مورد استفاده قرار دادند. کوو و همکارن[1] [۱۰] در مطالعه‌ای تاثیر به‌کارگیری میکروسیلیس را به میزان ٪۱۰ وزن مصالح سیمانی با افزایش مقادیر مختلف مصالح بازیافتی بررسی کردند و نشان دادند که در تمام مخلوط‌های بتنی، زمانی که ٪۱۰ میکروسیلیس افزوده می‌شود، مقاومت فشاری حدود ٪۱۰ نیز افزایش خواهد یافت. در برخی از تحقیقات، جایگزینی همزمان سرباره کوره‌آهنگدازی[2] و سنگدانه‌های بازیافتی جهت ساخت بتن بازیافتی نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰، ۱۱]. در برخی از حالات، استفاده از این مواد اگر چه منجر به کاهش مقاومت فشاری تا سقف ٪۳۰ نسبت به بتن مرجع در سن ۲۸ روزه شده است، ولی در دراز مدت این کاهش مقاومت با نرخ افزایش ٪۶۹ در بازه ۹۱ روزه جبران شده است. این تحقیقات نشان دادند که تاثیر افزودن سرباره کوره‌آهنگدازی بر بتن‌های بازیافتی مانند تاثیری است که بر بتن‌های معمولی دارد.

در برخی تحقیقات نیز استفاده از سایر موارد پوزولانی مانند متاکائولین و پودر سنگ نیز مورد مطالعه قرار گرفتند [۱۲-۱۰]. نتایج حاصل از این مطالعات نیز مبین آن است که افت مقاومت مورد انتظار، ناشی از افزایش میزان سنگدانه‌های بازیافتی تحت تاثیر میزان تغییرات این مواد پوزولانی قرار نخواهد گرفت. به طور کلی، بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با بتن-های معمولی، از مقاومت کششی کم‌تری برخوردار می‌باشند و این تفاوت وابسته به عوامل متعددی ناشی از سنگدانه‌های بازیافتی می-باشد. اکثر قریب به اتفاق مطالعات به عمل آمده نشان دادند که با افزایش میزان جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، از میزان مقاومت کششی بین ٪۲۰ تا ٪۴۰ کاسته می‌شود[۱۴، ۱۳، ۱۰].

این مقاله تلاش می‌کند تا تاثیرسطوح مختلف جایگزینی سنگدانه-های درشت بتنی بازیافتی را مورد بررسی قرار دهد. به همین جهت پوزولان‌های میکروسیلیس، خاکستربادی و زئولیت طبیعی، هر یک در سه سطح جایگزینی به بتن‌های بازیافتی افزوده شدند و خواص مکانیکی هر یک از این بتن‌ها بدون حضور و با حضور پوزولان مورد شناسایی قرار گرفته و با خواص بتن معمولی مقایسه شدند. برای شناخت خواص بتن‌های بازیافتی، آزمایش‌های مقاومت

[1] Kou et al.
[2] Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBFS)

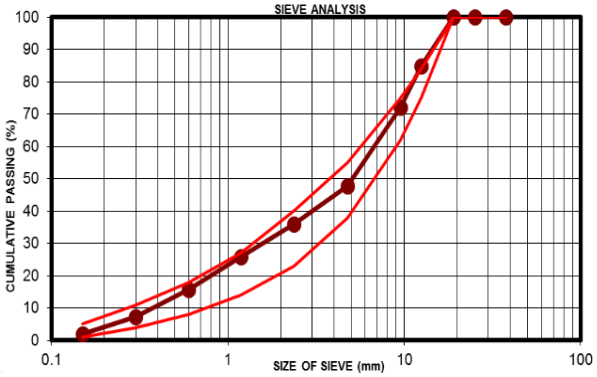
فشاری، مقاومت کششی دونیم‌شدن، ضریب ارتجاعی استاتیکی و سرعت امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه مورد بررسی قرار گرفتند.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

۲-۱-۱- سنگدانه‌ها

سنگدانه‌های طبیعی استفاده شده در این تحقیق شامل ریزدانه طبیعی با حداکثر اندازه ۴ میلی‌متر و درشت‌دانه طبیعی شکسته با حداکثر قطر ۱۹ میلی‌متر با میزان جذب آب ٪۳/۲۳ وزنی و چگالی خشک شده در کوره به مقدار ۲/۵۷ تن در مترمکعب می‌باشند. درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی شامل قطعات شکسته شده شمع‌های بتنی و ساختمان‌های تخریب شده در اهواز بوده که دارای حداکثر قطر اسمی ۱۹ میلی‌متر، میزان جذب آب ٪۶/۴۴ وزنی و چگالی خشک شده در کوره به مقدار ۲/۱۹ تن در مترمکعب می‌باشند. مقدار ملات سیمانی چسبیده به درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی بزرگتر از ۹/۵ میلی‌متر به طور متوسط معادل ٪۵۵ و برای درشت‌دانه‌های کوچکتر از ۹/۵ میلی‌متر به طور متوسط معادل ٪۶۰ می‌باشد. میزان توزیع سنگدانه‌ها در مخلوط به نحوی است که ٪۴۸ از سنگدانه‌ها در محدوده درشت‌دانه و ٪۵۲ از آن‌ها در محدوده ریزدانه قرار گرفته‌اند. شکل ۱ بیانگر منحنی دانه‌بندی ترکیب مصالح سنگی ریزدانه و درشت‌دانه می‌باشد.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی در نسبت مخلوط بتن معمولی

۲-۱-۲- سیمان و مواد پوزولانی

سیمان استفاده شده در این تحقیق سیمان نوع ۲ کارخانه سیمان خوزستان می‌باشد. پوزولان‌های استفاده شده شامل میکروسیلیس، خاکستربادی رده F و زئولیت طبیعی می‌باشند. نتایج تجزیه شیمیایی هر یک از مواد سیمانی فوق در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۱-۳- آب و مواد افزودنی

جهت ساخت مخلوط‌های بتنی و همین طور عمل‌آوری نمونه‌ها از آب شرب اهواز استفاده شده است. جهت دست‌یابی به کارایی مناسب به ویژه در بتن‌های بازیافتی از فوق روان‌کننده پایه پلی-کربکسیلات با چگالی g/cm^3 ۱/۱±۰/۰۲ و به میزان ٪۱ وزن مصالح سیمانی استفاده شد.

۲-۲- معرفی نسبت مخلوط‌های تحقیق

جهت مطالعه مشخصات مکانیکی بتن‌های بازیافتی، ۴۰ نسبت مخلوط با درصدهای مختلف جایگزینی درشت‌دانه بازیافتی و پوزولان‌های مختلف ساخته شدند. در تمامی طرح‌ها نسبت آب به سیمان معادل ۰/۳۶ و مقدار مواد سیمانی ۴۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب ثابت نگه داشته شده است. فرآیند اختلاط مصالح تحت عنوان روش سه مرحله‌ای و براساس روش اختلاط دومرحله‌ای ارائه شده توسط تام و همکاران[1] [۱۵] می‌باشد. شرح کامل روش اختلاط سه مرحله‌ای در مقالات پیشین نویسندگان ارائه شده است [۱۴]. جزئیات نسبت مخلوط مورد استفاده شده در تحقیق در جدول ۲ ارائه گردیده است. قابل ذکر است نمایه‌های CC، NP و RC به ترتیب معرف بتن معمولی، بتن بدون پوزولان و بتن بازیافتی می‌باشد. جهت هر یک از پوزولان‌های میکروسیلیس، خاکستربادی و زئولیت نیز به ترتیب نمایه‌های SF، FA و Z تعیین شده و عدد مندرج شده پس از هر یک از نمایه‌ها نیز بیانگر میزان درصد جایگزینی آن پوزولان با سیمان بر حسب وزن سیمان می‌باشد. لازم به ذکر است مطابق برنامه تحقیق، علاوه بر جایگزین کردن درشت‌دانه‌های طبیعی با درشت‌دانه‌های بازیافتی در سه سطح ٪۲۵، ٪۵۰ و ٪۱۰۰ بر مبنای وزن سنگدانه‌های طبیعی، مواد پوزولانی نیز شامل میکروسیلیس در سه سطح ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ به ترتیب به میزان ۲۱، ۴۲ و ۶۳ کیلوگرم، خاکستربادی در سه سطح ٪۱۵، ٪۲۵ و ٪۳۵ به ترتیب به میزان ۶۳، ۱۰۵ و ۱۴۷ کیلوگرم و زئولیت طبیعی نیز در سه سطح ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰ به ترتیب به میزان ۴۲، ۸۴ و ۱۲۶ کیلوگرم با سیمان جایگزین شدند.

[1] Tam et al.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی مواد استفاده شده در تحقیق

مواد سیمانی	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	LOI
سیمان	۲۱/۲۸	۳/۷	۶/۱	۶۴/۳۴	۲/۱	۲/۱۳	۲/۲
زئولیت طبیعی	۶۸	۱/۵	۱۱/۵	۲/۵	–	–	۱۲/۲
میکروسیلیس	۹۴/۷۳	۰/۸۷	۱/۲۳	۰/۴۹	۰/۹۷	۰/۱	–
خاکستربادی	۵۶/۷	۵/۳	۲۸/۲	۲/۸	۵/۲	۰/۶۸	۳/۷

جدول ۲- جزئیات نسبت مخلوط‌های مورد استفاده در تحقیق

نمایه	سیمان (kg)	آب (lit)	فوق‌روان کننده (lit)	ماسه (kg)	شن طبیعی (kg)	شن بازیافتی (kg)
CC	۴۲۰	۱۵۰	۴/۲	۸۸۸	۸۱۵	۰
RC25	۴۲۰	۱۵۰	۴/۲	۸۸۸	۶۱۱	۲۰۴
RC50	۴۲۰	۱۵۰	۴/۲	۸۸۸	۴۰۷/۵	۴۰۷/۵
RC100	۴۲۰	۱۵۰	۴/۲	۸۸۸	۰	۸۱۵

۲-۳- نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها

نسبت مخلوط پیش‌بینی شده بر مبنای طرح ملی مخلوط بتن ایران [۱۶] و برای دست‌یابی به بتن معمولی با مقاومت مشخصه در سن ۲۸ روزه ۴۰ مگاپاسکال بوده است. جهت بهبود سطح کیفی خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی از پوزولان میکروسیلیس در سطوح جایگزینی ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵، خاکستربادی در سطوح ٪۱۵، ٪۲۵ و ٪۳۵ و زئولیت طبیعی در سطوح ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰ استفاده شد. در مجموع ۳۶۰ نمونه بتنی در دو دسته نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای ساخته شدند. پس از ساخت، تمامی نمونه‌های در قالب در شرایط آزمایشگاه قرار داده شدند و پس از گذشت ۲۴ ساعت اقدام به بازنمودن قالب‌ها شده و تا سررسیدهای تعیین شده، نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C192 [۱۷] در حوضچه آب با دمای ۲۵±۲ °C عمل‌آوری شدند.

آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه در مجموع بر روی ۱۲۰ نمونه مکعبی استاندارد براساس استانداردASTM C109 [۱۸]، آزمایش تعیین ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه در مجموع بر روی ۱۲۰ نمونه استوانه‌ای استاندارد براساس استاندارد ASTM C469 [۱۹]، آزمایش تعیین مقاومت کششی دونیم-شدن در سن ۲۸ روزه در مجموع بر روی ۱۲۰ نمونه استوانه‌ای استاندارد براساس استاندارد ASTM C496 [۲۰] و هم‌چنین قبل از شکستن نمونه‌های مکعبی در سن ۲۸ روزه، آزمایش تعیین سرعت امواج فراصوت براساس استانداردASTM C597 [۲۱] برروی ۱۲۰ نمونه استاندارد انجام گردید. نحوه انجام آزمایش‌های صورت گرفته روی نمونه‌ها در شکل ۲ ارائه شده است.

شکل ۲- نحوه انجام آزمایش‌ها روی نمونه‌ها

۳- نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آن‌ها

۳-۱- مشاهدات پس از شکست نمونه‌ها

در ساخت بتن‌های بازیافتی با استفاده از درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی، محققین همواره با سه حالت از سنگدانه‌های بازیافتی مواجه خواهند بود. حالت اول شامل درشت‌دانه بازیافتی که مرکب از درشت‌دانه طبیعی به همراه ملات سیمانی چسبیده شده به آن می‌باشد (حالت الف در شکل ۳). حالت دوم شامل درشت‌دانه بازیافتی حاصل از ترکیب حداقل دو یا چند سنگدانه کوچک طبیعی بوده که توسط ملات سیمانی قدیمی به یکدیگر چسبیده می‌باشد (حالت ب در شکل ۳) و حالت سوم درشت‌دانه‌های بتنی بوده که تمام اجزای آن را ملات سیمانی قدیمی تشکیل داده است (حالت ج در شکل ۳). از آنجایی که هر یک از این سنگدانه‌ها از مقاومت متفاوتی نسبت به یکدیگر برخوردار می‌باشند، لذا لازم است تا در بررسی رفتار شکست نمونه‌های بتنی، تحلیل چگونگی شکست و خرد شدن نمونه، متاثر از ویژگی‌های این سنگدانه‌ها صورت پذیرد.

(الف) درشت‌دانه بازیافتی حاوی درشت‌دانه طبیعی و ملات چسبیده

(ب) درشت‌دانه بازیافتی مرکب از دو یا چند سنگدانه طبیعی کوچک

(ج) درشت‌دانه بازیافتی حاصل از ملات سیمانی قدیمی

شکل ۳- حالت‌های مختلف تشکیل سنگدانه‌های بتنی بازیافتی

پس از شکست هر یک از نمونه‌های بتنی به دلیل ساختار متفاوت سنگدانه‌های مصرفی و نیز درصد جایگزینی متفاوت هر یک از سنگدانه‌های بازیافتی در تولید بتن‌ها، روند ترک‌خوردگی و نحوه توزیع حفرات به شکل متفاوتی مشاهده گردید. شکل ۴ نشان‌دهنده ساختار درونی بتن معمولی می‌باشد. بررسی سطح مقطع این بتن نشان می‌دهد که میزان حفرات هوا کم و اندازه آن‌ها کوچک می‌باشند. از سوی دیگر مشهود بودن وقوع و گسترش ترک در مرز مشترک میان سنگدانه‌ها و ملات سیمانی نشان می‌دهد که ملات سیمانی ساخته شده در نسبت مخلوط ارائه شده از مقاومت بالایی برخوردار بوده و توانسته به میزان زیادی در برابر بار وارده مقاومت نماید.

شکل ۴- وضعیت و نحوه وقوع ترک و توزیع حفرات در بتن معمولی

تغییر محسوس در جایگزینی ٪۲۵ از سنگدانه‌های بازیافتی در بافت مقطع بتنی، ایجاد و توزیع نامتقارن حفرات به نسبت زیاد در مقطع بتنی است. شکل ۵ نشانگر این است که میزان حفرات ایجاد شده در مقایسه با بتن معمولی به میزان زیادی در حال افزایش است و نکته قابل تامل نیز تمرکز وقوع این حفرات در اطراف سنگدانه‌های

بازیافتی می‌باشد. البته با توجه به ذات سنگدانه‌های بتنی بازیافتی که دارای اشکال مختلف ملات‌های چسبیده می‌باشند، وجود حفرات ذاتی در سنگدانه و نیز ورود هوای بیش‌تر در اطراف آن‌ها حین انجام اختلاط، امری قابل پیش‌بینی می‌باشد. با این حال باید به این نکته توجه داشت که علی‌رغم وجود حفرات در اطراف سنگدانه‌های بازیافتی، وقوع ترک الزاماً از این نقاط روی نداده و این شکل نشان می‌دهد که گسترش ترک در بتن ٪۲۵ بازیافتی از ناحیه انتقال و حتی از میانه سنگدانه طبیعی نیز قابل وقوع می‌باشد.

شکل ۵- وضعیت و نحوه وقوع ترک و توزیع حفرات در بتن ٪۲۵ بازیافتی

با افزایش مقادیر جایگزینی سنگدانه‌های بتنی بازیافتی به ٪۵۰، نسبت افزایش مقادیر حفرات موجود در مقطع بتنی به میزان چشم-گیری افزایش یافت. شکل ۶ نشان می‌دهد که نه تنها مقدار این حفرات در مقایسه با سطوح کم‌تر جایگزینی مصالح بازیافتی افزایش یافته است، بلکه به دلیل افزایش میزان درصد استفاده از درشت‌دانه بازیافتی، احتمال توزیع این ذرات در مقطع بتن به شکل گسترده و یکنواخت‌تر نیز بیش‌تر شده است. با این حال با دقت بیش‌تر در موقعیت حفرات می‌توان دریافت که هم‌چنان تمرکز اصلی حفرات در اطراف سنگدانه‌های بازیافتی می‌باشد. نکته چشم‌گیر موجود در این شکل امتداد یافتن ترک از ناحیه انتقال سنگدانه طبیعی و برخورد آن با سنگدانه بازیافتی نوع سوم که متشکل از ملات و اندک ریزدانه‌های موجود در آن است، می باشد. نفوذ امتداد ترک در این سنگدانه نشان می‌دهد که این نوع از سنگدانه‌های بازیافتی از مقاومت کم‌تری برخوردار می‌باشند، چرا که در غیر اینصورت ترک باید از موضع ضعیف‌تری مانند ناحیه انتقال جدید ایجاد شده حول آن عبور کند و مانع از متلاشی شدن سنگدانه بازیافتی گردد. البته باید به این نکته نیز توجه داشت که به دلیل ساختار خشن‌تر اطراف سنگدانه‌های بازیافتی، امکان ایجاد ناحیه انتقال جدید با مقاومت پیوستگی بیش‌تر نیز وجود دارد.

شکل ۶- وضعیت و نحوه وقوع ترک و توزیع حفرات در بتن ٪۵۰ بازیافتی

در بتن‌های تماماً بازیافتی نکته بسیار قابل توجه افزایش اندازه حفرات در مقطع بتنی و نیز پدیدار شدن حفرات خوشه‌ای شکل می‌باشد. این مسأله به میزان زیادی در کاهش مقاومت فشاری بتن-های تماماً بازیافتی تاثیر دارد و نتایج کسب شده در بخش‌های بعدی نیز تاییدکننده این ادعا می‌باشند. شکل ۷ نشانگر شرایط عنوان شده می‌باشد.

شکل ۷- وضعیت و نحوه وقوع ترک و توزیع حفرات در بتن ٪۱۰۰ بازیافتی

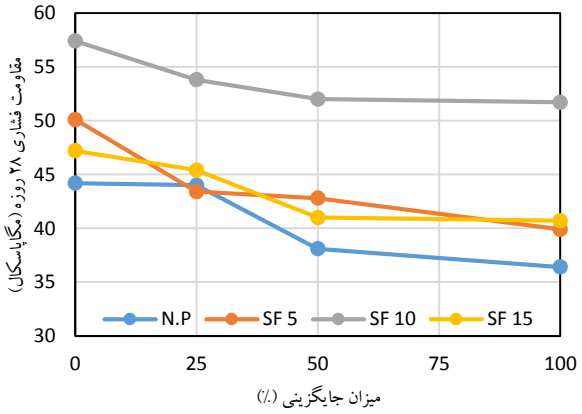
۳-۲- مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه

جدول ۳ و نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان‌دهنده مقاومت فشاری بتن‌های معمولی و بازیافتی دارای پوزولان‌های مختلف می‌باشند. در بتن‌های بدون جایگزینی مواد پوزولانی، تا سقف جایگزینی ٪۲۵ درشت‌دانه بازیافتی مقاومت فشاری بدون تغییر باقی مانده است و جایگزینی ٪۵۰ و ٪۱۰۰ درشت‌دانه باعث شد تا مقاومت فشاری از مقاومت هدف ۴۰ مگاپاسکال کم‌تر گردد و با ٪۱۴ و ٪۱۸ کاهش نسبت به بتن معمولی به ترتیب به ۳۸/۱ و ۳۶/۴ مگاپاسکال برسند.

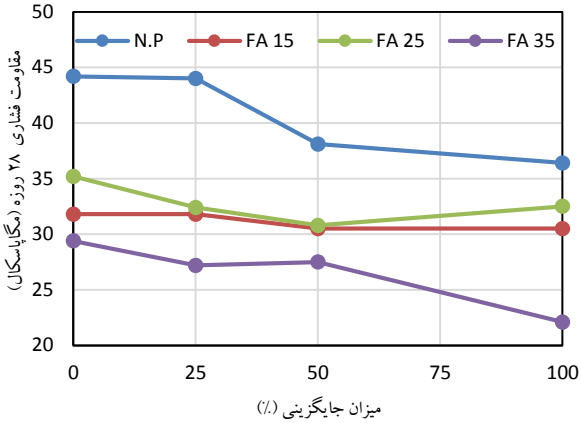
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کم‌ترین میزان افت مقاومت در اثر جایگزینی کامل درشت‌دانه بازیافتی در بتن‌های حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس رخ داده است. بیش‌ترین مقاومت کسب شده بتن معمولی با حضور ٪۱۰ میکروسیلیس روی داده و بیش‌ترین مقاومت کسب شده بتن‌های بازیافتی در بتن ٪۲۵ بازیافتی با استفاده ٪۱۰ از میکروسیلیس است. تمامی سطوح جایگزینی درشت‌دانه بازیافتی در اثر استفاده از هر یک از سطوح میکروسیلیس در بازه ۲۸ روزه مقاومت فشاری هدف (۴۰ مگاپاسکال) را کسب کردند. در شکل ۹ مشاهده می‌شود که در تمام سطوح جایگزینی درشت‌دانه بازیافتی، مقاومت فشاری بتن بدون پوزولان از بتن‌های حاوی خاکستربادی بیش‌تر شده است. این امر نشان‌دهنده عدم توانایی بهبودبخشی مقاومت در بازه ۲۸ روزه توسط این پوزولان است. در بتن معمولی افت مقاومت ناشی از افزایش ٪۳۵ خاکستربادی معادل ٪۳۳ گردید؛ در حالی که در بتن تماماً بازیافتی این افت تا ٪۳۹ نیز رسید. بیش‌ترین مقاومت فشاری در بازه جایگزینی ٪۱۵ تا ٪۳۵ خاکستربادی برای بتن‌های حاوی ٪۲۵ خاکستربادی روی داد. بیش‌ترین نتایج کسب شده پس از بتن معمولی متعلق به بتن تماماً بازیافتی و بتن ٪۲۵ بازیافتی می‌باشد. در دسته بتن‌های حاوی زئولیت طبیعی، فقط جایگزینی ٪۲۵ مصالح بازیافتی در حضور استفاده از ٪۱۰ زئولیت طبیعی توانست تا مقاومت مشخصه هدف را تامین کند. با این حال بیش‌ترین میزان مقاومت‌های کسب شده و نیز کم‌ترین میزان کاهش مقاومت در اثر افزایش جایگزینی درشت‌دانه بازیافتی در سطح جایگزینی ٪۱۰ زئولیت طبیعی روی داد.

جدول ۳- مقاومت فشاری بتن‌های معمولی و بازیافتی (MPa)

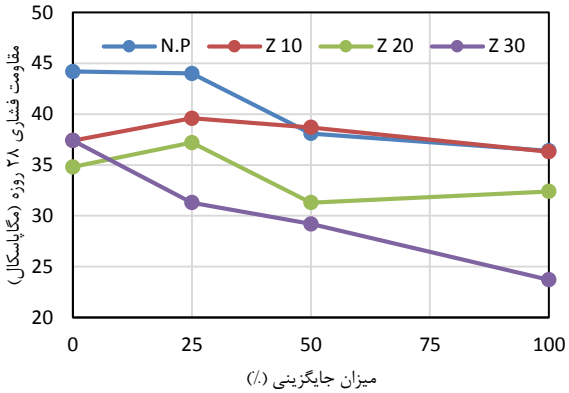
نسبت مخلوط	میزان جایگزینی سنگدانه‌ها (٪)			
	۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
CC	۴۴/۲	۴۴	۳۸/۱	۳۶/۴
SF5	۵۰/۱	۴۳/۴	۴۲/۸	۳۹/۹
SF10	۵۷/۴	۵۳/۸	۵۲/۰	۵۱/۷
SF15	۴۷/۲	۴۵/۴	۴۱/۰	۴۰/۷
FA15	۳۱/۸	۳۱/۸	۳۰/۵	۳۰/۵
FA25	۳۵/۲	۳۲/۴	۳۰/۸	۳۲/۵
FA35	۲۹/۴	۲۷/۲	۲۷/۵	۲۲/۱
Z10	۳۷/۴	۳۹/۶	۳۸/۷	۳۶/۳
Z20	۳۴/۸	۳۷/۲	۳۱/۳	۳۲/۴
Z30	۳۷/۴	۳۱/۳	۲۹/۲	۲۳/۷



شکل ۸- تغییرات مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه بر حسب درصد جایگزینی سنگدانه‌ها برای بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی میکروسیلیس



شکل ۹- تغییرات مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه بر حسب درصد جایگزینی سنگدانه‌ها برای بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی خاکستربادی



شکل ۱۰- تغییرات مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه بر حسب درصد جایگزینی سنگدانه‌ها برای بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی زئولیت طبیعی

۳-۳- مقاومت کششی دونیم‌شدن در سن ۲۸ روزه

جدول ۴ و نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نشان‌دهنده مقاومت کششی در سن ۲۸ روزه بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی پوزولان‌های مختلف می‌باشند. در بتن بدون پوزولان، جایگزینی کامل درشت‌دانه بازیافتی باعث افت ٪۲۴ مقاومت کششی نسبت به بتن معمولی شد؛ در حالی که متوسط کاهش مقاومت در اثر جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی در بتن‌های حاوی میکروسیلیس حدود ٪۲۰ است. بر خلاف رفتار تمام پوزولان‌های استفاده شده در این پژوهش، سطح جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس باعث شد تا حتی جایگزینی ٪۲۵ و ٪۵۰ درشت‌دانه بازیافتی با مقاومت کششی دونیم‌شدن بیش‌تری نسبت به بتن معمولی برخوردار شوند. نتایج کسب شده در هر سطح جایگزینی مصالح بازیافتی نشان می‌دهد که بجز سطح جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس، سایر سطوح جایگزینی میکروسیلیس تاثیر محسوسی در بهبود مقاومت کششی دونیم‌شدن نسبت به بتن‌های مشابه بدون پوزولان ندارند و در موارد بیش‌تری نیز با کاهش مقاومت روبرو شدند.

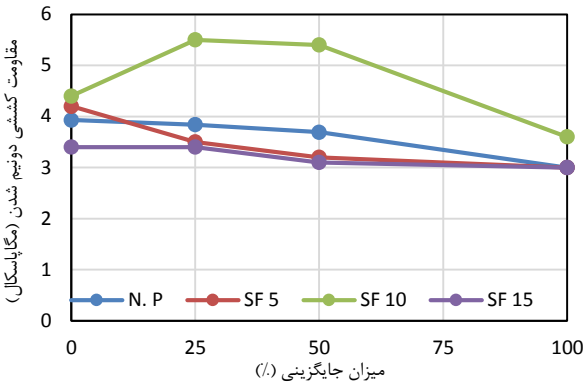
در شکل ۱۲ نیز فاصله معنی‌دار نتایج مقاومتی بتن‌های بدون پوزولان در هر سطح جایگزینی از سنگدانه‌ها از یک سو و قرابت نتایج کسب شده برای بتن‌های حاوی خاکستربادی در هر سطح جایگزینی از سنگدانه‌ها، دو نتیجه را نشان می‌دهد. نتیجه اول اینکه استفاده از خاکستربادی به عنوان پوزولان باعث شده تا افت شدیدی در مقاومت کششی دونیم‌شدن بتن‌های معمولی و بازیافتی ایجاد شود. متوسط این افت مقاومت معادل ٪۳۸ می‌باشد. نتیجه دوم بیانگر آن است که اگر چه مقاومت کششی دونیم‌شدن بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۲۵ خاکستربادی نسبت به سایر بتن‌های بازیافتی در سطوح جایگزینی ٪۱۵ و ٪۳۵ خاکستربادی اندکی بیش‌تر می‌باشند، ولی در عمل در هر سطح جایگزینی درشت‌دانه بازیافتی تغییرات مقاومت کششی دونیم‌شدن تحت تاثیر تغییرات میزان خاکستربادی نمی‌باشد.

جدول ۴- مقاومت کششی دونیم شدن بتن‌های معمولی و بازیافتی (MPa)

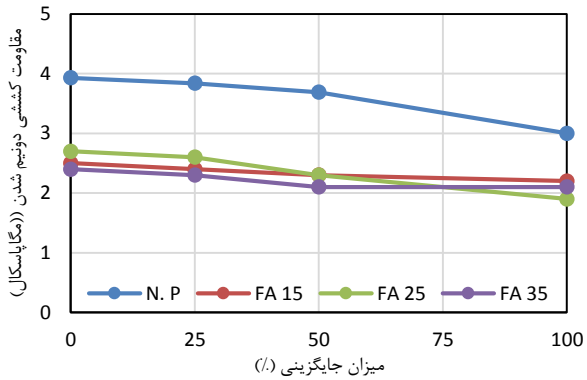
نسبت مخلوط	میزان جایگزینی سنگدانه‌ها (٪)			
	۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
CC	۳/۹	۳/۸	۳/۷	۳/۰
SF5	۴/۲	۳/۵	۳/۲	۳/۰
SF10	۴/۴	۵/۵	۵/۴	۳/۶
SF15	۳/۴	۳/۴	۳/۱	۳/۰
FA15	۲/۵	۲/۴	۲/۳	۲/۲
FA25	۲/۷	۲/۶	۲/۳	۱/۹
FA35	۲/۴	۲/۳	۲/۱	۲/۱
Z10	۳/۴	۳/۴	۳/۰	۲/۷
Z20	۳/۲	۲/۷	۲/۶	۲/۵
Z30	۲/۵	۲/۷	۲/۴	۲/۳

در رابطه با زئولیت طبیعی نیز رفتاری میان رفتار خاکستربادی و میکروسیلیس روی داد. به این نحو که در سطح جایگزینی ٪۱۰ زئولیت طبیعی، متوسط افت مقاومت کششی دونیم‌شدن در سطوح مختلف جایگزینی درشت‌دانه بازیافتی معادل ٪۱۳ می‌باشد؛ در حالی که جایگزینی‌های ٪۲۰ و ٪۳۰ از این پوزولان باعث افت زیادتری

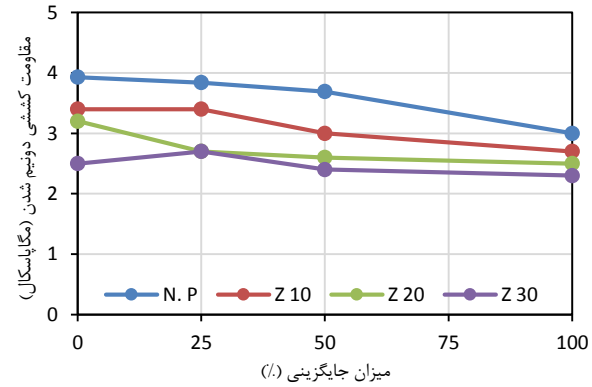
در مقاومت کششی دونیم‌شدن شدند. در میان تمام بتن‌های بازیافتی نیز بتن‌های دارای ٪۲۵ درشت‌دانه حاوی ٪۱۰ زئولیت مقاومت مطلوب‌تری را نسبت به سایر بتن‌های کسب کردند.



شکل ۱۱- تغییرات مقاومت کششی دونیم‌شدن در سن ۲۸ روزه بر حسب درصد جایگزینی سنگدانه‌ها برای بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی میکروسیلیس



شکل ۱۲- تغییرات مقاومت کششی دونیم‌شدن در سن ۲۸ روزه بر حسب درصد جایگزینی سنگدانه‌ها برای بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی خاکستربادی



شکل ۱۳- تغییرات مقاومت کششی دونیم‌شدن در سن ۲۸ روزه بر حسب درصد جایگزینی سنگدانه‌ها برای بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی زئولیت

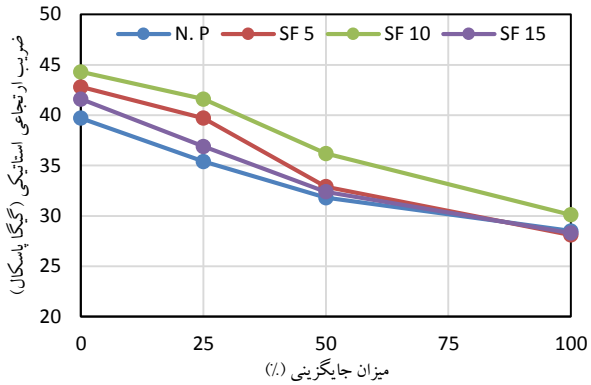
۳-٤- ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه

جدول ۵ و نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نشان‌دهنده ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن های معمولی و بازیافتی حاوی پوزولان‌های مختلف می‌باشند. به طور کلی تفاوت نمودارهای فوق نسبت به نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های ۸ تا ۱۳ نشان می‌دهد که افزایش جایگزینی مصالح بازیافتی باعث شده تا ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن‌های بازیافتی در مقایسه با مقاومت‌های فشاری و کششی از افت محسوس‌تری برخوردار گردد.

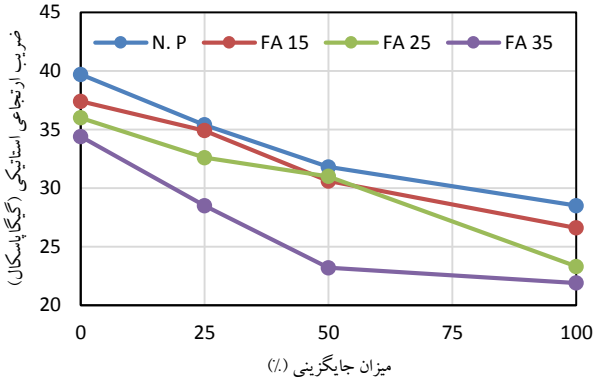
تاثیر استفاده از میکروسیلیس نشان داد که در هر سطح جایگزینی مصالح بازیافتی، استفاده از این ماده پوزولانی باعث افزایش ضریب ارتجاعی استاتیکی نسبت به حالت بدون پوزولان می‌شود. جایگزینی کامل درشت‌دانه بازیافتی باعث شد تا بتن‌های بدون پوزولان با ٪۲۸ کاهش ضریب ارتجاعی استاتیکی مواجه شوند، در حالی که استفاده از میکروسیلیس باعث گردید تا در اثر جایگزینی کامل مصالح بازیافتی ضریب ارتجاعی استاتیکی با افت شدیدتری مواجه شود. متوسط این کاهش ٪۳۳ ثبت گردید. سطح مطلوب جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس در بتن معمولی به نحوی است که در مقایسه با بتن معمولی بدون پوزولان ٪۱۲ رشد و در بتن‌های ٪۲۵، ٪۵۰ و ٪۱۰۰ بازیافتی در مقایسه با بتن بازیافتی مشابه بدون پوزولان به ترتیب ٪۱۸، ٪۱۴ و ٪۶ رشد نشان داد.

جدول ۵- ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن‌های معمولی و بازیافتی (GPa)

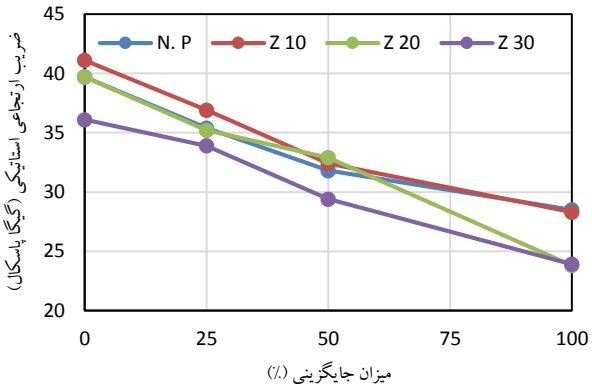
نسبت مخلوط	میزان جایگزینی سنگدانه‌ها (٪)			
	۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
CC	۳۹/۷	۳۵/۴	۳۱/۸	۲۸/۵
SF5	۴۲/۸	۳۹/۷	۳۲/۹	۲۸/۱
SF10	۴۴/۳	۴۱/۶	۳۶/۲	۳۰/۱
SF15	۴۱/۶	۳۶/۹	۳۲/۴	۲۸/۳
FA15	۳۷/۴	۳۴/۹	۳۰/۶	۲۶/۶
FA25	۳۶/۰	۳۲/۶	۳۱/۰	۲۳/۳
FA35	۳۴/۴	۲۸/۵	۲۳/۲	۲۱/۹
Z10	۴۱/۱	۳۶/۹	۳۲/۴	۲۸/۳
Z20	۳۹/۷	۳۵/۲	۳۲/۹	۲۳/۸
Z30	۳۶/۱	۳۳/۹	۲۹/۴	۲۳/۹



شکل ۱۴- تغییرات ضریب ارتجاعی در سن ۲۸ روزه بر حسب درصد جایگزینی سنگدانه‌ها برای بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی میکروسیلیس



شکل ۱۵- تغییرات ضریب ارتجاعی در سن ۲۸ روزه بر حسب درصد جایگزینی سنگدانه‌ها برای بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی خاکستربادی



شکل ۱۶- تغییرات ضریب ارتجاعی ادر سن ۲۸ روزه بر حسب درصد جایگزینی سنگدانه‌ها برای بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی زئولیت طبیعی

برخلاف بتن‌های حاوی میکروسیلیس، ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن‌های حاوی خاکستربادی در هر سطح، از ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن بدون پوزولان کم‌تر می‌باشد. نتایج شکل ۱۵ نشان داد که در هر سطح جایگزینی مصالح بازیافتی، هر چه میزان خاکستربادی افزایش یابد، از مقدار ضریب ارتجاعی استاتیکی کاسته می‌شود. بازه این تغییرات برای بتن معمولی ٪۱۳ بوده و برای بتن‌های بازیافتی بین ٪۱۹ تا ٪۲۷ متغیّر می‌باشد. میزان افزایش افت ضریب ارتجاعی استاتیکی در بتن‌های حاوی خاکستربادی در اثر افزایش جایگزینی مصالح بازیافتی نیز مانند بتن‌های حاوی میکروسیلیس می‌باشد و متوسط این کاهش در ضریب ارتجاعی استاتیکی معادل ٪۳۳ گردیده است.

تاثیر رفتار میانه زئولیت طبیعی بر ضریب ارتجاعی استاتیکی به شکلی است که در سطح جایگزینی ٪۱۰ از این پوزولان، در اکثر سطوح جایگزینی مصالح بازیافتی باعث بهبود ضریب ارتجاعی استاتیکی نسبت به بتن مشابه بدون پوزولان شد؛ این در حالی است که در سطح جایگزینی ٪۲۰ زئولیت تا مرز ٪۵۰ جایگزینی مصالح بازیافتی نیز هم‌چنان ضریب ارتجاعی استاتیکی بالاتری نسبت به بتن مشابه بدون پوزولان مشاهده شد. مانند پوزولان‌های میکروسیلیس و خاکستربادی مصرفی در این پژوهش، مصرف زئولیت طبیعی نیز باعث شد تا روند افت ضریب ارتجاعی استاتیکی در اثر افزایش جایگزینی مصالح بازیافتی با سرعت بیش‌تری مواجه گردد و متوسط این افت به ٪۳۵ نیز برسد.

۳-۵- سرعت انتشار امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه

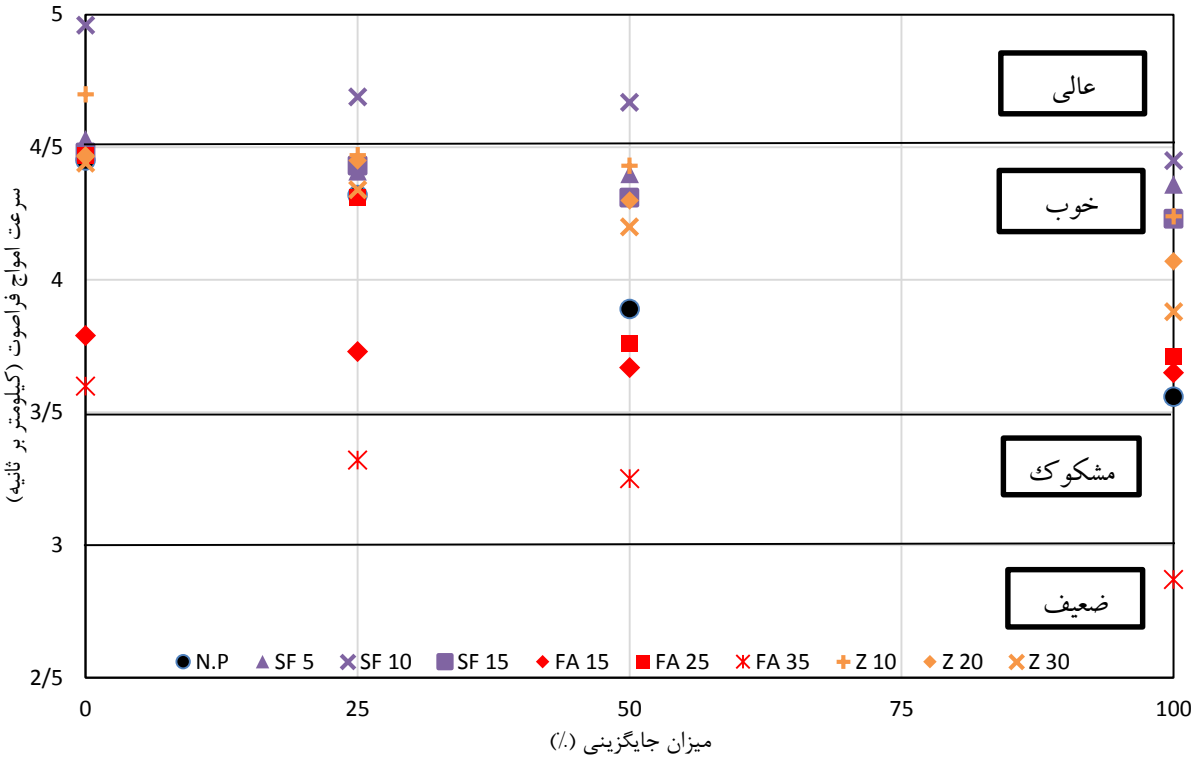
در جدول ۶ و شکل ۱۷ نتایج سرعت انتشار امواج فراصوت روی نمونه های مکعبی استاندارد ارائه شده است. هر عدد بیانگر متوسط سه نمونه مکعبی می‌باشد. حدود تعریف شده روی نمودار، معرف بازه‌های تعیین کیفیت بتن‌ها براساس یافته‌های وایتهورس[1] [۲۲] می‌باشند. براساس این نمودار مشاهده می‌شود که علاوه بر بتن معمولی حاوی ٪۵ میکروسیلیس، استفاده از ٪۱۰ میکروسیلیس باعث شده تا علاوه بر بتن معمولی، بتن‌های ٪۲۵ و ٪۵۰ بازیافتی نیز در محدوده کیفی عالی قرار گیرند. این در حالی است که عدم استفاده از میکروسیلیس در بتن معمولی، باعث شد تا این بتن در محدوده مرز مشترک کیفیت عالی و خوب قرار گیرد و با افزایش میزان جایگزینی به‌تدریج کیفیت بتن کاهش یابد، به نحوی که در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی، بتن به سطح کیفی مشکوک نزدیک شود.

[1] Whitehurst

جدول ۶- سرعت انتشار امواج فراصوت بتن‌های معمولی و بازیافتی (km/s)

نسبت مخلوط	میزان جایگزینی سنگدانه‌ها (٪)			
	۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
CC	۴/۴۵	۴/۳۲	۳/۸۹	۳/۵۶
SF5	۴/۵۳	۴/۴۱	۴/۴۰	۴/۳۶
SF10	۴/۹۶	۴/۶۹	۴/۶۷	۴/۴۵
SF15	۴/۴۸	۴/۴۳	۴/۳۱	۴/۲۳
FA15	۳/۷۹	۳/۷۳	۳/۶۷	۳/۶۵
FA25	۴/۴۷	۴/۳۱	۳/۷۶	۳/۷۱
FA35	۳/۶۰	۳/۳۲	۳/۲۵	۲/۸۷
Z10	۴/۷۰	۴/۴۷	۴/۴۳	۴/۲۴
Z20	۴/۴۷	۴/۴۵	۴/۳۰	۴/۰۷
Z30	۴/۴۴	۴/۳۴	۴/۲۰	۳/۸۸

با دقت در نمودار نشان داده در شکل ۱۷ می‌توان دریافت که در بتن‌های معمولی در صورت استفاده از میکروسیلیس و زئولیت طبیعی، کیفیت بتن در مرز سطح کیفی خوب و عالی قرار می‌گیرد، با این حال می‌توان مشاهد کرد که اکثر بتن‌های بازیافتی حاوی میکروسیلیس و زئولیت طبیعی در ناحیه بالایی محدوده کیفی خوب قرار گرفتند و در مقابل، نتایج حاصل از مصرف خاکستربادی در بتن‌های معمولی و به‌ویژه در بتن‌های بازیافتی نشان داد که سطح کیفی بتن‌ها در محدوده پایین سطح کیفی خوب و بعضاً مرز ناحیه مشکوک واقع شدند؛ این پدیده تا جایی پیش رفته که بتن‌های ٪۲۵ و ٪۵۰ بازیافتی حاوی ٪۳۵ خاکستربادی در محدوده کیفی مشکوک و بتن تماماً بازیافتی حاوی ٪۳۵ خاکستربادی در محدوده ضعیف قرار گرفت.



شکل ۱۷- سرعت انتشار امواج فراصوت در بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی میکروسیلیس، خاکستربادی و زئولیت طبیعی

٤- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

همان‌گونه که پیش‌تر عنوان شد، محققان در زمینه حداقل سطح جایگزینی بهینه درشت‌دانه بتنی بازیافتی و میزان کاهش مقاومت فشاری در اثر جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی به نتایج مختلفی رسیده‌اند [۱۵-۱۰]. دهیر و پاینا[1] [۵] بیان داشته که در صورت عدم استفاده از مواد پوزولانی، جایگزینی ٪۳۰ درشت‌دانه

[1] Dhir and Paine

بتنی را می‌توان به عنوان یک سطح جایگزینی عملی بدون این‌که تاثیر نامطلوبی روی توسعه مقاومت بتن داشته باشد، پذیرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که در بتن‌های بدون پوزولان، جایگزینی ٪۲۵ مصالح بازیافتی تاثیری در کاهش مقاومت فشاری ندارد؛ با این حال استفاده از ٪۱۰ میکروسیلیس باعث شد تا حتی در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی مقاومت فشاری به ۵۱/۷ مگاپاسکال برسد که این امر نشان دهنده ٪۱۷ رشد نسبت به بتن بدون پوزولان است. نمودارهای ارائه شده نشان داد که جایگزینی کامل درشت‌دانه بازیافتی بدون استفاده از مواد پوزولانی با ٪۱۸ کاهش مقاومت فشاری روبرو می‌شود، در حالی که برخی منابع این کاهش مقاومت را تا ٪۳۰ نیز گزارش کرده‌اند[۲۳، ۶]. تاثیر مطلوب استفاده از مواد پوزولانی علاوه بر بهبود مقاومت فشاری را می‌توان در کاهش محسوس افت مقاومت در اثر جایگزینی کامل درشت‌دانه بازیافتی نسبت به بتن معمولی مشابه دانست. نتایج نشان داد که در سه سطح بهینه جایگزینی مواد پوزولانی شامل ٪۱۰ میکروسیلیس، ٪۲۵ خاکستربادی و ٪۱۰ زئولیت، کاهش مقاومت فشاری در مقایسه با بتن معمولی مشابه در اثر حداکثر جایگزینی به ترتیب ٪۱۰، ٪۸ و ٪۳ می‌باشد.

کو و همکاران[1] [۲۴] نشان دادند که با افزایش درصد جایگزینی خاکستربادی از میزان مقاومت فشاری کاسته می‌شود در حالی‌که در این پژوهش روند کسب مقاومت برای بتن‌های حاوی خاکستربادی به نحوی مشاهده شد که تا سقف جایگزینی ٪۲۵ خاکستربادی، مقاومت فشاری افزایش یافت و پس از آن سطح، مقاومت فشاری کاهش یافت. از دیگر نتایج کسب شده متمایز با تحقیقات آن‌ها، کاهش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه در جایگزینی‌های بالاتر سنگدانه‌های بازیافتی با افزایش جایگزینی خاکستربادی است در حالی‌که نتایج کسب شده آن‌ها در نقطه مقابل نتایج حاضر قرار دارد.

از نکات قابل توجه کسب شده استفاده از سطح جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس در مخلوط‌های بتنی، افزایش درصد رشد مقاومت در بتن‌های بازیافتی نسبت به بتن بدون پوزولان مشابه با افزایش مقادیر جایگزینی سنگدانه‌ها می‌باشد، به نحوی‌که میزان بهبود مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه بتن ٪۲۵ بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس در مقایسه با بتن ٪۲۵ درصد بازیافتی بدون پوزولان ٪۲۲ است، در حالی که این نسبت با افزایش مقادیر درشت‌دانه بازیافتی برای بتن‌های ٪۵۰ و ٪۱۰۰ بازیافتی به ترتیب به ٪۳۶ و ٪۴۲ رسید. این امر نشان می‌دهد که به علت ریزی بسیار زیاد ذرات میکروسیلیس و متعاقباً افزایش قابلیت پرکنندگی بیشتر آن، از شدت بروز و توسعه حفرات در مقطع بتن‌های تماماً بازیافتی کاسته می‌شود. این امر منجر به بهبود محسوس‌تر مقاومت فشاری این بتن‌ها شده است. با این حال در نقطه مقابل نتیجه فوق، برخی محققان معتقدند که در بتن‌های حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس نسبت بهبود مقاومت هر سطح از بتن‌های بازیافتی نسبت به بتن بازیافتی مشابه بدون پوزولان تقریباً یکسان می‌باشد [۱۰]. عدم تغییر محسوس مقاومت فشاری در جایگزینی‌های ٪۵۰ و ٪۱۰۰ در بتن‌های حاوی ٪۱۰ زئولیت در مقایسه با بتن‌های مشابه بدون پوزولان نشان می‌دهد که در سطوح جایگزینی‌های زیاد سنگدانه بازیافتی، از سطح جایگزینی ٪۱۰ زئولیت می‌توان به عنوان یک سطح جایگزینی مطمئن جهت کاهش مصرف سیمان بدون بروز تغییرات محسوس مقاومتی استفاده نمود.

در زمینه مقاومت کششی‌دونیم‌شدن نیز مطالعات آماری انجام شده توسط سیلوا[2] [۲۵] نشان داده که در اثر جایگزینی کامل سنگدانه‌های بازیافتی امکان وقوع افت ٪۴۰ در مقاومت کششی دونیم‌شدن نیز وجود دارد؛ در حالی که یانگ[3] [۲۶] نشان داد که در صورت استفاده از سنگدانه‌های بتنی با کیفیت بالا افت مقاومت کششی تا حدود ٪۱۰ روی خواهد داد. مطالعات تحقیق حاضر نشان داد که در صورت جایگزینی کامل درشت‌دانه، بدون حضور هرگونه پوزولان، کاهش ٪۲۳ مقاومت کششی دونیم‌شدن در مقایسه با بتن معمولی روی می‌دهد. با این حال استفاده از سطح بهینه مصرف میکروسیلیس که پیش‌تر در بررسی‌های مربوط به مقاومت فشاری، معادل ٪۱۰ بیان شده بود، باعث شد تا در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌ها ٪۱۸ افت در مقاومت کششی دونیم‌شدن روی دهد. این نتیجه نشان می‌دهد که استفاده از میکروسیلیس باعث شده تا از میزان افت مقاومت کششی دونیم‌شدن در جایگزینی‌های کامل

[1] Kou et al.

[2] Silva
[3] Yang

بکاهد. مصرف سطح بهینه ٪۱۰ زئولیت نیز باعث شد تا افت مقاومت کششی دونیم‌شدن نسبت به بتن معمولی حاوی زئولیت به ٪۱۸ برسد، در حالی که این مسأله در سطح بهینه ٪۲۵ خاکستربادی رخ نداد. نتایج این تحقیق نیز نشان داد بجز در سطح جایگزینی ٪۱۰۰ درشت‌دانه، در سایر سطوح جایگزینی درشت‌دانه بازیافتی، با افزایش مقادیر خاکستربادی تا سطح ٪۲۵، مقاومت کششی افزایش یافته است و پس از آن کاهش می‌یابد؛ در حالی که کو و همکاران [۲۴] معتقدند که با افزایش خاکستربادی از مقاومت کششی کاسته می‌شود. با این حال مشابه نتایج کسب شده این محققان در این تحقیق را می‌توان در نتایج حاصل از مصرف زئولیت یافت؛ جایی که در هر سطح جایگزینی مصالح درشت‌دانه، افزایش مقادیر زئولیت منجر به کاهش مقاومت کششی دونیم‌شدن شد.

در زمینه رفتار ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن‌های بازیافتی می‌توان به شکل واضح‌تری تصمیم‌گیری نمود؛ به نحوی‌که به طور مشخص در تمامی بتن‌های بازیافتی بدون پوزولان و با پوزولان هرگونه افزایش مقدار سنگدانه بازیافتی منجر به کاهش ضریب ارتجاعی استاتیکی شد. این پدیده را می‌توان به علت پایین‌تر بودن ضریب ارتجاعی استاتیکی سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی دانست. در میان تمام پوزولان‌های استفاده شده در تحقیق، به طور کلی میکروسیلیس و به شکل خاص، سطح جایگزینی ٪۱۰ آن مطلوب‌ترین رفتار را نشان داد. با این حال اگر چه در تمامی حالات جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن‌های بازیافتی حاوی مقادیر مختلف میکروسیلیس از بتن‌های مشابه بدون پوزولان بیش‌تر شد، ولی میزان شدت افت ضریب ارتجاعی استاتیکی این بتن‌ها به نحوی بود که در جایگزینی کامل سنگدانه‌های بازیافتی، ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی میکروسیلیس و بتن‌های بدون میکروسیلیس بسیار به هم نزدیک شدند (به شکل ۱۴ توجه گردد). وقوع این امر نشان داد که در زمینه ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن‌ها، تاثیر نامطلوب سنگدانه‌های بازیافتی در سطوح بالاتر جایگزینی سنگدانه‌ها بر تاثیر بهبودبخشی میکروسیلیس فائق شده است. برخی از محققین مشابه این پدیده را در مصرف سطوح مختلف خاکستربادی مشاهده نمودند [۲۴] در حالی که نتایج حاصل از مصرف خاکستربادی در این تحقیق نشان داد که در جایگزینی کامل سنگدانه‌های بازیافتی علاوه بر تاثیر نامطلوب جایگزینی سنگدانه‌ها، تاثیر نامطلوب خاکستربادی نیز موثر واقع شد و باعث افت محسوس ضریب ارتجاعی استاتیکی نسبت به بتن-های بدون پوزولان گردید.

تنایج آزمایش تعیین سرعت انتشار امواج فراصوت نشان داد که با افزایش میزان سنگدانه بازیافتی در بتن از میزان سرعت انتشار امواج نیز کاسته می‌شود. وقوع این امر را می‌توان به کاهش چگالی سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی دانست. نتایج نشان داد که جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی منجر به کاهش ٪۲۵ در سرعت انتشار امواج گردید، با این حال استفاده از پوزولان‌های میکروسیلیس، خاکستربادی و زئولیت طبیعی هر یک تا سطحی در متراکم کردن فضای موجود در بتن‌های بازیافتی موثر واقع شدند؛ به نحوی که به طور میانگین میزان کاهش سرعت انتشار امواج فراصوت در جایگزینی کامل نسبت به بتن معمولی مشابه به ترتیب تا ٪۶/۶ ، ٪۱۳/۶ و ٪۱۰/۴ کاهش یافت. اگر چه مقدار کاهش سرعت انتشار امواج فراصوت در جایگزینی کامل سنگدانه‌های بتنی در مقایسه با نتایج کسب شده با برخی محققان[۲۸، ۲۷] مقدار بیش‌تری است، ولی باید به این نکته توجه داشت که سرعت انتشار امواج فراصوت و نیز روند تغییرات آن به میزان زیادی به عوامل متعددی مانند نوع و حجم سنگدانه‌ها، نوع و میزان سیمان مصرفی، نوع و میزان مواد افزودنی و روان‌کننده‌ها و میزان رطوبت اولیه[۲۹]، مشخصات ناحیه انتقال، چگالی و میزان حفرات موجود در خمیر سیمانی [۳۰] بستگی دارد؛ لذا نتیجه-گیری در این زمینه و پرداختن به مقایسه نتایج کسب شده سایرین نیازمند تامین شرایط آزمایشگاهی یکسان و مشابه می‌باشد.

۵- نتایج

در این تحقیق خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی ساخته شده از درصدهای مختلف درشت‌دانه بتنی بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت. سه نوع پوزولان شامل میکروسیلیس، خاکستربادی و زئولیت در درصدهای مختلف جایگزینی با سیمان، جهت بهبود خواص مکانیکی مورد استفاده قرار گرفت. در مجموع ۳۶۰ نمونه مکعبی و استوانه‌ای در قالب ۴۰ نسبت مخلوط ساخته شدند و آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم‌شدن، ضریب ارتجاعی استاتیکی و تعیین سرعت انتشار امواج فراصوت در سن

۲۸ روزه انجام گردیدند. نتایج کلیدی حاصل شده به شرح زیر می باشند:

- مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ٪۲۵ بازیافتی بدون پوزولان در مقایسه با بتن معمولی، بدون تغییر باقی ماند در حالی که جایگزینی‌های ٪۵۰ و ٪۱۰۰ از مصالح بازیافتی باعث کاهش مقاومت فشاری به میزان به ترتیب ٪۱۴ و ٪۱۸ گردید.
- در تمامی سطوح جایگزینی میکروسیلیس در بتن‌های ٪۲۵ تا ٪۱۰۰ بازیافتی، طی ۲۸ روز مقاومت مشخصه به ۴۰ مگاپاسکال رسید. در این میان مصرف ٪۱۰ میکروسیلیس باعث شد تا مقاومت فشاری تمامی بتن‌های بازیافتی از مرز ۵۰ مگاپاسکال نیز عبور کند.
- سطح جایگزینی بهینه خاکستربادی در بتن‌های معمولی و بازیافتی ٪۲۵ به‌دست آمد، با این حال همین سطح جایگزینی نیز قادر نبود تا مقاومت فشاری بتن‌های بازیافتی را به سطح مقاومت مشخصه مورد نظر برساند. از سوی دیگر، زئولیت فقط در سطح جایگزینی ٪۱۰ نیز قادر است تا صرفاً مقاومت بتن ٪۲۵ بازیافتی را به مقاومت مشخصه ۴۰ مگاپاسکال برساند.
- جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی در بتن بدون پوزولان باعث افت مقاومت کششی به میزان ٪۲۳ در مقایسه با بتن معمولی شد. در حالی که جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس در بتن تماماً بازیافتی باعث شد تا افت مقاومت کششی نسبت به بتن معمولی بدون پوزولان به ٪۸ برسد. استفاده از میکروسیلیس بجز در سطح جایگزینی ٪۱۰، تاثیر محسوسی در بهبود مقاومت کششی دونیم‌شدن در مقایسه با بتن‌های مشابه بدون پوزولان نداشت. برخلاف میکروسیلیس، تمام سطوح جایگزینی خاکستربادی باعث کاهش شدید مقاومت کششی شدند، به نحوی که در بتن تماماً بازیافتی حاوی ٪۲۵ خاکستربادی ٪۵۱ کاهش مقاومت کششی نسبت به معمولی بدون پوزولان مشاهده شد.در رابطه با زئولیت نیز در سطح بهینه جایگزینی ٪۱۰، مقاومت کششی دونیم شدن بتن ٪۲۵ بازیافتی ٪۱۳ افت و بتن ٪۱۰۰ بازیافتی ٪۳۱ افت نسبت به بتن معمولی بدون پوزولان را نشان دادند.
- در بتن‌های بدون پوزولان، جایگزینی کامل درشت‌دانه‌ها باعث افت ٪۲۸ در ضریب ارتجاعی استاتیکی نسبت به بتن معمولی شد. در موثرترین سطوح جایگزینی پوزولان در ضریب ارتجاعی استاتیکی، در سطح جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس، ضریب ارتجاعی بتن تماماً بازیافتی تا ٪۲۴ نسبت به بتن معمولی افت کرد. این افت در بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی ٪۱۵ خاکستربادی و ٪۱۰ زئولیت طبیعی معادل ٪۲۹ مشاهده شد.
- نسبت کاهش ضریب ارتجاعی استاتیکی در اثر افزایش جایگزینی مصالح بازیافتی در بتن‌های حاوی مواد پوزولانی، بیش‌تر از حالتی است که از مواد پوزولانی استفاده نشد.
- مصرف ٪۱۰ میکروسیلیس باعث شده تا بتن‌های ٪۲۵ و ٪۵۰ بازیافتی در محدوده سطح کیفی عالی قرار گیرند، در حالی که عدم استفاده از این پوزولان باعث گردید تا در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی، سطح کیفی بتن به مرز ناحیه مشکوک نیز برسد.
- کاربرد پوزولان‌های میکروسیلیس و زئولیت باعث شده تا در بازه ۲۸ روزه، اکثر بتن‌های بازیافتی در ناحیه کیفی خوب قرار گیرند، در حالی که استفاده از خاکستربادی باعث گردید تا سطح کیفی بتن‌ها رو به کاهش نهند و به مرز ناحیه مشکوک نیز برسند.

٦- مراجع

[1] BCSJ, Proposed Standard for the Use of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete, Japan: Building Contractors Society of Japan Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste, 1977.

[2] DIN 4226-100. Mineral aggregates for concrete and mortar-Part 100: Recycled aggregates, Germany, 2000.

[3] RILEM "Specifications for concrete with recycled aggregates". Materials and Structures, 27, 173, 557-559, 1994.

[4] LNEC-E471 "Guide for the use of coarse recycled aggregates in concrete (in Portuguese)". National laboratory of Civil Engineering (Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC), Portugal, 6 p, 2006

[5] Dhir, R. K., and Kevin A. Paine. "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.

[6] Etxeberria, Miren, E. Vázquez, A. Marí, and M. Barra. "Influence of amount of recycled coarse

aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete." Cement and concrete research. 37, 5, 735-742, 2007.
[7] Yang, Keun-Hyeok, Heon-Soo Chung, and Ashraf F. Ashour. "Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties." ACI Materials Journal. 150, 3, 289-296, 2008.
[8] Limbachiya, M. C. "Coarse recycled aggregates for use in new concrete." Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability. 157, 2. Thomas Telford Ltd, 2004.
[9] Sajedi, Fathollah, and Hasan Jalilifar. "Investigation on Mechanical Properties of Recycled Concrete Containing Natural Zeolite." International Journal of Engineering and Applied Sciences. 4, 3, 77-81, 2017.
[10] Kou, Shi-cong, Chi-sun Poon, and Francisco Agrela. "Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures." Cement and Concrete Composites. 33, 8, 788-795, 2011.
[11] Vázquez, E., Ch F. Hendriks, and G. M. T. Janssen, eds. "Self-compacting Concrete: a Great Opportunity for Recycling Materials." In International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures, 600-609, 2004.
[12] Corinaldesi, V., G. Orlandi, and G. Moriconi. "Self-compacting concrete incorporating recycled aggregate." RK Dhir, PC Hewlett and LJ Csetenyi (eds). 4, 455-464, 2002.
[13] Evangelista, Luis, and Jorge de Brito. "Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates." Cement and concrete composites. 29, 5, 397-401, 2007.
[14] Sajedi, Fathollah, and Hasan Jalilifar. "Study and comparison of the effect of natural zeolite and silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concretes." Journal of Structural and Construction Engineering. in presien, 2017.
[15]. Tam, Vivian WY, X. F. Gao, and Chi M. Tam. "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach." Cement and concrete research. 35, 6, 1195-1203, 2005.
[16] Iranian Management Organization, Iranian Concrete Code (ICC). 6 ed, 120, Tehran, Iran, 2003.
[17] ASTM C192 / C192M-16a.; Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken, 2016.
[18] 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.
[19] 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.
[20] ASTM C496 / C496M-11.; Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, 2004.
[21] ASTM C597-16.; Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, 2016.
[22] Whitehurst, Eldridge Augustus. "Soniscope tests concrete structures." Journal Proceedings. 47, 2, 433-444, 1951.
[23] Dhir, R. K., M. C. Limbachiya, and T. Leelawat. "Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes." Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings. 134, 3, 1999.
[24] Kou, Shi Cong, Chi Sun Poon, and Dixon Chan. "Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete." Journal of Materials in Civil Engineering. 19, 9, 709-717, 2007.
[25] Silva, R. V., J. De Brito, and R. K. Dhir. "Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete." Construction and Building Materials. 83, 108-118, 2015.
[26] Yang, Keun-Hyeok, Heon-Soo Chung, and Ashraf F. Ashour. "Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties." ACI Materials Journal. 150, 3, 289-296, 2008.
[27] Rao, M. Chakradhara, S. K. Bhattacharyya, and S. V. Barai. "Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete." Materials and Structures. 44, 1, 205-220 2011.
[28] Kurda, Rawaz, Jorge de Brito, and José D. Silvestre. "Indirect evaluation of the compressive strength of recycled aggregate concrete with high fly ash ratios." Magazine of Concrete Research. 70, 4, 204-216, 2018.
[29] Bogas, J. Alexandre, M. Glória Gomes, and Augusto Gomes. "Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method." Ultrasonics. 53, 5, 962-972, 2013.
[30] Naik, Tarun R., V. Mohan Malhotra, and John S. Popovics. "The ultrasonic pulse velocity method." Handbook on nondestructive testing of concrete. CRC Press, 182-200, 2003.

Experimental Study of some Mechanical Properties of Recycled Concrete containing Micro-Silica, Fly ash and Natural Zeolite

Hasan Jalilifar
Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
Seyed Fathollah Sajedi *
Associate professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Abstract

The present study studies the effect of the replacement of different levels of recycled concrete aggregates on the mechanical behavior of recycled concrete. In made concretes, natural aggregates have been replaced at three levels of 25%, 50% and 100% with recycled concrete coarse aggregates. In order to enhance the mechanical performance of these concrete, each of the pozzolans including micro-silica, fly ash and natural zeolite has been replaced with cement at three different levels. A total of 360 cube and cylindrical concrete specimens were made in the form of 40 mixing designs, and tests of compressive strength, tensile strength, static modulus of elasticity and ultrasonic pulse velocity at 28 days of age were performed. The results showed that, without the use of pozzolanic materials, up to 25% replacement of recycled coarse aggregate, there was no significant change in the mechanical performance of this concrete, while the higher replacement rates resulted in a significant loss in the mechanical performance of this concrete. The use of micro-silica, especially at the replacement level of 10%, has led to a very good performance of recycled concrete even in the case of full replacement of recycled coarse aggregates. Other pozzolanic materials used were also relatively less and in lesser intervals of recyclable materials to improve their mechanical properties.

Keywords: Recycled concrete, Mechanical properties, Micro-silica (SF), Fly ash (FA), Natural zeolite (NZ).

* Corresponding Author: f_sajedi@yahoo.com, sajedi@iauahvaz.ac.ir