



بررسی مطلوبیت فنی و اقتصادی بتن‌های بازیافتی حاوی پوزولان

سید فتح اله ساجدی*، حسن جلیلی‌فر

دانشیار گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۴
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۲۷
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲

کلمات کلیدی:

بتن بازیافتی
درشت‌دانه بتنی بازیافتی
پوزولان
دوام
خواص مکانیکی
مطلوبیت فنی - اقتصادی

خلاصه: مقاله حاضر تاثیر جایگزینی درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی بر دوام بتن‌ها و میزان مطلوبیت فنی - اقتصادی آن‌ها را بررسی نموده است. بتن‌ها در جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی شامل ۲۵٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ ساخته شدند. برای بهبود کیفیت بتن‌های بازیافتی، پوزولان‌های میکروسیلیس، خاکستر بادی و زئولیت طبیعی به صورت جداگانه با بخشی از سیمان جایگزین شدند. در مجموع ۴۰ طرح اختلاط در قالب ۱۰۰۰ نمونه بتنی استاندارد ساخته شد. در بازه زمانی ۲۸ روزه، آزمایش‌های مقاومت‌های فشاری و کششی دو نیم شدن، ضریب ارتجاعی استاتیکی و سرعت انتشار امواج فراصوت و در بازه ۱۸۰ روزه، آزمایش‌های جذب آب غوطه‌وری و مویینه، مقاومت ویژه الکتریکی، ضریب هدایت الکتریکی و نفوذ تسریع شده یون کلراید انجام شدند. نتایج نشان داد که حتی با وجود جایگزینی مواد پوزولانی، نتایج جذب آب در حالات غوطه‌وری و مویینه بتن‌های بازیافتی تحت تاثیر توسعه فضای متخلخل و مویینه ناشی از افزایش میزان جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی است. از منظر نتایج مربوط به مقاومت ویژه الکتریکی، ضریب هدایت الکتریکی و نفوذ تسریع شده یون کلراید، به دلیل تغییر در ساختار شیمیایی جریان منفذی موجود در بتن‌های بازیافتی، امکان دست‌یابی به بتن‌های بازیافتی با دوام مشابه با بتن معمولی وجود دارد. مطلوبیت (میزان صرفه همزمان اقتصادی و فنی بتن بازیافتی نسبت به بتن مرجع) بتن‌های بازیافتی از منظرهای فنی و اقتصادی و تاثیر متقابل این دو بررسی شد. در بین بتن‌های ساخته شده، بتن‌های با ۲۵٪ درشت‌دانه بازیافتی حاوی ۱۰٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس و ۱۰٪ زئولیت طبیعی و بتن ۵۰٪ بازیافتی حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس از مطلوبیت فنی - اقتصادی بیشتری نسبت به بتن مرجع برخوردار شدند.

۱- مقدمه

توسعه یافته مانند ژاپن، آلمان و هلند به ۸۰٪ و در برخی دیگر از کشورهای توسعه یافته بین ۲۰٪ تا ۴۰٪ می‌رسد [۲]. در مقابل کشورهای در حال توسعه بخش بسیار ناچیزی از این رویکرد جهانی را به خود اختصاص داده‌اند. به عنوان نمونه، در حالی که سرانه تولید روزانه زباله در شهر تهران برای هر نفر تقریباً ۲ برابر بیشتر از متوسط جهانی است، بخش بسیار ناچیزی از این زباله مجدداً وارد چرخه بازیافت قرار می‌گیرد [۳]. مصرف بیش از حد بتن به عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزای فرآیند ساخت و ساز از یک سو و نیاز به استفاده بیش از حد سنگدانه‌های طبیعی و نیز محدودیت فضای محل دپوی مصالح تخریب شده از سوی دیگر، باعث شده تا رویکرد تولید سنگدانه بازیافتی از مصالح تخریب شده بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

در مقالات مختلفی از تاثیر نامناسب استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی بر خواص مکانیکی بتن صحبت شده است [۱۰-۴]. اختلاف نظر در زمینه نتایج کسب شده در زمینه تاثیر سنگدانه‌های بازیافتی بر خواص مکانیکی

سرعت پیشرفت و توسعه فن‌آوری در جهان نیازمند به روز شدن زیرساخت‌ها است و این امر مستقیماً به واسطه دست بردن انسان در منابع زیست‌محیطی و از بین بردن تعادل محیط زیست صورت می‌گیرد. نیاز به توسعه زیرساخت‌های جدید و ناکارآمدی زیرساخت‌های موجود باعث شده تا خروج زیرساخت‌های موجود از چرخه بهره‌برداری اجتناب ناپذیر باشد. لازمه حفظ منابع زیست‌محیطی موجود، توسعه نگاه بر پایه توسعه پایدار در صنعت ساخت و ساز است. صنعت ساخت و ساز به تنهایی مسئول مصرف بیش از ۵۰٪ از منابع طبیعی، ۴۰٪ از انرژی و تولید ۵۰٪ از زباله‌های موجود در جهان است [۱]. بازیافت مصالح حاصل از تخریب زیرساخت‌ها، به عنوان یکی از رویکردهایی است که کشورهای مختلف از آن به عنوان یکی از گزینه‌های فعال استفاده می‌کنند. نرخ این فرآیند در برخی از کشورهای

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sajedi@iauhvaz.ac.ir



سنگدانه‌های بازیافتی در اسید سولفوریک و اسید کلریدریک نام برد. اکبرنژاد همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که میزان موفقیت این روش به عوامل مختلفی مانند میزان تخلخل سنگدانه‌ها، نوع و مقدار آن‌ها، غلظت اسید و دمای محیط بستگی دارد [۱۴] و عملاً بهره بردن از این روش ممکن است منجر به افزایش احتمالی مقادیر سولفات و کلراید در بتن شود و دوام این بتن‌ها را تحت تاثیر قرار دهد.

در کنار اثرات مثبت زیست‌محیطی و نیز اقتصادی ناشی از استفاده از مواد جایگزین سیمان [۲۲]، پژوهش‌های زیادی تاثیر مطلوب جایگزینی این مواد بر خواص مکانیکی و وابسته به دوام بتن‌های بازیافتی را گزارش کردند [۲۴ و ۲۳]. پردو و همکاران (۲۰۱۸) در زمینه تاثیر مواد پوزولانی بر دوام بتن‌های بازیافتی نشان دادند که با استفاده از سنگدانه بازیافتی با کیفیت بالا و در صورت اختلاط مناسب، می‌توان حتی در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی به بتن با عملکرد بالا نیز دست یافت [۲۵]. کوردا و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان دادند که گر چه با افزایش جایگزینی درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی میزان جذب آب افزایش و مقاومت الکتریکی بتن بازیافتی کاهش می‌یابد، ولی با افزودن خاکستر بادی به بتن‌های بازیافتی این دو مولفه وابسته به دوام به سطح مطلوب‌تری می‌رسند [۲۶]. به علاوه، در برخی از تحقیقات با استفاده از جایگزینی ۴۰٪ از سیمان با سرباره کوره آهن‌گذاری، دوام بتن ۵۰٪ بازیافتی مشابه با بتن معمولی گزارش شده است [۲۷]. در یکی از مطلوب‌ترین سطوح جایگزینی مواد پوزولانی نیز می‌توان تاثیر جایگزینی ۱۰٪ از میکروسیلیس را در بتن‌های بازیافتی مشاهده کرد، جایی که نتایج نشان از کاهش ۱۵٪ تا ۸۰٪ از نفوذ یون کلراید در مقایسه با بتن‌های بازیافتی بدون این ماده پوزولانی دارد [۲۸ و ۲۹].

از آنجایی که در مقایسه با خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی، مطالعات کمتری در زمینه دوام این بتن‌ها در ایران صورت گرفته است، این مقاله با هدف شناخت این دسته از خواص بتن‌های بازیافتی اقدام به سنجش برخی از خواص مهم و اثرگذار در ویژگی دوام این بتن‌ها نموده است. از این روی، با ترکیب ۴ سطح جایگزینی سنگدانه‌های درشت بازیافتی در کنار ۳ سطح جایگزینی مواد پوزولانی منجر به تولید ۴۰ طرح اختلاط مختلف گردید. سنگدانه‌های درشت بتنی بازیافتی در سطوح جایگزینی ۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ به شکل وزنی به جای سنگدانه‌های درشت طبیعی جایگزینی شده و کنار آن سیمان نیز به شکل وزنی با میکروسیلیس در ۳ سطح جایگزینی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪، خاکستر بادی در با سطح جایگزینی ۱۵٪، ۲۵٪ و ۳۵٪ و نهایتاً ژئولیت طبیعی نیز در

بتن‌های بازیافتی به نحوی است که محققان از عدم تغییر تا کاهش ۴۰٪ خواص مکانیکی در مقایسه با بتن معمولی را گزارش کرده‌اند [۴-۶]. در مقابل اگر چه مطالعات کمتری در رابطه با خواص وابسته به دوام بتن‌های بازیافتی انجام شده است ولی بیشتر این نتایج از کاهش محسوس دوام بتن‌های بازیافتی نشان دارد؛ به نحوی که افزایش ۲۵٪ جمع شدگی، ۳۰٪ خزش و ۴۰٪ نفوذ یون کلراید در بتن‌های بازیافتی در مقایسه با بتن معمولی گزارش شده است [۷ و ۸]. در واقع خواص نامطلوب سنگدانه‌های بازیافتی و تاثیر آن‌ها در خواص مکانیکی و دوام بتن‌های بازیافتی باعث شده تا این دسته از مصالح به عنوان مصالح با اهمیت کم و در دسته مصالح قابل استفاده در زیرسازی جاده‌ها بیشتر مورد توجه قرار گیرند [۹]. بسته به نوع سنگدانه بازیافتی (ریزدانه، درشت‌دانه) و منشأ آن (بتنی، بنایی و یا ترکیبی) میزان تاثیرگذاری این سنگدانه‌ها بر عملکرد بتن تغییر می‌کند. علاوه بر آن به دلیل وجود ملات چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی، این سنگدانه از تخلخل بیشتر، سطح خشن‌تر و نامنظمی بیشتری برخوردار بوده [۱۰] و متعاقباً از چگالی کمتر و جذب آب بیشتری برخوردار خواهد بود [۱۲ و ۱۱]. به علاوه وجود ناحیه انتقال ضعیف در این سنگدانه‌ها بین ملات چسبیده و سنگدانه طبیعی احتمال توسعه ریزترک‌ها و تبدیل شدن آن‌ها به ترک‌های بزرگ‌تر را در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی بیشتر می‌کند. لذا در تحقیقات متعددی بر روش‌های ارتقای سطح کیفی سنگدانه‌های بازیافتی شامل پیش غوطه‌ورسازی در اسید [۱۴ و ۱۳]، پیش غوطه‌ورسازی در آب [۱۵]، پیش غوطه‌ورسازی در دوغاب‌های پوزولانی [۱۷ و ۱۶]، قرار دادن سنگدانه‌ها در معرض امواج فراصوت [۱۸]، استفاده از پوشش‌های پلیمری [۲۱-۱۹] و سایر روش‌های دیگر مورد توجه قرار گرفته است.

در زمینه دوام بتن‌های بازیافتی تلاش‌های فراوانی شده تا از تاثیر مخرب این سنگدانه‌ها کاسته شود. افزایش چگالی سنگدانه‌های بازیافتی با استفاده از غوطه‌ور کردن سنگدانه‌های بازیافتی در دوغاب مواد پوزولانی و پر کردن حفرات موجود روی آن‌ها با این مواد، تحت عنوان روشی به نام اختلاط دو مرحله‌ای توسط تام و تام (۲۰۰۵) پیشنهاد شد و باعث شد تا میزان شارش جریان الکتریکی در بتن‌های تماماً بازیافتی ساخته شده با این روش تا ۱۱٪ نسبت به روش اختلاط معمولی کاسته شود [۱۶]. ژو و همکاران (۲۰۱۳) نیز با استفاده از غوطه‌ورسازی سنگدانه‌های بازیافتی در مواد پلیمری توانستند با کاهش میزان نفوذ آب به درون سنگدانه‌های بازیافتی، باعث کاهش چشمگیر جذب آب بتن بازیافتی شدند [۲۰]. در مقابل نتایج نسبتاً نامناسبی نیز در برخی از روش‌ها گزارش شده که می‌توان به پیش غوطه‌ورسازی

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی مصرفی در تحقیق

Table 1. Chemical composition of cementitious materials used in research

LOI	SO ₃	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	
۲/۲	۲/۱۳	۱/۲	۶۴/۶۳	۶/۱	۳/۷	۲۱/۲۸	سیمان
۱۲/۲	-	-	۲/۵	۱۱/۵	۱/۵	۰/۶۸	زئولیت طبیعی
-	۰/۱	۰/۹۷	۰/۴۹	۱/۲۳	۰/۸۷	۹۴/۷۳	میکروسیلیس
۳/۷	۰/۶۸	۵/۲	۲/۸	۲۸/۲	۵/۳	۵۶/۷	خاکستر بادی

جدول ۲. مشخصات فیزیکی مواد سیمانی مصرفی در تحقیق

Table 2. Physical characteristics of cementitious materials used in research

میانگین اندازه ذرات (میکرومتر)	سطح ویژه ذرات (مترمربع بر کیلوگرم)	چگالی ویژه (گرم بر سانتی متر مکعب)	
۲۶/۰	۲۹۵	۳/۱۵	سیمان
۱۶/۸	۳۲۰	۲/۲۰	زئولیت طبیعی
۰/۱۵	۲۰۰۰۰	۲/۲۶	میکروسیلیس
۳۷/۹	۴۴۰	۲/۳۰	خاکستر بادی

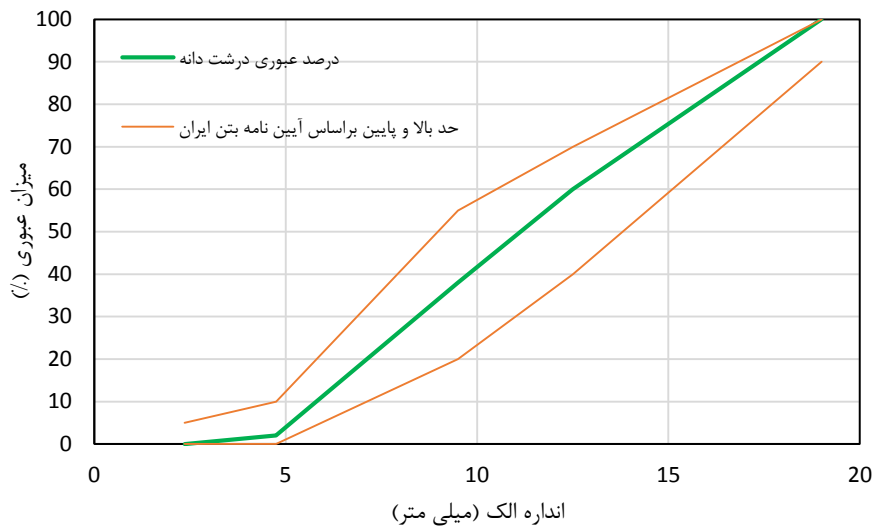
۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

۲-۱-۱- مواد سیمانی

مواد سیمانی استفاده شده در این پژوهش شامل سیمان پرتلند نوع ۳۲۵-۱، میکروسیلیس، خاکستر بادی و زئولیت طبیعی بوده است. میکروسیلیس استفاده شده از کارخانه فروآلیاژ ازنا و زئولیت طبیعی از نوع کلینوپتیلولیت از معادن سمنان بوده است. مجموع مقادیر سیلیس، اکسید آلومینیوم و اکسید آهن موجود در میکروسیلیس، خاکستر بادی و زئولیت طبیعی به ترتیب ۹۷٪، ۹۰٪ و ۸۱٪ بوده که بر اساس استاندارد ASTM C618-19 [۳۰] از حداقل مقدار لازم برای معرفی هر یک از مواد به عنوان یک ماده جایگزین سیمان برخوردار هستند. مشخصه‌های شیمیایی و فیزیکی مواد سیمانی استفاده شده در جداول ۱ و ۲ ارائه شده‌اند.

۳ سطح جایگزینی ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ با سیمان پرتلند جایگزین شدند. پس از معرفی روش اختلاط ویژه مربوط به سنگدانه‌های بازیافتی در این تحقیق، آزمایش‌های مقاومت فشاری ۲۸ روزه، مقاومت کششی دونیم شدن ۲۸ روزه، ضریب ارتجاعی استاتیکی ۲۸ روزه، سرعت انتشار امواج فراصوت ۲۸ روزه، جذب آب غوطه‌وری و جذب آب مویینه ۱۸۰ روزه، مقاومت ویژه الکتریکی ۱۸۰ روزه، ضریب هدایت الکتریکی ۱۸۰ روزه و نفوذ تسریع شده یون کلراید ۱۸۰ روزه مورد انجام شد. پس از بررسی و مقایسه تاثیر همزمان جایگزینی درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی و مواد پوزولانی بر خواص مکانیکی و وابسته به دوام بتن‌های بازیافتی، جهت انتخاب میزان مطلوبیت طرح‌های ساخته شده، تاثیر متقابل مطلوبیت اقتصادی و فنی هر یک از طرح‌ها در مقایسه با بتن معمولی مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱. دانه‌بندی درشت‌دانه‌های بازیافتی و طبیعی

Fig. 1. Grain size distribution of recycled and natural aggregates

۲-۱-۲- سنگدانه‌ها

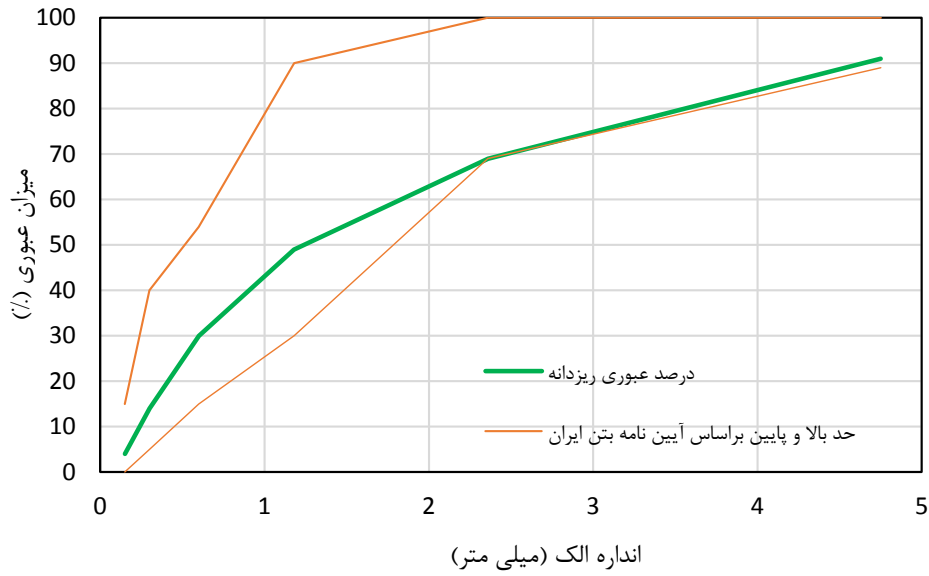
برای ساخت بتن‌ها از ریزدانه طبیعی با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر با وزن مخصوص ۲/۵۱ تن بر متر مکعب و جذب آب ۵/۵۸٪ و درشت‌دانه طبیعی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر، وزن مخصوص ۲/۵۷ تن بر متر مکعب و جذب آب ۳/۲۳٪ استفاده شد. درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی جایگزین شده نیز با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر و وزن مخصوص ۲/۱۹ تن بر متر مکعب و جذب آب ۶/۴۴٪ بوده که حاصل تخریب شمع و قطعات بتنی از تخریب یک ساختمان در اهواز بوده است. مشخصات مکانیکی و سن بتنی که درشت‌دانه‌های بازیافتی از آن استخراج شده در دسترس نبوده و میزان ملات چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی بر اساس روش حرارتی [۳۱] برای درشت‌دانه‌های با اندازه بین ۹/۵ تا ۱۹ میلی‌متر به طور متوسط ۵۵٪ و برای درشت‌دانه‌های با اندازه بین ۴/۷۵ تا ۹/۵ میلی‌متر به طور متوسط ۶۰٪ بوده است. نسبت ترکیب ریزدانه و درشت‌دانه در مخلوط سنگدانه معادل ۵۲٪ ریزدانه و ۴۸٪ درشت‌دانه بود. برای اطمینان از تاثیر یکسان درشت‌دانه‌های طبیعی و بازیافتی، دانه‌بندی درشت‌دانه‌های بازیافتی دقیقاً مانند دانه‌بندی درشت‌دانه‌های طبیعی ساخته شد. شکل ۱ نشانگر دانه‌بندی درشت‌دانه‌های طبیعی و بازیافتی، شکل ۲ نشانگر ریزدانه‌های طبیعی و شکل ۳ نشانگر ترکیب ریزدانه‌های طبیعی و درشت‌دانه‌ها می‌باشد.

۲-۱-۳- آب و فوق روان کننده

آب استفاده شده برای ساخت بتن‌ها از نوع آب لوله‌کشی شهر اهواز و فوق روان کننده بر پایه پلی‌کربکسیلات با چگالی 1.02 ± 0.1 گرم بر سانتی‌متر مکعب با حداکثر مقدار ۱٪ وزن مصالح سیمانی بود.

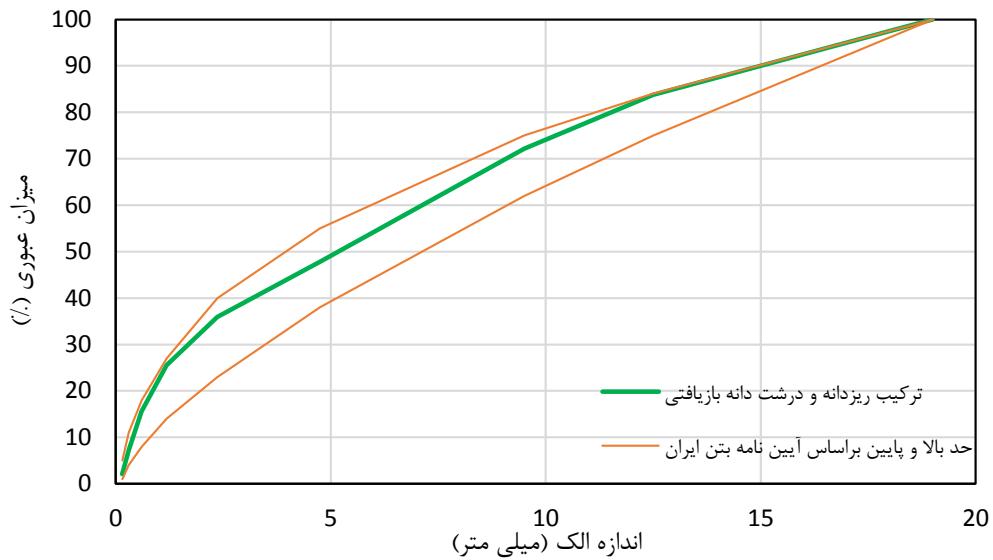
۲-۲- روش اختلاط

بتن معمولی ساخته شده بر اساس مقاومت هدف ۴۰ مگاپاسکال با نسبت آب به سیمان ۰/۳۶ بر اساس طرح ملی مخلوط بتن ایران ساخته شد. سنگدانه‌های درشت بتنی بازیافتی در سطوح جایگزینی ۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ به شکل وزنی با سنگدانه‌های درشت طبیعی جایگزینی شده و کنار آن سیمان نیز به شکل وزنی با میکروسیلیس در ۳ سطح جایگزینی ۰٫۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪، خاکستر بادی با سطح جایگزینی ۰٫۱۵٪، ۲۵٪ و ۳۵٪ و نهایتاً ژئولیت طبیعی نیز در ۳ سطح جایگزینی ۰٫۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ با سیمان پرتلند جایگزین شدند. از آنجایی که قبلاً عنوان شد که یکی از نقاط ضعف اساسی بتن‌های بازیافتی ساختار ضعیف سنگدانه‌های بازیافتی تشکیل دهنده آن است، لذا برای ارتقا کیفیت آن‌ها روشی تحت عنوان سه مرحله‌ای بر اساس روش دو مرحله‌ای معرفی شده توسط تام و تام (۲۰۰۵) ارائه شد [۱۶]. در این روش ابتدا با استفاده از نیمی از مواد پوزولانی و یک سوم آب، تمام



شکل ۲. دانه بندی ریزدانه های طبیعی

Fig. 2. Grain size distribution of natural sands



شکل ۳. ترکیب ۵۲٪ ریزدانه طبیعی و ۴۸٪ درشت دانه با حداکثر اندازه ۱۹ میلی متر

Fig. 3. Combination of 52% natural fine-grained and 48% coarse-grained with a maximum size of 19 mm

جدول ۳. جزئیات نسبت طرح مخلوط‌های تحقیق

Table 3. Details of the proportions of mixtures used in the research

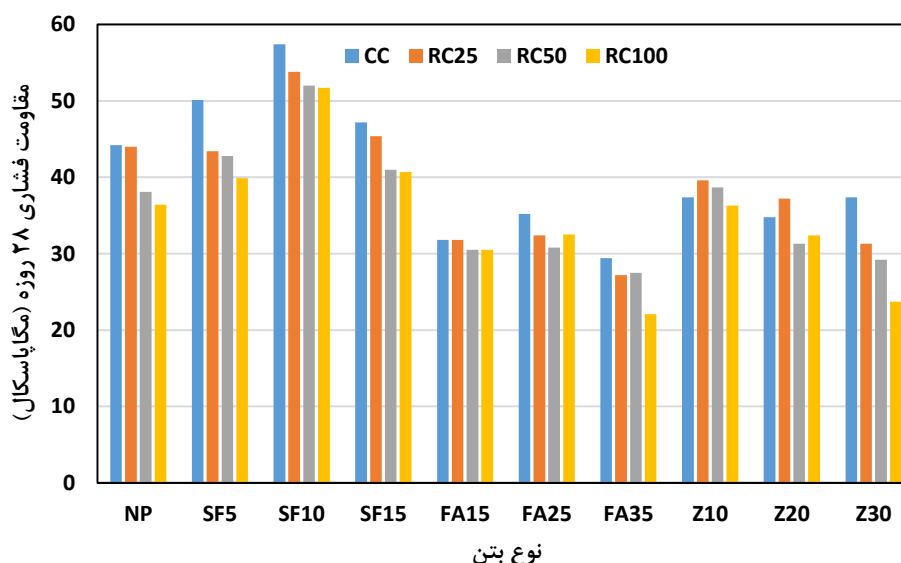
شماره شن بازیافتی (کیلوگرم)	شماره شن طبیعی (کیلوگرم)	ماسه (کیلوگرم)	فوق روان کننده (لیتر)	آب به مواد سیمانی	آب (لیتر)	مواد سیمانی (کیلوگرم)	طرح مخلوط
۰	۸۱۵						CC
۲۰۴	۶۱۱	۸۸۸	۴/۲	۰/۳۶	۱۵۰	۴۲۰	RC۲۵
۴۰۷/۵	۴۰۷/۵						RC۵۰
۸۱۵	۰						RC۱۰۰

جزئیات نسبت اختلاط کلی مصالح برای ساخت بتن‌های معمولی، ۲۵٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ در جدول ۳ ارائه شده است. در تمامی جداول و شکل‌ها، نمایه‌های NC، CC و RC هر یک به ترتیب بیانگر بتن بدون پوزولان، بتن معمولی و بتن بازیافتی است. هر یک از پوزولان‌های میکروسیلیس، خاکستر بادی و زئولیت طبیعی نیز با نمایه‌های SF، FA و Z نشان داده شده‌اند. عدد مندرج پس از نمایه‌های بتنی معرف میزان جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی و عدد مندرج پس از نمایه‌های مواد پوزولانی نشانگر میزان درصد جایگزینی آن ماده پوزولانی با سیمان معمولی است.

۲-۳- آزمایش‌ها

آزمایش‌های انجام شده روی بتن‌های ساخته شده شامل مقاومت فشاری ۲۸ روی نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری بر اساس استاندارد BS 1881-116 [۳۲]، تعیین مقاومت کششی دونیم شدن بر اساس استاندارد ASTM C496 [۳۳]، تعیین ضریب ارتجاعی استاتیکی بر اساس استاندارد ASTM C469 [۳۴]، تعیین سرعت امواج فراصوت بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری بر اساس استاندارد ASTM C597 [۳۵]، تعیین جذب آب غوطه‌وری، جذب آب مویینه و نفوذ تسریع شده یون کلراید به ترتیب براساس استانداردهای ASTM C642 [۳۶]، ASTM C1585 [۳۷] و ASTM C1202 [۳۸] روی نمونه‌های دیسکی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر، ضریب هدایت جریان الکتریکی براساس استاندارد ASTM C1760 [۳۹] و مقاومت ویژه الکتریکی روی نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر بودند.

درشت‌دانه‌ها درون دوغاب پوزولانی ساخته شده به مدت ۱ دقیقه غوطه‌ور شدند (غوطه‌ورسازی در دوغاب پوزولانی). هدف از این روش ایجاد یک لایه دوغاب پوزولانی روی سطوح متخلخل و پر کردن حفره‌های موجود روی ملات چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی است. علاوه بر آن با ایجاد یک لایه از مواد پوزولانی روی سطح سنگدانه‌های بازیافتی شرایط برای ایجاد واکنش پوزولانی در اطراف سنگدانه بازیافتی به شکل قوی‌تری مهیا خواهد شد، لذا امکان ایجاد پیوندهای قوی‌تر و تشکیل ژل‌های سیلیکاتی بیشتر در اطراف سنگدانه‌های بازیافتی و ایجاد ناحیه انتقال با مقاومت بیشتر امکان‌پذیر خواهد بود. در مرحله دوم، نیمی از سیمان، نیمی از ماسه و یک سوم آب به مخلوط اضافه شده و فرآیند مخلوط کردن به مدت ۲ دقیقه ادامه می‌یابد (ساخت ملات معمولی). در مرحله سوم نیز نیم باقی‌مانده ماسه، نیم باقی‌مانده سیمان و یک سوم آب به همراه نیم باقی‌مانده ماده پوزولانی به مخلوط اضافه شده و به مدت ۶ دقیقه اختلاط صورت می‌شود (ساخت ملات با مواد پوزولانی). در واقع اختلاف این روش با روش دو مرحله، نه در افزایش تعداد مراحل اختلاط، بلکه در نوع نگاه محققان به نحوه توزیع مواد پوزولانی در ملات است. در روش دو مرحله‌ای، تمام ماده پوزولانی صرف تولید دوغاب شده و از آنجایی که دوغاب برای ارتقا کیفیت سنگدانه‌ها مصرف شده، این امکان وجود دارد که به دلیل متمرکز شدن مواد پوزولانی در اطراف درشت‌دانه‌های بازیافتی، واکنش‌های پوزولانی به شکل پیوسته‌ای در سایر بخش‌های ملات توزیع نشود. در واقع جدا کردن نیمی از پوزولان از مرحله اول و اضافه کردن آن در مرحله سوم به عنوان روشی برای حصول اطمینان از توزیع یکنواخت‌تر واکنش‌های پوزولانی در ساختار ملات بتن ساخته شده می‌باشد.



شکل ۴. مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه

Fig. 4. Compressive strength at the age of 28 days

بتن‌های تماماً بازیافتی با افت بیش‌تری مواجه شوند. گوناگونی نتایج کسب شده در این زمینه تا حدی است که اتربریا و همکاران (۲۰۰۷) و هانسون (۱۹۹۲) این افت مقاومت را بین ۲۰٪ تا ۳۰٪ ثبت کردند [۴ و ۴۱]. در حالی که ژو و همکاران (۲۰۱۸) در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی تا ۶۶٪ افت مقاومت را مشاهده نمودند [۴۰]. با این حال در برخی از مطالعات، نتایج نزدیک به مقاومت بتن مرجع و حتی بیش‌تر از آن، برای بتن‌های تماماً بازیافتی گزارش شده است [۴۲ و ۴۳]. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تمام بتن‌های بازیافتی حاوی میکروسیلیس با مقاومت هدف و حتی بالاتر از ۴۰ مگاپاسکال رسیدند. سطح جایگزینی ۱۰٪ از میکروسیلیس به نحوی اثربخش بوده که حتی در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی منجر به افزایش ۱۷٪ مقاومت فشاری نسبت به بتن مرجع شده است. وقوع این امر را می‌توان به غوطه‌ورسازی سنگ‌دانه‌ها در دوغاب میکروسیلیس دانست. چرا که این دوغاب باعث شده تا از تخلخل موجود روی سطوح سنگ‌دانه‌های بازیافتی کاسته شده و نه تنها از جذب آب این سنگ‌دانه‌ها کاسته شده، بلکه باعث شده تا در مرز ناحیه انتقال واکنش‌های پوزولانی موثرتری روی داده و احتمال تراکم این ناحیه توسط ژل‌های سیلیکاتی تولید شده افزایش یابد [۱۶]. همان‌طور که دیده می‌شود به طور کلی میزان تاثیر جایگزینی میکروسیلیس بر بهبود مقاومت فشاری، در درصد جایگزینی‌های

۳- تحلیل نتایج

۳-۱- مقاومت فشاری

شکل ۴ بیانگر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های ساخته شده می‌باشد. نمایه NP در این نمودار معرف بتن‌های معمولی و بازیافتی بدون پوزولان هستند. بتن مرجع با عبور از مقاومت هدف، به مقاومت فشاری ۴۴/۲ مگاپاسکال رسید. همان‌طور که دیده می‌شود، جایگزینی ۲۵٪ درشت‌دانه بازیافتی تغییر محسوسی در مقاومت فشاری ایجاد نکرد، با این حال جایگزینی‌های ۵۰٪ و ۱۰۰٪ درشت‌دانه بازیافتی منجر به افت به ترتیب ۱۴٪ و ۱۸٪ مقاومت فشاری شد. بر این اساس می‌توان چنین نتیجه گرفت که به دلیل افزایش در مقادیر و اندازه خلل و فرج‌های موجود روی سطوح درشت‌دانه‌های بازیافتی، مقاومت فشاری در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی با افت محسوسی مواجه شده است. در واقع در تحلیل کامل‌تری می‌توان علت این افت را به دو عامل معطوف کرد. اول، از آنجایی که جذب آب درشت‌دانه‌های بازیافتی بیشتر از درشت‌دانه‌های طبیعی است، باعث شده تا مقدار با کاهش نسبت آب به سیمان، فرآیند هیدراسیون به شکل ناقصی انجام شود [۴۰]. دوم اینکه مقاومت کمتر و تخلخل بیش‌تر درشت‌دانه‌های بازیافتی باعث شده تا در اثر اعمال بارهای قائم، تمرکز تنش در اطراف سنگ‌دانه‌های بازیافتی بیش‌تر شده و این امر باعث شده تا مقاومت فشاری

با درجه خلوص بالا در مقایسه با میکروسیلیس از فعالیت‌های پوزولانی کمتری برخوردار است [۴۴]. لذا بدیهی است که در مقایسه با بتن‌های بازیافتی حاوی میکروسیلیس، درون بتن‌های بازیافتی حاوی زئولیت طبیعی مقادیر بیش‌تری از هیدروکسید کلسیم واکنش داده نشده باقی بماند و این دسته از بتن‌ها از مقاومت کمتری برخوردار گردند. به علاوه به دلیل اندازه بزرگ‌تر ذرات زئولیت طبیعی ($16/8 \mu\text{m}$) در مقایسه با ذرات میکروسیلیس ($0/15 \mu\text{m}$)، قابل پیش‌بینی است که ساختار ماتریس سیمانی بتن‌های حاوی زئولیت طبیعی متخلخل‌تر و ناهمگن‌تر باشند.

۳-۲- مقاومت کششی دونیم شدن

شکل ۵ نشان دهنده مقاومت کششی دونیم شدن بتن‌های ساخته شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در دسته بتن‌های بدون پوزولان، جایگزینی ۲۵٪ از درشت‌دانه بازیافتی تاثیر محسوسی در کاهش مقاومت کششی دونیم شدن نداشته، در حالی که از جایگزینی بیشتر از ۵۰٪ درشت‌دانه بازیافتی، مقاومت کششی شروع به کاهش چشمگیری کرده و در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی مقاومت کششی دونیم شدن با افت ۲۳٪ در مقایسه با بتن مرجع به ۳ مگاپاسکال رسید. سیلوا و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعات آماری خود تا افت ۴۰٪ از مقاومت کششی دونیم شدن را برای جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی امکان‌پذیر می‌داند [۴۵]. با این حال یانگ و همکاران (۲۰۰۸) بیان داشتند که در صورت جایگزینی و

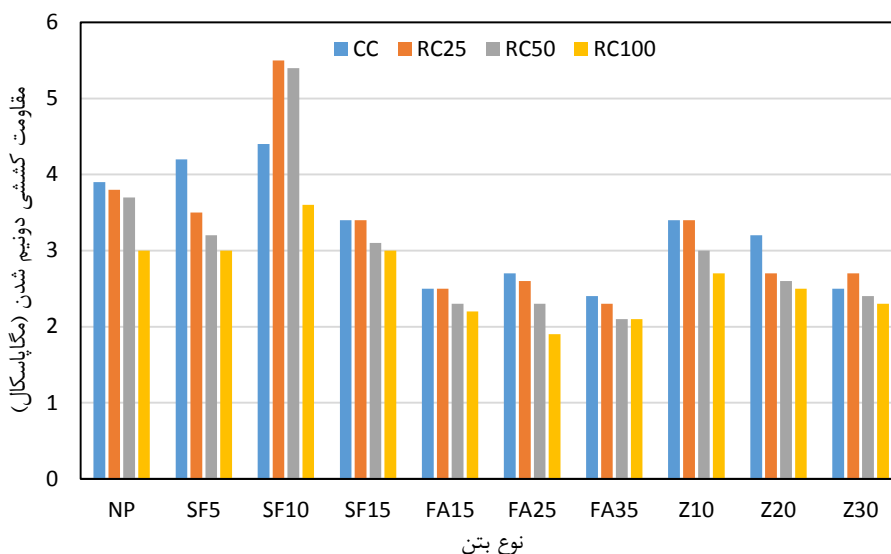
استفاده از درشت‌دانه‌های بازیافتی با کیفیت این سطح از کاهش می‌تواند تا ۱۰٪ کاهش یابد [۴۶]. در بین مواد پوزولانی استفاده شده، مطلوبیت نتایج به ترتیب متعلق به میکروسیلیس، زئولیت و در آخر خاکستر بادی می‌باشد. تاثیر استفاده از میکروسیلیس به نحوی است که حتی بتن ۵۰٪ بازیافتی حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس از مقاومت کششی بسیار بیشتری نسبت به بتن مرجع برخوردار شده است. با این حال به دلیل افت کیفیت سنگدانه‌های بازیافتی و کاهش محسوس مقاومت کششی این سنگدانه‌ها، با رسیدن سنگدانه‌ها به مرز جایگزینی کامل، حتی در مطلوب‌ترین سطح جایگزینی میکروسیلیس (۱۰٪)، مقاومت کششی در مقایسه با بتن مرجع با ۸٪ افت مواجه شده است. این پدیده نشان می‌دهد که حتی استفاده از مواد پوزولانی بهینه نمی‌تواند تاثیر نامطلوب افت کیفیت سنگدانه‌های بازیافتی را به ویژه در جایگزینی‌های زیاد مرتفع نماید، بلکه می‌تواند تا حدی از این روند کاهش مقاومت بکاهد. در دسته بتن‌های حاوی خاکستر بادی به جز بتن‌های تماماً بازیافتی، افزایش مقدار خاکستر بادی تا ۲۵٪ باعث افزایش مقاومت کششی

بالتر درشت‌دانه‌های بازیافتی بیش‌تر است. به نحوی که بتن تماماً بازیافتی حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس در مقایسه با بتن مشابه بدون پوزولان با ۴۲٪ رشد در مقاومت مواجه شد، در حالی که در مقایسه با بتن ۲۵٪ و ۵۰٪ بازیافتی بدون پوزولان، جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس منجر به رشد به ترتیب ۲۲٪ و ۳۷٪ شد.

همان‌طور که از شکل ۴ مشاهده می‌شود در بازه ۲۸ روزه، هیچ یک از بتن‌های معمولی و بازیافتی حاوی خاکستر بادی به مرز مقاومت هدف ۴۰ مگاپاسکال نرسیدند. با این حال بتن‌های حاوی ۲۵٪ خاکستر بادی، در مقایسه با بتن‌های حاوی ۱۵٪ و ۳۵٪ خاکستر بادی به طور متوسط ترتیب با ۵٪ و ۲۳٪ رشد مقاومت فشاری مواجه شدند. ولی جایگزینی ۳۵٪ خاکستر بادی باعث شد تا مقاومت بتن تماماً بازیافتی با افت محسوسی مواجه شده و به ۲۲/۱ مگاپاسکال برسد. با این حال نتایج مربوط به بتن‌های حاوی زئولیت طبیعی رفتار متفاوتی را نشان دادند. همان‌طور که دیده می‌شود تمام بتن‌های حاوی زئولیت در مقایسه با بتن مشابه بدون پوزولان، از مقاومت کمتری برخوردار شدند. با این حال در جایگزینی ۱۰٪ از زئولیت طبیعی، مقاومت بتن حاوی ۲۵٪ درشت‌دانه بازیافتی به مرز مقاومت هدف رسید. نکته پراهمیت در جایگزینی ۱۰٪ زئولیت طبیعی در جایی است که در جایگزینی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ از درشت‌دانه‌های بازیافتی با درشت‌دانه‌های طبیعی، مقاومت فشاری تغییر

محسوسی نسبت بتن‌های ۵۰٪ و ۱۰۰٪ بازیافتی بدون پوزولان نکرد. این امر نشان می‌دهد که میزان بهبود بخشی مقاومت، توسط زئولیت طبیعی در بتن بازیافتی تا حدی است که بتواند اثر مخرب ناشی از جایگزینی درشت‌دانه‌ها را مرتفع نماید. لذا به دلیل کسب مقاومت مشابه با بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان، بتن تماماً بازیافتی حاوی ۱۰٪ زئولیت طبیعی، بتنی است که علاوه بر مطلوبیت کاهش مصرف سنگدانه‌های طبیعی، منجر به کاهش مصرف سیمان نیز شده است. با این حال در مقایسه با بتن‌های حاوی ۱۰٪ زئولیت طبیعی، مقاومت فشاری بتن‌های حاوی ۲۰٪ و ۳۰٪ زئولیت طبیعی به طور متوسط با ۱۱٪ و ۲۰٪ کاهش مواجه شدند.

از منظر خواص مکانیکی، کاهش مقاومت‌های کسب شده بتن‌های بازیافتی حاوی زئولیت طبیعی در مقایسه با بتن‌های حاوی میکروسیلیس را می‌توان میزان فعالیت پوزولانی و نیز اندازه ذرات زئولیت طبیعی مرتبط دانست. زئولیت طبیعی ماده‌ای است که بسته به نوع و دسته‌بندی آن میزان فعالیت پوزولانی آن متغیر است. با این حال، نتایج آزمون‌های وزن‌سنجی حرارتی نمونه‌های مختلف زئولیت طبیعی نشان داده که حتی زئولیت طبیعی



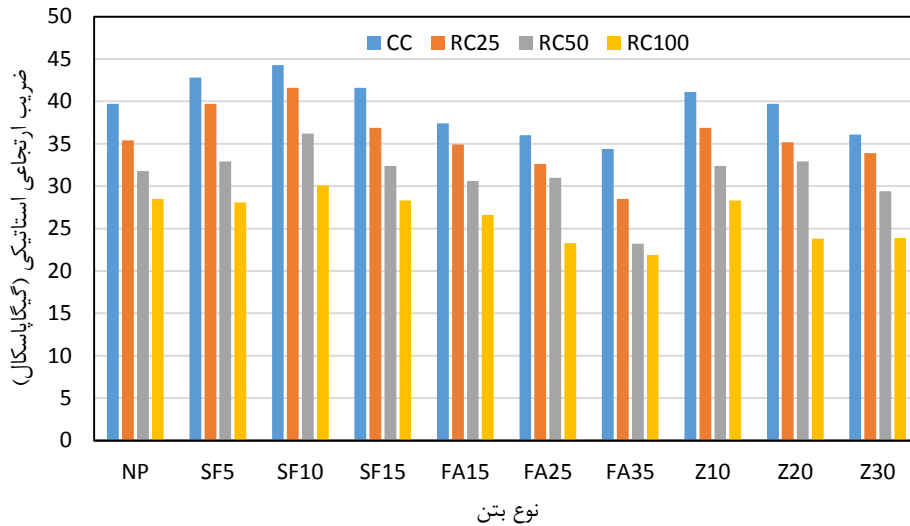
شکل ۵. مقاومت کششی در سن ۲۸ روزه

Fig. 5. Tensile strength at 28 days of age

۳-۳- ضریب ارتجاعی استاتیکی

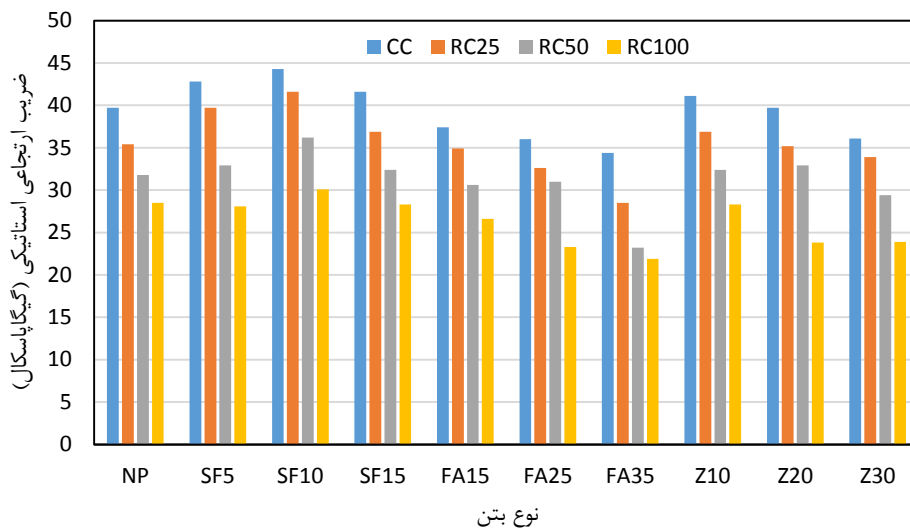
بر اساس شکل ۶، به طرز واضحی می‌توان ملاحظه کرد که چه در بتن‌های حاوی پوزولان و چه در بتن‌های بدون پوزولان، هر چه میزان جایگزینی درشت‌دانه‌های باز یافتی افزایش یافته، از ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن‌ها کم شده است. به نظر سیلوا (۲۰۱۵) علت وقوع این پدیده را می‌توان به افزایش احتمال ورود آلودگی‌ها به درون بتن به واسطه افزایش میزان جایگزینی سنگدانه‌های باز یافتی و نیز افت بسیار زیاد ضریب ارتجاعی سنگدانه‌های باز یافتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی دانست [۵۶]. مشابه این رویداد را کو و همکاران (۲۰۰۷) در کاهش ضریب ارتجاعی با افزایش میزان جایگزینی درشت‌دانه در بتن‌های حاوی خاکستر بادی گزارش کردند [۴۷]. همان‌طور که دیده می‌شود تاثیر میکروسیلیس به شکلی است که باعث شده تا ضریب ارتجاعی بتن ۲۵٪ باز یافتی حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس از ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن مرجع نیز بیشتر شود. با این حال در بین بتن‌های باز یافتی حاوی پوزولان، بتنی را نمی‌توان یافت که از ضریب ارتجاعی مشابهی با بتن مرجع برخوردار باشد. در بین پوزولان‌های استفاده شده کمترین تاثیر مطلوب در بتن‌های حاوی خاکستر بادی مشاهده شد. همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، در هر سطح جایگزینی ثابت سنگدانه‌های باز یافتی، افزایش مقدار جایگزینی خاکستر بادی منجر به افت

دو نیم شدن شد ولی افزایش مقدار خاکستر بادی به سطح ۳۵٪ باعث شد تا مقاومت کششی کاهش یابد. کو و همکاران (۲۰۰۷) معتقدند که افزایش مقدار خاکستر بادی باعث کاهش مقاومت کششی دو نیم شدن می‌شود [۴۷]، در حالی که در این تحقیق این رفتار تا سطح جایگزینی ۲۵٪ خاکستر بادی موافق و پس از آن مخالف نظر آن‌ها می‌باشد. البته افت محسوس نتایج مربوط به خاکستر بادی را می‌توان به کندی رفتار واکنش‌های پوزولانی این ماده و تشکیل با تاخیر ژل‌های سیلیکاتی در آن دانست. رفتار میانه ژئولیت در مقایسه با این دو پوزولان نشان دهنده تاثیر متوسط آن در بهبود مقاومت کششی دو نیم شدن است. به هر حال نتایج نشان می‌دهد که در سطح جایگزینی ۱۰٪ از این ماده پوزولانی، بتن ۲۵٪ باز یافتی بدون تغییر و بتن ۵٪ باز یافتی با ۱۳٪ افت مقاومت روبرو می‌شود. اما تاثیر محسوس افت کیفیت سنگدانه‌های باز یافتی در جایگزینی کامل را می‌توان مجدداً در جایگزینی ۱۰٪ ژئولیت مشاهده کرد جایی که ۲۰٪ افت مقاومت کششی دو نیم شدن در مقایسه با بتن مرجع حاوی ۱۰٪ ژئولیت طبیعی و ۳۱٪ در مقایسه با بتن مرجع مشاهده شد. مشابه نتایج کو و همکاران (۲۰۰۷) [۴۷] را می‌توان برای ژئولیت طبیعی مشاهده کرد، به نحوی که هر چه مقدار جایگزینی ژئولیت طبیعی افزایش یافته، از مقاومت کششی دو نیم شدن بتن‌های باز یافتی کاسته شده است.



شکل ۶. ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه

Fig. 6. Static modulus of elasticity at 28 days of age



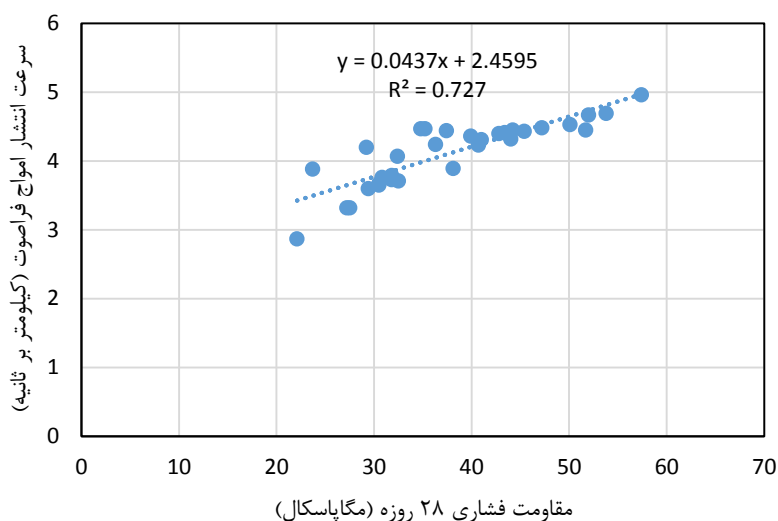
شکل ۷. سرعت انتشار امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه

Fig. 7. Ultra pulse velocity propagation at the age of 28 days

۳-۴- سرعت انتشار امواج فراصوت

شکل ۷ نشانگر نتایج سرعت انتشار امواج فراصوت و نیز حدود تعیین شده برای ارزیابی کیفیت بتن‌ها توسط وایتورست (۱۹۵۱) است [۴۷]. به طور کلی می‌توان مشاهده کرد که افزایش جایگزینی سنگدانه بازیافتی چه در

ضریب ارتجاعی شد. مشابه همین رفتار را نیز می‌توان برای ژنولیت طبیعی دید. برخلاف این نتایج، افزایش مقدار جایگزینی میکروسیلیس تا سطح جایگزینی ۱۰٪ باعث رشد ضریب ارتجاعی شده و پس از آن با رسیدن به سطح جایگزینی ۱۵٪ از میکروسیلیس، این ضریب کاهش یافته است.



شکل ۸. رابطه بین مقاومت فشاری و سرعت انتشار امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه

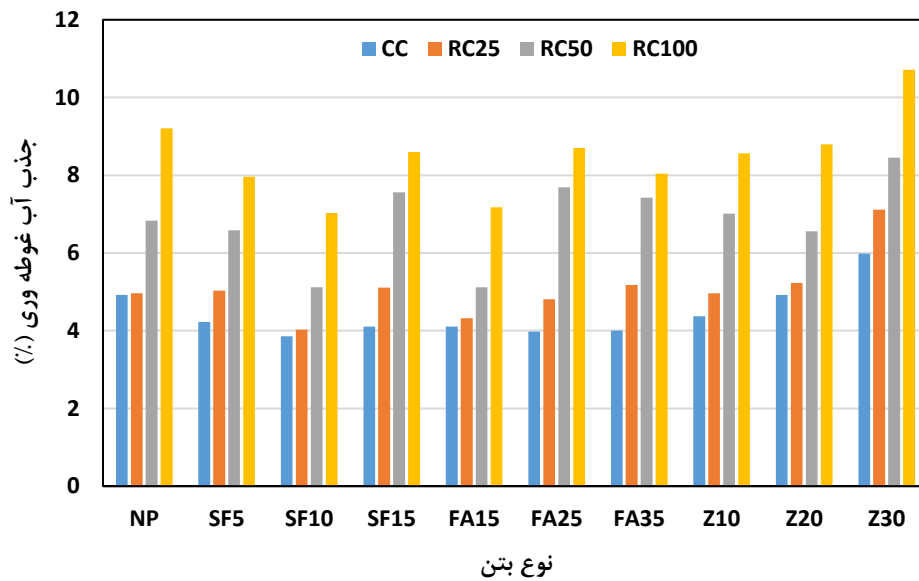
Fig. 8. Relationship between compressive strength and ultra-pulse velocity propagation at 28 days of age

ضعیفی برخوردار شد. در رابطه با تاثیر ژئولیت طبیعی بر کیفیت بتن‌های بازیافتی ساخته شده نیز می‌توان دید که نه تنها تا سطح جایگزینی ۱۰٪ ژئولیت طبیعی حتی بتن تماماً بازیافتی سطح کیفی خوبی را کسب کرده، بلکه تا جایگزینی ۲۰٪ از این پوزولان سطح کیفی بتن تماماً بازیافتی در بازه بالایی سطح کیفی خوب قرار گرفته است. با این حال افت جزئی در کیفیت بتن‌های حاوی ۳۰٪ ژئولیت طبیعی در مقایسه با سایر سطوح جایگزینی ژئولیت طبیعی مشاهده شد. لازم به ذکر است که میزان درصد کاهش سرعت انتشار امواج فراصوت در اثر افزایش جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی در مقایسه با بتن مرجع در این پژوهش از برخی مطالعات دیگر [۵۰] و [۴۹] بیشتر ثبت شد. ذکر این نکته لازم است که چگونگی انتشار امواج فراصوت در بتن به عوامل متعددی مانند نوع و حجم سنگدانه‌ها، نوع و میزان سیمان مصرفی، نوع و میزان مواد افزودنی و روان‌کننده‌ها و میزان رطوبت اولیه [۵۰]، مشخصات ناحیه انتقال، چگالی و میزان حفرات موجود در خمیر سیمانی بستگی دارد [۵۱]. لذا بدیهی است تا میان نتایج کسب شده در این پژوهش و درصد تغییرات روی داده نسبت به بتن مرجع با سایر نتایج موجود اختلاف وجود داشته باشد. در شکل ۸ نیز رابطه میان سرعت انتشار امواج فراصوت و مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه بتن‌های ساخته شده ارائه شده است. مشهود است که رابطه خطی با ضریب همبستگی متوسطی میان این دو متغیر وجود دارد.

بتن‌های حاوی پوزولان و چه بدون پوزولان، منجر به کاهش سرعت انتشار امواج فراصوت می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود در دسته بتن‌های بدون پوزولان، بتن مرجع در مرز سطح کیفی عالی تا خوب قرار گرفت. با این حال با افزایش مقدار جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی سطح کیفی بتن‌های بازیافتی افت کرده به نحوی که در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی، کیفیت بتن ۱۰۰٪ بازیافتی بدون پوزولان در مرز بین خوب و مشکوک واقع شد. وقوع این امر را می‌توان به کاهش محسوس چگالی درشت‌دانه‌های بازیافتی در مقایسه با درشت‌دانه‌های طبیعی دانست. به طور کلی و با استفاده از خطوط مرجع کیفی ترسیم شده، می‌توان چنین استنباط کرد که استفاده از میکروسیلیس در تمامی درصدهای جایگزینی، منجر به ساخت بتن بازیافتی با سطح کیفی خوب می‌گردد. این سطح از بهبودی به نحوی است که بتن‌های ۲۵٪ و ۵۰٪ سطح کیفیت عالی و بتن ۱۰۰٪ بازیافتی سطح کیفی معادل با بتن مرجع کسب کرد.

در دسته بتن‌های حاوی خاکستر بادی افت کیفیت بتن‌های بازیافتی به نحوی است که فقط بتن ۲۵٪ بازیافتی حاوی ۲۵٪ خاکستر بادی از سطح کیفی خوبی برخوردار شده است

ولی سایر بتن‌های بازیافتی در مرز سطح کیفی خوب و مشکوک واقع شدند. با این حال عدم تامین کیفیت مطلوب توسط ۳۵٪ خاکستر بادی به شکلی است که بتن ۱۰۰٪ بازیافتی حاوی ۳۵٪ خاکستر بادی از سطح کیفی



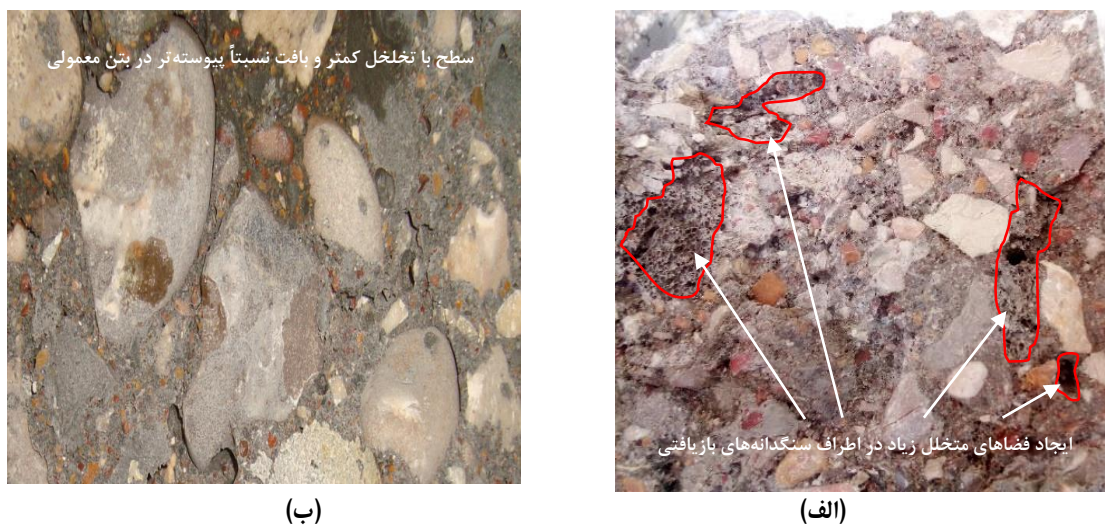
شکل ۹. جذب آب غوطه‌وری بتن‌های معمولی و بازیافتی در سن ۱۸۰ روزه

Fig. 9. Absorption of immersion water of ordinary and recycled concretes at the age of 180 days

۲۵]. از سوی دیگر کووان و همکاران (۲۰۱۲) معتقدند که به دلیل افزایش جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی، فشار اسمزی بیشتری درون بتن ایجاد می‌شود که باعث افزایش مقدار جذب آب غوطه‌وری درون بتن می‌شود [۵۵]. با این حال باید به این نکته توجه داشت که دلیل ذات متخلخل سنگدانه‌های بازیافتی، این احتمال وجود دارد که به هنگام ورود آن‌ها درون بتن، حجم زیادی هوا نیز به همراه سنگدانه‌ها درون بتن وارد شده که طی فرآیند اختلاط و پر شدن حفرات روی سنگدانه‌ها توسط ملات، این حفرات درون بتن آزاد می‌شوند و باعث شده تا در اطراف سنگدانه‌های بازیافتی، حجم زیادی از حفرات گوناگون ایجاد شود. این امر می‌تواند مستقیماً باعث افزایش بیش از حد جذب آب غوطه‌وری در بتن‌های تماماً بازیافتی شود. در شکل ۱۰ نیز می‌توان مشاهده کرد که در مقایسه با سطح عاری از تخلخل بتن معمولی، از نظر ظاهری، در بتن ۱۰۰٪ بازیافتی علاوه بر افزایش تعداد حفرات، تمرکز آن‌ها نیز به میزان زیادی در اطراف سنگدانه‌های بازیافتی صورت گرفته است. ذکر این نکته اهمیت دارد که به طور کل، عوامل زیادی مانند نوع سنگدانه بازیافتی، کیفیت آن، تعداد مراحل خرد کردن در مقدار جذب آب غوطه‌وری بتن بازیافتی موثر است؛ لذا می‌توان در مطالعات و مقایسه‌های آماري انجام شده توسط سیلوا (۲۰۱۵) امکان افزایش جذب آب غوطه‌وری

۳-۵- جذب آب غوطه‌وری

شکل ۹ نشانگر جذب آب غوطه‌وری بتن‌های ساخته شده می‌باشد. همان‌طور که از نتایج دیده می‌شود رابطه خطی مستقیمی با ضریب همبستگی ۰/۸۷ تا ۰/۹۹ میان افزایش جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی و جذب آب غوطه‌وری بتن‌های بازیافتی حاوی پوزولان وجود دارد. در بتن‌های بدون پوزولان، جذب آب غوطه‌وری بتن مرجع ۴/۹۲٪ شده است. با این حال در جایگزینی ۲۵٪ درشت‌دانه بازیافتی جذب آب غوطه‌وری بدون تغییر و در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی، این مقدار با ۸۷٪ رشد نسبت به بتن مرجع به ۹/۱۲٪ رسید. گرچه نتایج کسب شده اختلاف زیادی با یافته‌های راثو و همکاران (۲۰۱۹) (۳۳٪ افزایش جذب آب غوطه‌وری در بتن تماماً بازیافتی در مقایسه با بتن مرجع) دارند [۵۲]، با این حال، فوتبائو و همکاران (۲۰۱۸) با ثبت رشد ۷۰٪ در جذب آب غوطه‌وری بتن ۱۰۰٪ بازیافتی در مقایسه با بتن مرجع نشان دادند که ثبت چنین رشد جذب آب غوطه‌وری، امکان‌پذیر است [۵۳]. پدرو و همکاران (۲۰۱۸) و ماتیس و همکاران (۲۰۱۳) علت افزایش بیش از حد جذب آب غوطه‌وری با جایگزینی زیاد سنگدانه‌های بازیافتی را ناشی از افزایش ساختار متخلخل، به دلیل افزایش مقدار ملات چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی عنوان کردند [۵۴] و



شکل ۱۰. مقایسه تمرکز حفرات در اطراف سنگدانه‌های باز یافتی در بتن ۱۰۰٪ باز یافتی بدون پوزولان (الف) بتن معمولی (ب)

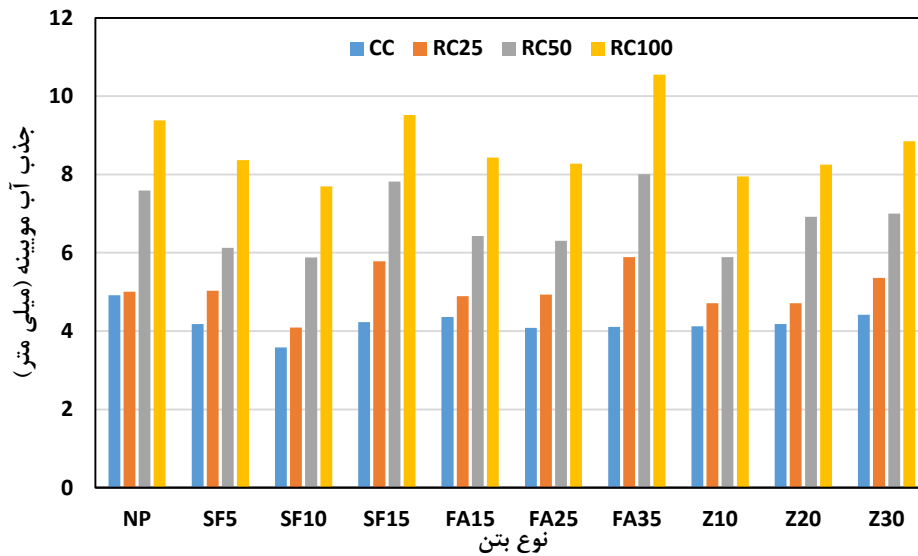
Fig. 10. Comparison of pore concentration around recycled aggregates in 100% recycled concrete (A) without pozzolan; (B) ordinary concrete

ریز ساختار این بتن‌ها وجود دارد ارجاع داد.

۳-۶- جذب آب مویینه

نتایج جذب آب مویینه بتن‌های ساخته شده در شکل ۱۱ ارائه شده است. جذب آب مویینه بتن مرجع پس از ۷۲ ساعت از آغاز آزمایش به ۴/۹۲ میلی‌متر رسید. همان‌طور که دیده می‌شود جایگزینی ۲۵٪ از درشت‌دانه باز یافتی باعث بروز تغییرات محسوس در جذب آب مویینه نشد، با این حال جایگزینی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ درشت‌دانه باز یافتی باعث شد تا جذب آب مویینه به ترتیب ۵۴٪ و ۹۱٪ رشد کند. این امر نشان می‌دهد که تشکیل شبکه مویرگی و توسعه فضای‌های مویینه با افزایش جایگزینی درشت‌دانه‌های باز یافتی به شکل فزاینده‌ای افزایش می‌یابد. به طور کلی جایگزینی مواد پوزولانی نشان داد که استفاده از این مواد به عنوان جایگزینی سیمان نمی‌تواند تا روند افزایش جذب آب مویینه را تغییر دهد، در مقابل، به دلیل کاهش مقدار جذب آب مویینه بتن‌های معمولی ناشی از اثر مطلوب مواد پوزولانی (کاهش مطلوب جذب آب مویینه بتن‌های معمولی) و در مقابل غلبه اثر نامطلوب جایگزینی درشت‌دانه‌های باز یافتی بر اثر مواد پوزولانی در جایگزینی کامل (کاهش محسوس جذب آب مویینه) درشت‌دانه‌های باز یافتی، این روند در بتن‌های حاوی مواد پوزولانی سرعت بیشتری به خود گرفت.

بتن ۱۰۰٪ باز یافتی را تا ۲/۴۷ برابر نسبت به بتن مرجع نیز یافت [۵۶]. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بین بتن‌های حاوی باز یافتی حاوی میکروسیلیس، جایگزینی ۱۰٪ در بین بتن‌های حاوی خاکستر بادی، جایگزینی ۱۵٪ و در بین بتن‌های حاوی زئولیت طبیعی، جایگزینی ۱۰٪ منجر به کسب مطلوب‌ترین نتایج شده است. تاثیر مطلوب جایگزینی این سه سطح جایگزینی از مواد پوزولانی به نحوی است که در مقایسه با بتن مرجع در بتن ۲۵٪ باز یافتی حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس مقدار جذب آب غوطه‌وری تا ۱۸٪ کاهش یافته و به ۴/۰۳٪ رسید. این میزان از بهبودی برای بتن‌های ۲۵٪ باز یافتی حاوی ۱۵٪ خاکستر بادی و ۱۰٪ زئولیت طبیعی به ترتیب ۱۲٪ و بدون تغییر می‌باشد. با این حال همان‌طور که دیده می‌شود، حتی در مطلوب‌ترین سطوح جایگزینی این پوزولان‌ها، هیچ بتن ۵۰٪ باز یافتی نمی‌توان یافت که از جذب آب غوطه‌ور کمتری نسبت به بتن مرجع برخوردار باشند. به همین ترتیب در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های باز یافتی در بهترین سطح اثر گذاری مواد پوزولانی، سطح جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس را می‌توان یافت که با ۴۳٪ افزایش نسبت به بتن مرجع به مقدار ۷/۰۳٪ رسید. عدم دستیابی به جذب آب غوطه‌وری نزدیک به بتن مرجع حتی در بهترین سطح جایگزینی مواد پوزولانی (۱۰٪ میکروسیلیس) را می‌توان به وجود ساختارهای متخلخل و حفره‌های متعددی که در



شکل ۱۱. جذب آب مویینه بتن‌های معمولی و بازیافتی در سن ۱۸۰ روزه

Fig. 11. Absorption of capillary water of normal and recycled concretes at the age of 180 days

نتیجه گرفت که با افزایش جایگزینی درشت‌دانه بازیافتی، همزمان با افزایش فضاهای حفره‌ای و متخلخل، فضاهای مویینه و مویرگی نیز در حال توسعه چشمگیری هستند.

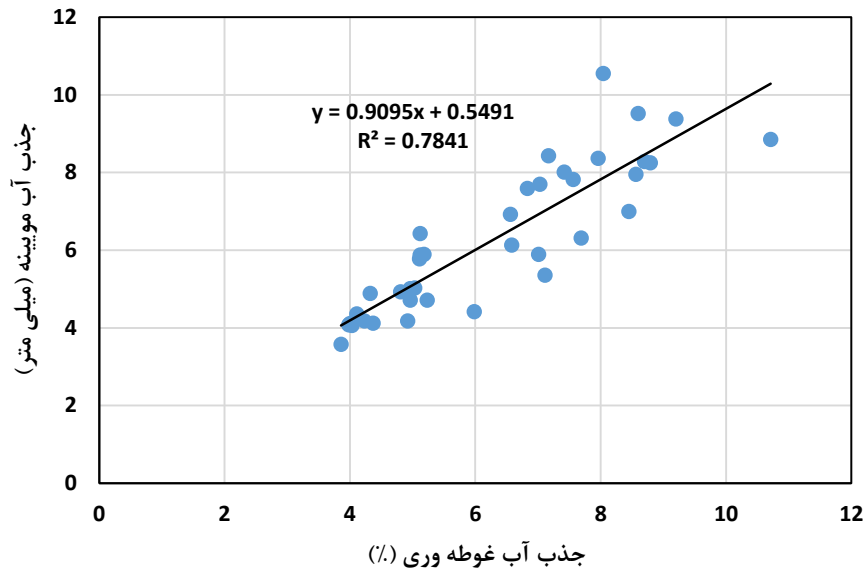
۳-۷- مقاومت ویژه الکتریکی

این آزمایش در واقع میزان قابلیت مقاومت بتن در برابر خوردگی اجزای فولادی درون بتن را نشان می‌دهد. از آنجایی که با کاهش قلیائیت درون بتن و بروز روند خوردگی اجزای فولادی درون بتن، دو ناحیه آند و کاتد ایجاد می‌شود که تحت تاثیر اختلاف پتانسل این دو ناحیه در اطراف میلگرد، شارش جریان الکتریکی روی می‌دهد، مقاومت ویژه الکتریکی بتن به عنوان شاخصی محسوب می‌شود که میزان ظرفیت وقوع این خوردگی درون بتن را نشان می‌دهد. مالهورتا و کارینو (۲۰۰۳) میزان خطر بروز خوردگی اجزای فولادی درون بتن را بر اساس مقاومت ویژه الکتریکی بتن دسته‌بندی نمودند [۵۷]. آن‌ها بتن‌های با مقاومت ویژه بیشتر از ۱۲۰ اهم - متر را در دسته بتن‌های با عدم وجود احتمال خوردگی، بین ۵۰ تا ۱۲۰ اهم - متر را با احتمال وجود خوردگی و کمتر از ۵۰ اهم - متر را وجود احتمال قطعی خوردگی تقسیم‌بندی کردند.

شکل ۱۳ نشانگر نتایج مقاومت الکتریکی بتن‌های ساخته شده است.

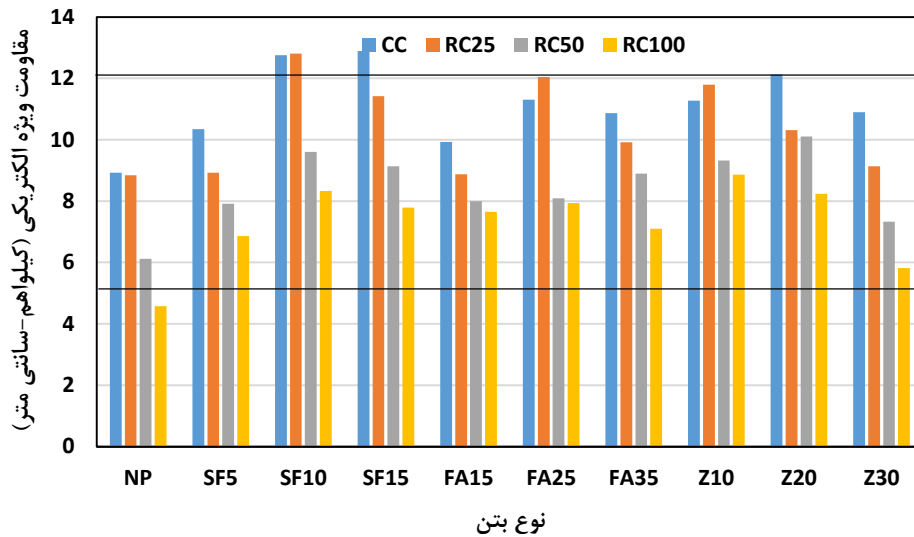
از مشاهده نتایج می‌توان استنباط کرد که جایگزینی مواد پوزولانی می‌تواند تا امکان دستیابی به بتن ۲۵٪ بازیافتی با جذب آب مویینه کمتر از بتن مرجع را ممکن سازد ولی در مطلوب‌ترین سطح جایگزینی مواد پوزولانی، امکان دستیابی به بتن ۵۰٪ بازیافتی با جذب آب مویینه مشابه با بتن مرجع ممکن نخواهد بود. این سطح از افت کیفیت به نحوی است که در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی، جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس باعث شد تا جذب آب مویینه تا ۵۶٪ نسبت به بتن مرجع افزایش یابد. این مقدار برای مطلوب‌ترین سطوح جایگزینی دو ماده خاکستر بادی (۱۵٪) و ژئولیت طبیعی (۱۰٪) نیز معادل ۶۸٪ ثبت شد. لذا به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که اثر مخرب جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی بر تشکیل ساختار مویرگی و توسعه فضاهای مویینه به شکل محسوسی بر اثر بهبودی بخش مواد پوزولانی غلبه کرده است، به نحوی که امکان دستیابی به بتن بازیافتی با ویژگی جذب آب مشابه بتن مرجع پس از جایگزینی ۲۵٪ درشت‌دانه بازیافتی مقدور نمی‌گردد.

شکل ۱۲ با ضریب همبستگی ۰/۷۸ نیز نشانگر وجود رابطه نسبتاً خطی میان نتایج جذب آب غوطه‌وری و جذب آب مویینه بتن‌های ساخته شده است. گرچه ساز و کار متفاوت دو آزمایش باعث شده تا ضریب همبستگی بین این دو پارامتر اندکی کم نشان داده شود، اما می‌توان به طور کلی



شکل ۱۲. رابطه بین جذب آب غوطه وری و جذب آب موئینه بتن‌ها در سن ۱۸۰ روزه

Fig. 12. Relationship between immersion water absorption and capillary water absorption of concretes at 180 days of age



شکل ۱۳. مقاومت ویژه الکتریکی بتن‌ها در سن ۱۸۰ روزه

Fig. 13. Special electrical resistance of concretes at the age of 180 days

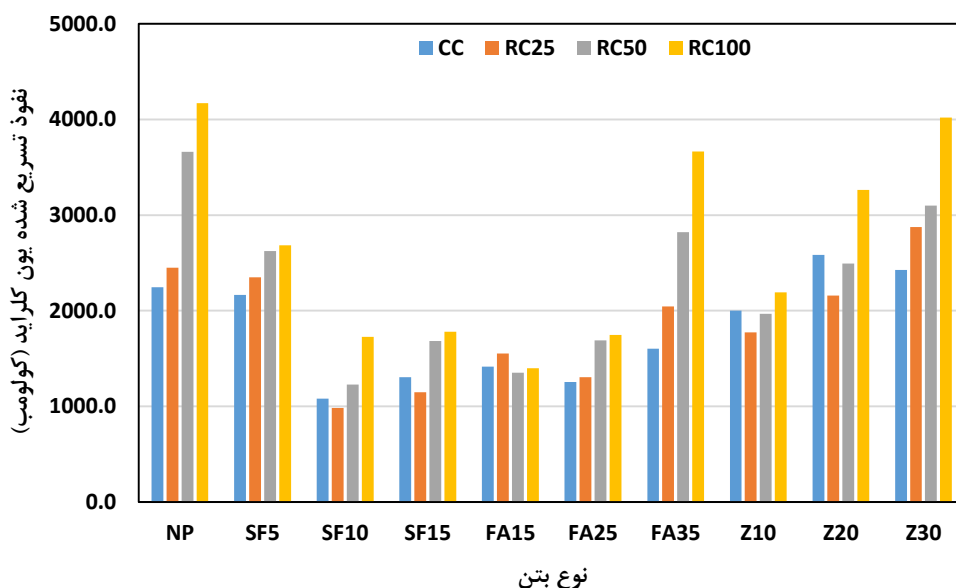
شد. نویسندگان معتقدند گر چه جایگزینی مواد پوزولانی باعث افزایش حجم تولید محصولات ناشی از هیدراسیون و بالتبع کاهش حفرات مویینه و ناپیوستگی‌های داخلی بتن می‌گردد، اما ظاهراً مقاومت ویژه الکتریکی بیشتر از آن که تحت تاثیر ساختار متخلخل بتن‌های بازیافتی قرار گرفته باشد، تحت تاثیر تغییرات شیمیایی درونی بتن و تغییرات جریان منفذی موجود در حفرات درون بتن قرار گرفته است. در تایید این ادعا، نایکوان و تینگیو (۱۹۹۸) معتقدند که استفاده از ژئولیت طبیعی باعث کاهش غلظت یونی و افزایش مقاومت الکتریکی درون بتن می‌گردد [۵۸].

۳-۸- ضریب هدایت جریان الکتریکی

در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که در دسته بتن‌های بدون پوزولان، با افزایش جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی ضریب هدایت جریان الکتریکی نیز افزایش یافته است به نحوی که در مقایسه با بتن مرجع، بتن‌های ۲۵٪ تا ۱۰۰٪ بازیافتی، با ۱۷٪ تا ۶۷٪ افزایش ضریب هدایت جریان الکتریکی مواجه شدند. با توجه به این که در این آزمایش هر چه شدت جریان عبوری کمتر باشد، میزان مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید افزایش می‌یابد؛ می‌توان تاثیر مطلوب استفاده از مواد پوزولانی را در هر یک از سطوح جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی مشاهده کرد. به نحوی که بتن‌های ۱۰۰٪ بازیافتی حاوی پوزولان به جز ۵٪ میکروسیلیس، ۳۵٪ خاکستر بادی و ۲۰٪ و ۳۰٪ ژئولیت طبیعی، از ضریب هدایت الکتریکی کم‌تری نسبت به بتن مرجع برخوردار شدند.

گر چه حتی استفاده از مواد پوزولانی باعث نشد تا افت کیفیت بتن‌ها در اثر افزایش جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی تغییر کند، ولی به هر حال باعث شد تا روند افزایش ضریب هدایت الکتریکی کاهش یابد. افزایش ۶۷٪ ضریب هدایت الکتریکی بتن ۱۰۰٪ بازیافتی بدون پوزولان در مقایسه با بتن مرجع را می‌توان به دلیل افزایش ساختار متخلخل و توسعه فضاهای ناپیوسته درون این بتن دانست. با این حال کاهش رشد این ضریب در بتن‌های حاوی پوزولان در مقایسه با بتن مرجع حاوی پوزولان را می‌توان به دلیل کاهش حجم فضاهای متخلخل در اثر تولید ژل‌های سیلیکاتی ناشی از واکنش پوزولانی دانست. چرا که در اثر افزایش حجم محصولات هیدراسیون و کاهش خلل و فرج‌های درون بتن، مسیر انتقال یون‌های آزاد درون بتن طولانی‌تر شده و از شدت عبور جریان الکتریکی کاسته می‌شود. همان‌طور که ذکر شد مانند نتایج مقاومت ویژه الکتریکی، نتایج این آزمایش نیز در راستای نتایج مربوط به جذب آب غوطه‌وری و مویینه نیستند. و جایگزینی

همان‌طور که دیده می‌شود در دسته بتن‌های بدون پوزولان، برای بتن مرجع احتمال خوردگی وجود دارد و با افزایش جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی این احتمال افزایش می‌یابد به نحوی که در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی با ۴۹٪ کاهش مقاومت ویژه الکتریکی، احتمال بروز خوردگی قطعی شده است. مشابه این افت مقاومت ویژه الکتریکی در اثر افزایش جایگزینی درشت‌دانه بازیافتی را کوردا و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان دادند [۲۶]؛ با این حال برخلاف نتایج کسب شده این تحقیق، آن‌ها وقوع خوردگی در بتن ۱۰۰٪ بازیافتی را با احتمال متوسط نشان دادند. به هر حال تاثیر مطلوب جایگزینی مواد پوزولانی را می‌توان جایی مشاهده کرد که استفاده از هر یک از سطوح جایگزینی مواد پوزولانی باعث شد تا مقاومت ویژه الکتریکی هر یک از بتن‌های بازیافتی در مقایسه با بتن بازیافتی بدون پوزولان بیشتر شود. این تاثیر مطلوب به شکلی است که احتمال خوردگی قطعی بتن تماماً بازیافتی در اثر جایگزینی هرگونه ماده پوزولانی کاسته شده است. مطلوب‌ترین نتایج در بین بتن‌های بازیافتی متعلق به بتن ۲۵٪ بازیافتی حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس و پس از آن ۲۵٪ خاکستر بادی می‌باشد به شکلی که احتمال بروز خوردگی درون این دو بتن از میان رفته است. نکته قابل توجه آن است که برخلاف نتایج جذب آب مویینه و غوطه‌وری، در سطح جایگزینی ۵۰٪ از درشت‌دانه‌های بازیافتی استفاده از مواد پوزولانی باعث شد تا از منظر مقاومت ویژه الکتریکی، امکان دستیابی به بتن با کیفیت بالاتر بتن مرجع مقدور گردد؛ با این حال در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی هیچ بتنی یافت نمی‌شود که از سطح کیفی بالاتری نسبت به بتن مرجع برخوردار باشد. همان‌طور که از نتایج دیده می‌شود، در هر سطح از جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی، متوسط مقاومت ویژه الکتریکی بتن‌های بازیافتی حاوی پوزولان (به ویژه میکروسیلیس و ژئولیت طبیعی) به هم نزدیک هستند. به نظر می‌رسد که تاثیر تغییرات شیمیایی ایجاد شده درون ساختار بتن‌های بازیافتی مشابه به هم می‌باشد و این امر باعث شده تا جریان منفذی که عامل انتقال جریان الکتریکی درون بتن است، درون بتن‌ها به شکل مشابهی عمل کند. در همین راستا، پیش‌بینی می‌شد که نتایج مقاومت ویژه الکتریکی بتن‌های ۱۰۰٪ بازیافتی مشابه با نتایج جذب آب غوطه‌وری و مویینه این بتن‌ها باشد. به نحوی که بتن‌های ۱۰۰٪ بازیافتی حاوی سطوح مختلف ژئولیت طبیعی از کیفیت پایین‌تری نسبت به بتن‌های حاوی میکروسیلیس برخوردار باشند با این حال برخلاف انتظار چنین پدیده‌ای رخ نداده و مقاومت ویژه الکتریکی بتن‌های ۱۰۰٪ بازیافتی حاوی ۱۰٪ و ۲۰٪ به ترتیب بیشتر و مشابه بتن ۱۰۰٪ بازیافتی حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس



شکل ۱۴. ضریب هدایت الکتریکی بتن‌ها در سن ۱۸۰ روزه

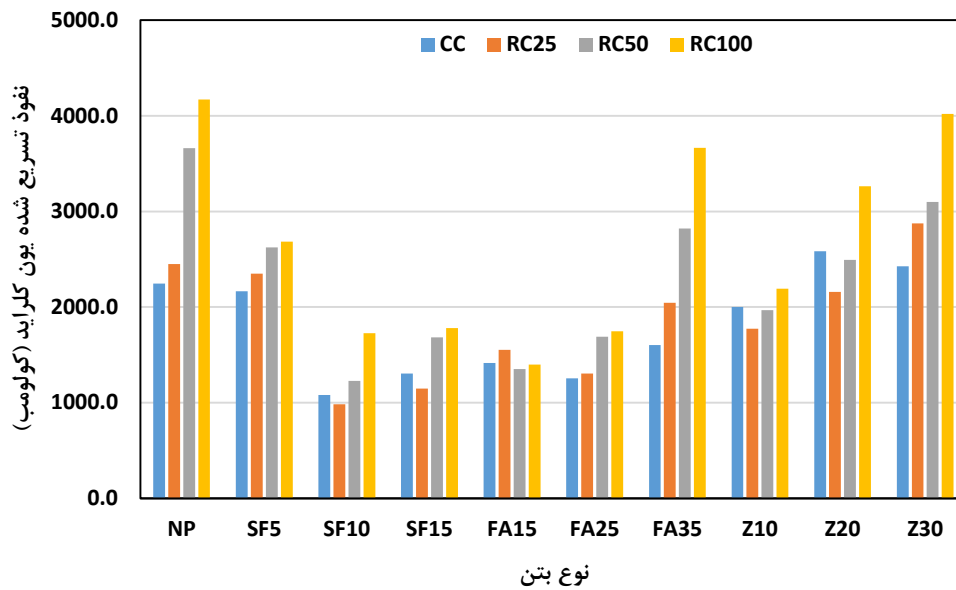
Fig. 14. Electrical conductivity of concretes at the age of 180 days

شده نشان داده شده که امکان افزایش شارش جریان الکتریکی در بتن‌های تماماً بازیافتی در مقایسه با بتن مرجع به ۲ برابر نیز می‌رسد [۵۶]. با این حال برخلاف این نظریه و نتایج کسب شده در این تحقیق، در برخی از مطالعات امکان دستیابی به بتن ۱۰۰٪ بازیافتی با مقاومت در برابر شارش جریان بیشتر و یا مشابه با بتن مرجع نیز گزارش شده است [۶۰ و ۵۹]. به طور کلی افزایش مقدار شارش جریان با افزایش جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی را می‌توان به ذات سنگدانه‌های بازیافتی ارجاع داد، زیرا که در این سنگدانه‌ها به دلیل داشتن ملات چسبیده امکان وجود مقدار نسبتاً بیشتری از یون‌های کلراید وجود دارد [۶۱]. از سوی دیگر با افزایش مقدار جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، امکان افزایش مقدار و اندازه حفرات و نیز ناپیوستگی‌های درون بتن افزایش می‌یابد، لذا نفوذ یون کلراید به درون بتن می‌تواند ساده‌تر و سریع‌تر صورت گردد. از سوی دیگر در صورت عدم استفاده از مواد پوزولانی برای غوطه‌ورسازی درشت‌دانه‌ها در دوغاب پوزولانی و یا هر گونه ارتقای سطح کیفی سنگدانه‌های بازیافتی، این امکان وجود دارد تا پس از اتمام فرآیند اختلاط، آب جذب شده توسط درشت‌دانه‌های بازیافتی در درون بتن آزاد شود و باعث شود تا نسبت آب به سیمان در اطراف ناحیه انتقال سنگدانه‌های بازیافتی افزایش یافته و این ناحیه با ضعف ساختاری بیشتری مواجه شود و

برخی از سطوح مواد پوزولانی در بتن‌های بازیافتی باعث دستیابی به نتایج کمتر و یا مشابه با بتن مرجع شد. بر این اساس می‌توان چنین استنباط کرد که نتایج این آزمایش بیشتر از آن که تحت تاثیر ساختار متخلخل و ناپیوستگی‌های درون بتن‌های بازیافتی باشند، تحت تاثیر تغییرات جریان منفذی درونی و تغییرات شیمیایی در ساختار این بتن‌ها ناشی از واکنش مواد پوزولانی قرار گرفته‌اند.

۳-۹- نفوذ تسریع شده یون کلراید

نتایج مربوط به آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید در بتن‌های ساخته شده در شکل ۱۵ ارائه شده است. بر اساس استاندارد ASTM C1202 حدود کیفی بتن‌ها بر اساس میزان شارش جریان الکتریکی نشان داده شده است [۳۸]. همان‌طور که مشاهده می‌شود خطر نفوذ یون کلراید در بتن مرجع و بتن ۲۵٪ بازیافتی بدون پوزولان در بخش پایین بازه متوسط قرار دارد و افزایش جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی در صورت عدم استفاده از مواد پوزولانی باعث شده تا در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی با افزایش ۸۶٪ نسبت به شارش جریان در بتن مرجع، بتن ۱۰۰٪ بازیافتی با خطر بالای نفوذ یون کلراید مواجه شود. در برخی از مطالعات آماری انجام



شکل ۱۵. نفوذ تسریع شده یون کلراید در بتن‌ها در سن ۱۸۰ روز

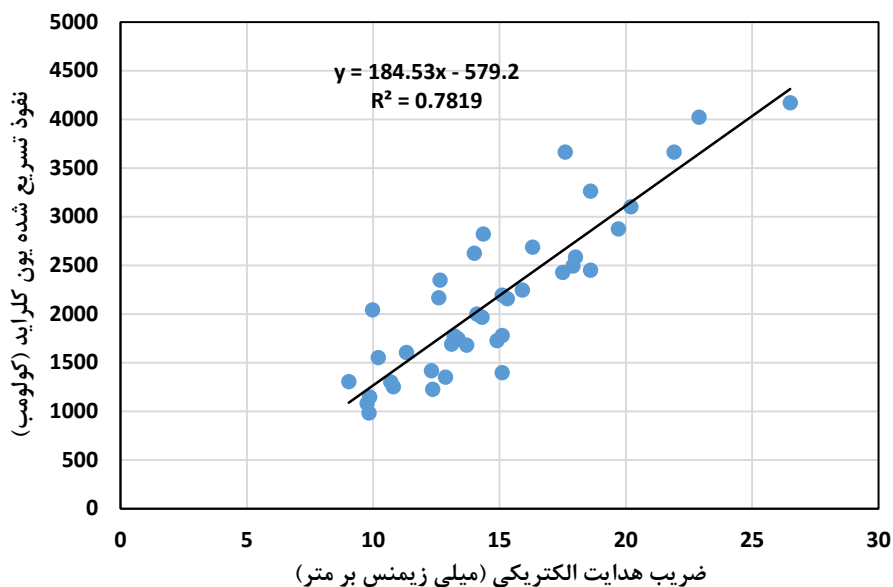
Fig. 15. Accelerated penetration of chloride ions in concretes at 180 days of age

سنگدانه‌های بازیافتی می‌شود. تاثیر مطلوب جایگزینی مواد پوزولانی را می‌توان در جایی مشاهده کرد که در سطح جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس میزان خطر نفوذ یون کلراید بتن ۲۵٪ بازیافتی به مرز خیلی کم رسیده است. در زمینه جایگزینی خاکستر بادی نیز می‌توان دید که تا سقف ۲۵٪ جایگزینی از این ماده پوزولانی نتایج در محدوده خطرپذیری کم قرار دارند ولی جایگزینی ۳۵٪ از خاکستر بادی قادر به تامین سطح کیفی مطلوبی در مقایسه با سایر سطوح جایگزینی این ماده پوزولانی نمی‌باشد. ژئولیت طبیعی نیز نشان داد که در سطح جایگزینی ۱۰٪ قادر است تا بتن ۵۰٪ بازیافتی خطر نفوذ یون کلراید را در محدوده کم قرار دهد. با این حال در سایر سطوح جایگزینی این ماده پوزولانی تمامی نتایج کسب شده در محدوده خطر متوسط نفوذ یون کلراید قرار دارند. شکل ۱۶ نیز نشان می‌دهد که می‌توان یک رابطه نسبتاً خطی با ضریب همبستگی نسبتاً خوب (۰/۸۷) میان نتایج نفوذ تسریع شده یون کلراید و ضریب هدایت الکتریکی بتن‌های بازیافتی یافت.

۴- تحلیل فنی و اقتصادی نتایج

در زمینه تحلیل و مقایسه فنی طرح‌ها نیز از مقایسه نتایج کسب شده

این امر باعث شود تا انتقال یون‌های کلراید با سهولت بیشتری در بتن‌های تماماً بازیافتی مواجه شوند. مشابه چنین رفتاری را سوچی و همکاران (۲۰۱۷) نیز گزارش کردند [۶۲]. به طور کلی می‌توان تاثیر مطلوب جایگزینی مواد پوزولانی را جایی مشاهده کرد که تمامی بتن‌های بازیافتی حاوی تمام سطوح جایگزینی میکروسیلیس، تمام بتن‌های بازیافتی حاوی ۱۵٪ و ۲۵٪ خاکستر بادی و تا سقف بتن‌های ۵۰٪ بازیافتی حاوی ۱۰٪ ژئولیت طبیعی در دسته بتن‌های با خطر کم نفوذ یون کلراید قرار گرفتند. به عبارتی با جایگزینی مواد پوزولانی می‌توان به بتن‌های تماماً بازیافتی با قابلیت نفوذ یون کلراید کمتر از بتن مرجع نیز دست یافت. علت رشد کیفی بسیار مطلوب بتن‌های ۱۰۰٪ بازیافتی حاوی پوزولان در مقایسه با بتن ۱۰۰٪ بازیافتی بدون پوزولان را می‌توان چنین دانست به دلیل غوطه‌ورسازی درشت‌دانه‌های بازیافتی درون دوغاب مواد پوزولانی و ایجاد یک لایه نازک روی این سنگدانه‌ها، امکان بازگشت آب جذب شده احتمالی درون سنگدانه‌ها به درون بتن کاهش یابد و از سوی دیگر افزایش تولید محصولات حاصل از واکنش‌های پوزولانی در اطراف ناحیه انتقال این سنگدانه‌ها منجر به مترکم‌تر شدن این ناحیه می‌گردد، لذا امکان آب انداختگی داخلی اطراف سنگدانه‌های بازیافتی کمتر شده و در نتیجه منجر به کاهش شبکه مویرگی در ناحیه انتقال اطراف



شکل ۱۶. رابطه بین ضریب هدایت الکتریکی و نفوذ تسریع شده یون کلراید در بتن‌های تحقیق در سن ۱۸۰ روزه

Fig. 16. Relationship between electrical conductivity and accelerated diffusion of chloride ions in research concretes at 180 days of age

محصول می‌گویند. بسته به نیاز مصرف کنندگان یک محصول، می‌توان این بازه را گسترده کرد. در این بررسی، این چرخه اقتصادی صرفاً متأثر از هزینه‌های ناشی از تولید فرض شده و هزینه‌های احتمالی ناشی از دوره بهره‌برداری بتن‌ها یکسان منظور گشته است. لذا با در نظر گرفتن این اصل که هزینه‌های تولید بتن‌های معمولی و بازیافتی شامل تهیه ماسه، آب، فوق روان کننده و سیمان مشترک خواهد بود، در کنار هزینه استفاده از مواد پوزولانی برای دستیابی به کیفیت بتن مشابه با بتن معمولی، هزینه تمام شده دستیابی به سنگدانه‌های درشت بازیافتی و معمولی، عامل اصلی بروز اختلاف قیمت در این دو نوع بتن می‌شود.

در شکل ۱۷-الف هزینه‌های تمام شده دستیابی به سنگدانه‌های طبیعی ارائه شده است. از آنجایی که بسیاری از پیمانکاران تخریب ساختمان، پس از اتمام فرآیند تخریب، اقدام به حمل و ریختن آن‌ها در حاشیه شهرها می‌کنند، لازم است تا دستگاه‌های قانون‌گذار و اجرایی، اقدام به تصویب قوانین لازم جهت حمل و تحویل نخاله‌های ساختمانی در محل‌های تعیین شده نمایند. همان‌طور که در شکل ۱۶-ب مشاهده می‌شود، هزینه دستیابی به سنگدانه‌های بازیافتی شامل انتقال مواد تخریب شده به محل خردکن، خرد کردن و دانه‌بندی و انتقال آن‌ها به محل کارخانه تولید بتن است. با

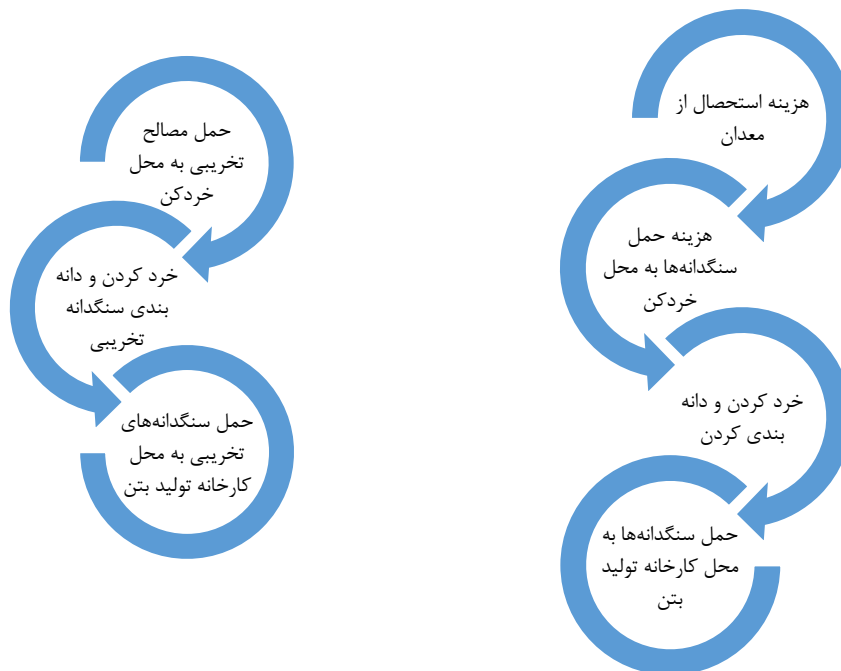
هر یک از بتن‌های ساخته شده با بتن مرجع نیز نسبتی به دست می‌آید که این نسبت نشان دهنده میزان رشد یا کاهش هر یک از خواص بررسی شده در بتن ساخته شده در مقایسه با بتن مرجع می‌باشد. از آن جایی که در این تحقیق، ۷ آزمایش مختلف در زمینه خواص مکانیکی و دوام مورد بررسی قرار گرفت، پس از محاسبه هر یک از نسبت‌ها، با استفاده از میانگین هندسی نتایج مختص به هر طرح، مطلوبیت فنی هر یک از طرح‌ها نسبت به بتن مرجع تعیین گردید. در زمینه انتخاب محاسبه بر اساس میانگین هندسی لازم به ذکر است که اساساً کاربرد میانگین هندسی برای داده‌هایی است که به صورت نسبی و درصدی ارزیابی می‌شوند. برای نمونه در مقایسه‌های زوجی چون حالت معکوسی وجود دارد و برخی اعداد به صورت نسبی و معکوس هستند، میانگین حسابی ساده پاسخگو نیست و باید از میانگین هندسی استفاده کرد. جدول ۴ نشانگر مطلوبیت فنی هر یک از طرح‌ها نسبت به بتن مرجع بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های مکانیکی و دوام انجام شده است.

در تحلیل اقتصادی هر محصول می‌توان سطوح مختلفی از زمان پیش از تولید تا پس از مصرف آن را معرفی کرد و اثرات اقتصادی آن را در بازه‌های مختلف بررسی و شناسایی نمود که به آن ارزیابی چرخه اقتصادی حیات

جدول ۴. ضریب مطلوبیت فنی بتن‌های تحقیق در مقایسه با بتن مرجع

Table 4. Technical desirability coefficient of research concretes in comparison with reference concrete

نوع بتن	ضریب مطلوبیت فنی	نوع بتن	ضریب مطلوبیت فنی	نوع بتن	ضریب مطلوبیت فنی	نوع بتن	ضریب مطلوبیت فنی
CC	۱/۰۰	RC25	۰/۹۵	RC50	۰/۶۶	RC100	۰/۳۶
CC-SF5	۱/۱۱	RC25-SF5	۰/۹۹۰	RC50-SF5	۰/۸۶	RC100-SF5	۰/۶۸
CC-SF10	۱/۲۷	RC25-SF10	۱/۲۶	RC50-SF10	۱/۱۰	RC100-SF10	۰/۸۶
CC-SF15	۱/۱۳	RC25-SF15	۱/۰۶	RC50-SF15	۰/۸۲	RC100-SF15	۰/۵۹
CC-FA15	۰/۹۹	RC25-FA15	۰/۹۵	RC50-FA15	۰/۸۶	RC100-FA15	۰/۷۰
CC-FA25	۱/۰۶	RC25-FA25	۱/۰۱	RC50-FA25	۰/۷۸	RC100-FA25	۰/۶۳
CC-FA35	۰/۹۸	RC25-FA35	۰/۸۵	RC50-FA35	۰/۶۵	RC100-FA35	۰/۳۶
CC-Z10	۱/۰۶	RC25-Z10	۱/۰۴	RC50-Z10	۰/۸۸	RC100-Z10	۰/۷۰
CC-Z20	۰/۹۷	RC25-Z20	۰/۹۵	RC50-Z20	۰/۸۰	RC100-Z20	۰/۵۸
CC-Z30	۰/۹۱	RC25-Z30	۰/۷۹	RC50-Z30	۰/۶۴	RC100-Z30	۰/۳۶



(ب) هزینه دست‌یابی به سنگدانه‌های بازیافتی

(الف) هزینه تمام شده دست‌یابی به سنگدانه‌های طبیعی

شکل ۱۷. سازوکار دست‌یابی به سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی و عوامل موثر در هزینه تمام شده آن‌ها

Fig. 17. Mechanism of obtaining natural and recycled aggregates and factors affecting their cost (A) Complete costs of obtaining natural aggregates; (B) Cost of obtaining recycled aggregates

جدول ۵. قیمت واحد مصالح مصرفی در ساخت بتنهای تحقیق (کیلوگرم/ تومان)

Table 5. Unit price of consumable materials in the manufacture of research concretes (Toman / kg)

مصالح	سیمان	میکروسیلیس	خاکستر بادی	زئولیت طبیعی	شن طبیعی	ماسه طبیعی	فوق روان کننده	آب
قیمت	۲۱۰	۵۰۰	۹۰۰	۶۰۰	۵۰	۶۰	۴۰۰۰	۳

جدول ۶. ضریب مطلوبیت اقتصادی بتنهای تحقیق در مقایسه با بتن مرجع

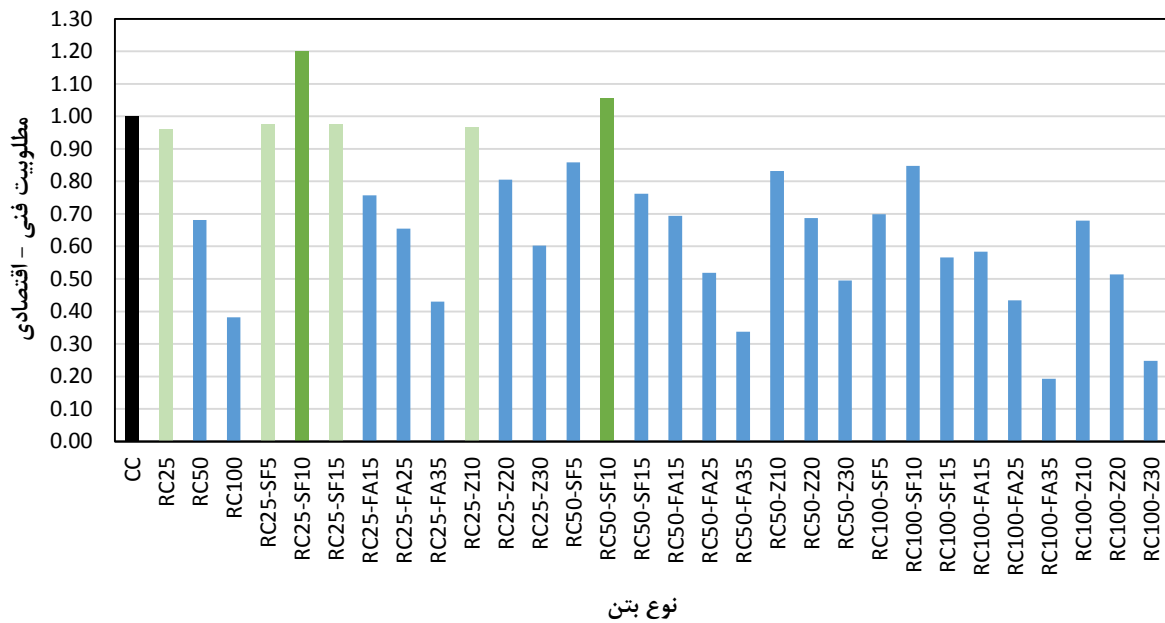
Table 6. Economic desirability coefficient of research concretes in comparison with reference concrete

نوع بتن	ضریب مطلوبیت اقتصادی	نوع بتن	ضریب مطلوبیت اقتصادی	نوع بتن	ضریب مطلوبیت اقتصادی	نوع بتن	ضریب مطلوبیت اقتصادی
CC	۱/۰۰۰	RC25	۱/۰۱۳	RC50	۱/۰۲۶	RC100	۱/۰۵۴
CC-SF5	۰/۹۶۹	RC25-SF5	۰/۹۸۲	RC50-SF5	۰/۹۹۵	RC100-SF5	۱/۰۲۱
CC-SF10	۰/۹۳۹	RC25-SF10	۰/۹۵۲	RC50-SF10	۰/۹۶۴	RC100-SF10	۰/۹۹۰
CC-SF15	۰/۹۰۸	RC25-SF15	۰/۹۲۱	RC50-SF15	۰/۹۳۴	RC100-SF15	۰/۹۵۹
CC-FA15	۰/۷۸۲	RC25-FA15	۰/۷۹۵	RC50-FA15	۰/۸۰۷	RC100-FA15	۰/۸۳۳
CC-FA25	۰/۶۳۶	RC25-FA25	۰/۶۴۹	RC50-FA25	۰/۶۶۲	RC100-FA25	۰/۶۸۷
CC-FA35	۰/۴۹۱	RC25-FA35	۰/۵۰۴	RC50-FA35	۰/۵۱۶	RC100-FA35	۰/۵۴۲
CC-Z10	۰/۹۱۸	RC25-Z10	۰/۹۳۱	RC50-Z10	۰/۹۴۳	RC100-Z10	۰/۹۶۹
CC-Z20	۰/۸۳۶	RC25-Z20	۰/۸۴۸	RC50-Z20	۰/۸۶۱	RC100-Z20	۰/۸۸۷
CC-Z30	۰/۷۵۳	RC25-Z30	۰/۷۶۶	RC50-Z30	۰/۷۷۹	RC100-Z30	۰/۸۰۴

نظر گرفتن چنین هزینه‌هایی در تحلیل اقتصادی، با پیش فرض بدبینانه می‌توان، نیمی از هزینه‌های ناشی از خرید سنگدانه‌های طبیعی در محل معدن را برای سنگدانه‌های بازیافتی در نظر گرفت. بر این اساس و با استناد به جدول ۵ که بیانگر قیمت واحد هر یک از اجزای تشکیل دهنده بتن در ابتدای سال ۹۹ و بر اساس میانگین استعمال اخذ شده از بازارهای اهواز و تهران می‌باشد، هزینه تمام شده هر یک از بتن‌های معمولی و بازیافتی استفاده شده در این تحقیق محاسبه شده و بر مبنای آن، ضریبی تحت عنوان "ضریب مطلوبیت اقتصادی" معرفی شد که نشانگر میزان نسبت قیمت تمام شده هر یک از بتن‌ها نسبت به بتن مرجع می‌باشد (جدول ۶).

جهت انتخاب طرح بهینه‌ای که هم‌زمان مطلوبیت‌های اقتصادی و فنی در آن در بالاترین سطح نسبت به بتن مرجع وجود دارد، یک ضریب کل

این حال در صورت استقرار دستگاه خردکن در مجاورت کارخانه تولید بتن، می‌توان هزینه انتقال سنگدانه‌های بازیافتی دانه‌بندی شده را نیز حذف کرد و به این ترتیب باعث کاهش بیشتر هزینه تمام شده تولید سنگدانه‌های بازیافتی شد. در این بررسی از این پیش فرض صرف‌نظر شده و صرفاً با تکیه بر حذف هزینه‌های ناشی از استحصال، محاسبات قیمت صورت گرفته است. البته نباید مواردی مانند هزینه‌های کنترل کیفی سنگدانه‌های بازیافتی و یا هزینه‌های جداسازی برخی از آلودگی‌های ساختمانی مانند گچ، چوب و مواد پلاستیکی از مصالح بازیافتی را از نظر دور داشت. با این حال چنین هزینه‌هایی در تولید با مقیاس انبوه به شکل محسوسی کاهش خواهند یافت و عملاً باعث می‌شود تا هزینه‌های دستیابی به سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی رایگان محسوب شود. با این حال جهت در



شکل ۱۸. مطلوبیت فنی - اقتصادی بتن‌های تحقیق در مقایسه با بتن مرجع

Fig. 18. Technical-economic desirability of research concretes compared to reference concrete

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق خواص مکانیکی، ویژگی‌های وابسته به دوام و میزان مطلوبیت فنی - اقتصادی بتن‌های بازیافتی بررسی شدند. نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

- مقاومت فشاری در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌ها تا ۱۸٪ نسبت به بتن مرجع کاهش یافت؛ در حالی که در جایگزینی ۲۵٪ درشت‌دانه‌های بازیافتی منجر به بروز تغییر محسوس در مقاومت فشاری نشد.

- تمام بتن‌های بازیافتی حاوی میکروسیلیس به مقاومت هدف ۴۰ مگاپاسکال رسیدند. نتایج نشان دادند که در جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس امکان دستیابی به مقاومت فشاری بیشتر از بتن مرجع نیز وجود دارد. در مطلوب‌ترین سطح جایگزینی خاکستر بادی (۲۵٪)، امکان دستیابی به بتن با مقاومت هدف برای هیچ یک از سطوح جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی میسر نگردید. با این حال، جایگزینی ۱۰٪ از ژئولیت طبیعی نشان داد که این ماده پوزولانی به عنوان یک ماده جایگزین سیمان، قادر است تا در بتن‌های بازیافتی با کاهش مقدار سیمان مصرفی، مقاومت فشاری معادل بتن‌های بازیافتی بدون پوزولان را تامین کند.

- با توجه به نتایج آزمون سرعت انتشار امواج فراصوت، در حالی که

تعریف گردید که حاصل از ضریب مستقیم مطلوبیت اقتصادی در مطلوبیت فنی است. در واقع این ضریب میزان مطلوبیت همزمان طرح‌هایی که قادر به کسب مطلوبیت بالایی در عوامل فنی و اقتصادی بودند، را نشان می‌دهد. از ویژگی‌های مثبت این روش محاسبه، آن است که نشان می‌دهد الزاماً بتنی که قادر به کسب مطلوبیت عامل فنی شده است، به عنوان بتن بهینه انتخاب نخواهد شد و در مقابل بتنی که صرفاً از نظر اقتصادی با هزینه کم‌تری ساخته شده است، به دلیل نتایج پایین‌تر از حد مطلوب در عامل فنی، به عنوان بتن بهینه نیز معرفی نمی‌شود. نمونه بارز این ادعا را می‌توان در بتن ۵۰٪ بازیافتی مشاهده کرد، جایی که تاثیر مطلوبیت فنی کم آن باعث شده تا مطلوبیت بیشتر اقتصادی آن در مقایسه با بتن مرجع، منجر به کاهش مطلوبیت کل آن شود. نتایج مندرج در شکل ۱۸ نشان می‌دهد که در مقایسه با بتن مرجع، بتن‌های ۲۵٪ و ۵۰٪ بازیافتی حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس از مطلوبیت کل فنی - اقتصادی بیشتری نسبت به بتن مرجع برخوردار هستند. همچنین می‌توان با ضریب اطمینان ۹۰٪ بتن ۲۵٪ بازیافتی بدون پوزولان و بتن ۲۵٪ بازیافتی حاوی ۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس و بتن ۲۵٪ بازیافتی حاوی ۱۰٪ ژئولیت طبیعی را نیز در دسته بتن‌های بازیافتی با مطلوبیت مناسب محسوب کرد.

- در بتن‌های بدون پوزولان تا جایگزینی ۲۵٪ درشت‌دانه‌های بازیافتی، میزان نفوذ یون کلراید مشابه بتن مرجع و با شدت متوسط ثابت شد، در حالی که جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی باعث شد تا بتن ۱۰۰٪ بازیافتی با خطر بالای نفوذ یون کلراید مواجه شود. نتایج نشان داد که با استفاده از مواد پوزولانی امکان دستیابی به بتن‌های ۱۰۰٪ بازیافتی با قابلیت نفوذ یون کلراید کمتر از بتن مرجع وجود دارد.

- از منظر معیار مطلوبیت فنی-اقتصادی، نتایج نشان داد که در مقایسه با بتن مرجع، بتن‌های ۲۵٪ و ۵۰٪ بازیافتی حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس از مطلوبیت کل فنی-اقتصادی بیشتری نسبت به بتن مرجع برخوردار هستند. همچنین می‌توان با ضریب اطمینان ۹۰٪ بتن ۲۵٪ بازیافتی بدون پوزولان و بتن ۲۵٪ بازیافتی حاوی ۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس و بتن ۲۵٪ بازیافتی حاوی ۱۰٪ ژئولیت طبیعی را نیز در دسته بتن‌های بازیافتی با مطلوبیت مناسب محسوب کرد.

منابع

- [1] N.D. Oikonomou, Recycled concrete aggregates, Cement and concrete composites, 27(2) (2005) 315-318.
- [2] N. Kisku, H. Joshi, M. Ansari, S. Panda, S. Nayak, S.C. Dutta, a critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material, Construction and building materials, 131 (2017) 721-740.
- [3] <https://pasmand.tehran.ir>, in.
- [4] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, M. Barra, Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, Cement and concrete research, 37(5) (2007) 735-742.
- [5] K.K. Sagoe-Crentsil, T. Brown, A.H. Taylor, Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate, Cement and concrete research, 31(5) (2001) 707-712.
- [6] K. Rahal, Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate, Building and environment, 42(1) (2007) 407-415.
- [7] J. Pacheco, J. De Brito, C. Chastre, L. Evangelista, Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse

جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی باعث افت کیفیت بتن تا سطح مشکوک شد، تمامی سطوح جایگزینی میکروسیلیس باعث دستیابی به بتن‌های با سطح کیفی خوب شد، به نحوی که بتن‌های ۵۰٪ و ۱۰۰٪ بازیافتی حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس در دسته بتن‌های با سطح کیفی عالی قرار گرفتند. در بین بتن‌های حاوی خاکستر بادی، فقط بتن ۲۵٪ بازیافتی حاوی ۲۵٪ خاکستر بادی از سطح کیفی خوب برخوردار شد و سایر سطوح جایگزینی خاکستر بادی در بتن‌های بازیافتی باعث شدند تا سطح کیفی بتن ضعیف، مشکوک و یا در مرز بین خوب و مشکوک واقع شوند. ژئولیت طبیعی نیز نشان داد تا جایگزینی ۲۰٪، امکان دستیابی به بتن بازیافتی با سطح کیفی خوب وجود دارد.

- میزان جذب آب غوطه‌وری در بتن ۲۵٪ بازیافتی بدون پوزولان در مقایسه با بتن مرجع، بدون تغییر و در بتن ۱۰۰٪ بازیافتی تا ۸۷٪ افزایش یافت و به ۹/۱۲٪ رسید. در مطلوب‌ترین سطوح جایگزینی مواد پوزولانی، هیچ یک از بتن‌های ۵۰٪ و ۱۰۰٪ بازیافتی از جذب آب غوطه‌وری کمتری نسبت به بتن مرجع برخوردار نشدند.

- جایگزینی مواد پوزولانی نشان داد که استفاده از این مواد به عنوان جایگزین سیمان، نمی‌تواند اثر مخرب افزایش جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی را در افزایش جذب آب موئینه کمتر کند.

- با توجه به نتایج حاصل از آزمون مقاومت ویژه الکتریکی، احتمال بروز خوردگی در بتن تماماً بازیافتی قطعی گردید. با این حال تاثیر مطلوب مواد پوزولانی به نحوی بود که در بتن‌های ۱۰۰٪ بازیافتی حاوی پوزولان، احتمال بروز خوردگی کاسته شده و در بتن‌های ۲۵٪ بازیافتی حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس و ۲۵٪ خاکستر بادی، امکان بروز خوردگی از بین رفت. در ضمن امکان دستیابی به بتن ۵۰٪ بازیافتی با مقاومت الکتریکی مشابه با بتن مرجع مقدور گردید.

- نتایج نشان دادند که مقاومت ویژه الکتریکی بیشتر از آن که تحت تاثیر ساختار متخلخل بتن‌های بازیافتی قرار گرفته باشد، تحت تاثیر تغییرات شیمیایی درونی بتن و تغییرات جریان منفذی موجود در حفرات درون بتن قرار گرفته است.

- با افزایش جایگزینی از ۲۵٪ تا ۱۰۰٪ درشت‌دانه‌های بازیافتی، ضریب هدایت جریان الکتریکی در مقایسه با بتن مرجع بین ۱۷٪ تا ۶۷٪ افزایش یافت. با این حال تاثیر مواد پوزولانی در بهبود کیفیت بتن‌های بازیافتی به نحوی بود که امکان دستیابی به بتن ۱۰۰٪ بازیافتی با ضریب هدایت الکتریکی کمتر از بتن مرجع را مقدور ساخت.

- and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 24(5) (2010) 701-708.
- [18] A. Akbarnezhad, K. Ong, M. Zhang, C. Tam, T. Foo, Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, 25(8) (2011) 3469-3479.
- [19] A. Mansur, D. Santos, H. Mansur, a microstructural approach to adherence mechanism of poly (vinyl alcohol) modified cement systems to ceramic tiles, *Cement and concrete research*, 37(2) (2007) 270-282.
- [20] Y.-G. Zhu, S.-C. Kou, C.-S. Poon, J.-G. Dai, Q.-Y. Li, Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*, 35(1) (2013) 32-38.
- [21] M. Tsujino, T. Noguchi, M. Tamura, M. Kanematsu, I. Maruyama, Application of conventionally recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(1) (2007) 13-25.
- [22] B. Wu, G. Ye, Development of porosity of cement paste blended with supplementary cementitious materials after carbonation, *Construction and Building Materials*, 145 (2017) 52-61.
- [23] G. Hannesson, K. Kuder, R. Shogren, D. Lehman, the influence of high volume of fly ash and slag on the compressive strength of self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials*, 30 (2012) 161-168.
- [24] Z. Pan, J. Zhou, X. Jiang, Y. Xu, R. Jin, J. Ma, Y. Zhuang, Z. Diao, S. Zhang, Q. Si, Investigating the effects of steel slag powder on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 200 (2019) 570-577.
- [25] D. Pedro, J. De Brito, L. Evangelista, Durability performance of high-performance concrete made with recycled aggregates, fly ash and densified silica fume, *Cement and Concrete Composites*, 93 (2018) 63-74.
- [26] R. Kurda, J. de Brito, J.D. Silvestre, Water absorption recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, 201 (2019) 110-120.
- [8] H.K.A. Al-Bayati, P.K. Das, S.L. Tighe, H. Baaj, Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, 112 (2016) 284-298.
- [9] V.W. Tam, Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries, *Journal of Cleaner production*, 17(7) (2009) 688-702.
- [10] C. Faella, C. Lima, E. Martinelli, M. Pepe, R. Realfonzo, Mechanical and durability performance of sustainable structural concretes: An experimental study, *Cement and Concrete Composites*, 71 (2016) 85-96.
- [11] H. Jalilifar, F. Sajedi, V.R. Toosi, Evaluating the durability of recycled concrete made of coarse recycled aggregate concrete containing silica-fume and natural zeolite, *Revista de la construcción*, 19(3) (2020) 457-473.
- [12] I.S. Del Bosque, W. Zhu, T. Howind, A. Matías, M.S. De Rojas, C. Medina, Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate, *Cement and Concrete Composites*, 81 (2017) 25-34.
- [13] V.W. Tam, C.M. Tam, a new approach in assessing cement mortar remains on recycled aggregate, *Magazine of Concrete Research*, 59(6) (2007) 413-422.
- [14] A. Akbarnezhad, K. Ong, M. Zhang, C. Tam, Acid treatment technique for determining the mortar content of recycled concrete aggregates, *Journal of Testing and Evaluation*, 41(3) (2013) 441-450.
- [15] A. Katz, Treatments for the improvement of recycled aggregate, *Journal of materials in civil engineering*, 16(6) (2004) 597-603.
- [16] V.W. Tam, X. Gao, C.M. Tam, Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, *Cement and concrete research*, 35(6) (2005) 1195-1203.
- [17] D. Kong, T. Lei, J. Zheng, C. Ma, J. Jiang, J. Jiang, Effect

- [36] ASTM C 642-13. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concretes, in, ASTM International, West Conshohocken, 2013.
- [37] ASTM C1585. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, in, ASTM International West Conshohocken, 2011.
- [38] ASTM C1202-12. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, in, ASTM International, West Conshohocken, 2012.
- [39] ASTM C1760-12. Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete, in, ASTM International, West Conshohocken, 2012.
- [40] X. Zhu, X. Chen, N. Shen, H. Tian, X. Fan, J. Lu, Mechanical properties of pervious concrete with recycled aggregate, *Computers and Concrete*, 21(6) (2018) 623-635.
- [41] T.C. Hansen, *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*, CRC Press, 1992.
- [42] A. Kanellopoulos, D. Nicolaidis, M.F. Petrou, Mechanical and durability properties of concretes containing recycled lime powder and recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 53 (2014) 253-259.
- [43] K.H. Younis, K. Pilakoutas, Strength prediction model and methods for improving recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 49 (2013) 688-701.
- [44] B. Ahmadi, M. Shekarchi, Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, *Cement and concrete composites*, 32(2) (2010) 134-141.
- [45] R. Silva, J. De Brito, R. Dhir, Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 83 (2015) 108-118.
- [46] K.-H. Yang, H.-S. Chung, A.F. Ashour, Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties, *ACI Materials Journal*, 150(3) (2008) 289-296.
- [47] S.C. Kou, C.S. Poon, D. Chan, Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash, *Cement and Concrete Composites*, 95 (2019) 169-182.
- [27] R. Majhi, A. Nayak, Bond, durability and microstructural characteristics of ground granulated blast furnace slag based recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 212 (2019) 578-595.
- [28] M. Limbachiya, M.S. Meddah, Y. Ouchagour, Performance of Portland/Silica Fume Cement Concrete Produced with Recycled Concrete Aggregate, *ACI Materials Journal*, 109(1) (2012).
- [29] R. Corral Higuera, S.P. Arredondo Rea, N. Flores, J.M.V. Gómez Soberón, J.L. Almaral Sánchez, J. Castorena González, A. Martínez Villafane, F. Almeraya Calderón, Chloride ion penetrability and corrosion behavior of steel in concrete with sustainability characteristics, *International journal of electrochemical science*, 6(4) (2011) 958-970.
- [30] ASTM C618-19. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, in, ASTM International, West Conshohocken, 2019.
- [31] M.S. De Juan, P.A. Gutiérrez, Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction and building materials*, 23(2) (2009) 872-877.
- [32] BS 1881: 116. Methods for the Determination of Compressive Strength of Concrete, in, BSI, United Kingdom, 1983.
- [33] ASTM C496 / C496M-11. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, in, ASTM International, West Conshohocken, 2004.
- [34] ASTM C469 / C469M-14. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, in, ASTM International, West Conshohocken, 2014.
- [35] ASTM C597-16. Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, in, ASTM International, West Conshohocken, 2016.

- [55] W.H. Kwan, M. Ramli, K.J. Kam, M.Z. Sulieman, Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties, *Construction and Building Materials*, 26(1) (2012) 565-573.
- [56] R. Silva, Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in the production of structural concrete, 2015.
- [57] V.M. Malhotra, N.J. Carino, *Handbook on nondestructive testing of concrete*, CRC press, 2003.
- [58] F. Naiqian, H. Tingyu, Mechanism of natural zeolite powder in preventing alkali—silica reaction in concrete, *Advances in cement research*, 10(3) (1998) 101-108.
- [59] R.K. Dhir, K.A. Paine, Value added sustainable use of recycled and secondary aggregates in concrete, *Indian Concrete Journal*, 84(3) (2010) 7-26.
- [60] M.C. Limbachiya, Coarse recycled aggregates for use in new concrete, in: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability*, Thomas Telford Ltd, 2004, pp. 99-106.
- [61] V.W. Tam, C.M. Tam, diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA_s and TSMA_{sc}, *Construction and Building Materials*, 22(10) (2008) 2068-2077.
- [62] J.-C. Souche, P. Devillers, M. Salgues, E.G. Diaz, Influence of recycled coarse aggregates on permeability of fresh concrete, *Cement and Concrete Composites*, 83 (2017) 394-404.
- aggregate concrete, *Journal of materials in civil engineering*, 19(9) (2007) 709-717.
- [48] E.A. Whitehurst, Soniscope tests concrete structures, in: *Journal Proceedings*, 1951, pp. 433-444.
- [49] M.C. Rao, S. Bhattacharyya, S. Barai, Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete, *Materials and structures*, 44(1) (2011) 205-220.
- [50] R. Kurda, J. de Brito, J.D. Silvestre, Indirect evaluation of the compressive strength of recycled aggregate concrete with high fly ash ratios, *Magazine of Concrete Research*, 70(4) (2018) 204-216.
- [51] T.R. Naik, V.M. Malhotra, J.S. Popovics, The ultrasonic pulse velocity method, *Handbook on nondestructive testing of concrete*, CRC Press, 2003.
- [52] S.P. Arredondo-Rea, R. Corral-Higuera, J. Gómez-Soberón, D.C. Gámez-García, J. Bernal-Camacho, C. Rosas-Casarez, M. Ungsson-Nieblas, Durability parameters of reinforced recycled aggregate concrete: Case study, *Applied sciences*, 9(4) (2019) 617.
- [53] S. Seara-Paz, J. de Brito, I. González-Taboada, F. Martínez-Abella, R. Vasco-Silva, Recycled concrete with coarse recycled aggregate. An overview and analysis, *Mater. Construcc*, 68(330) (2018) e151.
- [54] D. Matias, J. de Brito, A. Rosa, D. Pedro, Durability of concrete with recycled coarse aggregates: influence of superplasticizers, *Journal of materials in civil engineering*, 26(7) (2014) 06014011.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. F. Sajedi , H. Jalilifar, *Investigation of the technical and economic desirability of recycled concretes containing pozzolan*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(8) (2022) 2969-2994.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20411.7415

