تحقیقات بتن
سال پانزدهم، شمارهٔ دوم
تابستان ۱۴۰۱
ص ۹۶ – ۷۹
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸

بررسی آزمایشگاهی تأثیر درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی بر دوام بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی پوزولان

سیدفتح اله ساجدی *
دانشیار گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
حسن جلیلی‌فر
دانش‌آموخته دکتری تخصصی، گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

چکیده
تحقیق آزمایشگاهی حاضر به بررسی دو خاصیت مکانیکی و به‌ویژه دوام بتن‌های تماما بازیافتی حاوی پوزولان‌های زئولیت طبیعی، میکروسیلیس و خاکستربادی پرداخته است. بتن‌های بازیافتی متشکل از درشت‌دانه‌های بتنی بازیافت شده و حاوی درصدهای مختلف جایگزینی میکروسیلیس، خاکستربادی و زئولیت طبیعی می‌باشند. در مجموع ۱۱ طرح اختلاط ساخته شدند که شامل بتن معمولی مرجع، بتن ٪۱۰۰ بازیافتی بدون پوزولان و ۹ طرح اختلاط از بتن‌های تماما بازیافتی حاوی مواد پوزولانی مذکور به‌صورت کاربردهای جداگانه می‌باشند. برای بررسی و مقایسه برخی از خواص مکانیکی و به‌ویژه خواص وابسته به دوام این نوع بتن‌ها، در بازه سنی ۲۸ تا ۹۱ روزه، مقاومت فشاری، در بازه سنی ۲۸ روزه سرعت انتشار امواج فراصوت، و در بازه سنی ۱۸۰ روزه نیز آزمایش‌های جذب آب غوطه‌وری، جذب آب مویینه، مقاومت ویژه الکتریکی و ضریب هدایت الکتریکی نمونه‌های ساخته شده از این نوع بتن‌ها، اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان دادند که گرچه جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی در این نوع بتن‌ها منجر به افت مقاومت فشاری آنها نسبت به بتن مرجع می‌شود، ولی جایگزینی مواد پوزولانی مانند میکروسیلیس در بتن‌های تماما بازیافتی قادر است تا منجر به کسب مقاومت فشاری بیش‌تری نسبت به بتن مرجع گردد. همچنین میزان افت خواص وابسته به دوام در بتن‌های تماما بازیافتی بدون پوزولان نسبت به بتن مرجع، در مقایسه با افت حاصله در خواص مکانیکی به مراتب بیش‌تر است. با این‌حال به‌دلیل تغییر در ساختار شیمیایی بتن‌های بازیافتی ناشی از مواد پوزولانی مانند زئولیت طبیعی، برخی از خواص وابسته به دوام این بتن‌ها در مقایسه با بتن‌های معمولی، تغییر محسوسی نداشتند.

واژه‌های کلیدی: **سنگدانه بازیافتی، بتن بازیافتی، خواص مکانیکی، دوام، پوزولان.**

* نویسنده مسئول: sajedi@iauahvaz.ac.ir

۱- مقدمه

نقش بتن در توسعهٔ شهری و مهندسی جوامع، نقشی غیرقابل انکار است. با این‌حال این محصول به همان اندازه که در پیشبرد اهداف مهندسی موثر واقع شده، هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده آن در بروز اختلال در ساختار محیط زیست مؤثر بوده‌اند. امروزه بخشی از رویکرد توسعه پایدار در صنعت ساختمان متمرکز بر کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از ساخت و مصرف بتن می‌باشد که توجه به نقش سنگ‌دانه‌های مصرفی درون بتن یکی از کانون-های پراهمیت در این زمینه است. سیر مطالعات در زمینه شناخت خواص مکانیکی و دوام بتن‌های ساخته شده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی در دو دهه گذشته به شکل چشم‌گیری در حال افزایش است و پس از اینکه در مطالعات چند دهه اخیر بسیاری از خواص مکانیکی این بتن‌ها شناخته شده در حال حاضر مبحث دوام این بتن‌ها توجه بیش‌تری را به خود جلب کرده است. عوامل مختلفی مانند تأثیر جایگزینی درصدهای مختلف سنگ‌دانه‌های بازیافتی [۱]، تأثیر میزان رطوبت موجود در سنگ‌دانه‌ها [۲]، تأثیر کیفیت مصالح بازیافتی [۳]، تأثیر نسبت آب به سیمان [۴] و تأثیر افزودنی-های شیمیایی [۵] و مواد افزودنی پوزولانی مختلف [۶] از عواملی هستند که در زمینه شناخت خواص مکانیکی مورد توجه بیش‌تری قرار گرفته‌اند. اجماع نظر تمام مطالعات گذشته در زمینه استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی دال بر این است که با افزایش میزان جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، مقدار مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. درصد این کاهش به نوع، اندازه و کیفیت سنگ‌دانه‌ها وابسته می‌باشد. در این راستا در برخی مطالعات[۷] نشان داده شده که برای جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی درشت‌دانه حداکثر ٪۳۰ و برای سنگدانه‌های بازیافتی ریزدانه تا حداکثر ٪۲۰ تأثیر محسوسی در بهبود مقاومت فشاری روی نخواهد داد. اما رفته-رفته با افزایش میزان درصد جایگزینی، از مقاومت فشاری نیز کاسته خواهد شد[۱۰-۸]،همچنین به طور میانگین برای بتن‌های بازیافتی با ٪۱۰۰ جایگزینی سنگدانه‌های درشت بازیافتی بین ٪۲۰ تا ٪۳۰ افت مقاومت نسبت به بتن معمولی ثبت شده است [۱۱، ۸]. دوام بتن یکی از مهم‌ترین عواملی است که مستقیماً روی فرآیند خوردگی میلگردهای موجود در بتن تأثیرگذار می‌باشد و شناسایی عوامل مؤثر بر آن و حرکت در راستای ارتقای آن به میزان زیادی در کاهش آسیب‌های وارده به اجزای فولادی موجود در بتن مؤثر می‌باشد. رویکرد استفاده از بتن‌های بازیافتی در سازه‌های بتنی مسلح، یکی از جدیدترین رویکردها در این عرصه است [۱۲]. جهت تصمیم‌گیری صحیح در زمینه خواص وابسته به دوام بتن، شناخت صحیح مواردی مانند ظرفیت جذب آب بتن، میزان قابلیت انتقال و انتشار یون کلر و مقاومت در برابر پدیده کربناسیون از اهمیت بالایی برخوردار است. برخلاف خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی که از اتفاق نظر بیش‌تری برخوردار هستند، دوام بتن‌های بازیافتی با گستره زیادی از اطلاعات متفاوت روبه‌رو است. در حالی‌که بسیاری از محققان با افزایش جایگزینی سنگ‌دانه‌های بازیافتی، افزایش نفوذ یون کلراید را گزارش دادند [۱۷-۱۳]، مقالات زیادی نیز وجود دارد که نشان از مقاومت یکسان و یا افزایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید در بتن‌های بازیافتی در مقایسه با بتن معمولی دارند [۲۲-۱۸]. با توجه به ذات سنگدانه‌های بازیافتی، ملات چسبیده به این سنگدانه‌ها نقش اساسی در بسیاری از خواص وابسته به دوام بتن-های بازیافتی دارد. اثرگذاری این موضوع و گوناگونی نظریات در این زمینه به حدی است که برخی از محققان افزایش تعداد مراحل خردکردن سنگ‌دانه‌های بازیافتی و نیز افزایش مقاومت این ملات چسبیده شده را به‌دلیل کاهش حفرات داخل ملات، عاملی جهت کاهش میزان جذب آب بتن دانسته [۲۴، ۲۳] و در مقابل، برخی دیگر افزایش مقاومت ملات چسبیده را به‌دلیل عدم جداشدن آن از سنگ‌دانه را، عاملی جهت کاهش جذب آب می‌دانند [۲۵].

از آنجایی که در حال حاضر در ایران نگرش مطالعات تحقیقاتی در زمینه بتن بازیافتی در حال رشد می‌باشد و از سوی دیگر هم-اکنون تجربه استفاده از پوزولان‌های مختلف در بتن‌های معمولی در اختیار بسیاری از محققان و مهندسان قرار گرفته است، این مقاله تلاش دارد تا با ترکیب این دو مقوله اقدام به ساخت و شناسایی خواص مکانیکی و دوام بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی پوزولان‌های مختلف نماید. از این‌رو با جایگزین کردن کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی با نوع طبیعی و نیز بهره‌بردن از درصدهای مختلف پوزولان‌هایی مانند میکروسیلیس، خاکستربادی و زئولیت طبیعی، اقدام به ساخت بتن‌های تماماً بازیافتی شد. با توجه به تمرکز مطالعه بر خواص وابسته به دوام، در زمینه خواص مکانیکی صرفاً مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه و تعیین سرعت انتشار امواج صوت در بازه سنی ۲۸ روزه بررسی شد و برای خواص وابسته به دوام پس

از گذشت ۱۸۰ روز، آزمایش‌های جذب آب مویینه، جذب آب غوطه‌وری، مقاومت ویژه الکتریکی و ضریب هدایت الکتریکی بررسی شدند.

۲- برنامه آزمایشگاهی

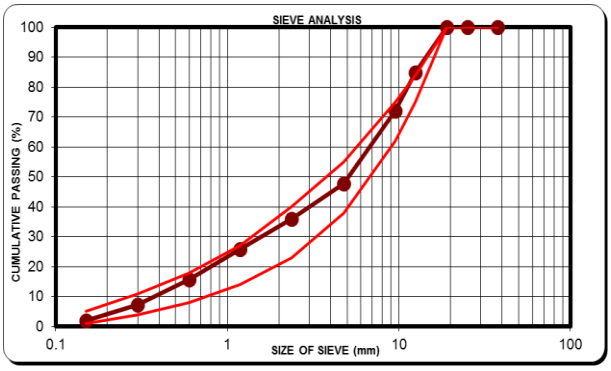
در این پژوهش دو دسته بتن تحت عنوان بتن مرجع با درشت‌دانه‌ها و ریزدانه‌های طبیعی و بتن تماماً بازیافتی با درشت‌دانه‌های بازیافتی بتنی و ریزدانه‌های طبیعی ساخته شده است. به‌منظور ارتقاء سطح کیفی بتن‌های بازیافتی، به‌دلیل افت خواص مکانیکی و دوام ناشی از جایگزینی کامل درشت‌دانه‌ها، سه نوع پوزولان شامل میکروسیلیس در سه درصد جایگزینی ٪۵، ٪۱۰ ، ٪۱۵، خاکستربادی در سه درصد جایگزینی ٪۱۵، ٪۲۵، ٪۳۵ و زئولیت طبیعی در سه درصد جایگزینی ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰ وزنی با سیمان جایگزین شدند. طرح اختلاط‌ها بر مبنای طرح ملی مخلوط بتن ایران [۲۶] و با مقاومت هدف طراحی در سن ۲۸ روزه معادل ۴۰ مگاپاسکال می‌باشند. نمونه‌های بتنی ساخته شده برای تعیین مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه و تعیین سرعت انتشار امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه، به شکل مکعب استاندارد به بعد ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشند. پس از گذشت ۱۸۰ روز، برای تعیین خواص وابسته به دوام از جمله مقاومت الکتریکی ویژه و ضریب هدایت الکتریکی از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر استفاده شده است و برای تعیین میزان جذب آب غوطه‌وری و جذب آب مویینه از قطعات استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر که از استوانه‌های استاندارد به ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متری برش خورده و جدا شدند، استفاده گردیده است. شکل ۱ نشانگر درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی و شکل ۲ نشانگر آزمایش‌های انجام شده می‌باشد.

شکل ۱- درشت‌دانه‌های استفاده شده در طرح اختلاط‌های تحقیق

۲-۱- مواد و مصالح

۲-۱-۱- سنگ‌دانه‌ها

سنگ‌دانه‌های طبیعی به شکل ریزدانه با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر و درشت‌دانه با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر استفاده شدند. برای بررسی تأثیر سنگ‌دانه‌های بازیافتی بتنی بر خواص مکانیکی و دوام بتن‌ها، درشت‌دانه‌های بازیافتی بتنی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر به‌طور کامل با سنگدانه طبیعی جایگزین شدند. درشت‌دانه‌های بتنی استفاده شده، مرکب از قطعات بتنی حاصل از تخریب شمع‌ها و ساختمان‌های بتی تخریب شده می‌باشند. میزان جذب آب سنگ‌دانه‌های بازیافتی براساس استاندارد ASTM C127 [۲۷] معادل ٪۶/۴۴ و میزان ملات چسبیده به آن‌ها براساس روش جداسازی حرارتی [۲۸] در محدوده اندازه ۱۹-۹/۵ میلی‌مترمعادل ٪۵۵ و در محدوده اندازه ۹/۵-۴/۷۵ میلی‌متر معادل ٪۶۰ می‌باشد. نمودار ۱ دانه‌بندی ترکیب ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها با ضریب نرمی ۴/۹۴ را نشان می‌دهد.



نمودار ۱- دانه‌بندی مصالح مصرف شده در تحقیق

۲-۱-۲- سیمان و مواد پوزولانی

سیمان استفاده شده نوع ۲ کارخانه رامهرمز واقع در استان خوزستان بوده و برای ارتقاء سطح کیفی بتن‌های تماماً بازیافتی ساخته شده، از سه نوع پوزولان مختلف استفاده شد. مشخصات شیمیایی هر یک از مواد سیمانی استفاده شده در تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۱-۳- آب و مواد افزودنی

برای ساخت طرح اختلاط‌ها از آب شرب اهواز و برای دست‌یابی به مخلوط با روانی مناسب از فوق روان‌کننده پایه پلی کربکسیلات به میزان ٪۱ وزن مواد سیمانی استفاده شد.

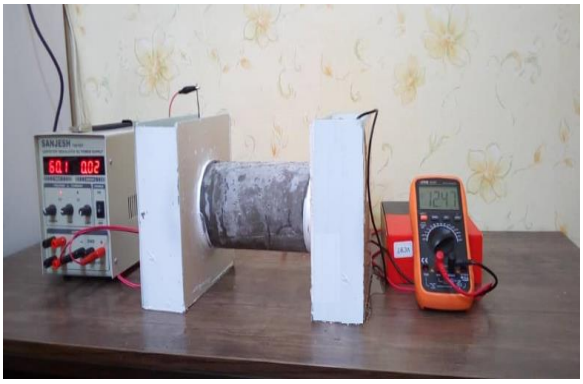
الف) آزمایش تعیین مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه

ب) آزمایش تعیین سرعت انتشار امواج فراصوت

ج) فرایند توزین نمونه از آزمایش جذب آب غوطه‌وری

د) آزمایش تعیین جذب آب مویینه

ه) آزمایش تعیین مقاومت ویژه الکتریکی



و) آزمایش تعیین هدایت الکتریکی

شکل ۲- روند انجام آزمایش‌های معرفی شده در تحقیق

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی (٪)

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

۲-۲- طرح اختلاط بتن

طرح اختلاط‌های مورد استفاده شده در این تحقیق بر مبنای طرح ملی مخلوط بتن ایران [۲۶] می‌باشد. در ابتدا بتن با ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌های طبیعی به‌عنوان بتن مرجع ساخته شده (CC) و پس از آن تمامی درشت‌دانه‌های بازیافتی بتنی با درشت‌دانه‌های طبیعی جایگزین شدند (RC). برای ارتقاء سطح کیفی بتن‌های بازیافتی، مواد پوزولانی شامل میکروسیلیس، خاکستربادی و زئولیت طبیعی در درصدهای مختلف عنوان شده با سیمان جایگزین شدند. مطابق جدول ۲ نسبت آب به مواد سیمانی در تمامی طرح‌ها ۰/۳۶ ثابت نگه‌داشته شد و برای حفظ کارایی مخلوط در حالت تر، طی فرایند اختلاط معادل ٪۱ وزن مواد سیمانی فوق روان‌کننده به مخلوط اضافه شد. با توجه به اینکه بسیاری از خواص بتن‌های بازیافتی تحت تأثیر ملات چسبیده به سنگ‌دانه‌های بازیافتی می‌باشند، روش‌های مختلفی برای ارتقاء سطح کیفی این سنگ‌دانه‌ها استفاده می‌شود [۳۲-۲۹]. در این تحقیق با هدف پرکردن حفرات و ریزترک‌های موجود در ملات سیمانی چسبیده به سنگ‌دانه‌های بازیافتی و تأمین شرایط مناسب برای بهبود کیفیت ناحیه انتقال جدید بین سنگ‌دانه-های بازیافتی و ملات سیمانی جدید، ناشی از تشکیل ژل‌های سیلیکاتی اضافی به علت واکنش پوزولانی، از پیش‌غوطه‌ورسازی سنگ‌دانه‌های بازیافتی در دوغاب مواد پوزولانی استفاده شد. به این ترتیب درشت‌دانه‌های بازیافتی بتنی به مدت ۱ دقیقه پیش از اختلاط با سایر مواد، در دوغاب مواد پوزولانی غوطه‌ور شده تا آمادگی بیش‌تری در سطح آن‌ها جهت انجام واکنش‌های پوزولانی روی دهد. سایر مشخصات طرح اختلاط‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- جزئیات طرح اختلاط‌های ساخته شده در تحقیق

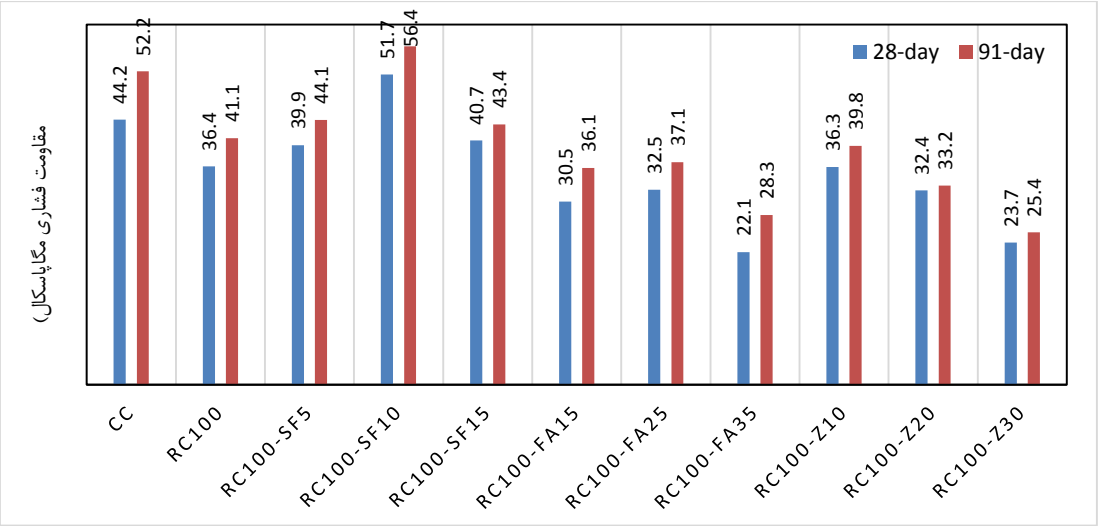
طرح مخلوط	مواد پوزولانی (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	آب (لیتر)	فوق روان‌کننده (لیتر)	ماسه (کیلوگرم)	درشت‌دانه طبیعی (کیلوگرم)	درشت‌دانه بازیافتی (کیلوگرم)
CC	۰	۴۲۰	۱۵۰	۴/۲	۸۸۸	۸۱۵	۰
RC-SF5	۲۱					۰	۸۱۵
RC-SF10	۴۲						
RC-SF15	۶۳						
RC-FA15	۶۳						
RCFA25	۱۰۵						
RC-FA35	۱۴۷						
RC-Z10	۴۲						
RC-Z20	۸۴						
RC-Z30	۱۲۶						

یادداشت: CC: بتن مرجع، RC: بتن بازیافتی، SF: میکروسیلیس، FA: خاکستربادی، Z: زئولیت طبیعی

۳- نتایج آزمایش‌ها

۳-۱- مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه

آزمایش مقاومت فشاری براساس استاندارد BS1881:116 [۳۳] توسط یک جک هیدرولیکی ۲۰۰۰ نیوتنی روی ۳۳ نمونه مکعبی استاندارد انجام شد. نتایج حاصل از انجام آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه در جدول ۳ و نمودار ۲ ارائه شده‌اند. هر عدد مندرج در جدول نشانگر متوسط نتیجه کسب شده از سه نمونه مکعبی استاندارد می‌باشد. بتن معمولی پس از طی ۲۸ روز، مقاومت فشاری ۴۴/۲ مگاپاسکال را کسب کرد، در حالی‌که بتن تماماً بازیافتی با ٪۱۸ افت به مقاومت ۳۶/۴ مگاپاسکال رسید. از مشاهده نمودار می‌توان دریافت که در بازه سنی ۲۸ روزه، بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی میکروسیلیس به مقاومت مشخصه ۴۰ مگاپاسکال رسیده‌اند و علاوه بر آن حتی بتن تماماً بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس از مقاومتی بیش‌تر از مقاومت بتن مرجع برخوردار شد. این بتن در مقایسه با بتن مرجع ٪۱۷ و در مقایسه با بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان ٪۴۲ رشد مقاومت را از خود نشان داد.



نمودار ۲- مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه

جدول۳- خواص مکانیکی و دوام بتن‌های معمولی و تماماً بازیافتی

نوع آزمایش	واحد	CC	RC100								
			-	SF5	SF10	SF15	FA15	FA25	FA35	Z10	Z20	Z30
مقاومت فشاری در سن ۲۸روزه	مگاپاسکال	۴۴/۲	۳۶/۴	۳۹/۹	۵۱/۷	۴۰/۷	۳۰/۵	۳۲/۵	۲۲/۱	۳۶/۳	۳۲/۴	۲۳/۷
مقاومت فشاری در سن ۹۱روزه	مگاپاسکال	۵۲/۲	۴۱/۱	۴۴/۱	۵۶/۴	۴۳/۴	۳۶/۱	۳۷/۱	۲۸/۳	۳۹/۸	۳۳/۲	۲۵/۴
سرعت انتشار امواج فراصوت	کیلومتر بر ثانیه	۴/۴۵	۳/۵۶	۴/۳۶	۴/۴۵	۴/۲۳	۳/۶۵	۳/۷۱	۲/۸۷	۴/۲۴	۴/۰۷	۳/۸۸
جذب آب غوطه وری	٪	۴/۹۲	۹/۲۰	۷/۹۶	۷/۰۳	۸/۶۰	۷/۱۷	۸/۷۰	۸/۰۴	۸/۵۶	۸/۷۹	۱۰/۷۱
جذب آب مویینه	میلی متر	۴/۹۲	۹/۳۸	۸/۳۷	۷/۷۰	۹/۵۲	۸/۴۳	۸/۲۵	۱۰/۵۵	۷/۹۵	۸/۲۵	۸/۸۵
نرخ جذب مویینه	میلی گرم بر میلی‌متر مربع بر مجذور دقیقه	۰/۰۷۵	۰/۱۴۳	۰/۱۲۷	۰/۱۱۷	۰/۱۴۵	۰/۱۲۸	۰/۱۲۶	۰/۱۶۱	۰/۱۲۱	۰/۱۲۶	۰/۱۳۵
مقاومت ویژه الکتریکی	کیلواهم- سانتی متر	۸/۹۳	۴/۵۸	۶/۸۶	۸/۳۳	۷/۷۹	۷/۶۵	۷/۹۳	۷/۱۰	۸/۸۶	۸/۲۴	۵/۸۲
هدایت جریان الکتریکی	میلی زیمنس بر متر	۱۵/۹	۲۶/۵	۱۶/۳	۱۴/۹	۱۵/۱	۱۵/۱	۱۳/۳۶	۱۷/۶	۱۵/۱	۱۸/۶	۲۲/۹

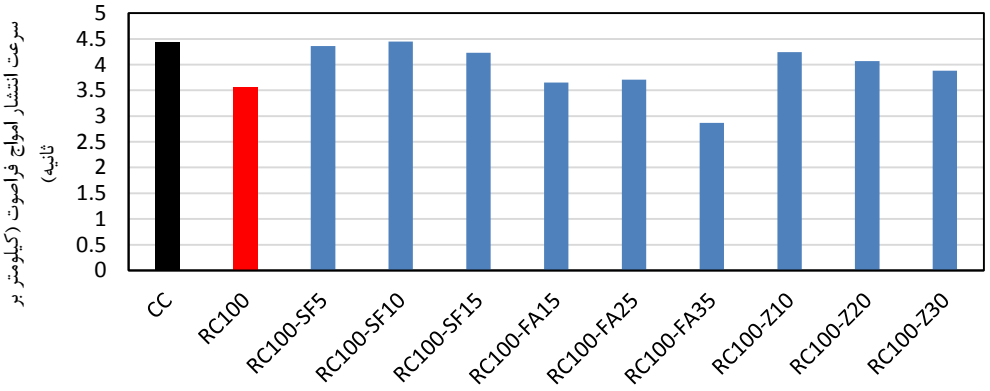
مشاهده می‌شود که کمترین میزان کسب مقاومت در بازه ۲۸ روزه متعلق به بتن‌های حاوی خاکستربادی است، به نحوی‌که بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی ٪۱۵، ٪۲۵ و ٪۳۵ خاکستربادی در مقایسه با بتن مرجع به ترتیب با ٪۳۱، ٪۲۶ و ٪۵۰ افت به مقاومت‌های ۳۰/۵، ۳۲/۵ و ۲۲/۱ مگاپاسکال رسیدند. عدم تأثیرگذاری این پوزولان در بازه ۲۸ روزه بر مقاومت فشاری به نحوی است که حتی بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی این پوزولان در مقایسه با بتن بازیافتی بدون پوزولان نیز از مقاومت کم‌تری برخوردار شدند.

در بین سه پوزولان استفاده شده، گرچه زئولیت طبیعی رفتاری بین میکروسیلیس و خاکستربادی را در بازه ۲۸ روزه نشان داد، ولی نتایج کسب شده حاکی از آن است که این پوزولان قادر نیست تا مقاومت فشاری بتن تماماً بازیافتی را پس از طی ۲۸ روز به حد

مقاومت مشخصه ۴۰ مگاپاسکال برساند. نتایج نشانگر آن هستند که مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه بتن تماماً بازیافتی حاوی ٪۱۰ زئولیت طبیعی ٪۱۸ نسبت به مقاومت فشاری بتن مرجع کم‌تر شده است، در حالی‌که این مقدار مشابه با مقاومت فشاری بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان است. این نتیجه نشان می‌دهد که گرچه درصد جایگزینی ٪۱۰ زئولیت طبیعی نتوانسته تا منجر به کسب مقاومت فشاری محسوسی شود، ولی با حفظ مقاومت فشاری توانسته تا مقدار سیمان مصرفی را کاهش دهد. درصدهای ٪۲۰ و ٪۳۰ زئولیت طبیعی در کسب چنین پدیده‌ای نیز موفق نبودند.

۳-۲- مقاومت فشاری در سن ۹۱ روزه

مشاهده می‌شود که پس از گذشت ۹۱ روز، بتن مرجع، مقاومت فشاری ۵۲/۲ مگاپاسکال را کسب کرده، در حالی‌که بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان با ٪۲۱ افت به مقاومت ۴۱/۱ مگاپاسکال رسید. تأثیر مطلوب استفاده از میکروسیلیس را چه در بازه ۲۸ روزه و چه در بازه ۹۱ روزه جایی می‌توان مشاهده کرد که مقاومت فشاری بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ میکروسیلیس از مقاومت فشاری بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان به ترتیب ٪۷، ٪۳۷ و ٪۶ بیش‌تر شده است. تأثیر مناسب جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس به نحوی است که مقاومت فشاری در سن ۹۱ روزه بتن تماماً بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس حتی از مقاومت فشاری بتن مرجع نیز بیش‌تر شده و به ۵۶/۴ مگاپاسکال رسید. نمودار ۳ نشان می‌دهد که بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی خاکستربادی پس از گذشت ۹۱ روز همچنان نتوانسته‌اند که مقاومت فشاری بتن تماماً بازیافتی را به مرز مقاومت مشخصه ۲۸ روزه برسانند. با این‌حال مشهود است که هر سه درصد جایگزینی خاکستربادی توانستند تا بیش‌ترین رشد مقاومت در بین بتن‌های بازیافتی در بازه ۲۸ تا ۹۱ روزه را ثبت کنند. بیش‌ترین میزان رشد مقاومت فشاری در بازه ۲۸ تا ۹۱ روزه در بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی ٪۳۵ خاکستربادی با ٪۲۸ رشد حاصل شد و پس از آن درصدهای جایگزینی ٪۱۵ و ٪۲۵ خاکستربادی توانستند تا رشد ٪۱۸ و ٪۱۴ را ثبت کنند.



نمودار ۳- سرعت انتشار امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه

در بتن‌های حاوی زئولیت طبیعی نیز مشاهده شد که تغییرات مقاومت فشاری در بازه ۲۸ تا ۹۱ روزه چندان محسوس نمی‌باشد، به نحوی‌که در این دسته از بتن‌ها، بیش‌ترین میزان رشد مقاومت فشاری در بتن‌های حاوی ٪۱۰ زئولیت طبیعی حاصل شد و مقاومت فشاری با ٪۱۰ رشد به ۳۹/۸ مگاپاسکال و به مرز مقاومت مشخصه ۲۸ روزه رسید. بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی ٪۲۰ و ٪۳۰ زئولیت طبیعی نشان دادند که کم‌ترین میزان رشد مقاومت را داشته، به نحوی‌که جایگزینی ٪۲۰ زئولیت طبیعی با ٪۲ و جایگزینی ٪۳۰ زئولیت طبیعی با ٪۷ رشد به مقاومت‌های فشاری ۳۳/۲ و ۲۵/۴ مگاپاسکال رسیدند. نتایج نشان داد که بیشینه کسب مقاومت فشاری در بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی انواع پوزولان در مقایسه با بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان متعلق به جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس و معادل ٪۳۷ و حداکثر افت آن متعلق به جایگزینی ٪۳۰ زئولیت طبیعی و معادل ٪۳۸ می باشد، در حالی‌که این کران در مقایسه با بتن مرجع، بیشینه رشد مقاومت را ٪۸ و بیشینه افت آن را ٪۵۱ نشان می‌دهد.

۳-۳- سرعت انتشار امواج فراصوت

در جدول ۳ و همین‌طور نمودار ۳ نتایج سرعت انتشار امواج فراصوت روی نمونه‌های مکعبی ارائه شده است. هر عدد بیانگر متوسط نتایج حاصل از سه نمونه مکعبی می‌باشد. مطابق نظر

وایتهورس[1] (۱۹۵۱) براساس سرعت انتشار امواج فراصوت می‌توان سطح کیفی بتن را از منظر انسجام داخلی و نیز میزان و توزیع حفرات و ناپیوستگی‌های داخلی مورد سنجش و دسته‌بندی قرار داد که خلاصه آن در جدول ۴ ارائه شده است [۳۴]. لذا استفاده از این معیار می‌تواند ابزار مناسبی جهت پیش‌بینی برخی از خواص مکانیکی و وابسته به دوام بتن باشد.

جدول ۴- تعیین سطح کیفی بتن براساس سرعت انتشار امواج فراصوت ارائه شده توسط وایتهورس [۳۴]

سطح کیفی	عالی	خوب	مشکوک	ضعیف
سرعت انتشار امواج (کیلومتر بر ثانیه)	UPV> ۴/۵	۳/۵<UPV <۴/۵	۳/۰<UPV <۳/۵	۳/۰>UPV

مشاهده می‌شود که بتن مرجع در مرز مشترک میان سطوح کیفی عالی و خوب واقع شده، در حالی‌که بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان در فاصله کمی از مرز مشترک میان سطوح کیفی خوب و مشکوک قرار گرفته است. این نتیجه نشانگر افت زیاد سطح کیفی بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان می‌باشد. در بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی زئولیت، گرچه افزایش مقدار زئولیت مصرفی باعث شده تا کیفیت بتن کاهش یابد، ولی همچنان این بتن‌ها در محدوده سطح کیفی خوب قرار دارند. در متناسب‌ترین درصد جایگزینی زئولیت طبیعی (درصد جایگزینی ٪۱۰) در بتن تماماً بازیافتی حداقل کاهش سرعت انتشار امواج فراصوت در مقایسه با بتن مرجع ٪۵ ثبت شد، که این کاهش در درصدهای جایگزینی بالاتر به شکل چشم‌گیرتری مشهود گردید.

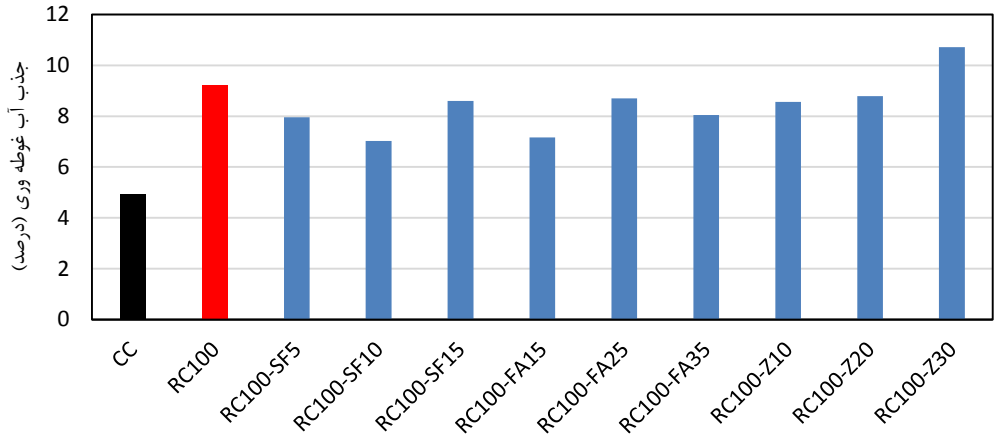
بهبود سطح کیفی بتن‌های بازیافتی حاوی میکروسیلیس و تبدیل آن‌ها به یک جسم چگال‌تر، در افزایش سرعت انتقال امواج در این بتن‌ها، ملاحظه می‌شود، و هر سه جایگزینی ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ به مقادیری بسیار نزدیک به بتن معمولی رسیدند که این نتیجه نشان از متراکم‌تر شدن بتن‌های بازیافتی تحت اثر واکنش‌های پوزولانی ناشی از میکروسیلیس دارد. مشاهده می‌شود که سرعت انتشار امواج فراصوت در بتن تماماً بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس در مقایسه با بتن مرجع تغییری نکرده و این امر گویای آن است که ساختار درونی این دسته از بتن‌های بازیافتی احتمالاً شبیه بتن مرجع شده است. در مقایسه با بتن مرجع، بیشترین میزان کاهش سرعت انتشار امواج در بتن تماماً بازیافتی حاوی ٪۱۵ میکروسیلیس روی داده و معادل ٪۵ گردید. افت سطح کیفی سرعت انتشار امواج در بتن‌های تماماً بازیافتی جایی بیش‌تر دیده می‌شود که این بتن‌ها حاوی خاکستربادی باشند، به نحوی که بهترین‌ترین مقدار ثبت شده در میان درصدهای مختلف جایگزینی خاکستربادی متعلق به جایگزینی ٪۲۵ است، که نزدیک به مرز سطح کیفی مشکوک قرار گرفت. ملاحظه می‌شود که مصرف ٪۳۵ خاکستربادی باعث شده تا بتن تماماً بازیافتی از نظر تراکم در سطح کیفی ضعیفی قرار گیرد و در اثر تخلخل زیاد موجود در این بتن، سرعت انتشار امواج به ۲/۹ کیلومتر بر ثانیه برسد. جایگزینی ٪۲۵ خاکستربادی که پیش‌تر نیز در مقاومت فشاری در میان بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی خاکستربادی، بهترین وضعیت مقاومتی را از خود نشان داده بود، در مقایسه با بتن مرجع ٪۱۷ امواج فراصوت را کندتر عبور داده که این نتیجه نشانگر میزان تخلخل نسبتاً زیاد این بتن در مقایسه با بتن‌های حاوی میکروسیلیس است.

۳-٤- جذب آب غوطه‌وری

آزمایش تعیین میزان جذب آب غوطه‌وری براساس استاندارد ASTM C642 [۳۵] روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر انجام شد. مطابق استاندارد هر عدد نشانگر متوسط نتیجه دو نمونه می‌باشد. در نمودار ۴ مشاهده می‌شود که میزان جذب آب بتن مرجع ٪۴/۹۲ می‌باشد، در حالی‌که جذب آب بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان با ٪۸۷ افزایش نسبت به بتن مرجع به ٪۹/۲ رسید. به‌طور کلی با مشاهده نمودار می‌توان دریافت که جایگزینی مواد پوزولانی بجز جایگزینی ٪۳۰ زئولیت طبیعی باعث شده تا جذب آب غوطه‌وری بتن تماماً بازیافتی نسبت به حالت عدم استفاده از پوزولان کاهش یابد، ولی باید توجه نمود که جایگزینی مواد پوزولانی باعث نشد تا سطح کیفی بتن تماماً بازیافتی به سطح کیفی بتن مرجع برسد. بهترین شرایط کسب شده در بتن‌های تماماً بازیافتی در جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس و پس از آن ٪۱۵ خاکستربادی روی داد. با این‌حال جذب آب در بتن

[1] Whitehurst

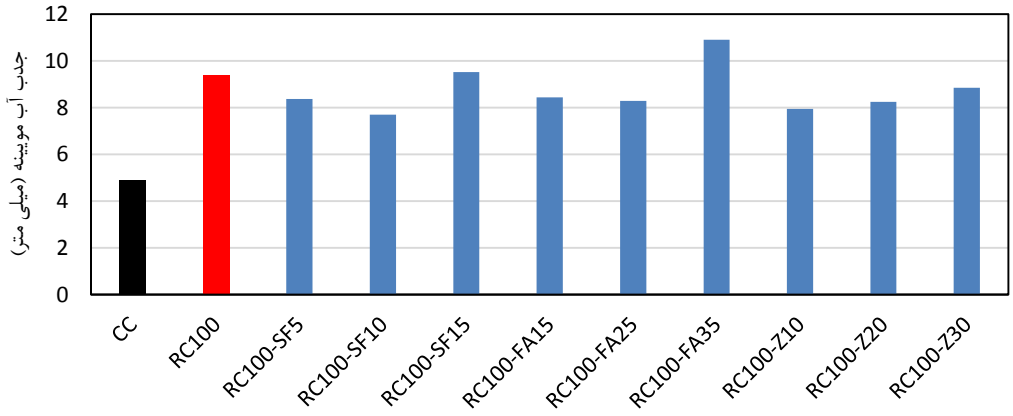
تماماً بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس ٪۴۳ و در بتن حاوی ٪۱۵ خاکستربادی ٪۴۶ نسبت به بتن مرجع بیش‌تر می‌باشند. جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس در بتن تماماً بازیافتی باعث شد تا میزان جذب آب بتن تماماً بازیافتی نسبت به حالت بدون پوزولان ٪۲۴ کاهش یابد. بهترین میزان کاهش جذب آب غوطه‌وری در بتن‌های حاوی خاکستربادی در جایگزینی ٪۱۵ روی داده و منجر به کاهش جذب آب به مقدار ٪۲۲ در مقایسه با بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان شد و در بین بتن‌های حاوی زئولیت طبیعی نیز بهترین اثرگذاری در بتن‌های حاوی ٪۱۰ زئولیت طبیعی مشاهده شد و ٪۷ کاهش جذب آب در مقایسه با بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان ثبت گردید.



نمودار ۴- جذب آب غوطه‌وری در طرح اختلاط‌های تحقیق در سن ۱۸۰ روزه

۳-۵- جذب آب مویینه

آزمایش تعیین میزان جذب آب غوطه‌وری براساس استاندارد ASTM C1585 [۳۶] روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر انجام شد. مطابق استاندارد هر عدد نشانگر متوسط نتیجه دو نمونه می‌باشد. نمودار ۵ نشان می‌دهد که میزان جذب آب مویینه بتن مرجع پس از گذشت ۷۲ ساعت ۴/۹۲ میلی‌متر بوده و بتن تماماً بازیافتی پس از گذشت همین مدت زمان ۹/۳۸ میلی‌متر جذب آب مویینه را ثبت کرد.



نمودار ۵- جذب آب مویینه طرح اختلاط‌های تحقیق در سن ۱۸۰ روزه

دیده می‌شود که بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان در مقایسه با بتن مرجع ٪۹۱ با رشد در جذب آب مویینه مواجه شده است که این میزان با ٪۸۷ رشد ثبت شده در جذب آب غوطه‌وری بتن‌های مذکور نیز مطابقت دارد. طبق نمودار ۵ مشهود است که استفاده از هر یک از پوزولان‌ها بجز ٪۱۵ میکروسیلیس و ٪۳۵ خاکستربادی باعث شد تا میزان جذب آب مویینه این بتن‌ها نسبت به بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان کم‌تر شود. با این‌حال ترکیب هر یک از این پوزولان‌ها در بتن تماماً بازیافتی نتوانست تا تأثیر به‌سزایی در متراکم‌تر کردن بتن تماماً بازیافتی در مقایسه با بتن مرجع داشته باشد. بهترین اثرگذاری پوزولان‌ها در متراکم‌سازی و توپر کردن

فضای داخلی بتن تماماً بازیافتی در جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس مشاهده شد، جایی‌که این بتن در مقایسه با بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان ٪۱۸ با کاهش جذب آب مویینه مواجه شد، ولی با این‌حال ٪۵۷ نسبت به بتن مرجع از جذب آب مویینه بیش‌تری برخوردار گردید. در بتن‌های حاوی خاکستربادی، جایگزینی ٪۲۵ و پس از آن با فاصله بسیار کمی، جایگزینی ٪۱۵ قرار دارند. در بین بتن‌های حاوی زئولیت طبیعی نیز همان‌طور که مشاهده می‌شود، جایگزینی ٪۱۰، با کاهش ٪۱۵ جذب آب مویینه نسبت به بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان و افزایش ٪۶۲ نسبت به بتن مرجع بهترین شرایط را به خود اختصاص دادند.

در استاندارد ASTM C1585 از مفهومی تحت عنوان "نرخ جذب اولیه" نام برده شده است که معرف شیب نموداری است که محور قائم آن بیانگر عمق نفوذ بر حسب میلی‌متر و محور افقی آن بیانگر مجذور زمان بر حسب مجذور ثانیه است و در بازه زمانی دقیقه اول تا ساعت ششم پس از برخورد سطح نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر با آب محاسبه می‌شود. در بسیاری از پژوهش‌های پیشین از معیاری تحت عنوان "ضریب جذب مویینه" که از نظر رابطه شبیه به آنچه در استاندارد ASTM C1585 است، عنوان شده که در یک بازه زمانی ۷۲ ساعته محاسبه و با واحد میلی‌گرم بر مترمربع بر مجذور دقیقه اندازه‌گیری می‌شود. جدول ۵ معیارهای کیفی برای تشخیص کیفیت بتن براساس شاخص ضریب جذب مویینه است که توسط برونه[1] (۱۹۹۱) [۳۷] ارائه شده است. در این تحقیق برای استفاده از این مبنا، از ضریب جذب مویینه به‌جای نرخ جذب اولیه استفاده شده است که نتایج آن در جدول ۳ داده شده است.

۳-۶- مقاومت ویژه الکتریکی

یکی از خواص فیزیکی بتن که مستقیماً می‌تواند برخی از ویژگی‌های وابسته به دوام بتن را تحت تأثیر قرار دهد، مقاومت ویژه الکتریکی است. این مشخصه بیانگر میزان مقاومت بتن در برابر عبور جریان الکتریکی است و بیشتر در بتن‌هایی که تحت شرایط خورده‌شدن میلگرد قرار می‌گیرند، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. مقاومت الکتریکی بتن به ریزساختار ماتریس سیمان، خلل و فرج آن، تخلخل و اندازه حفرات وابسته است. مقاومت الکتریکی همچنین تابعی از غلظت و تحرک یون‌ها در منافذ بتن است. از سوی دیگر مقاومت الکتریکی بتن تابع ساختارهای فیزیکی و شیمیایی بتن است. در ساختار فیزیکی بتن هرچه که منافذ موجود درون بتن بزرگ‌تر شوند، از مقاومت الکتریکی کاسته خواهد شد. ساختار شیمیایی بتن نیز تحت تأثیر یون‌های مختلفی که ممکن است درون منافذ موجود در بتن قرار گیرند، تحت تأثیر قرار گرفته و مستقیماً بر مقاومت الکتریکی اثرگذار می‌باشد.

جدول ۵- میزان ضریب جذب آب مویینه ارائه شده توسط برونه [۳۷]

سطح کیفی	میزان ضریب جذب مویینه (S) (میلی‌گرم بر میلی‌مترمربع بر مجذور دقیقه)
پایین	S > ۰/۲
متوسط	۰/۲ > S > ۰/۱
بالا	۰/۱ > S

بیشتر محققان جهت تعیین مقاومت الکتریکی بتن سخت شده از روش حجمی استفاده می‌کنند. جهت انجام این آزمایش از یک جریان سنجش جهت تعیین مقاومت الکتریکی با فرکانس متغیر ۱۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز استفاده می‌شود. برای اتصال دو سر نمونه به دستگاه از صفحات مسی استفاده می‌گردد. برای اینکه صفحات مسی هیچ‌گونه اتصالی با زمین و میز کار نداشته باشند و اتصال کوتاه روی ندهد، از یک جسم عایق مانند تخته چوبی یا پلاستیکی استفاده می‌شود. برای کسب اطمینان از اتصال کامل بین صفحات مسی و قطعه بتنی از یک ماده رسانا مانند خمیر سیمان استفاده می‌شود. خمیر سیمان از یک‌سو دارای یون‌های آزاد زیادی است که هادی الکتریکی با مقاومت پایین است و از سوی دیگر سبب اتصال کامل بین سطح بتن با صفحات مسی می‌شود. برای اطمینان از اتصال کامل میان صفحه مسی و سطح بتنی از یک نمونه بتنی به عنوان وزنه استفاده می‌شود.

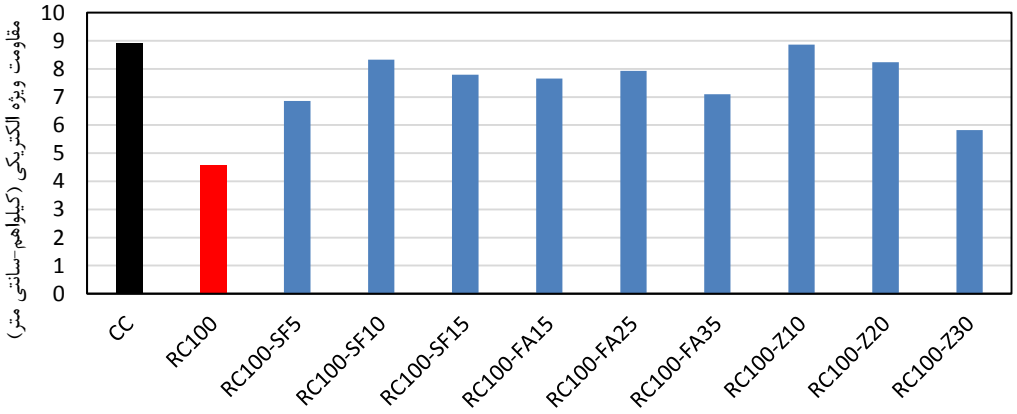
مقاومت ویژه الکتریکی، براساس رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد. در این رابطه R نشانگر مقاومت الکتریکی بر حسب اهم، φ نشانگر مقاومت ویژه الکتریکی بر حسب اهم- متر، L بیانگر طول نمونه بر حسب متر و A بیانگر سطح مقطع نمونه بر حسب مترمربع است.

[1] Browne

$$\varphi = \frac{R*A}{L} \quad (۱)$$

نمودار ۶ و همین‌طورجدول ۳ نشانگر نتایج حاصل از تعیین میزان مقاومت ویژه الکتریکی بتن‌های ساخته شده می‌باشند. طبق نمودار ۶ ملاحظه می‌شود که مقاومت ویژه بتن مرجع ۸/۹۳ کیلواهم- سانتی‌متر شده، در حالی‌که مقاومت ویژه بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان با ٪۴۹ افت به ۴/۵۸ کیلواهم- سانتی‌متر رسید. از نمودار نیز مشهود است که جایگزینی هر یک از درصدهای پوزولان توانسته است تا میزان مقاومت ویژه الکتریکی بتن تماماً بازیافتی را بهبود دهد. این نتیجه را می‌توان از منظر فیزیکی با چگال‌تر شدن فضای داخلی بتن‌های تماماً بازیافتی مرتبط دانست. اما نکتهٔ مهم آن است که برخلاف تأثیر متوسطی که زئولیت طبیعی در بهبود جذب آب مویینه و غوطه‌وری در کاهش جذب آب از خود نشان داد، این پوزولان تأثیر چشم‌گیرتری در افزایش مقاومت ویژه و نزدیک شدن به مقدار بتن مرجع از خود نشان داده است که این نتیجه احتمالاً می‌تواند متاثر از تأثیرات شیمیایی تغییرات ایجاد شده درون بتن و تغییر در ساختار یون‌ها و مایع منفذی ایجاد شده توسط زئولیت طبیعی باشد.

با این‌حال در بین بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی میکروسیلیس، جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس بهترین شرایط را در افزایش مقاومت ویژه الکتریکی از خود نشان داد و توانست تا در مقایسه با بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان ٪۸۲ مقاومت بیشتری را تأمین نماید، با این حال در مقایسه با بتن مرجع ٪۷ کاهش مقاومت را نشان داد. رفتار هر سه درصد جایگزینی خاکستربادی در بهبود مقاومت ویژه الکتریکی نسبتاً مشابه هم بوده و درصدهای ٪۱۵، ٪۲۵ و ٪۳۵ جایگزینی خاکستربادی با کسب مقاومت‌های ویژه الکتریکی به ترتیب ۷/۶۵، ۷/۹۳ و ۷/۱۰ کیلواهم- سانتی‌متر در مقایسه با بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان رشد ٪۶۷، ٪۷۳ و ٪۵۵ را نشان دادند. رفتار زئولیت طبیعی در افزایش مقاومت ویژه الکتریکی محسوس بود، به نحوی‌که مقاومت ویژه الکتریکی بتن تماماً بازیافتی حاوی ٪۱۰ زئولیت طبیعی تقریباً معادل با بتن مرجع و بتن حاوی ٪۲۰ زئولیت طبیعی ٪۸ کم‌تر از بتن مرجع ثبت شد. در ادامه روند نامطلوب جایگزینی ٪۳۰ زئولیت طبیعی چه در خواص مکانیکی و چه در خواص وابسته به دوام، این درصد جایگزینی کمترین مقاومت ویژه الکتریکی را در بتن تماماً بازیافتی نشان داد.



نمودار ۶- مقاومت ویژه الکتریکی طرح اختلاط‌های تحقیق در سن ۱۸۰ روزه

۳-۷- ضریب هدایت الکتریکی

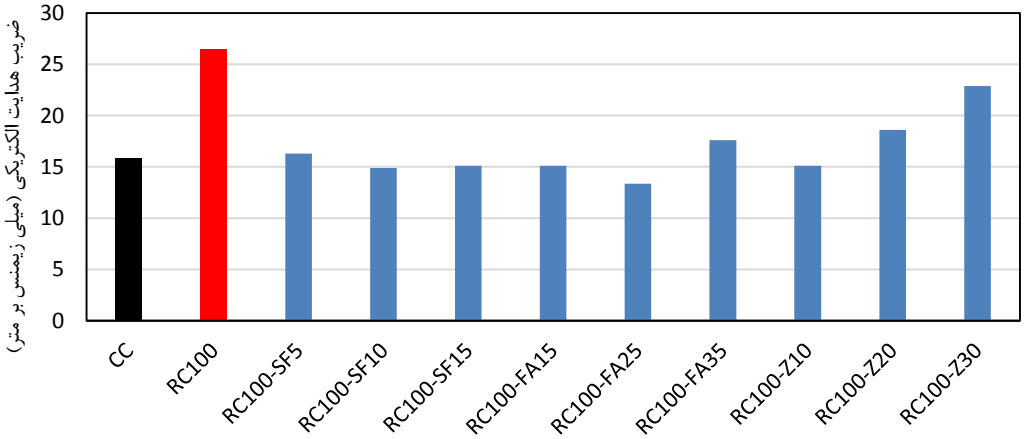
آزمایش تعیین میزان ضریب هدایت الکتریکی براساس استاندارد ASTMC1760 [۳۸] روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر انجام شد. هر عدد نشانگر متوسط نتیجه دو نمونه استوانه‌ای می‌باشد. این آزمایش با ثبت میزان قابلیت هدایت الکتریکی توده‌ای هر نمونه بتنی، میزان مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید را در آن نمونه نشان می‌دهد. در این آزمایش دو سر نمونه‌های استوانه‌ای در محفظه‌هایی که حاوی محلول کلریدسدیم ٪۳/۰ بوده قرار گرفته و سپس با اعمال اختلاف ولتاژ مستقیم ۶۰ ولت به دو سر نمونه به مدت ۱ دقیقه، شدت جریان ثبت می‌گردد. پس از آن براساس رابطه ۲ میزان ضریب هدایت الکتریکی توده‌ای نمونه بتنی محاسبه می‌شود.

$$\sigma = K\frac{I}{V}\frac{L}{D^2} \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، σ نشانگر هدایت الکتریکی توده‌ای برحسب زیمنس بر متر، I شدت جریان پس از ۱ دقیقه از اعمال اختلاف پتانسیل،

V اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت جریان مستقیم، L متوسط طول نمونه بر حسب میلی‌متر، D متوسط قطر نمونه بر حسب میلی‌متر و K تحت‌عنوان ضریب تبدیل و معادل عدد ۱۲۷۳/۲ می‌باشند.

نمودار ۷ و همین‌طور جدول ۳ نشانگر نتایج مربوط به میزان هدایت الکتریکی هر یک از بتن‌ها می‌باشند. مشاهده می‌شود که میزان قابلیت هدایت الکتریکی بتن مرجع ۱۵/۹ میلی‌زیمنس بر متر می‌باشد، در حالی‌که بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان با رشد ٪۶۷ به ۲۶/۵ میلی‌زیمنس بر متر رسید. طبق نمودار مشهود است که مواد پوزولانی به‌ویژه میکروسیلیس در کاهش میزان هدایت الکتریکی رفتار بسیار مطلوبی را نشان دادند، به نحوی‌که هدایت الکتریکی بتن تماماً بازیافتی حاوی ٪ ۵ میکروسیلیس فقط ٪۳ نسبت به بتن مرجع بیش‌تر شده و جایگزینی ٪۱۰ و ٪۱۵ میکروسیلیس منجر به کم‌تر شدن جزئی میزان هدایت الکتریکی در این بتن‌های تماماً بازیافتی نسبت به بتن مرجع شد. در بتن‌های حاوی خاکستربادی نیز رفتار مطلوبی مبنی بر کاهش میزان هدایت الکتریکی در بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی ٪۱۵ و ٪۲۵ رخ داد، به نحوی‌که هدایت الکتریکی بتن تماماً بازیافتی حاوی ٪۱۵ خاکستربادی ۱۵/۱ میلی-زیمنس بر متر معادل ٪۵ کم‌تر از بتن مرجع شد. ملاحظه می‌شود که بهترین اثرگذاری پوزولان‌ها در جایگزینی ٪۲۵ خاکستربادی واقع شد و با ٪۱۶ افت نسبت به بتن معمولی، میزان هدایت الکتریکی به ۱۳/۳۶ میلی‌زیمنس بر متر رسید. در بتن‌های حاوی زئولیت طبیعی نیز جایگزینی ٪۱۰ باعث شد تا با کسب هدایت الکتریکی ۱۵/۱ میلی‌زیمنس بر متر، رفتار مطلوب‌تری نسبت به بتن مرجع در این نوع بتن تماماً بازیافتی پدید آید. جایگزینی‌های ٪۲۰ و به ویژه ٪۳۰ قادر به تأمین شرایط مطلوبی در مقایسه با بتن مرجع نشدند.



نمودار ۷- ضریب هدایت الکتریکی طرح اختلاط‌های تحقیق در سن ۱۸۰ روزه

٤- تحلیل نتایج آزمایش‌ها

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان داد که جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی منجر به افت ٪۱۸ نسبت به بتن مرجع شده و مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه را به ۳۶/۴ مگاپاسکال رساند. این درحالی است که اتزبریا و همکاران[1] (۲۰۰۷) و هانسن[2] (۱۹۹۲) در پژوهش‌های خود افت مقاومت فشاری در مقایسه با بتن مرجع را در اثر جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی بین ٪۲۰ تا ٪۳۰ عنوان کردند [۳۹، ۸] با این حال کانالپولوس و همکاران[3] (۲۰۱۴) در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی تغییر محسوسی در مقاومت فشاری مشاهده نکردند [۴۰]. جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس به عنوان درصد بهینه جایگزینی این پوزولان در بتن تماماً بازیافتی نشان داد که قادر است تا ٪۱۷ منجر به رشد مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه در مقایسه با بتن مرجع شود. این درحالی است که بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی خاکستربادی نشان دادند که پس از ۲۸ روز قادر نیستند تا تأثیر مناسبی در پر کردن فضاهای متخلخل بتن تماماً بازیافتی داشته باشند. بهترین درصد خاکستربادی در بتن‌های تماماً بازیافتی در جایگزینی ٪۲۵ از این پوزولان مشاهده شد و باعث شد تا مقاومت فشاری این بتن تا ٪۲۶

[1] Etxeberria et al.
[2] Hansen
[3] Kanellopoulos et al.

نسبت به بتن مرجع کم‌تر باشد. اما تأثیر درازمدت خاکستربادی نشان داد که در مقایسه با سایر پوزولان‌ها پس از ۹۱ روز، بیش‌ترین میزان رشد مقاومت را حاصل می‌کند، به این ترتیب که جایگزینی‌های ٪۳۵، ٪۱۵ و ٪۲۵ خاکستربادی به ترتیب بیش‌ترین مقادیر رشد در بازه ۹۱ روزه را به‌دست آوردند. با این حال مقاومت مطلوب طراحی در سن ۲۸ روزه در این بتن‌ها در این مدت زمان کسب نشد. زئولیت طبیعی نیز نشان داد که در بتن تماماً بازیافتی، در جایگزینی ٪۱۰، قادر است تا مقاومتی معادل بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان را تامین کند. این به آن معنی است که مصرف این پوزولان در بتن بازیافتی می‌تواند با حفظ شرایط موجود در بتن تماماً بازیافتی مقدار مصرف سیمان را کاهش دهد و در افزایش مقاومت فشاری تأثیر چشم‌گیری ندارد.

افت سطح کیفی بتن تماماً بازیافتی در مقایسه با بتن مرجع جایی به شکل مطلوب مشاهده گردید که از منظر سرعت انتشار امواج فراصوت، سطح کیفی بتن مرجع در مرز سطوح کیفی عالی و خوب قرار گرفت، در حالی که بتن تماماً بازیافتی در مرز سطوح کیفی خوب و مشکوک واقع شد. بجز سطح کیفی ٪۳۵ خاکستربادی، سایر درصدهای مصرف پوزولان‌های مورد استفاده در دامنه سطح کیفی خوب واقع شدند. با این‌حال بهترین تأثیر در متراکم‌تر کردن فضای داخلی و حفرات موجود درون بتن‌های تماماً بازیافتی در میکروسیلیس مشاهده شد، به‌طوری‌که سرعت انتشار امواج فراصوت در جایگزینی٪۱۰ میکروسیلیس در مقایسه با بتن مرجع هیچ تغییری نکرده و در بیش‌ترین حالت در جایگزینی ٪۱۵ میکروسیلیس این افت به ٪۵ رسید. جایگزینی درصدهای مختلف خاکستربادی نشان داد که در بازه ۲۸ روزه، این پوزولان قادر به پر کردن حفرات و خلل‌وفرج موجود در بتن تماماً بازیافتی نبوده و سطح کیفی بتن‌های حاوی سطوح مختلف این پوزولان در مرز مشترک خوب و مشکوک واقع می‌شوند.

نتایج جذب آب غوطه‌وری در بتن مرجع نشان از ٪۴/۹۲ داشت و جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی با رشد ٪۸۷ به ٪۹/۲ رسید. رائو و همکاران[1] (۲۰۱۷) این مقادیر را برای بتن مرجع ٪۵/۵۵ و برای بتن تماماً بازیافتی بسته به نوع سنگ‌دانه‌های بازیافتی بین ٪۵/۴ تا ٪۷/۳۷ به‌دست آوردند که نشان از حداکثر رشد ٪۳۳ نسبت به بتن مرجع دارد [۴۱] و نشان می‌دهد که نتایج این پژوهش با یافته‌های آن‌ها متفاوت است. اما نتایج کسب شده به نتایج تحقیقات انجام شده توسط فونتبائو و همکاران[2] (۲۰۱۸) نزدیک‌تر است،زیرا آن‌ها حداکثر میزان جذب آب غوطه‌وری در بتن تماماً بازیافتی را در مقایسه با بتن معمولی ٪۷۰ بیان داشتند [۴۲]. با این‌حال به‌دلیل وابستگی نتایج به عوامل متعدد مانند نوع و کیفیت سنگ‌دانه‌های بازیافتی، میزان رطوبت آن‌ها، مقاومت بتن پایه، تعداد مراحل خردشدن و عوامل متعدد دیگر، نتایج کسب شده در این زمینه از گوناگونی زیادی برخوردار می‌باشند، به نحوی‌که در برخی از نتایج و بدون توجه به کیفیت سنگدانه‌های بازیافتی و با یک حاشیه اطمینان ٪۹۵ نشان داده شد که در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی میزان جذب آب تا ۲/۴۷ برابر بتن مرجع نیز می‌رسد[۴۳]. جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس در بتن تماماً بازیافتی بهترین شرایط را در تامین فضای متراکم در بتن تماماً بازیافتی فراهم آورد و توانست تا میزان جذب آب غوطه‌وری بتن تماماً بازیافتی نسبت به حالت بدون پوزولان را ٪۲۴ کاهش دهد. پدرو و همکاران[3] (۲۰۱۸) نیز در جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس به کاهش ٪۲۳/۶ جذب آب غوطه‌وری دست یافتند [۴۴]. استفاده از خاکستربادی نیز نشان داد که قادر است تا در بهترین حالت (جایگزینی ٪۱۵) جذب آب بتن تماماً بازیافتی را نسبت به حالت بدون پوزولان تا ٪۲۲ کاهش دهد و بهترین درصد جایگزینی زئولیت طبیعی (٪۱۰) نیز تا ٪۷ قادر به کاهش جذب آب غوطه‌وری نسبت به بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان شد. با این‌حال هیچ یک از درصدهای جایگزینی پوزولان‌های مصرفی در تامین شرایطی مشابه جذب آب غوطه‌وری بتن مرجع موفق نبودند و جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس به‌عنوان درصد بهینه شناسایی شده بیش از ٪۴۳ از جذب آب غوطه‌وری بیش‌تری نسبت به بتن مرجع برخوردار شد.

میزان جذب آب مویینه در بتن مرجع پس از ۷۲ ساعت ۴/۹۲ میلی‌متر و در بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان با ٪۹۱ رشد ۹/۳۸ میلی‌متر ثبت شد. گرچه استفاده از مواد پوزولانی بجز جایگزینی‌های ٪۱۵ میکروسیلیس و ٪۳۵ خاکستربادی منجر به کاهش جذب آب مویینه نسبت به بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان شدند، ولی نتایج

[1] Rao et al.
[2] Fonteboa
[3] Pedro et al.

کسب شده نسبت به بتن مرجع از مقادیری بیش‌تری برخوردار شدند و نشان دادند که افت کیفیت بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی پوزولان از منظر جذب آب مویینه نسبت به بتن مرجع بسیار چشم-گیر می‌باشد. بهترین درصد جایگزینی در میان انواع پوزولان‌ها، جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس بود به نحوی‌که منجر به ٪۱۸کاهش جذب آب مویینه نسبت به بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان شد، اما در مقایسه با بتن مرجع ٪۵۷ با رشد جذب آب مویینه روبرو گردید. براساس آنچه برونه (۱۹۹۱) [۳۷] جهت تعیین سطح کیفی بتن‌ها برمبنای میزان جذب آب مویینه به‌دست آورد، بتن مرجع در محدوده سطح کیفی عالی قرار گرفت، در حالی‌که همه بتن‌های تماماً بازیافتی با و بدون پوزولان در تراز سطح کیفی متوسط قرار گرفتند. نزدیک‌ترین ضریب جذب مویینه به مرز سطح کیفی عالی برای بتن تماماً بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس معادل ۰/۱۱۷ میلی‌گرم بر میلی‌متر بر مجذور دقیقه به دست آمد و به‌دنبال آن جایگزینی‌های ٪۱۰ و ٪۲۰ زئولیت طبیعی و ٪۲۵ خاکستربادی قرار گرفتند و از منظر این شاخص، بتن تماماً بازیافتی حاوی ٪۳۵ خاکستربادی در پایین‌ترین سطح کیفی قرار گرفت.

روش مدون و یکپارچه‌ای در زمینه محاسبه مقاومت الکتریکی بتن در استانداردها وجود ندارد، و از آنجایی که پس از سال ۲۰۱۲ برای تعیین میزان هدایت الکتریکی بتن استاندارد معتبری ارائه شده، لذا نتایج متنوعی در این زمینه برای بتن‌های بازیافتی در دسترس نمی‌باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی می‌تواند باعث افت مقاومت ویژه الکتریکی بتن به میزان ٪۴۹ نسبت به بتن مرجع شود، در حالی‌که در برخی از پژوهش‌ها این میزان از افت در بازه ٪(۳۷-۲۸) بیان شده است[۴۵]. البته نباید از تأثیر تفاوت نسبت آب به سیمان و درجه رطوبت موجود در نمونه‌ها در این نتایج غافل بود. با این‌حال جایگزینی هر یک از مواد پوزولانی به‌دلیل چگال‌تر شدن فضای داخلی بتن تماماً بازیافتی باعث افزایش میزان مقاومت الکتریکی گردید. از آنجایی‌که بتن‌های حاوی زئولیت طبیعی به‌ویژه در جایگزینی‌های ٪۱۰ و ٪۲۰ مقاومت ویژه مطلوبی از خود نشان دادند و به رفتاری مشابه با رفتار بتن مرجع رسیدند، احتمال تأثیر تغییرات شیمیایی درون این دسته از بتن‌ها قوت می‌یابد. مقاومت ویژه بتن تماماً بازیافتی حاوی ٪۱۰ زئولیت طبیعی تقریباً معادل بتن مرجع و بتن حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس ٪۷ کم‌تر از بتن مرجع ثبت شد؛ بهترین شرایط در بتن‌های حاوی خاکستربادی نیز در جایگزینی ٪۱۵ و با ٪۱۱ کاهش نسبت به بتن مرجع مشاهده شد. به‌طور کلی متوسط رشد مقاومت ویژه الکتریکی بتن‌های بازیافتی حاوی انواع پوزولان در مقایسه با بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان ٪۴۰ ثبت شد که این میزان در مقایسه با بتن مرجع نشانگر متوسط افت ٪۱۵ می‌باشد. در تعیین هدایت الکتریکی بتن‌های بازیافتی نیز مانند مقاومت ویژه الکتریکی نشان داده شد که جایگزینی کامل درشت‌دانه‌ها می‌تواند تا ٪۶۷ هدایت الکتریکی را افزایش دهد. در مقابل جایگزینی انواع پوزولان‌ها بجز ٪۳۵ خاکستربادی و ٪۲۰ و ٪۳۰ زئولیت طبیعی باعث شد تا ضریب هدایت الکتریکی بتن‌های تماماً بازیافتی به ضریب هدایت الکتریکی بتن مرجع نزدیک و بعضاً کم‌تر نیز شود. با احتساب مقادیر کسب شده از همه پوزولان-ها، جایگزینی پوزولان در بتن تماماً بازیافتی باعث شده تا هدایت الکتریکی بتن تماماً بازیافتی حدود ٪۳۸ از بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان کم‌تر و حدود ٪۴ نسبت به بتن مرجع بیش‌تر شود.

۵- نتایج

در این تحقیق خواص وابسته به دوام بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی درصدهای مختلف میکروسیلیس، خاکستربادی و زئولیت طبیعی مطالعه شد. در مجموع ۱۵۴ نمونه بتنی مکعبی و استوانه‌ای استاندارد در قالب ۱۱ طرح اختلاط ساخته شدند. در بازه ۲۸ روزه مقاومت فشاری و سرعت انتشار امواج فراصوت، در بازه ۹۱ روزه، مقاومت فشاری و در بازه ۱۸۰ روزه آزمایش‌های جذب آب غوطه‌وری، جذب آب مویینه، مقاومت ویژه الکتریکی و ضریب هدایت الکتریکی بتن‌ها اندازه‌گیری شدند. خلاصه نتایج به شرح زیر می‌باشد:

- جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی در بتن‌های بدون پوزولان نشان داد که مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه تا سقف ٪۱۸ افت می‌کند. استفاده از ٪۱۰ میکروسیلیس، به عنوان بهترین درصد جایگزینی نشان داد که قادر است تا مقاومت فشاری بتن تماماً بازیافتی را تا ٪۱۷ نسبت به بتن مرجع بهبود بخشد، در حالی-که در بهترین درصد جایگزینی خاکستربادی ٪۲۶ افت نسبت به بتن مرجع روی داد. جایگزینی ٪۱۰ زئولیت طبیعی در بتن تماماً بازیافتی نیز نشان داد که مقاومت فشاری در بازه ۲۸ روزه حدود ٪۱۷ نسبت به بتن مرجع افت می‌کند، با این‌حال پس از گذشت ۹۱

روز به مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال نزدیک شد، لذا می‌توان چنین استنباط کرد که گرچه جایگزینی ٪۱۰ زئولیت طبیعی نمی‌تواند منجر به کسب مقاومت فشاری محسوسی در مقایسه با بتن مرجع شود، ولی با تامین مقاومت فشاری هدف می‌تواند تا مقدار مصرف سیمان را کاهش دهد.

- از منظر سرعت انتشار امواج فراصوت، سطح کیفی بتن مرجع در مرز خوب و عالی قرار گرفت، در حالی‌که بتن تماماً بازیافتی در مرز سطح کیفی خوب و مشکوک واقع شد. براساس این معیار سطح کیفی بتن تماماً بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس مشابه با بتن مرجع می‌باشد. بجز سطح کیفی ٪۳۵ خاکستربادی، سایر درصدهای مصرف پوزولان‌های استفاده شده در دامنه سطح کیفی خوب واقع شدند.

-جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی نشان داد که جذب آب غوطه‌وری تا ٪۸۷ نسبت به بتن مرجع رشد می‌کند، با این‌حال جایگزینی میکروسیلیس در درصد جایگزینی بهینه ٪۱۰ باعث شد تا جذب آب غوطه‌وری بتن تماماً بازیافتی تا ٪۴۳ نسبت به بتن مرجع افزایش یابد. جایگزینی سایر درصد پوزولان‌ها منجر به کسب جذب آب غوطه‌وری بیش‌تری گردید، به نحوی‌که جایگزینی ٪۱۵ میکروسیلیس، ٪۲۵ خاکستربادی و تمام جایگزینی‌های زئولیت طبیعی موفق به کاهش چشم‌گیر جذب آب نشدند.

- با جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی، میزان جذب آب مویینه نسبت به بتن مرجع تا ٪۹۱ افزایش یافت. در بهترین حالت، درصد جایگزینی بهینه میکروسیلیس منجر به افزایش ٪۵۷ جذب آب غوطه‌وری بتن تماماً بازیافتی نسبت به بتن مرجع شد و سایر درصدهای جایگزینی پوزولان‌ها با رشد بیش‌تری مواجه شدند. براساس معیار کیفی معرفی شده تحت‌عنوان ضریب جذب آب مویینه، بتن مرجع در سطح کیفی عالی قرار گرفت، در حالی که همه بتن‌های تماماً بازیافتی با و پوزولان در تراز سطح کیفی متوسط قرار گرفتند.

- در جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی میزان مقاومت ویژه الکتریکی تا ٪۴۹ نسبت به بتن مرجع افت کرد. تأثیر تغییرات شیمیایی موجود درون بتن ناشی از نوع پوزولان جایی مشاهده شد که برخلاف نتایج سایر آزمایش‌های انجام شده، مقاومت الکتریکی بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۱۰ و ٪۲۰ زئولیت طبیعی مشابه بتن مرجع شده و پس از آن‌ها جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس منجر به افت ٪۷ در مقاومت ویژه توده‌ای الکتریکی گردید. بهترین شرایط در بتن‌های حاوی خاکستربادی نیز در جایگزینی ٪۱۵ و با ٪۱۱ افت نسبت به بتن مرجع مشاهده شد.

- در بتن‌های تماماً بازیافتی بدون پوزولان میزان هدایت الکتریکی تا ٪۶۷ نسبت به بتن مرجع افزایش یافت. به‌طور کلی جایگزینی انواع پوزولان‌ها در بتن تماماً بازیافتی باعث شد تا هدایت الکتریکی بتن تماماً بازیافتی حدود ٪۳۸ از بتن تماماً بازیافتی بدون پوزولان کم‌تر و حدود ٪۴ نسبت به بتن مرجع بیشتر شود.

- با جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی، خواص وابسته به دوام به نسبت بیش‌تری نسبت به خواص مکانیکی دستخوش تغییر شدند.

٦- مراجع

[1] Dhir, R. K., McCarthy, M. J., Halliday, J. E., Tang, M. C. ASR testing on recycled aggregates guidance on alkali limits and reactivity. DTI/WRAP Aggregates Research Programme STBF, (2005) 13.

[2] Leite, M. B. Evaluation of the mechanical properties of concrete produced with recycled aggregates from construction and demolition wastes, Brasil: PhD Thesis, Federal University of Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, (2001).

[3] Khalaf, F. M. Using crushed clay brick as coarse aggregate in concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 18(4), (2006) 518-526.

[4] Rao, A., Jha, K. N., Misra, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. Resources, conservation and Recycling, 50(1), (2007) 71-81.

[5] Pereira, P., Evangelista, L., De Brito, J. The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cement and concrete composites, 34(9), (2012) 1044-1052.

[6] Sajedi, F., Jalilifar, H. Evaluating and comparing the effect of zeolite, micro-silica, and fly ash on the mechanical properties of recycled concrete made of 100% recycled aggregates. Journal of Structural and Construction Engineering, 6(Special Issue 4), (2019) 165-180.

[7] Dhir, R. K., Paine, K. A. Suitability and practicality of using coarse RCA in normal and high-strength concrete. In 1st International Conference on Sustainable Construction: Waste Management. (2004).

[8] Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., Barra, M.

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.
[9] Yang, K. H., Chung, H. S., Ashour, A. F. Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. (2008).
[10] Limbachiya, M. C. Coarse recycled aggregates for use in new concrete. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability. 157(2), (2004) 99-106.
[11] Dhir, R. K., Limbachiya, M. C., Leelawat, T. Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 134(3), (1999).
[12] Senaratne, S., Lambrousis, G., Mirza, O., Tam, V. W., Kang, W. H. Recycled concrete in structural applications for sustainable construction practices in Australia. Procedia engineering, 180, (2017) 751-758.
[13] Kou, S. C., and Poon, C. S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate, Construction and Building Materials, 35, (2012) 69-76.
[14] Kou, S. C., and Poon, C. S. A comparative study of using river sand, crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates for concrete production Excellence in Concrete Construction through Innovation-Proceedings of the International Conference on Concrete Construction. In *Excellence in Concrete Construction through Innovation: Proceedings of the conference held at the Kingston University, United Kingdom*, (2008) 459.
[15] Gonçalves, A., Esteves, A., Vieira, M. Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability. Presented at the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, (2004) 554-562.
[16] Amorim, P., de Brito, J., Evangelista, L. Concrete made with coarse concrete aggregate: Influence of curing on durability. ACI Materials Journal, 109(2), (2012) 195-204.
[17] Gomes, M., de Brito, J. Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance. Materials and Structures, 42(5), (2009) 663-675.
[18] Hobbs, D. W. *Aggregate influence on chloride ion diffusion into concrete*. Cement and Concrete Research, 29(12) (1999) 1995-1998.
[19] Dhir R. K., Dyer T. D., Paine K. A. *Dismantling barriers: Roles for research in realizing markets for construction and demolition wastes*. Presented at 1st International Conference on Sustainable Construction: Waste Management, (2004) 1-22.
[20] Koulouris, A., Limbachiya, M. C., Fried, A. N., Roberts, J. J. *Use of recycled aggregate in concrete application: Case studies*. Presented at the International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling: Challenges and Opportunities, (2004) 245-257.
[21] Limbachiya, M., Meddah, M. S., Ouchagour, Y. Performance of Portland/silica fume cement concrete produced with recycled concrete aggregate. ACI Materials Journal, 109(1), (2012) 91-100.
[22] Dhir, R. K., Paine, K. Value added sustainable use of recycled and secondary aggregates in concrete. Indian Concrete Journal, 84(3), (2010) 7-26.
[23] Pedro, D., De Brito, J., Evangelista, L. Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. Construction and Building Materials, 71, (2014) 141-151.
[24] Nagataki, S., Gokce, A., Saeki, T., Hisada, M. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. Cement and concrete research, 34(6), (2004) 965-971.
[25] Padmini, A. K., Ramamurthy, K., Mathews, M. S. Relative moisture movement through recycled aggregate concrete. Magazine of concrete research, 54(5), (2002) 377-384.
[26] Iranian Management Organization, Iranian Concrete Code (ICC). 6 ed., 120, Tehran, Iran, (2003).
[27] ASTM C127-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2015).
[28] De Juan, M.S., Gutiérrez, P.A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials, 23(2), (2009) 872-877.
[29] Tateyashiki, H., Shima, H., Matsumoto, Y., Koga, Y. Properties of concrete with high quality recycled aggregate by heat and rubbing method. Proc. JCI, 23(2), (2001) 61-66.
[30] Katz, A. Treatments for the improvement of recycled aggregate. Journal of Materials in Civil Engineering, 16(6), (2004) 597-603.
[31] Tam, V. W., Tam, C. M., Le, K. N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. Resources, Conservation and Recycling, 50(1), (2007) 82-101.

absorption and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash. Cement and Concrete Composites, 95, (2019) 169-182.

[32] Kou, S. C., Poon, C. S. Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites, 32(8), (2010) 649-654.

[33] BS 1881: 116. Methods for the Determination of Compressive Strength of Concrete. BSI, Linfordwood, Milton Keynes MK14 6LE, UK, (1983).

[34] Whitehurst, E. A. Soniscope tests concrete structures. In Journal Proceedings. 47(2), (1951). 433-444.

[35] ASTM C642-13, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2013).

[36] ASTM C1585-13, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2013).

[37] Browne, R. D. Field investigations: site laboratory tests: maintenance, repair and rehabilitation of concrete structures. Lisbon: CEEC; (1991).

[38] ASTM C1760-12, Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012).

[39] Hansen, T. C. Recycling of Demolished Concrete and Masonry. London, UK, E & FN Spon, (1992).

[40] Kanellopoulos, A., Nicolaides, D., Petrou, M. F. Mechanical and durability properties of concretes containing recycled lime powder and recycled aggregates. Construction and Building Materials, 53, (2014) 253-259.

[41] Rao, M. C., Bhattacharyya, S. K., Barai, S. V. Influence of different demolished old structures concrete as aggregate on properties of concrete. Indian Concrete Journal, 91, (2017) 68–85

[42] González-Fonteboa, B., Seara-Paz, S., De Brito, J., González-Taboada, L., Martínez-Abella, F., Vasco-Silva, R. Recycled concrete with coarse recycled aggregate. An overview and analysis. Materiales de Construcción, 68(330), (2018) 151.

[43] Guo, H., Shi, C., Guan, X., Zhu, J., Ding, Y., Ling, T. C., Wang, Y. Durability of recycled aggregate concrete–a review. Cement and Concrete Composites, 89, (2018) 251-259.

[44] Pedro, D., de Brito, J., Evangelista, L. Durability performance of high-performance concrete made with recycled aggregates, fly ash and densified silica fume. Cement and Concrete Composites, 93, (2018) 63-74.

[45] Kurda, R., de Brito, J., Silvestre, J.D. Water

Laboratory study of the effect of recycled concrete aggregates on the durability of fully recycled concrete containing pozzolans

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

Abstract

This laboratory research has investigated in particular the durability of fully recycled concrete containing natural zeolite (NZ), microsilica (SF) and fly ash (FA) pozzolans. Recycled concretes consist of recycled concrete aggregates and contain different percentages of replacement of SF, FA and NZ. A total of 11 mixing designs were constructed, including plain reference concrete (RC), 100% recycled concrete without pozzolans, and 9 mixing designs of fully recycled concretes containing the mentioned pozzolanic materials as separate applications. To evaluate and compare some mechanical properties and especially properties related to the durability of this type of concrete, in the age range of 28- to 91-day, compressive strength (CS), in the age range of 28-day the ultr-pulse velocity, and in the age range of 180-day immersion water absorption, capillary water absorption, electrical resistivity and electrical conductivity of specimens made of this type of concretes, were measured. The results showed that although the complete replacement of recycled aggregates in this type of concrete leads to a decrease in their CS compared to the RC, but the replacement of pozzolanic materials such as SF in fully recycled concrete can lead to gain more CS than RC. Also, the rate of loss of durability properties in fully recycled concretes without pozzolans is much higher than the loss of mechanical properties compared to the RC. However, due to changes in the chemical structure of recycled concretes from pozzolanic materials such as NZ, some of the durability properties of these concretes did not change significantly compared to RC.

Keywords: Recycled aggregate, Recycled concrete, Mechanical properties, Durability, Pozzolan.

* Corresponding Author: sajedi@iauahvaz.ac.ir