

## بررسی تأثیر سنگدانه‌های درشت بازیافتی بر دوام بتن‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس

حسین ساسانی پور<sup>۱\*</sup>، مصطفی حق طلب جورقانی<sup>۲</sup>، محسن تدین<sup>۳</sup> و امیر مسعود سلیمی<sup>۴</sup>

۱- مدیر فنی آزمایشگاه مرکزی شرکت مهندسی مشاور سیناب غرب

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه ملایر - گروه عمران

۳- مدیر بخش ژئوتکنیک و مقاومت مصالح شرکت مهندسی مشاور سیناب غرب

۴- مدیر آزمایشگاه مرکزی شرکت مهندسی مشاور سیناب غرب

\*نویسنده مسئول

تلفن: ۰۹۱۸۷۰۸۱۰۴۳ E-mail: [sasnipourhossein@gmail.com](mailto:sasnipourhossein@gmail.com)

کد مقاله : کد انجمن :

چکیده:

استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی بعنوان جایگزین سنگدانه‌های طبیعی می‌تواند روی کاهش مصرف منابع طبیعی تأثیر بگذارد. از این رو در سال‌های اخیر بررسی اثرات مثبت و منفی استفاده از این نوع سنگدانه‌ها روی بتن مورد استقبال پژوهشگران قرار گرفته است. بواسطه استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی، برخی از خواص بتن ساخته شده با این نوع از سنگدانه‌ها مانند جذب آب، تخلخل، مقاومت الکتریکی و نفوذ یون کلر ممکن است تحت تأثیر قرار بگیرد. در این مطالعه میزان جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی درشت بترتیب ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ انتخاب گردید و تأثیر آنها روی دوام بتن‌های خودتراکم مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت بررسی کارایی بتن، آزمایش‌های جریان اسلامپ و حلقه جی برای بتن تازه در نظر گرفته شد. آزمایش‌های مقاومت فشاری، سرعت پالس، مقاومت الکتریکی و نفوذ یون کلر برای مخلوط‌های سخت شده انجام گرفت. نتایج نشان داد که با جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت فشاری بطور محسوس کاهش داشت. همچنین نتایج نشان داد که جایگزینی ۲۵٪ از سنگدانه‌های بازیافتی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر سرعت پالس، مقاومت الکتریکی و نفوذ یون کلر در بتن سخت شده نداشت. با این حال، با افزایش در میزان جایگزینی سنگدانه بازیافتی، دوام بتن‌های خودتراکم تحت تأثیر قرار گرفت و باعث کاهش مقاومت ویژه الکتریکی و کاهش دوام در برابر نفوذ یون کلر گردید.

واژه‌های کلیدی: بتن خودتراکم، سنگدانه‌های بازیافتی، سرعت پالس، مقاومت ویژه الکتریکی، نفوذ یون کلر، میکروسیلیس.

## ۱- مقدمه:

بدون شک بتن یکی از مواد ساختمانی پرمصرف در سال‌های اخیر شناخته شده است. با پیشرفت تکنولوژی در طراحی‌های بتن‌های خاص، پژوهشگران موفق شدند نوعی از بتن را که براحتی و تحت اثر وزن خود، در محل‌های با تراکم زیادی از میلگردها، در قالب جای می‌گیرد تولید کنند [1]. مزیت این نوع بتن باتوجه به اینکه نیازی به تراکم ندارد، اجرای آن بدون ایجاد صدای خشن در حین بتن ریزی می‌باشد [2]. از طرفی امروزه مقدار مصالح ضایعاتی و مصالح حاصل از تخریب سازه‌ها روبه افزایش است و همچنین منابع طبیعی که در ساخت و ساز مورد استفاده قرار می‌گیرد روبه کاهش است. در این میان استفاده از سنگدانه‌های بتنی بازیافت شده جهت توسعه پایدار و تولید بتن دوستدار محیط زیست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [3,4]. مطالعات اخیر پژوهشگران نشان می‌دهد که علاقه به استفاده از سنگدانه‌های بتنی بازیافتی در بتن‌های خودتراکم رو به افزایش است [5-7]. ملات چسبیده به سنگدانه بازیافتی باعث کاهش کیفیت سنگدانه بازیافتی، شامل افزایش جذب آب، افزایش تخلخل و کاهش مقاومت می‌گردد. و از طرفی روی خواص بتن ساخته شده که شامل بتن تازه و بتن سخت شده می‌باشد، نیز تاثیر می‌گذارد [8-10]. مطالعات بسیاری وجود دارد که نشان می‌دهد امکان ساخت بتن خودتراکم با سنگدانه‌های بازیافتی وجود دارد. این امر با کنترل نسبت آب به سیمان، استفاده مناسب از افزودنی‌های شیمیایی و معدنی و همچنین روش‌های مناسب آماده سازی قبل از مصرف سنگدانه‌های بازیافتی امکانپذیر است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که با استفاده از هوازا و میکروسیلیس و همچنین آماده سازی سنگدانه‌های بازیافتی به روش pre-soaking می‌توان تا حدود زیادی مانع از آب انداختگی و جدا شدگی در بتن‌های خودتراکم حاوی سنگدانه‌های ریز و درشت بازیافتی شد [11-13]. میکروسیلیس بواسطه ذرات بسیار ریز خود می‌تواند در کنترل آب انداختگی و جداسدگی بسیار موثر باشد [14]. استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در بتن‌های خودتراکم امکان کاهش مقاومت فشاری را فراهم می‌کند. دلیل کاهش، جذب آب بالا در نتیجه افزایش نسبت آب به سیمان، تخلخل سنگدانه‌های بازیافتی و افزایش لایه‌های مرزی ضعیف گزارش شده است. با این حال نتایج برخی از پژوهشگران نشان می‌دهد جایگزینی تا ۴۰٪ از سنگدانه‌های درشت بازیافتی تاثیر چشمگیری در کاهش مقاومت فشاری نداشته است که می‌تواند بدلیل اتصال مناسب سنگدانه‌های بازیافتی با خمیر سیمان، مشارکت آب داخل حفرات سنگدانه‌های بازیافتی در بهبود لایه مرزی (self-healing)، کیفیت مناسب ملات چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی باشد [15-18]. در مواقعی نیز به این موضوع اشاره شده است که بدلیل وجود سیمان هیدراته نشده ملات روی سنگدانه‌های ریز بازیافتی امکان افزایش مقاومت فشاری، بدلیل واکنش سیمان هیدراته نشده، وجود دارد [19]. با این حال جهت بهبود کیفیت سنگدانه‌های بازیافتی مطالعات وسیعی صورت گرفته است و روش‌هایی نیز پیشنهاد شده است. این روش‌ها بصورت عملیات فیزیکی و یا شیمیایی روی سنگدانه‌های بازیافتی می‌باشند. با این نوع روش‌ها ملات چسبیده به سنگدانه حذف و یا مقاوم می‌شود [20-22]. با توجه به اینکه تخلخل بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی بیشتر از بتن فاقد سنگدانه‌های بازیافتی است، این موضوع باعث می‌شود دوام بتن بازیافتی تحت تاثیر قرار بگیرد [23]. با این حال با بهره‌گیری از مواد جایگزین سیمان مانند خاکستر بادی و میکروسیلیس می‌توان خواص دوامی بتن‌های بازیافتی شامل مقاومت الکتریکی و مقاومت در برابر نفوذ یون کلر را بهبود بخشید [24-26]. این مواد بدلیل ساختار بسیار ریز بعنوان پرکننده عمل میکنند و در بهبود دوام بتن بسیار موثر هستند [27]. با اشاره به این موضوع که بکارگیری مواد جایگزین سیمان می‌تواند در جهت کمک به بهبود دوام بتن‌های خودتراکم ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی قرار بگیرد، نگرش مثبتی در بکارگیری سنگدانه‌های بازیافتی بوجود آمده است.

## ضرورت پژوهش

از آنجاکه استقبال از مصرف بتن خودتراکم در دهه اخیر بسیار زیاد بود است و همچنین کارهای تحقیقاتی فراوانی روی بررسی خواص دوامی این نوع از بتن صورت گرفته است، با این حال بنظر میرسد علی‌رغم بررسی تاثیر سنگدانه‌های بازیافتی

روی دوام بتن معمولی، همچنان بدلیل نبود مطالعات کافی بررسی تاثیر سنگدانه‌های بازیافتی روی خواص بتن خودتراکم محسوس می‌گردد. از طرفی هم میکروسیلیس و هم سنگدانه‌های بازیافتی محصولاتی هستند که مصرف آنها به کاهش آلودگی محیط زیست کمک قابل ملاحظه‌ای می‌نماید. از آنجا که استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی به تنهایی، اثرات منفی روی خصوصیات بتن دارد، بهره‌گیری از میکروسیلیس در جهت بهبود کیفیت در نظر گرفته شد. مقدار جایگزینی میکروسیلیس، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ استفاده شد. در تهیه سنگدانه‌های بازیافتی از منابعی مشخص مانند بتن ساختمان‌های مسکونی و بهداشتی که در آینده تخریب خواهند شد، استفاده گردید. هدف اصلی از این مطالعه، ارزیابی استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی و کاهش اثرات منفی زیست محیطی ناشی از رها شدن ضایعات حاصل از تخریب سازه‌های بتنی مختلف می‌باشد. این مطالعه در جست‌جوی معرفی بتن خودتراکم بازیافتی که نیازهای یک بتن خودتراکم ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی را فراهم می‌کند، می‌باشد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱ مصالح مصرفی

در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه سیمان هگمتان و میکروسیلیس (SF) محصول شرکت فروسیلیس ایران که مشخصات آن در جدول شماره ۱ نشان داده شده است، استفاده گردید. از پودر سنگ (LP) با وزن مخصوص ۲/۵۸ به عنوان مصالح پودری استفاده شد. مشخصات دانه‌بندی و خصوصیات سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی در جدول ۲ نشان داده شده است. سنگدانه‌ها در آزمایشگاه بازیافت شدند و دانه‌های با قطر بیشتر از ۱۹ میلی‌متر بوسیله الک کردن، حذف شدند. از افزودنی فوق‌روان‌کننده (SP) بر پایه پلی‌کربوسیلات جهت دستیابی به روانی مناسب براساس توصیه‌نامه EFNARC [14] استفاده شد.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی سیمان و میکروسیلیس.

مشخصات مکانیکی	میکروسیلیس (%)	سیمان (%)	مشخصات شیمیایی
مقاومت فشاری ملات (MPa)	۸۵-۹۵	۲۱/۲۷	SiO <sub>2</sub>
۲۰/۱ ۳ روزه	-	۶۲/۹۵	CaO
۲۸/۲ ۷ روزه	۰/۴-۲	۴/۰۳	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۴۰/۳ ۲۸ روزه	۰/۵-۱/۷	۴/۹۵	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	۰/۱-۰/۹	۱/۵۵	MgO
	۰/۱۵-۰/۲	۰/۴۹	Na <sub>2</sub> O
	۰/۱۵-۱/۰۲	۰/۶۵	K <sub>2</sub> O
	-	۲/۲۶	SO <sub>3</sub>
	-	۶/۳	C <sub>2</sub> A
	۳/۵	۲/۱۱	LOI
<b>مشخصات فیزیکی</b>			
	۲/۲۱	۳-۳/۱	وزن مخصوص
	۱۴۰۰۰	۲۹۱۰	سطح ویژه (cm <sup>3</sup> /gr)
	-	۱۵۴- اولیه	زمان گیرش (min)
	-	۱۹۵- نهایی	

جدول شماره ۲: مشخصات دانه بندی و خصوصیات سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی.

اندازه الک (mm)	درصد عبوری (%)					
	CNA.	CRA.	FNA.	CNA.	CRA.	FNA.
۱۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	وزن مخصوص		
۱۲/۵	۳۵/۴	۷۳/۹	۱۰۰	۲/۶۳	۲/۳۹	۲/۵۸
۹/۵	۱/۴۳	۴۷/۹	۱۰۰	مدول نرمی		
۶/۳۵	۰/۵۳	۲۱/۳	۱۰۰	-	-	۳/۷
۴/۷۵	۰/۴۸	۶/۶	۹۹	جذب آب		
۲/۳۶	۰/۴۶	۰/۸۴	۶۴			
۱/۱۸	۰/۴۵	۰/۳۹	۳۳/۹	۱/۷	۵/۴	۲/۱
۰/۶	۰/۴۴	۰/۲۲	۱۷/۶			
۰/۳	۰/۴۳	۰/۱۵	۹/۹			
۰/۱۵	۰/۲۳	۰/۱۰	۵/۷			
۰/۰۷۵	۰/۱۵	۰/۰۷	۴/۷			

ماسه طبیعی: FNA, شن بازیافتی: CRA, شن طبیعی: CNA

## ۲-۲ نسبت‌های اختلاط

در طرح‌های اختلاط بتن خودتراکم از نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و عیار مواد سیمانی ۴۲۰ کیلوگرم در هر مترمکعب استفاده شده است. ضمناً با توجه به توصیه‌نامه EFNARC از میکروسیلیس جهت دستیابی به بتن خودتراکم بدون آب انداختگی و جداسازی استفاده شده است. در جدول ۳ مقادیر اجزای طرح اختلاط و مقاومت فشاری نشان داده شده است. نتایج نشان داد که همه طرح‌های ساخته شده بر اساس توصیه‌نامه EFNARC شرایط مناسبی داشتند و فاقد هرگونه جداسازی و یا آب انداختگی بودند. نتایج خصوصیات تازه بتن خودتراکم در جدول شماره ۴ نشان داده شده است.

جدول شماره ۳: مقادیر اجزای طرح اختلاط بتن‌های خودتراکم.

گروه طرح‌ها	کد طرح	نسبت آب به سیمان	سیمان	شن	ماسه	شن بازیافتی	پودر سنگ	میکروسیلیس	فوق روان کننده (%)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
طرح مرجع	SS			۵۲۶/۲	۱۰۳۲/۵	-			۱/۰۰	۵۶/۷
طرح‌های بازیافتی	SS۲۵C			۴۰۱/۴	۱۰۳۲/۴	۱۱۹/۵			۱/۰۰	۳۹/۲
	SS۵۰C	۰/۴	۱۶۸	۳۸۶/۴	۲۶۳/۱	۱۰۳۲/۴	۲۳۹/۱	۱۷۲	۳۳/۶	۳۶/۸
	SS۷۵C				۱۳۱/۶	۱۰۳۲/۴	۳۵۸/۷		۱/۰۰	۳۵/۲
	SS۱۰۰C				-	۱۰۳۲/۴	۴۷۸/۲		۱/۰۰	۳۳/۴

جدول شماره ۴: خصوصیات بتن‌های تازه خودتراکم.

گروه طرح‌ها	کد طرح	جریان اسلامپ (میلی متر)	T <sub>50</sub> (ثانیه)	T final (ثانیه)	J-ring (میلی متر)	J-ring	فوق روان کننده (%)	مطابقت با EFNARC [14]
طرح مرجع	SS	۶۰۰	۴/۹	۲۹	۵۸۰	۲	۱/۰۰	Yes
طرح‌های بازیافتی	SS۲۵C	۶۲۵	۵/۰	۲۸	۵۸۵	۲	۱/۰۰	Yes
	SS۵۰C	۶۱۰	۴/۱	۲۹	۵۹۵	۳	۱/۰۹	Yes
	SS۷۵C	۶۰۰	۳/۲	۲۷	۵۹۰	۴	۱/۰۰	Yes
	SS۱۰۰C	۶۱۰	۴/۹	۲۲	۵۹۰	۲	۱/۰۰	Yes

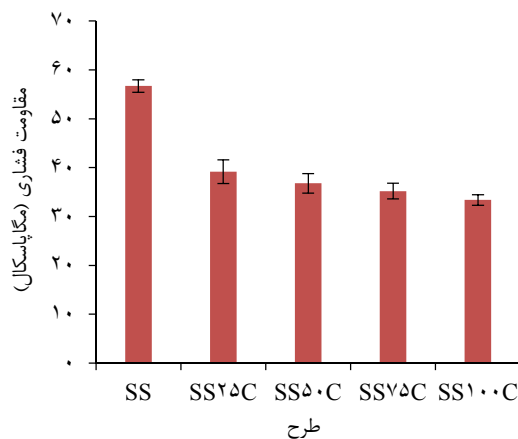
### ۳-۲ برنامه آزمایشگاهی

آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متر انجام شد. آزمایش اندازه‌گیری سرعت پالس براساس استاندارد [28] ASTM C 597 روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر در سنین ۳، ۷، ۱۱، ۱۴، ۲۱، ۲۵ و ۲۸ روز انجام شد. آزمایش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر در سنین ۳، ۷، ۱۱، ۱۴، ۲۱، ۲۵ و ۲۸ روز انجام شد. جهت بررسی مقاومت طرح‌ها در برابر نفوذ یون کلر آزمایش Rapid chloride penetration test براساس [29] ASTM C 1202 روی نمونه‌های استوانه‌ای ۵۰×۱۰۰ میلی‌متر اخذ شده از نمونه‌های استوانه‌ای ۲۰۰×۱۰۰ انجام شد.

### ۳ نتایج و بحث

#### ۳-۱ مقاومت فشاری

نتایج نشان داد که با جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت فشاری نسبت به طرح مرجع کاهش داشت (شکل ۱). در بسیاری از مراجع ذکر شده است که بدلیل تشکیل لایه انتقالی ضعیف، تشکیل ترک در فرآیند تهیه سنگدانه‌های بازیافتی و از طرفی تخلخل موجود بواسطه ملات چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی، امکان کاهش مقاومت وجود دارد [5,17,30,31]. ریز ساختار بتن ساخته شده با سنگدانه بازیافتی متفاوت‌تر از ساختار بتن ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی است. در واقع با ورود سنگدانه‌های بازیافتی تعداد لایه‌های مرزی افزایش می‌یابد. در بتن بازیافتی سه لایه انتقالی تعریف می‌شود: (۱) لایه انتقالی بین ملات قدیم و ملات جدید (۲) لایه انتقالی بین سنگدانه و ملات قدیم و احتمالاً (۳) لایه انتقالی بین سنگدانه و ملات جدید. از آنجا که محل لایه انتقالی ضعیف‌ترین بخش ساختاری بتن است و همچنین ساختار متخلخل سنگدانه‌های بازیافتی امری انکارناشدنی است، انتظار کاهش مقاومت در این نوع بتن‌ها وجود دارد. با این حال بسته به نوع سنگدانه‌های بازیافتی و خصوصیات بتن مرجع که سنگدانه از آن بازیافت شده است امکان کاهش یا افزایش مقاومت مشاهده شده است [13,32].

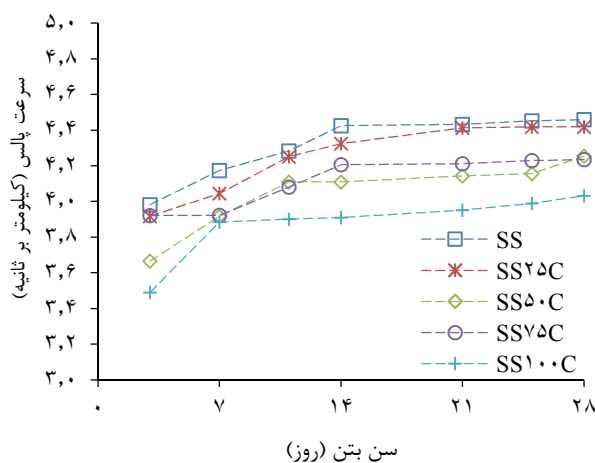


شکل ۱: مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط بتن‌های خودتراکم.

#### ۳-۲ سرعت پالس

نتایج آزمایش سرعت پالس در شکل ۲ نشان داد که با جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی سرعت پالس در بتن سخت شده کاهش یافت. کاهش سرعت پالس برای جایگزینی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ سنگدانه بازیافتی نسبت به طرح مرجع SS به ترتیب ۹، ۴/۶، ۵ و ۱۰ ثبت شد. بطور کلی با افزایش در تخلخل سرعت پالس کاهش می‌یابد. همچنین سرعت پالس تابع خصوصیات لایه مرزی و دانسیته بتن می‌باشد [16,33]. بنظر می‌رسد عامل کاهش سرعت پالس در بتن‌های حاوی سنگدانه بازیافتی نیز تخلخل موجود در این نوع از سنگدانه‌ها و همچنین لایه مرزی ضعیف در محل اتصال سنگدانه به خمیر سیمان باشد. نتایج مشابهی در سایر

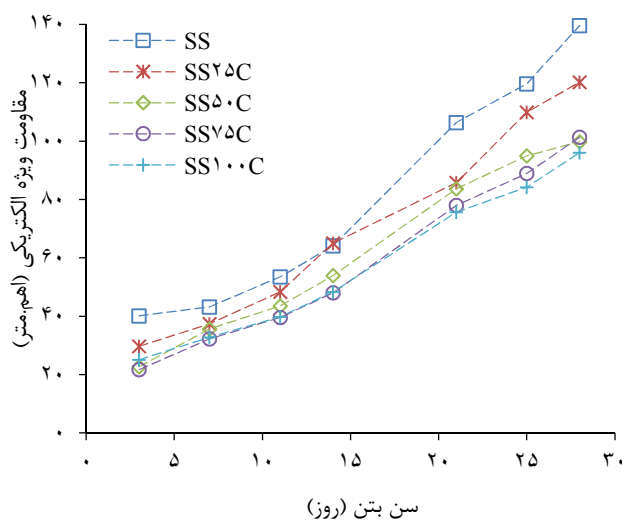
تحقیقات مشاهده شده است که با جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی سرعت پالس کاهش نشان داده است [16,18]. با این حال نتایج نشان داد که همه طرح‌ها دارای کیفیت قابل قبول (fair quality) بودند [34].



شکل ۲: نتایج آزمایش سرعت پالس در سنین مختلف.

### ۳-۳ مقاومت الکتریکی به روش حجمی

نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی در شکل ۳ نشان داد که با جایگزینی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ درشت دانه بازیافتی مقاومت الکتریکی به ترتیب نسبت به طرح مرجع SS، ۱۴، ۲۹، ۲۷ و ۳۱٪ کاهش داشت. جریان الکتریکی از محیط‌های متخلخل براحتی عبور می‌کند [35] و بدلیل این که تخلخل در سنگدانه بازیافتی بیشتر از سنگدانه طبیعی می‌باشد انتظار می‌رود مقاومت الکتریکی بتن‌های بازیافتی کاهش یابد. نتایج مشابهی نیز در این زمینه مشاهده شده است [24]. از آنجا که مقاومت الکتریکی یکی از روش‌های تخمین مقاومت بتن در برابر خوردگی است [36]، با افزایش مقاومت الکتریکی بتن بنظر می‌رسد دوام در برابر خوردگی نیز افزایش یابد. در برخی مراجع مقاومت الکتریکی کمتر از  $50 \Omega\text{-m}$  و در برخی مراجع دیگر مقاومت الکتریکی کمتر از  $100 \Omega\text{-m}$  مرز خطرناک جهت بروز خوردگی سازه‌های بتنی معرفی شده است. با این حال می‌توان مشاهده کرد که در این مطالعه با جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، مقاومت ویژه الکتریکی طرح‌های حاوی سنگدانه بازیافتی در موقعیت مناسبی قرار دارند.



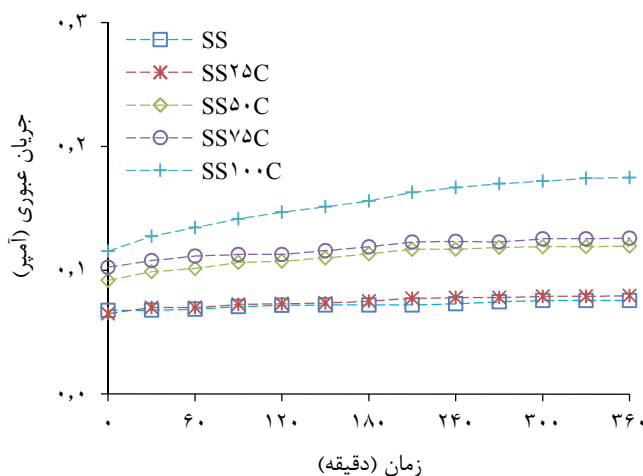
شکل ۳: نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی در سنین مختلف.

#### ۳-۴ مقاومت در برابر نفوذ یون کلر

خلاصه نتایج آزمایش نفوذ یون کلر بر اساس ASTM C1202 در سن ۲۸ روز در جدول شماره ۵ نشان داده شده است. با جایگزینی سنگدانه‌های درشت بازیافتی بیش از ۲۵٪ سطح زیر منحنی جریان عبوری نسبت به زمان که نشان دهنده شار عبوری می‌باشد، افزایش یافته است (شکل ۴). براساس استاندارد ASTM 1202 هرچه میزان شار عبوری افزایش یابد مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر کاهش می‌یابد. علت افزایش شار عبوری در بتن‌های بازیافتی معطوف می‌شود به ساختار متخلخل ملاتی که سنگدانه را احاطه کرده است. تخلخل ملات باعث تسهیل در افزایش نفوذ یون کلر می‌گردد [26]. نتایج نشان می‌دهد که با جایگزینی ۲۵٪ درشت دانه بازیافتی رده نفوذپذیری تغییر نکرده است و تنها حدود ۲٪ در مقدار شار عبوری افزایش مشاهده می‌گردد. با جایگزینی سنگدانه بازیافتی به مقدار ۵۰٪ و بیشتر تغییر در رده نفوذپذیری مشاهده می‌گردد. بترتیب با جایگزینی سنگدانه بازیافتی به میزان ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ شار عبوری ۵۱، ۶۳ و ۱۰۹٪ افزایش داشت. البته نمی‌توان تاثیر مثبت میکرو سیلیس را در این مطالعه نادیده گرفت. میکرو سیلیس می‌تواند تا حد زیادی در کاهش و کنترل نفوذ یون کلر موثر باشد. دلیل این می‌تواند بهبود تخلخل موجود در سطح سنگدانه‌ها بواسطه تشکیل مقادیر بیشتری از هیدرات‌های سیلیکات کلسیم بواسطه حضور میکروسیلیس باشد [26].

جدول شماره ۵: نتایج آزمایش نفوذ یون کلر (RCPT) در بتن‌های سخت شده.

گروه طرح‌ها	کد طرح	شار عبوری (کلومب)	رده بندی نفوذ یون کلر براساس ASTM C1202
طرح مرجع	SS	۱۴۲۹	کم
طرح‌های بازیافتی	SS۲۵C	۱۴۵۵	کم
	SS۵۰C	۲۱۵۲	متوسط
	SS۷۵C	۲۳۳۰	متوسط
	SS۱۰۰C	۲۹۸۹	متوسط



شکل ۴: افزایش سطح زیر منحنی بواسطه استفاده از سنگدانه بازیافتی.

نتیجه گیری:

براساس تحقیقات بعمل آمده در این مطالعه، موارد زیر بعنوان نتایج ارائه می‌گردد:

- ۱- بواسطه وجود تخلخل و افزایش تعداد لایه‌های انتقالی ضعیف در بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده با این سنگدانه‌ها کاهش یافت. بهرحال مقاومت فشاری این نوع بتن‌ها قابل قبول است و در موارد سازه‌ای قابل مصرف می‌باشند.
- ۲- بدلیل تخلخل در سنگدانه‌های بازیافتی امکان کاهش سرعت پالس وجود دارد. با این حال کاهش سرعت پالس بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی است و همه طرح‌ها دارای کیفیت مناسبی بودند.
- ۳- جایگزینی ۲۵٪ از سنگدانه‌های بازیافتی تاثیر چشمگیری بر کاهش مقاومت الکتریکی و افزایش شار عبوری طرح‌ها نداشت. بواسطه تخلخل موجود در سنگدانه‌های بازیافتی با افزایش جایگزینی، مقاومت الکتریکی کاهش و شار عبوری افزایش داشت. بهرحال همه طرح‌ها دارای مقاومت الکتریکی مناسبی بودند.

## References

- [۱] Loukili A. Self-compacting concrete. John Wiley & Sons, Inc. www.wiley.com; ۲۰۱۱.
- [۲] Kebaïli O, Mouret M, Arabi N, Cassagnabere F. Adverse effect of the mass substitution of natural aggregates by air-dried recycled concrete aggregates on the self-compacting ability of concrete : evidence and analysis through an example. J Clean Prod ۲۰۱۵;۸۷:۷۵۲-۶۱. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.jclepro.۲۰۱۴,۱۰,۰۷۷.
- [۳] González-Taboada I, González-Fonteboa B, Eiras-López J, Rojo-López G. Tools for the study of self-compacting recycled concrete fresh behaviour: Workability and rheology. J Clean Prod 2017;156:1-18. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.045.
- [۴] Guo Z, Tu A, Chen C, Lehman DE. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates. J Clean Prod ۲۰۱۸;۱۹۹:۱۳۶-۴۹. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.jclepro.۲۰۱۸,۰۷,۰۶۹.
- [۵] Aslani F, Ma G, Yim Wan DL, Muselin G. Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. J Clean Prod 2018;182:553-66. doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.074.
- [۶] Omrane M, Kenai S, Kadri EH, Ait-Mokhtar A. Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan. J Clean Prod ۲۰۱۷. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.jclepro.۲۰۱۷,۰۷,۱۳۹.
- [۷] Uygunoglu T, Topçu B, Gürhan A. Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability. J Clean Prod ۲۰۱۴;xxx:۱-۱۰. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.jclepro.۲۰۱۴,۰۶,۰۱۹.
- [۸] Pin K, Ashraf W, Cao Y. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. Resour Conserv Recycl ۲۰۱۸;۱۳۳:۳۰-۴۹. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.resconrec.۲۰۱۸,۰۲,۰۰۵.
- [۹] Sagoe-Crentsil KK, Brown T, Taylor AH. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. Cem Concr Res ۲۰۰۱. doi:۱۰,۱۰۱۶/S۰۰۰۸-8846(00)00476-2.
- [۱۰] Eng RSR, Loo YH. Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. Mag Concr Res ۱۹۸۷;۳۹:۲۱۴-۲۰.
- [۱۱] Güneşçi E, Gesoğlu M, Algin Z, Yazıcı H. Rheological and fresh properties of self-



- compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates. *Constr Build Mater J* ۲۰۱۶;۱۱۳:۶۲۲-۳۰. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.conbuildmat.۲۰۱۶,۰۳,۰۷۳.
- [۱۲] Kou SC, Poon CS. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cem Concr Compos* ۲۰۰۹;۳۱:۶۲۲-۷. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.cemconcomp.۲۰۰۹,۰۶,۰۰۵.
- [۱۳] Nili M, Sasanipour H, Aslani F. The Effect of Fine and Coarse Recycled Aggregates on Fresh and Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. *Materials (Basel)* ۲۰۱۹;۱۲:۱-۱۴. doi:۱۰,۳۳۹۰/ma۱۲۰۷۱۱۲۰.
- [۱۴] EFNARC. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. Farnham, Surrey GU۹ 7EN, UK, Website [WwwEfnarcOrg](http://www.efnarc.org), ISBN 2002. doi:0 9539733 4 4.
- [۱۵] Etxeberria M, Vázquez E, Mari A, Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem Concr Res* ۲۰۰۷. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.cemconres.۲۰۰۷,۰۲,۰۰۲.
- [۱۶] Tuyan M, Mardani-aghabaglou A, Ramyar K. Freeze – thaw resistance , mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. *Mater Des* ۲۰۱۴;۵۳:۹۸۳-۹۱. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.matdes.۲۰۱۳,۰۷,۱۰۰.
- [۱۷] Grdic ZJ, Toplicic-Curcic GA, Despotovic IM, Ristic NS. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. *Constr Build Mater* ۲۰۱۰. doi:۱۰,۲۲۹۸/hel۰۳۳۹۱۴۱d.
- [۱۸] Kwan WH, Ramli M, Kam KJ, Sulieman MZ. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Constr Build Mater* ۲۰۱۲. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.conbuildmat.۲۰۱۱,۰۶,۰۵۹.
- [۱۹] Evangelista L, De Brito J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cem Concr Compos* ۲۰۰۷;۲۹:۳۹۷-۴۰۱. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.cemconcomp.۲۰۰۶,۱۲,۰۰۴.
- [۲۰] Tam VWY, Tam CM. Diversifying two-stage mixing approach (TSMa) for recycled aggregate concrete: TSMAs and TSMAsc. *Constr Build Mater* ۲۰۰۸;۲۲:۲۰۶۸-۷۷. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.conbuildmat.۲۰۰۷,۰۷,۰۲۴.
- [۲۱] Shi C, Li Y, Zhang J, Li W, Chong L, Xie Z. Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review. *J Clean Prod* ۲۰۱۶. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.jclepro.۲۰۱۵,۰۸,۰۵۷.
- [۲۲] Spaeth V, Djerbi Tegger A. Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments. *Int J Sustain Built Environ* ۲۰۱۳. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.ijbsbe.۲۰۱۴,۰۳,۰۰۳.
- [۲۳] Debieb F, Courard L, Kenai S, Degeimbre R. Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Cem Concr Compos* ۲۰۱۰;۳۲:۴۲۱-۶. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.cemconcomp.۲۰۱۰,۰۳,۰۰۴.
- [۲۴] Santos SA, Brito J De, Raposeiro P. Durability evaluation of self-compacting concrete with recycled aggregates from the precast industry. *Mag Concr Res* ۲۰۱۸:۱-۱۸.
- [۲۵] Kou SC, Poon CS. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Constr Build Mater* ۲۰۱۲;۳۵:۶۹-۷۶. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.conbuildmat.۲۰۱۲,۰۲,۰۳۲.
- [۲۶] Kapoor K, Singh SP, D B. Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures. *Constr Build Mater* ۲۰۱۶;۱۲۸:۶۷-۷۶. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.conbuildmat.۲۰۱۶,۱۰,۰۲۶.
- [۲۷] Yazıcı H. The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-compacting concrete. *Constr Build Mater* ۲۰۰۷;۲۲:۴۵۶-۶۲. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.conbuildmat.۲۰۰۷,۰۱,۰۰۲.
- [۲۸] ASTM C۵۹۷. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete ۱۹۸۹:۴-۷.
- [۲۹] ASTM C۱۲۰۲. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ۲۰۱۶. doi:۱۰,۱۵۲۰/C۱۲۰۲-۱۲,۲.
- [۳۰] Silva YF, Robayo RA, Matthey PE, Delvasto S. Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete. *Constr Build Mater* 2016;124:639–44. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.057.
- [۳۱] MD.Safiuddin, Salam MA, Jumaat MZ. Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete. *Arch Civ Mech Eng* ۲۰۱۱;۱۱:۱۰۲۳-۴۱. doi:۱۰,۱۰۱۶/S۱۶۴۴-۹۶۶۵(۱۲)۶۰۰۹۳-۴.
- [۳۲] Poon CS, Shui ZH, Lam L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of

- concrete prepared with recycled aggregates. *Constr Build Mater* ۲۰۰۴.  
doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005.
- [۳۳] Jain A, Kathuria A, Kumar A, Verma Y, Murari K. Combined use of non-destructive tests for assessment of strength of concrete in structure. *Procedia Eng* ۲۰۱۳;۵۴:۲۴۱-۵۱.  
doi:10.1016/j.proeng.2013.03.022.
- [۳۴] Malhotra VM, Carino NJ. *Nondestructive testing of concrete*. CRC PRESS; ۲۰۰۳.
- [۳۵] Sengul O. Use of electrical resistivity as an indicator for durability. *Constr Build Mater* 2014;73:434-41. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.077.
- [۳۶] Lübeck A, Gastaldini ALG, Barin DS, Siqueira HC. Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag. *Cem Concr Compos* 2012;34:392-9. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.11.017.