

مطالعه برخی خواص مکانیکی و الکتروشیمیایی محصولات پایه سیمانی حاوی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی با مدول نرمی ثابت

ابراهیم قیاسوند*

استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

محمد مهدی رستگار

استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

محمد حسین قاسمی

دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

نوید امی

دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

چکیده

به دلیل خواص ضعیف‌تر سنگ‌دانه‌های بازیافتی نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی، بتن‌های حاوی این مصالح، عملکرد مکانیکی و دوامی پایین‌تری دارند. هدف پژوهش حاضر بررسی اثر جایگزینی سنگ‌دانه‌های طبیعی با سنگ‌دانه‌های بازیافتی بر خواص مکانیکی و الکتروشیمیایی ملات سیمانی است. برای این منظور، ملات‌هایی با درصد‌های صفر، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سنگ‌دانه‌ی بازیافتی ساخته و تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری، نیم‌پیل، پلاریزاسیون خطی و پلاریزاسیون پتانسیودینامیک قرار گرفتند. نمونه‌ها پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه طی هشت چرخه‌ی دو هفته‌ای (یک هفته مرطوب، یک هفته خشک) در شرایط کلریدی آزمایش شدند. نتایج نشان داد جایگزینی کامل سنگ‌دانه‌ی طبیعی با بازیافتی موجب کاهش ۲۳ تا ۳۲ درصدی مقاومت فشاری و آغاز زودتر خوردگی آرماتور (چرخه‌ی سوم در برابر چرخه‌ی ششم) شد، در حالی که جایگزینی ۵۰ درصد تنها کاهش اندک مقاومت فشاری (حدود ۷٪ در ۹۰ روز و ناچیز در ۲۸ روز) را به همراه داشت. ضمناً در این سطح از جایگزینی شاهد آغاز فرایند خوردگی در چرخه‌ی پنجم بودیم. همچنین افزایش میزان سنگ‌دانه‌های بازیافتی موجب افت کیفیت لایه‌ی انفعالی و کاهش حدود ۸۰ درصدی مقاومت پلاریزاسیون خطی گردید. در مجموع، نتایج نشان داد که استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی تا سطح ۵۰ درصد، تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری ندارد و تنها اثر اندکی بر خواص الکتروشیمیایی در مقایسه با طرح حاوی ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه‌ی طبیعی ایجاد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، مقاومت فشاری، خوردگی آرماتور، نیم‌پیل، مقاومت پلاریزاسیون خطی، مقاومت پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

* نویسنده مسئول: e.ghiasvand@basu.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از انواع محصولات پایه سیمانی، ملات یا بتن حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی است. سنگ‌دانه‌ی موجود در این نوع از محصولات، حاصل خردایش بتن و سایر نخاله‌های ساختمانی بوده که عموماً این نوع از مواد، دارای خواص ضعیف‌تری نسبت به محصولات حاوی سنگ‌دانه‌های طبیعی هستند [۱ و ۲]. شایان ذکر است استفاده از سنگ‌دانه‌های حاصل از بتن بازیافتی انتشار گازهای گلخانه‌ای را در مقایسه با زمانی که صرفاً از سنگ‌دانه‌های طبیعی استفاده می‌شود، به میزان حدود ۵۰ درصد می‌کاهد [۳]. لذا با توجه به ضرورت حفظ محیط زیست و کاهش آلاینده‌گی و کاهش مصرف منابع طبیعی، استفاده از بتن یا ملات‌های حاوی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی به‌عنوان روشی پایدار و دوست‌دار محیط‌زیست در سال‌های اخیر، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۴].

بر اساس آمار منتشرشده، سالانه حدود ۳۲ میلیون تن زباله‌ی صنعتی در ایران تولید می‌شود که بخش قابل توجهی از آن، نخاله‌های ساختمانی است. لذا از آنجا که سنگ‌دانه‌ها در ملات یا بتن، حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد حجم را تشکیل می‌دهند، استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی حاصل از نخاله‌های ساختمانی، می‌تواند در کاهش میزان زباله و حفاظت از محیط زیست مؤثر باشد [۵].

غالب مطالعات انجام‌شده توسط محققین حاکی از ضعف خواص مکانیکی و دوامی محصولات پایه سیمانی حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی در مقایسه با محصولات حاوی سنگ‌دانه‌های طبیعی است. محققین این موضوع را به عواملی چون وجود تخلخل، ترک‌ها و ضعف در ناحیه انتقالی نسبت داده‌اند [۶] که اکثریت محققین بر این موضوع توافق دارند. به طور مثال، مطالعه‌ی انجام‌شده توسط George و همکاران [۷]، نشان می‌دهد که ریزساختار بتن بازیافتی بسیار پیچیده‌تر از بتن معمولی است. این محققین پیچیدگی یادشده را به وجود دو نوع ناحیه‌ی انتقال سطحی متفاوت (ناحیه‌ی انتقالی بین سنگ‌دانه‌ی بازیافتی و ملات جدید و ناحیه انتقالی بین سنگ‌دانه‌ی بازیافتی و ملات چسبیده قدیمی که شامل بسیاری از ریزترک‌ها با تخلخل بالاست) نسبت داده‌اند. وجود ریزترک‌های متعدد بین سنگ‌دانه‌ی بازیافتی و ملات چسبیده قدیمی موجب تضعیف جدی خواص محصولات پایه سیمانی حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی در مقایسه با محصولات پایه سیمانی

حاوی سنگ‌دانه‌های طبیعی می‌شود. از سوی دیگر با کاهش مقاومت بتن مادر شاخص تخلخل سنگ‌دانه بازیافتی آشکارتر شده که این امر منجر به ضعف بیشتر بتن بازیافتی می‌شود [۸]. لذا بسیار ضروری است که به جنبه‌های مختلف مکانیکی و دوامی استفاده از انواع سنگ‌دانه‌های بازیافتی در بتن یا محصولات پایه سیمانی توجه شود.

عمده‌ی مطالعات انجام‌شده در خصوص خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی توسط محققین مختلف، منجر به دستیابی به نتایج همسو با یکدیگر شده، اما این موضوع در خصوص خواص دوامی این گونه نبوده و بعضاً نتایج به‌دست آمده با یکدیگر اختلاف معنادار دارند [۹]. بسیاری از پژوهشگران با افزایش جایگزینی سنگ‌دانه‌های بازیافتی، افزایش نفوذ یون کلراید را گزارش دادند [۱۰-۱۳]، در حالی که مقالات زیادی نیز با نتایج دوامی متضاد وجود دارد که نشان از مقاومت تقریباً یکسان و یا بعضاً افزایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید در بتن‌های بازیافتی در مقایسه با بتن معمولی وجود دارند [۱۷-۱۴].

یکی از جنبه‌های مهم دوامی محصولات پایه سیمانی که عدم توجه به آن، می‌تواند هزینه‌های مرتبط با تعمیر و نگهداری از آن‌ها را به شدت افزایش دهد، خوردگی آرماتورهای مدفون در آن محصولات است. به بیان دیگر خوردگی آرماتور را می‌توان یکی از مهم‌ترین مسائل مرتبط با دوام و پایداری سازه‌های مسلح ساخته‌شده از محصولات پایه سیمانی برشمرد [۱]. این موضوع می‌تواند به تخریب سازه و کاهش عمر مفید آن منجر شود و به‌طور قابل توجهی هزینه‌های تعمیر و نگهداری را افزایش دهد [۱۸ و ۱۹]. از دیدگاه Hansson و همکاران [۲۰]، خوردگی به‌عنوان یک فرایند الکتروشیمیایی شامل واکنش‌های نیمه‌سلولی آندی و کاتدی در سطوح میکروسکوپی و ماکروسکوپی تلقی می‌شود. مطالعات نشان داده است که pH بالای محلول منفذی محصولات پایه سیمانی از جمله بتن، موجب تشکیل و پایداری لایه اکسیدی محافظ بر روی سطح آرماتورهای فولادی می‌شود [۲۱]. این لایه انفعالی محافظ روی آرماتورهای فولادی، تا زمانی که سالم باشد، مانع خوردگی آرماتور می‌شود و آهنگ خوردگی را بسیار پایین نگه می‌دارد. اما هرگونه آسیب به این لایه، منجر به تماس مستقیم اکسیژن و رطوبت با فولاد شده و خوردگی را تسریع می‌کند [۲۲]. از طرف دیگر بتن‌های حاوی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی به‌دلیل ساختار

همکاران نیز [۳۲] این محدوده را بین ۷۵ تا ۱۰۰۰ میلی‌ولت بر دهه استفاده نمودند.

در مطالعات دیگر نیز، Kim و همکاران [۳۳] و Isgor و همکاران [۲۰] برای β_c و β_a ، مقدار ۶۰ میلی‌ولت بر دهه را پیشنهاد دادند، در حالی که Song و Sarawathy [۳۴] به صورت تئوریک مقادیر ۱۳ تا ۱۷ میلی‌ولت بر دهه را برای β_a و مقدار ۲۱ تا ۶۵ میلی‌ولت بر دهه را برای β_c در شرایط مختلف خوردگی گزارش نمودند. مطالعات تجربی انجام شده توسط Babae و Castel [۳۵] نشان داد که برای فولادهای دارای خوردگی فعال، مقادیر β_a بین ۴۳۰ تا بی‌نهایت و β_c بین ۱۰۶ تا ۲۲۱ میلی‌ولت بر دهه قرار دارد، در حالی که برای فولادهای غیرفعال مقدار β_a ، بی‌نهایت و مقدار β_c بین ۳۰ تا ۴۵ میلی‌ولت بر دهه بوده است. از سوی دیگر Alexander و همکاران [۳۶] نیز برای فولاد فعال، مقدار β_a را بین ۱۰ تا ۳۶۹ و مقدار β_c را بین ۱۰ تا ۲۳۳ گزارش کردند. همچنین β_a برای فولاد فعال بیشتر از فولاد غیر فعال است که دقیقاً در مقایسه با آنچه در سایر کارهای تحقیقاتی گزارش شده، برعکس است.

هدف اصلی این مطالعه، بررسی برخی خواص مکانیکی و الکتروشیمیایی محصولات پایه سیمانی حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی و طبیعی از طریق مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، پتانسیل نیم‌پیل، مقاومت پلاریزاسیون خطی و مقاومت پلاریزاسیون پتانسیودینامیک است. ضمناً با انجام این پژوهش می‌توان درصد بهینه‌ی استفاده از سنگ‌دانه‌ی بازیافتی را در طرح‌های مخلوط مطالعه شده، گزارش نمود. لازم به ذکر است جهت بررسی دقیق‌تر اثر استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی، کلیه‌ی طرح‌های مخلوط مورد بررسی در این پژوهش، دارای دانه‌بندی یکسان (با مدول نرمی برابر با ۳) بوده که این موضوع منجر به دستیابی به نتایج دقیق‌تری خواهد شد. نتایج ارائه شده در مطالعه‌ی حاضر بخش کوچکی از نتایج بدست آمده از یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی مفصل بر روی محصولات پایه سیمانی دارای مصالح سنگی بازیافتی با دانه‌بندی‌های یکسان و متفاوت بوده که بخشی از نتایج آن تاکنون منتشر و بخشی دیگر نیز در آینده انتشار خواهد یافت.

متخلخل تر و عموماً نفوذپذیری بیشتر، در معرض خطر بیشتری از نظر خوردگی آرماتور قرار دارند [۲۳ و ۲۴] و با توجه به تمایل روزافزون به استفاده از این نوع از بتن در بتن‌های مسلح به آرماتور، بررسی خوردگی آرماتور در بتن‌های بازیافتی حائز اهمیت است. حال با توجه به نکات ذکر شده در فوق، تخمین زمانی شروع فرایند خوردگی در محصولات پایه سیمانی از اهمیتی دوچندان برخوردار است. یکی از روش‌های تخمین خوردگی، آزمایش نیم‌پیل است که در خصوص احتمال خوردگی یکنواخت اطلاعات ارزشمندی را ارائه می‌کند اما در مورد خوردگی موضعی این موضوع صادق نیست و می‌تواند گمراه‌کننده باشد [۲۵ و ۲۶].

آزمایش مقاومت پلاریزاسیون خطی نیز ^۱(LPR) یکی از روش‌های مؤثر و البته غیرمخرب جهت ارزیابی نرخ خوردگی آرماتورها در بتن است. در مطالعه‌ای، Poursaei [۲۷] محدودیت اصلی این روش را در نیاز به شیب‌های تافل و ثابت استرن-گری (که با پارامتر B نمایش داده می‌شود) جهت محاسبه دقیق نرخ خوردگی بیان نموده است. Clément و همکاران [۲۸] نیز عنوان نمودند این روش فقط در موارد خوردگی یکنواخت قابل انجام است. علاوه بر این، قطبش باید محدود شود (± 20) میلی‌ولت نسبت به پتانسیل خوردگی) تا در محدوده پلاریزاسیون خطی بماند.

جهت تخمین نرخ خوردگی و چگالی جریان خوردگی نیز می‌توان از تحلیل منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک بهره برد. این روش به دلیل محاسبه دقیق‌تر ثابت استرن-گری و شیب‌های منحنی تافل، دارای دقت بیشتری نسبت به آزمایش مقاومت پلاریزاسیون خطی است. بر اساس مطالعه‌ی Andrade و González [۲۹]، مقدار $B=26\text{mV}$ برای فولاد در حالت فعال و $B=52\text{mV}$ برای فولاد در حالت غیر فعال قابل قبول است. Isgor [۳۰] نیز نشان داد، افزایش شیب شاخه آندی منحنی تافل (β_a) موجب افزایش پتانسیل بر روی سطح فولاد آندی شده و با افزایش شیب شاخه کاتدی منحنی تافل (β_c)، پتانسیل روی سطح میله کاتدی کاهش می‌یابد که این فرایند منجر به کاهش نرخ خوردگی می‌شود. Warkus و همکاران [۳۱] مقدار β_a را برای بتن در محدوده $100 \frac{\text{mV}}{\text{decade}}$ تا بی‌نهایت، گزارش نمودند. همچنین Redaelli و

¹ Linear polarisation resistance

۲- برنامه آزمایش

۱-۲ مواد و مصالح

کارخانه‌ی تولید سنگ‌دانه منتقل شد و پس از خردایش آن‌ها، مصالح سنگی بازیافتی بدست آمد. ضمناً سنگ‌دانه‌ی ریز طبیعی، از معدن سراوک واقع در شهر همدان تهیه شد که این مصالح نیز از نوع شکسته کوهی بود. مشخصات سنگ‌دانه‌های مصرفی در جدول ۳ قابل مشاهده است. ضمناً دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های طبیعی و بازیافتی که در ساخت طرح‌ها از آن استفاده شد، در شکل ۱ نمایش داده شده است. لازم است اشاره شود دانه‌بندی کلیه‌ی طرح مخلوط‌ها یکسان در نظر گرفته شد. به این منظور پژوهشگران آزمایشگاه، مانده روی هر الک را به تفکیک بدست آورده و حین ساخت طرح‌ها، مطابق با شکل ۲ و با مدول نرمی برابر با ۳ استفاده نمودند. هم‌چنین آب مصرفی در ساخت طرح‌های اختلاط، آب شرب شهر کبودرآهنگ واقع در استان همدان بود.

سیمان استفاده شده در این آزمایش، سیمان نوع دو هگمتان همدان بوده که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جداول ۱ و ۲ نمایش داده شده است. لازم است اشاره شود مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی به درخواست نویسندگان مقاله حاضر، توسط یکی از آزمایشگاه‌های همکار استاندارد در استان همدان استخراج و ارائه شده است. در این پژوهش به دلیل ابعاد قالب آزمون‌های مصرفی در آزمایش نیم‌پیل، صرفاً از سنگ‌دانه‌ی ریز با حداکثر اندازه اسمی ۲/۳۶ میلی‌متر استفاده شده و سنگ‌دانه‌ی درشت از طرح مخلوط حذف شده است. جهت تهیه سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، مطابق شکل ۱، آزمون‌های بتنی مکعبی شکل به

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی در پژوهش

نرمی (cm ² /gr)	زمان گیرش (دقیقه)		مقاومت فشاری (kg/cm ²)			انقباض (%)
	اولیه	نهایی	۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	
۲۹۱۰	۱۳۴	۱۹۵	۲۰۵	۲۸۸	۴۱۱	۰/۰۸

جدول ۲- مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی در پژوهش

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
۲۱/۲۷	۴/۴۵	۲/۰۳	۶۲/۹۵	۱/۵۵	۲/۱۶	۰/۶۹	۰/۴۹	۲/۱۱

جدول ۳- مشخصات سنگ‌دانه‌های مصرفی در طرح مخلوط‌های

مورد بررسی

شاخصه	ماسه طبیعی	ماسه بازیافتی
وزن مخصوص ظاهری اشباع با سطح خشک (gr/cm ²)	۲/۶	۲/۴۲
جذب آب (درصد)	۳/۵۳	۸/۸۹
مدول نرمی	۳	۳

۲-۲ طرح مخلوط و شرایط ساخت و عمل آوری

در این مطالعه، چهار طرح مخلوط حاوی مقادیر صفر، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه‌ی بازیافتی استفاده شده که در جدول ۴ نام‌گذاری این طرح‌های مخلوط و جزئیات اجزای سازنده‌ی آن ارائه شده است.

سطوح جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با سنگ‌دانه‌های بازیافتی با الگوبرداری از مطالعات مشابه بدست آمده است. ضمناً به منظور



شکل ۱- تبدیل آزمون‌های بتنی به سنگ‌دانه از طریق خردایش

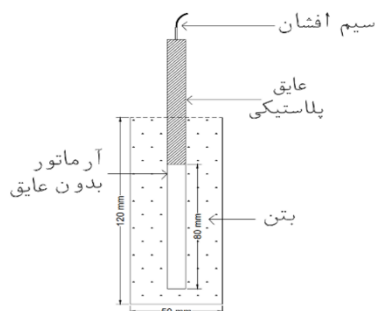
تسریع در فرایند خوردگی، در کلیه ی طرح مخلوط های مورد مطالعه، نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۶ در نظر گرفته شد. پس از ساخت مخلوط ها، آزمون ها جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری تا سن مقرر در آب نگهداری شدند. به منظور انجام آزمایش های خوردگی، از قالب های استوانه ای با قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۲۰ میلی متر، مطابق با شکل ۳ استفاده شد.

جدول ۴- جزئیات طرح مخلوط های مورد بررسی در این پژوهش

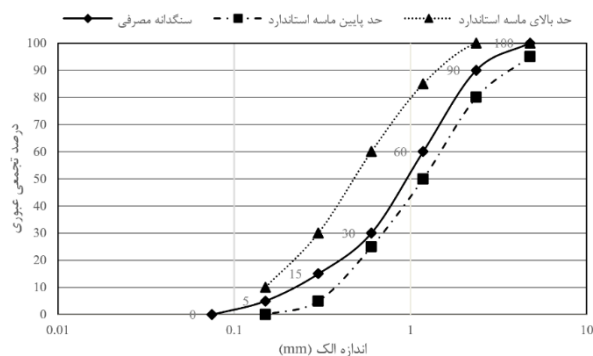
نام طرح	سهم سنگ دانه (%)		نسبت آب به سیمان		سهم اجزا (kg/m ³)		
	طبیعی	بازیافتی	سیمان	آب آزاد	آب اختلاط	ماسه طبیعی	ماسه بازیافتی
N100-R0	۱۰۰	صفر	۰/۶	۶۹۰	۴۱۴	۴۵۵/۷	۱۲۴۵/۲
N50-R50	۵۰	۵۰	۰/۶	۶۹۰	۴۱۴	۴۸۴/۵	۶۲۱/۶
N25-R75	۲۵	۷۵	۰/۶	۶۹۰	۴۱۴	۴۹۹/۱	۳۱۱/۶
N0-R100	صفر	۱۰۰	۰/۶	۶۹۰	۴۱۴	۵۱۳/۵	صفر

N: سنگ دانه ی طبیعی، R: سنگ دانه ی بازیافتی

چرخه های مورد نظر آغاز گردید. این چرخه ها شامل هشت چرخه ی دو هفته ای متشکل از یک هفته قرارگیری در هوای آزاد و یک هفته قرارگیری در محلول NaCl با غلظت ۱۰ درصد به منظور شبیه سازی خوردگی تسریع شده است. شکل ۴، قرارگیری آزمون ها در محلول NaCl را نمایش می دهد. چرخه ی تر و خشک منجر به جابجایی رطوبت و اکسیژن و افزایش غلظت یون ها مانند یون کلر درون حفرات بتن می گردد که در نهایت موجب تسریع و افزایش نرخ خوردگی آرماتور درون بتن می شود [۳۷].



شکل ۳- آماده سازی آزمون های حاوی آرماتور جهت آزمایش های خوردگی



شکل ۲- منحنی دانه بندی سنگ دانه های مصرفی در طرح مخلوط ها (اعم از طبیعی و بازیافتی)

در مرکز هر قالب، یک آرماتور فولادی بدون آج سنبلاست شده، با قطر ۱۰ و طول ۱۶۰ میلی متر قرار گرفت و پوشش آرماتور در طرفین به طور یکسان اعمال شد. ۸۰ میلی متر از طول هر آرماتور با محافظ حرارتی پوشانده شد تا از خوردگی آن در این بخش جلوگیری شود و ۸۰ میلی متر دیگر نیز در داخل بتن و معرض خوردگی قرار گرفت. برای انجام آزمایش های خوردگی آرماتورهای مدفون، یک سیم مسی افشان با مقطع ۱×۱ میلی متر مربع مطابق شکل ۳ به انتهای هر آرماتور متصل شد. آزمون های مذکور جهت آزمایش های خوردگی پس از آماده سازی به منظور تشکیل لایه محافظ روی آرماتورها، تا سن ۲۸ روز در محلول آب و آهک اشباع نگهداری شدند و پس از ۲۸ روز در محلول آب و آهک اولین سری از آزمایش های خوردگی روی آنها انجام شد. پس از ۲۸ روز، آزمون ها از محلول آب و آهک خارج شدند و

آهک اشباع عمل آوری شدند. در هر سن از هر طرح، تعداد سه آزمون مکعبی بر اساس استاندارد ASTM C39 آزمایش شدند و نتیجه‌ی گزارش شده، میانگین قرائت‌های انجام شده در هر طرح و سن بود.



شکل ۴- قراردادن آزمون‌ها در محلول ۱۰ درصد NaCl

۲-۳-۲- آزمایش پتانسیل نیم پیل

آزمایش نیم پیل اختلاف پتانسیل اندازه گیری شده بین الکترود کار (آرماتور) و الکترود مرجع را گزارش می کند. این آزمایش به عنوان یک روش غیرمخرب برای ارزیابی وضعیت خوردگی آرماتور در بتن به کار می رود و دارای بازه‌ی مشخصی است که با پیش بینی خوردگی، وضعیت آرماتور را نشان می دهد که این بازه برای انواع الکترودهای مرجع در جدول ۵ ارائه شده است. در این پژوهش، برای آزمایش نیم پیل از دستگاه ولت متر و الکترود نقره-کلرید نقره (Ag/AgCl) به عنوان الکترود مرجع و مطابق با ASTM C876 [۲۵] استفاده شد. به این منظور در پایان هر چرخه از هر کدام از طرح‌ها تعداد چهار آزمون مورد آزمایش قرار گرفتند که مقدار اختلاف پتانسیل نشان داده شده بر حسب میلی ولت ثبت و میانگین آن‌ها گزارش می گردد.

۳-۳-۲- آزمایش‌های انجام شده

در این پژوهش، آزمایش‌های مقاومت فشاری، پتانسیل نیم پیل، مقاومت پلاریزاسیون خطی و مقاومت پلاریزاسیون پتانسیودینامیک بر روی کلیه‌ی طرح‌ها انجام شده که در ادامه، به معرفی اجمالی هر یک از آن‌ها و روش انجام آزمایش پرداخته شده است.

۲-۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

به منظور تعیین مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های ساخته شده، از قالب‌های مکعبی به ابعاد پنج سانتی متر استفاده شد که این آزمون‌ها تا رسیدن به سن آزمایش (۲۸ و ۹۰ روز) در مخزن حاوی آب و

جدول ۵- محدوده‌ی پتانسیل خوردگی و احتمال وجود خوردگی برای الکترودهای مختلف [۲۵ و ۳۴]

محدوده پتانسیل (mv)			
احتمال وجود خوردگی	الکترود مرجع مس / سولفات مس	الکترود نقره-کلرید نقره	الکترود مرجع کالومل اشباع
به احتمال ۹۰ درصد خوردگی وجود ندارد	> -۲۰۰	> -۷۵	> -۱۲۶
فعالیت خوردگی قطعی نیست، اما امکان آن وجود دارد	-۳۵۰ >> -۲۰۰	-۲۳۴ >> -۷۵	-۱۲۶ >> -۲۷۵
به احتمال ۹۰ درصد خوردگی وجود دارد	< -۳۵۰	< -۲۳۴	< -۲۷۶

۲-۳-۳- آزمایش مقاومت پلاریزاسیون خطی

این آزمایش نیز یک آزمایش غیرمخرب است که برای ارزیابی وضعیت خوردگی استفاده می شود و می توان با استفاده از آن مقدار مقاومت اهمی آرماتور را محاسبه نمود. در این آزمایش دو الکترود از جنس گرافیت به عنوان الکترودهای کمکی و مرجع در دو سمت آزمون بتنی قرار می گیرند که از هر الکترود یک سیم به دستگاه پتانسیواستات (SAMA 500) متصل و سیم سوم از دستگاه به الکترود کار (آرماتور) وصل می گردد. ابتدا به وسیله دستگاه،

مقدار پتانسیل مدار باز^۱ اندازه گیری و پس از گذشت چند دقیقه به منظور تثبیت الکترولیت و عدم تلاطم محلول، آزمایش LPR انجام می گیرد. این آزمایش در محدوده ± ۲۰ میلی ولت نسبت به پتانسیل مدار باز (محدوده خطی) با سرعت روبش^۲ برابر با ۰/۱۶۶ میلی ولت بر ثانیه انجام و نمودار مربوطه ترسیم می شود تا بتوان با استفاده از شیب این نمودار مطابق شکل ۵ و رابطه (۱)، مقدار مقاومت پلاریزاسیون خطی (R_p) آرماتور مورد آزمایش را بدست آورد. از هر طرح مخلوط ساخته شده در پایان هر چرخه‌ی ۱۴ روزه

^۲ Scan Rate

^۱ OCP

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (3)$$

در روابط (۲) و (۳)، I_{corr} چگالی جریان خوردگی، B ثابت استرن-گری، β_a شیب شاخه آندی منحنی تافل و β_c شیب شاخه کاتدی منحنی تافل است.

جدول ۶- درجه بندی خوردگی بر اساس چگالی جریان خوردگی [۲۹]

درجه خوردگی	$I_{corr} [\mu A. cm^{-2}]$
غیرفعال	کمتر از ۰/۱
خوردگی ناچیز	۰/۱ الی ۰/۵
خوردگی متوسط	۰/۵ الی ۱
خوردگی شدید	بیش از ۱

۳- آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

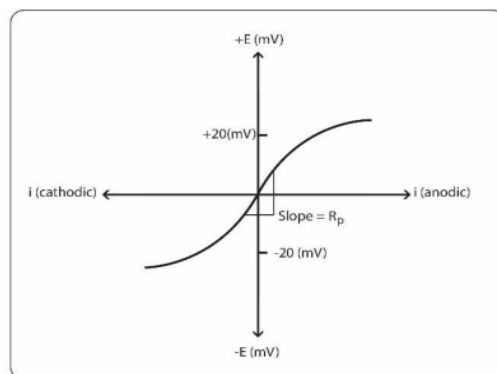
۳-۱- آزمایش تعیین مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه آزمون‌های مکعبی ۵۰ میلی متری از چهار مخلوط ساخته شده با نسبت آب به سیمان برابر در جدول ۷ قابل ملاحظه است. باتوجه به نتایج ۲۸ روزه در این مطالعه، استفاده صد درصدی از مصالح سنگی باز یافتی کاهش حدود ۲۳ درصدی مقاومت فشاری را به دنبال دارد که این مقدار در سن ۹۰ روز تقریباً برابر با ۳۱ درصد است. این کاهش مقاومت را می توان به مقاومت کمتر سنگ دانه ی باز یافتی، تخلخل بالاتر، و نیز حضور ملات قدیمی چسبیده به آن نسبت داد که ساختار ضعیف تری نسبت به سنگ دانه ی طبیعی ایجاد می کند. مطالعات اخیر نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده اند؛ به عنوان مثال، Pangha و همکاران نشان دادند که سنگ دانه های باز یافتی به دلیل وجود ناحیه ی انتقالی ضعیف تر و تخلخل بالا، مقاومت فشاری بتن را تا ۴۰ درصد کاهش می دهد [۳۸]. ضمناً می توان این گونه استنباط نمود که در سن ۲۸ روز، استفاده از ۵۰ درصد مصالح سنگی باز یافتی، تنها باعث کاهش ۰/۴۴ درصد مقاومت فشاری شده و در سن ۹۰ روز کاهش ۷/۳ درصدی را به همراه داشته است. Khatib [۳۹] به این نتیجه رسید که استفاده از سنگ دانه ی باز یافتی به میزان ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد در سن ۲۸ روز تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ندارد؛ اما در همین طرح ها در سن ۹۰ روز، حدود ۲۰ درصد کاهش مقاومت فشاری رخ داده است.

تعداد ۴ آزمون مورد آزمایش قرار می گیرند که میانگین بدست آمده از آن ها، به عنوان مقاومت پلاریزاسیون خطی آن طرح گزارش می شود.

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، R_p مقاومت پلاریزاسیون خطی، ΔE اختلاف پتانسیل اندازه گیری شده بین الکتروود کار و مرجع و ΔI اختلاف شدت جریان است.



شکل ۵- شماتیک نحوه محاسبه ی شیب منحنی پتانسیل در برابر جریان و مقاومت پلاریزاسیون [۲۹]

۳-۲- آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

این آزمایش یک آزمایش مخرب است که همانند آزمایش LPR از دو الکتروود گرافیت به عنوان الکتروودهای کمکی و مرجع در دو سمت الکتروود کار استفاده می شود. برای این آزمایش در پایان هر چرخه ی تر، یک آزمون مورد ارزیابی قرار گرفته است. پس از اندازه گیری مقدار پتانسیل مدار باز توسط دستگاه پتانسیواستات (SAMA 500)، الکتروود کار (آرماتور) در محدوده ی ۲۵۰- تا ۲۵۰+ میلی ولت نسبت به پتانسیل مدار باز یا پتانسیل خوردگی (نواحی تافل) با سرعت روبش ۰/۱۶۶ میلی ولت بر ثانیه تحت پلاریزه شدن قرار می گیرد. نمودار ترسیم شده در این روش شامل دو شاخه آندی و کاتدی است که شیب مماس بر این منحنی ها به ترتیب β_a و β_c نامگذاری می شود. با استفاده از این دو متغیر، مقدار دقیق ثابت استرن-گری و چگالی جریان خوردگی مطابق روابط (۲) و (۳) محاسبه می شود. بر اساس مقدار چگالی جریان خوردگی و محدوده های مشخص شده آن در جدول ۶، می توان وضعیت خوردگی آرماتور را تعیین کرد.

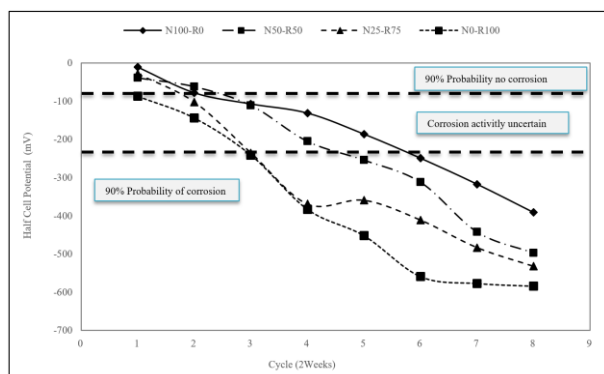
$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \quad (2)$$

یون‌های کلرید به سطح فولاد می‌شود. Nguyen و همکاران نیز تأکید کردند که ملات قدیمی چسبیده به سنگ‌دانه‌های باز یافتی، به عنوان مسیر انتقال اولیه جهت نفوذ یون‌ها عمل می‌کند و این امر فرایند خوردگی را تسریع می‌کند [۴۲].

جدول ۸- نتایج آزمایش نیم پیل برای طرح‌های مخلوط مورد

بررسی

چرخه	اختلاف پتانسیل (mV)			
	N0-R100	N25-R75	N50-R50	N100-R0
۱	-۸۷	-۲۸	-۳۹	-۱۱
۲	-۱۴۴	-۱۰۲	-۶۲	-۷۸
۳	-۲۴۱	-۲۳۵	-۱۱۱	-۱۰۷
۴	-۳۸۳	-۳۶۹	-۲۰۵	-۱۳۱
۵	-۴۵۲	-۳۵۹	-۲۵۴	-۱۸۶
۶	-۵۵۹	-۴۱۱	-۳۱۲	-۲۴۹
۷	-۵۷۷	-۴۸۳	-۴۴۲	-۳۱۷
۸	-۵۸۴	-۵۳۲	-۴۹۷	-۳۹۱



شکل ۶- نمودار تغییرات پتانسیل نیم پیل برای طرح‌های مخلوط

مورد بررسی

۳-۳- آزمایش مقاومت پلاریزاسیون خطی

مقدار مقاومت پلاریزاسیون خطی بدست آمده از این روش به صورت نمودار در شکل ۷ نمایش داده شده است. اختلاف مقاومت خطی طرح‌ها تا پایان چرخه‌ی پنجم تقریباً مشهود است. اما با گذشت زمان و با شکستن لایه انفعالی، این مقادیر به یکدیگر نزدیک می‌شوند. با مشاهده‌ی نتایج می‌توان دریافت وجود سنگ‌دانه‌ی باز یافتی، باعث کاهش مقاومت پلاریزاسیون خطی می‌شود. ضمناً با کاهش مقاومت پلاریزاسیون خطی، سرعت و چگالی جریان خوردگی افزایش می‌یابد. پس از پایان هشت

هم‌چنین، Vintimilla و Etxeberria نیز گزارش نمودند که جایگزینی سنگ‌دانه‌ی طبیعی با سنگ‌دانه‌ی باز یافتی تا ۵۰ درصد در سن ۲۸ روز، تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ندارد، اما با افزایش سن بتن، کاهش مقاومت آشکار می‌شود. یافته‌ای که نشان می‌دهد سنگ‌دانه‌ی باز یافتی ممکن است در فرایند هیدراسیون طولانی مدت، اختلال ایجاد نماید [۴۰].

جدول ۷- نتایج آزمایش مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های

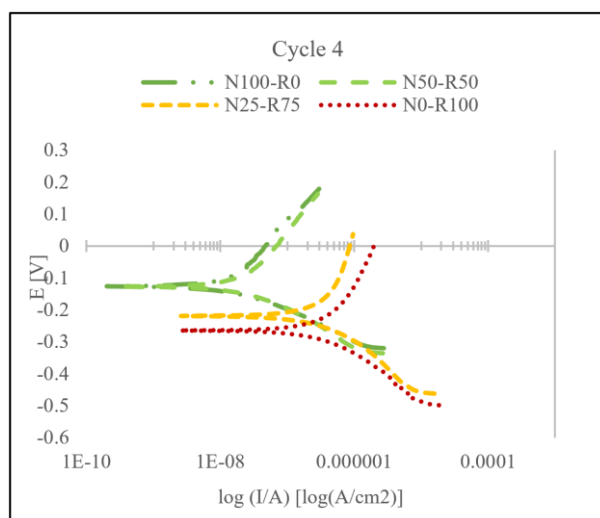
بررسی شده

نام طرح	مقاومت فشاری (Mpa)	
	۲۸ روزه	۹۰ روزه
N100-R0	۴۵/۲	۵۵/۳
N50-R50	۴۵	۵۱/۲
N25-R75	۴۰/۸	۴۵/۵
N0-R100	۳۴/۷	۳۸

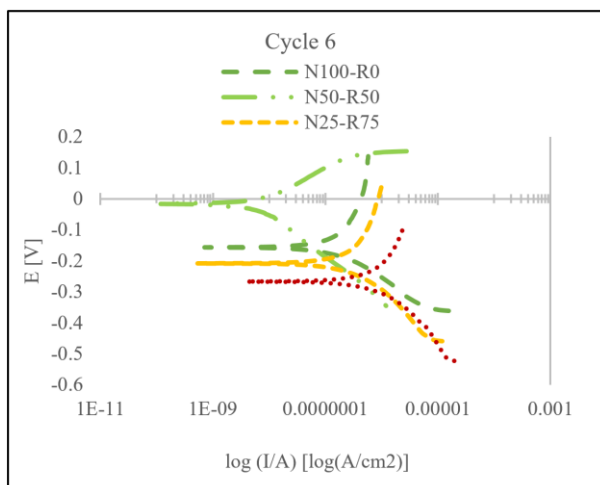
۳-۲- آزمایش پتانسیل نیم پیل

نتایج مربوط به آزمایش نیم پیل در قالب جدول ۸ و شکل ۶ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد. با توجه به نسبت بالای آب به سیمان و نیز محیط نمکی استفاده شده در آزمایش، لایه پسیو آرما توره به سرعت تخریب شده و فرایند خوردگی آغاز گردیده است. بر اساس معیار تعریف شده در استاندارد ASTM C876 پتانسیل نیم پیل کمتر از ۳۵۰- میلی‌ولت (در مقابل الکترو د مس- سولفات مس) نشان دهنده احتمال بالای خوردگی فعال است. نتایج نشان داد که در پایان چرخه‌ی سوم، آرما توره‌های موجود در طرح مخلوط‌های حاوی ۱۰۰ درصد مصالح سنگی باز یافتی، به احتمال ۹۰ درصد دچار خوردگی شده‌اند، در حالی که در طرح شاهد، این اتفاق تا پایان چرخه‌ی ششم رخ نداده است. این یافته نشان می‌دهد که با افزایش درصد جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با باز یافتی، زمان آغاز خوردگی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. لازم است اشاره شود که این روند با مطالعات اخیر هم‌راستا است. Bamshad و همکاران گزارش کردند که در بتن‌های حاوی ۱۰۰ درصد مصالح سنگی باز یافتی، پتانسیل نیم پیل به سرعت به مقادیر خطرناک می‌رسد، که نشان دهنده تخریب زود هنگام لایه محافظ است [۴۱]. این پدیده را می‌توان به تخلخل بالا و نفوذ پذیری بیشتر این نوع از بتن‌ها نسبت داد که باعث افزایش دسترسی رطوبت و

طرح‌ها به یکدیگر نزدیک است؛ اما با گذشت زمان و پس از هشت چرخه دو هفته‌ای، نمودارهای طرح‌های حاوی تا ۵۰ درصد مصالح سنگی بازیافتی (طرح‌های N100-R0 و N50-R50) به یکدیگر نزدیک هستند. ضمناً دو نمودار مرتبط با طرح مخلوط‌های N25-R75 و N0-R100 نیز در یک محدوده هستند. لذا این گونه می‌توان عنوان نمود که حضور تا ۵۰ درصد مصالح سنگی بازیافتی تأثیر چندانی بر چگالی جریان خوردگی و پتانسیل مدار باز، پس از گذشت هشت چرخه نداشته اما استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی به میزان بیش از ۵۰ درصد، منتج به افت خواص الکتروشیمیایی شده است.



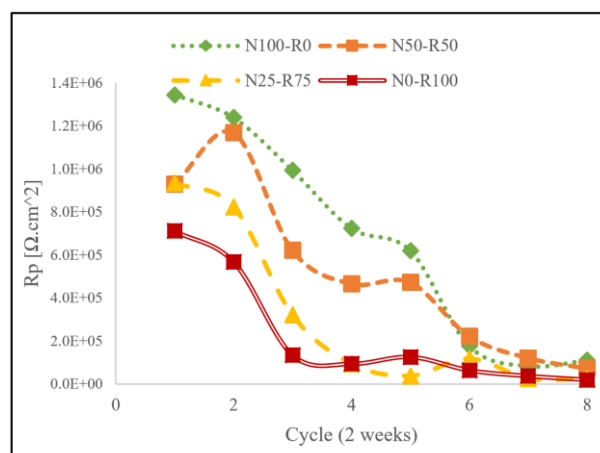
شکل ۹- نمودار تافل نمونه‌ها در پایان چرخه‌ی چهارم



شکل ۱۰- نمودار تافل نمونه‌ها در پایان چرخه‌ی ششم

علاوه بر این، با محاسبه شیب نواحی کاتدی و آنودی، مقادیر β_a و β_c محاسبه شد که می‌توان آن‌ها را در جدول ۹ مشاهده نمود. با

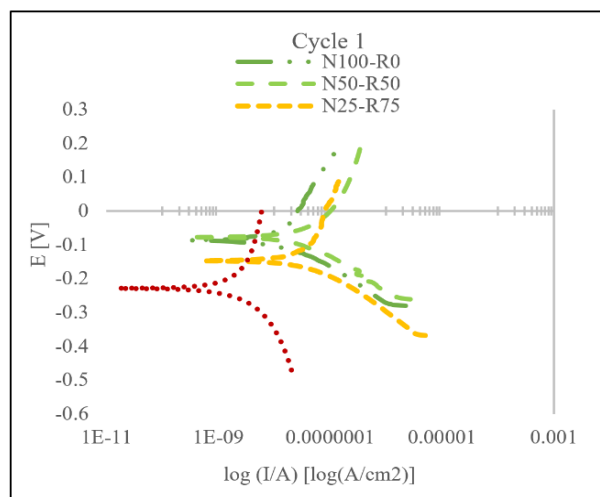
چرخه‌ی ۱۴ روزه، کمترین مقاومت مربوط به طرح N0-R100 با مقاومت $19282 \Omega \cdot cm^2$ و بیشترین مقاومت مربوط به طرح N100-R0 با مقاومت $110523 \Omega \cdot cm^2$ است. لذا کاملاً مشهود است میزان افت مقاومت طرح مخلوط حاوی ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه‌ی بازیافتی به میزان بسیار معناداری از طرح مخلوط شاهد (حاوی ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه‌ی طبیعی) بیشتر است.



شکل ۷- نمودار تغییرات مقاومت پلاریزاسیون خطی برای طرح‌های مخلوط مورد بررسی

۳-۴- آزمایش مقاومت پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

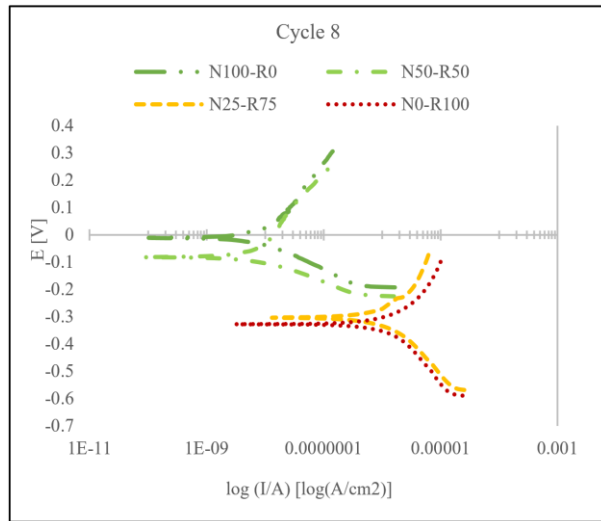
در شکل‌های ۸ الی ۱۱، نمودار تافل هر طرح مخلوط در پایان چرخه‌های ۱، ۴، ۶ و ۸ ارائه شده است.



شکل ۸- نمودار تافل نمونه‌ها در پایان چرخه‌ی اول

با مشاهده‌ی این اشکال، می‌توان به این نتیجه رسید که در آغاز این آزمایش، مقادیر پتانسیل مدار باز و چگالی جریان خوردگی

۰/۹۴ بدست آمد. ضمناً روند تغییرات مقادیر چگالی جریان خوردگی در شکل ۱۲ ترسیم شده است.



شکل ۱۱- نمودار تافل نمونه‌ها در پایان چرخه‌ی هشتم

دقت در نتایج یادشده می‌توان عنوان نمود که در پایان این آزمایش و پس از گذشت هشت چرخه، مقدار β_a در مخلوط حاوی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی کمتر از مخلوط حاوی سنگ‌دانه‌ی طبیعی بوده و این موضوع در خصوص β_c برعکس است. پس از بدست آوردن مقادیر β_a و β_c می‌توان ثابت استرن-گری را به صورت دقیق محاسبه نمود و قاعدتاً پس از آن می‌توان چگالی جریان خوردگی را محاسبه نمود. مقادیر دقیق ثابت استرن-گری در جدول ۱۰ و چگالی جریان خوردگی در جدول ۱۱ ارائه شده است.

در پایان آزمایش روشن شد که کمترین مقدار چگالی جریان خوردگی مربوط به طرح N100-R0 و برابر با $0.33 \frac{\mu A}{cm^2}$ و بیشترین مقدار آن مربوط به طرح N0-R100 و برابر با $1.15 \frac{\mu A}{cm^2}$ بوده و در طرح‌های N50-R50 و N25-R75 نیز به ترتیب، میزان چگالی جریان خوردگی برابر با $0.556 \frac{\mu A}{cm^2}$ و $0.73 \frac{\mu A}{cm^2}$ می‌باشد.

جدول ۹- مقادیر بتای کاتدی و آنودی

چرخه	سن نمونه (روز)	N100-R0		N50-R50		N25-R75		N0-R100	
		β_a	β_c	β_a	β_c	β_a	β_c	β_a	β_c
۱	۲۸	۲۱۰	۸۵	۱۰۵	۷۵	۱۸۰	۹۵	۲۱۰	۹۰
۲	۴۲	۱۹۵	۷۵	۲۰۰	۷۵	۱۹۰	۱۰۰	۱۶۵	۸۰
۳	۵۶	۱۸۰	۸۵	۱۴۵	۷۵	۱۹۰	۷۵	۱۴۵	۱۱۵
۴	۷۰	۱۶۰	۶۵	۲۳۵	۷۵	۱۵۵	۱۰۵	۱۷۰	۷۵
۵	۸۴	۱۷۰	۱۰۰	۱۹۵	۱۰۵	۱۶۰	۸۵	۱۸۰	۹۵
۶	۹۸	۱۶۰	۹۵	۱۲۰	۱۳۰	۱۳۰	۹۵	۱۶۰	۹۵
۷	۱۱۲	۱۵۵	۹۵	۱۰۰	۱۲۵	۱۴۰	۸۵	۱۰۰	۱۲۵
۸	۱۲۶	۱۵۰	۹۵	۱۳۰	۹۰	۱۴۵	۱۱۵	۱۱۰	۱۳۵

جدول ۱۰- مقدار ضریب استرن - گری (B) بر حسب میلی‌ولت

چرخه	سن نمونه (روز)	N100-R0	N50-R50	N25-R75	N0-R100
۱	۲۸	۲۶/۳	۱۹	۲۷	۲۷/۴
۲	۴۲	۲۳/۵	۲۳/۷	۲۸/۴	۲۳/۴
۳	۵۶	۲۵/۱	۲۱/۵	۲۳/۳	۲۷/۸
۴	۷۰	۲۰/۱	۲۴/۷	۲۷/۲	۲۲/۶
۵	۸۴	۲۷/۳	۲۹/۶	۲۴/۱	۲۷
۶	۹۸	۲۵/۹	۲۷/۱	۲۳/۸	۲۵/۹
۷	۱۱۲	۲۵/۶	۲۴/۱	۲۳	۲۴/۱
۸	۱۲۶	۲۵/۳	۲۳/۱	۲۷/۸	۲۶/۳

آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، مقادیر بدست آمده در دو طرح N50-R50 و N100-R0 به یکدیگر نزدیک و نتایج دو طرح N0-R100 و N25-R75 نیز مشابه یکدیگر بوده‌اند. از طرفی واضح است که سنگ‌دانه‌ی بازیافتی باعث افزایش چگالی جریان خوردگی می‌شود و آرماتور موجود در ملات ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی بازیافتی سریع‌تر دچار خوردگی می‌شود. با توجه به فاصله بین چگالی جریان خوردگی بتن‌های حاوی ۵۰ و ۷۵ درصد مصالح بازیافتی، می‌توان عنوان کرد که جایگزینی تا ۵۰ درصد سنگ‌دانه‌ی طبیعی با سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، تأثیر معناداری بر نتایج آزمایش‌ها نداشته است. در شکل ۱۳، تصویری از آرماتورهای مدفون در طرح مخلوط حاوی ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه‌ی بازیافتی (N0-R100) ارائه شده که بوضوح روشن است بعد از خاتمه هشت چرخه‌ی آزمایش، در آرماتورها خوردگی رخ داده است.

۴- نتیجه‌گیری

در ادامه به تشریح مختصر یافته‌های این مطالعه پرداخته شده است: در یک نسبت آب به سیمان برابر، مقاومت فشاری ملات حاوی ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه‌ی طبیعی، بیشتر از طرح حاوی ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه‌ی بازیافتی بوده که این اختلاف مقاومت فشاری بین دو طرح مذکور در سن ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب برابر ۲۳/۲۷ و ۳۱/۲۵ درصد است.

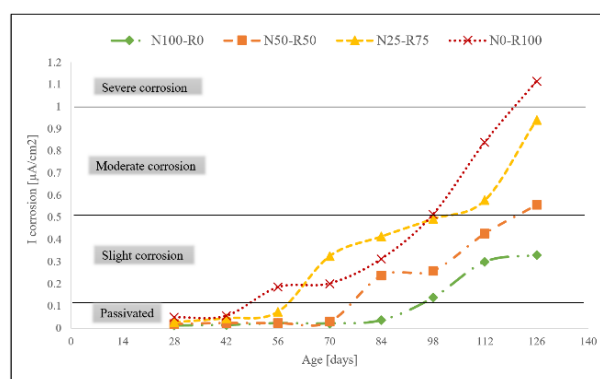
استفاده‌ی ۵۰ درصدی از مصالح سنگی بازیافتی، در سن ۲۸ روز، منجر به کاهش تنها ۰/۴۴ درصد و در سن ۹۰ روز باعث کاهش ۷/۳ درصدی مقاومت فشاری شده است. لذا می‌توان عنوان نمود که استفاده از سنگ‌دانه‌ی بازیافتی تا ۵۰ درصد، تأثیر معناداری بر مقاومت فشاری ندارد.

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش نیم‌پیل می‌توان نتیجه گرفت که فرایند خوردگی آرماتورهای موجود در طرح N0-R100 در پایان چرخه‌ی سوم، به احتمال ۹۰ درصد آغاز شده است. این موضوع برای طرح N100-R0 پایان چرخه‌ی ششم است.

با بررسی نتایج می‌توان دریافت وجود سنگ‌دانه‌ی بازیافتی موجب کاهش مقاومت پلاریزاسیون خطی می‌شود. درضمن با کاهش مقاومت پلاریزاسیون خطی، سرعت و چگالی جریان خوردگی افزایش می‌یابد. پس از پایان هشت چرخه‌ی ۱۴ روزه، کمترین مقاومت پلاریزاسیون خطی مربوط به طرح N0-R100

جدول ۱۱- مقادیر چگالی جریان خوردگی بر حسب $(\frac{\mu A}{cm^2})$

چرخه	سن نمونه (روز)	N100-R0	N50-R50	N25-R75	N0-R100
۱	۲۸	۰/۰۱۳	۰/۰۱۹	۰/۰۲۷	۰/۰۴۹
۲	۴۲	۰/۰۱۵	۰/۰۲۴	۰/۰۴۶	۰/۰۵۶
۳۴	۵۶	۰/۰۲۳	۰/۰۲۳	۰/۰۷۴	۰/۱۸۵
۴	۷۰	۰/۰۲۲	۰/۰۲۹	۰/۳۲۶	۰/۲۰۲
۵	۸۴	۰/۰۳۶	۰/۲۳۸	۰/۴۱۴	۰/۳۱۳
۶	۹۸	۰/۱۳۸	۰/۲۶	۰/۴۹۴	۰/۵۱۴
۷	۱۱۲	۰/۳	۰/۴۲۷	۰/۵۷۷	۰/۸۴
۸	۱۲۶	۰/۳۳	۰/۵۵۶	۰/۹۴	۱/۱۱۵



شکل ۱۲- مقادیر چگالی جریان خوردگی



شکل ۱۳- آرماتورهای مدفون در طرح مخلوط N0-R100 بعد از اتمام چرخه‌های آزمایش

با مشاهده‌ی این نمودارها به وضوح روشن است که پس از گذشت ۱۲۶ روز از ساخت نمونه‌ها، تنها آرماتور موجود در طرح N0-R100 وارد ناحیه‌ی خوردگی شدید شده است. همچنین دو طرح N25-R75 و N50-R50 در ناحیه‌ی خوردگی ملایم و طرح N100-R0 در محدوده‌ی خوردگی ناچیز باقی ماندند. این دسته‌بندی بر اساس چگالی جریان خوردگی، طبق مقادیر پیشنهادی توسط Zhang و همکاران [۴۳] ارائه شده است. مدت زمان قرار داشتن آرماتور در حالت غیرفعال در طرح‌های N100-R0، N50-R50، N25-R75 و N0-R100 به ترتیب دو، سه، چهار و پنج چرخه بوده است. علاوه بر این، همانند سایر

[4] Yuxi. Zhao, Dong. Jianfeng, Wu. Yingyao, Wang. Hailong, Li. Xiangmin, and Xu. Qingfeng, "Steel corrosion and corrosion-induced cracking in recycled aggregate concrete", Corrosion science, Vol. 85, pp. 241-250, 2014.

[5] Eshraghi. H, and Alipouri. Y. A, "Comprehensive Review of Strategies", First International Conference on the Exchange of Scientific Information in the Fields of Concrete Structures and Materials (ICCONCRETE). Tehran, 2024.

[6] هاشمی. سید علی، صدری نژاد. ایمان، "مطالعه مشخصات

مکانیکی بتن های حاوی سنگ دانه بازیافتی و سبکدانه رس منبسط شده"، تحقیقات بتن، دوره ۱۸ (۱)، صفحه ۶۳-۷۵، ۱۴۰۴.

[7] George. D, Savva. P, and Petrou. M.F, "Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete", Construction and Building Materials, Vol. 158, pp. 228-235, 2018.

[A] میراحمدی. سید قاسم، ساجدی. سیدفتح اله، رضوی طوسی. سیدوحید، "تأثیر ناحیه انتقال بر خواص و ریزساختار بتن بازیافتی"، تحقیقات بتن، دوره ۱۷ (۳)، صفحه ۱۲۱-۱۰۳، ۱۴۰۳.

[9] ساجدی. سیدفتح اله، جلیلی فر. حسن، "بررسی آزمایشگاهی تاثیر درشت دانه های بتنی بازیافتی بر خواص مرتبط با دوام بتن های تماماً بازیافتی حاوی پوزولان"، تحقیقات بتن، دوره ۱۵ (۲)، صفحه ۹۶-۷۹، ۱۴۰۱.

[10] 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.

[11] Amorim. P, de Brito. J, Evangelista. L, "concrete made with coarse concrete aggregate: Influence of curing on durability", ACI Materials Journal, vol. 109(2), pp. 195-204, 2012.

[12] Gomes. M, and de Brito. J, "Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance", Materials and Structures, vol 42 (5), pp. 663-675, 2009.

[13] Kou. S. C, and Poon. C. S, "Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate", Construction and Building Materials, vol 35, pp. 69-76, 20102.

[14] Hobbs. D. W, "Aggregate influence on chloride ion diffusion into concrete", Cement and Concrete Research, vol. 29 (12), pp. 1995-1998, 1999.

[15] Dhir. R. K, Dyer. T. D, Paine. K. A,

با مقدار $19282 \Omega.cm^2$ و بیشترین مقاومت مربوط به طرح N100-R0 با مقدار $110523 \Omega.cm^2$ بوده است. در نتیجه افت مقاومت پلاریزاسیون خطی ملات بازیافتی بیشتر از ملات طبیعی است.

- روند تغییرات β_a با گذشت زمان به صورت نزولی بوده که حداکثر میزان کاهش مربوط به طرح N0-R100 بوده که پس از گذشت هشت چرخه، این عدد از ۲۱۰ به ۱۱۰ میلی ولت بر دهه رسیده است.

- تغییرات β_c به صورت صعودی بوده که بیشترین آن مربوط به طرح N0-R100 بوده و پس از گذشت هشت چرخه، مقدار آن از ۹۵ به ۱۳۵ میلی ولت بر دهه افزایش یافته است.

- در این پژوهش و در طرح های مطالعه شده مقادیر β_a بین ۱۱۰ تا ۲۱۰ و β_c بین ۷۵ الی ۱۳۵ میلی ولت بر دهه بدست آمد.

- سنگ دانه های بازیافتی باعث افزایش چگالی جریان خوردگی شده و آرماتور موجود در ملات ساخته شده از سنگ دانه های بازیافتی سریع تر دچار خوردگی می شود و این فرایند به دلیل از بین رفتن سریع تر لایه محافظ روی آرماتور زودتر آغاز می گردد. همچنین استفاده از سنگ دانه های بازیافتی موجب افزایش شیب تغییرات چگالی جریان خوردگی شده است.

- به طور کلی می توان اظهار داشت نتایج طرح های حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد سنگ دانه های بازیافتی مشابه یکدیگر و طرح های حاوی صفر و ۵۰ درصد سنگ دانه های بازیافتی نیز مشابه یکدیگرند. از این رو می توان عنوان نمود جایگزینی مصالح سنگی بازیافتی تا ۵۰ درصد تأثیر معناداری بر مقاومت فشاری و خواص الکتروشیمیایی مؤثر بر خوردگی آرماتور ندارد.

۵- مراجع

[1] Metha. P. K, and Monteiro. P. J. M, "Concrete: microstructure, properties and materials", 4 McGraw-Hill Education New York." 2013.

[2] Tam. Vivian WY, Tam. Chi Ming, and Wang. Yongli, "Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach", Construction and Building Materials, Vol. 21 (10), pp. 1928-1939, 2007.

[3] Sonawane. T.R, Pimplikar. S.S, "Use of recycled aggregate concrete", IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, Vol. 52 (59), 2013.

- [28] Clément. Antoine, Laurens. S, Arliguie. G, and Deby. F, "Numerical study of the linear polarisation resistance technique applied to reinforced concrete for corrosion assessment", *European Journal of Environmental and Civil Engineering* Vol. 16 (3), pp. 491-504, 2012.
- [29] Carmen. A.P, and González. J. A, "Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements." *Materials and corrosion*, Vol. 29 (8), pp. 515-519, (1978).
- [30] Ge. J, and Isgor. O. B, "Effects of Tafel slope, exchange current density and electrode potential on the corrosion of steel in concrete." *Materials and Corrosion*, Vol. 58 (8), pp. 573-582, 2007.
- [31] Warkus. J, Brem. M, Raupach. M, "BEM-models for the propagation period of chloride induced reinforcement corrosion", *Materials and Corrosion*, Vol. 57 (8), pp. 636-641, 2006.
- [32] Luca. B, Elsener. B, Pedferri. P, Redaelli. E, and Polder. R.B, "Corrosion of steel in concrete": prevention, diagnosis, repair. John Wiley & Sons, 2013.
- [33] Kim. C.Y, and Kim. J.K, "Numerical analysis of localized steel corrosion in concrete", *Construction and Building Materials* Vol. 22 (6), pp. 1129-1136, 2008.
- [34] Song. H.W, and Saraswathy. V, "Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures – A Review", *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 2 (1), pp. 1-28, 2007.
- [35] Babaee. M, and Castel. A, "Chloride-induced corrosion of reinforcement in low-calcium fly ash-based geopolymer concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 88, pp. 96-107, 2016.
- [36] Alexander. M, Otieno. M, Stang. H, and Rica Geiker. M, "Propagation of steel corrosion in concrete: Experimental and numerical investigations", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 70, pp. 171-182, 2016.
- [37] Crumpton. C, Barbara. F, Smith. J, and Jayaprakash. G.P, "Salt weathering of limestone aggregate and concrete without freeze-thaw", *Transportation Research Record* 1250, 1989.
- [38] Panghal. H, and Kumar. A, "Enhancing concrete sustainability: assessing the impact of construction and demolished waste aggregates on strength and rapid chloride permeability as a durability indicator", In: *International Conference on Sustainable Development Goals*, Punjab: E3S Web of Conferences 453, 01009, 2023.
- [39] Khatib. J, M. "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate", *Cement and concrete research*, Vol. 35 (4), pp. 763-769, 2005.
- [40] Vintimilla. C, and Etcheberria, M, "Durable "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.
- [16] Limbachiya. M, Meddah. M. S, Ouchagour. Y, "Performance of Portland/silica fume cement concrete produced with recycled concrete aggregate", *ACI Materials Journal*, vol. 109 (1), pp. 91-100, 2012.
- [17] Dhir. R. K, and Paine. K, "Value added sustainable use of recycled and secondary aggregates in concrete", *Indian Concrete Journal*, vol. 84 (3), pp. 7- 26, 2010.
- [18] Bazant. Z.P, "Physical Model for Steel Corrosion in Sea Structures–Applications", *Journal of the Structural Division*, Vol. 105 (6), 1979.
- [19] Bamforth. P.B, "Enhancing reinforced concrete durability: Guidance on selecting measures for minimising the risk of corrosion of reinforcement in concrete", *Concrete Society Technical*, Vol. 61, 2004.
- [20] Hansson. C.M, Poursaee. A, Jaffer. S.J, Corrosion of reinforcing bars in concrete. R & D Serial No. 3013, Portland Cement Association (PCA), 2012.
- [21] Hansson. C. M, Poursaee. A, and Laurent. A, "Macrocell and microcell corrosion of steel in ordinary Portland cement and high performance concretes", *Cement and concrete research*, Vol. 36 (11), pp. 2098-2102, 2006.
- [22] Richardson. M. G, *Fundamentals of durable reinforced concrete*, London, 272, 2002.
- [23] Cong. S, and Poon. C, "Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 37, pp. 12-19, 2013.
- [24] Metha. P. K, and Monteiro. P. J. M, "Concrete: microstructure, properties and materials", New York: McGraw-Hill Education, 2013.
- [25] ASTM C876-91, "Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete", ASTM International, West Conshohocken, 1999.
- [26] Pour-Ghaz. Mohammad, Burkan. Isgor, and Ghods. P, "Quantitative interpretation of half-cell potential measurements in concrete structures", *Journal of materials in civil engineering*, Vol. 21 (9), pp. 467-475, 2009.
- [27] Poursaee. A, "Potentiostatic transient technique, a simple approach to estimate the corrosion current density and Stern–Geary constant of reinforcing steel in concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 40, pp. 1451-1458, 2010.

structural recycled concrete for different exposure environments”, *Materials*, Vol. 18 (3), 2025.

[41] Bamshad. O, Hakamian. I, Shirvani. M.F, Habibi. A, and Mahdikhani. M, “Long-term corrosion behavior of reinforced recycled aggregate concrete under acid rain condition”, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 22, 2025.

[42] Nguyen. T.D, Cherif. R, Mahieux. PY, Turcry. P, and Bastidas-Arteaga. E, “A review on deterioration Mechanisms, durability prediction and enhancement techniques for recycled aggregate concrete”, *Cleaner Materials*, Vol. 16, 2025.

[43] Zhang, Y, Xuanming, Z, Fan. J, and Zhao. X, "Impact of Stone Powder Content on Corrosion Resistance in Reinforced Concrete under Stray Current and Chloride Interactions." *Materials*, Vol. 17 (1), 2024.

Investigating Some Mechanical and Electrochemical Properties of Cement-Based Products Containing Natural and Recycled Aggregates with Constant Fineness Modulus

Ebrahim Ghiasvand *

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Mohammad Mahdi Rastegar

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Mohammad Hossein Ghasemi

Msc student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Navid Ommi

Msc student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Abstract

Due to the weaker properties of recycled aggregates compared to natural aggregates, concretes containing these materials generally exhibit lower mechanical performance and durability. The aim of the present study is to investigate the effect of replacing natural aggregates with recycled aggregates on the mechanical and electrochemical properties of cement mortar. For this purpose, mortars containing 0, 50, 75, and 100 percent recycled aggregates were prepared and subjected to compressive strength, half-cell potential, linear polarization resistance, and potentiodynamic polarization tests. After 28 days of curing, the specimens were exposed to chloride conditions through eight two-week cycles (one week wet, one week dry). The results indicated that complete replacement of natural aggregates with recycled aggregates led to a 23–32% reduction in compressive strength and earlier initiation of reinforcement corrosion (third cycle versus sixth cycle). In contrast, 50% replacement resulted in only a slight reduction in compressive strength (about 7% at 90 days and negligible at 28 days), with corrosion initiation observed in the fifth cycle. Moreover, increasing the proportion of recycled aggregates reduced the quality of the passive layer and caused approximately an 80% decrease in linear polarization resistance. Overall, the findings demonstrated that the use of recycled aggregates up to a 50% replacement level has no significant effect on compressive strength and only a minor influence on electrochemical properties compared to the mix containing 100% natural aggregates.

Keywords: Recycled Aggregate, Compressive Strength, Reinforcement Corrosion, Half-Cell, Linear Polarization Resistance, Potentiodynamic Polarization Resistance.

* Corresponding Author: e.ghiasvand@basu.ac.ir

