

Study of Some Corrosion-Related Durability Properties in Mortars Containing Natural and Recycled Aggregates with Constant Fineness Modulus

Ebrahim Ghasvand^{1*}, Mohammad Mahdi Rasegar¹, Mohammad Hossein Ghasemi², Navid Omidi²

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

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

ABSTRACT

Recycled aggregates possess weaker properties—like higher water absorption, increased porosity, and lower density—compared to their natural counterparts. Consequently, concretes produced with these recycled materials exhibit inferior mechanical and durability characteristics than natural concretes. Moreover, rebar corrosion poses a significant threat to reinforced concrete structures. Given the reduced durability of recycled concretes, it becomes crucial to investigate corrosion within this specific type of concrete. The current study presented laboratory findings on how recycled aggregates affect the strength and durability of cement-based products, particularly their resistance to rebar corrosion. To achieve this, four different mix designs were prepared, incorporating 0%, 50%, 75%, and 100% recycled aggregates. These mixes featured a maximum nominal size of 2.36 mm and a water-to-cement ratio of 0.6. Subsequently, tests for compressive strength, capillary water absorption, volumetric water absorption, and half-cell potential were conducted. Upon analyzing the results, it was determined that, at a consistent water-to-cement ratio, the inclusion of recycled aggregates led to a decrease in compressive strength and an increase in both capillary and volumetric water absorption. Interestingly, the mix containing 50% recycled aggregate performed quite similarly to the control mixture (which comprised 100% natural materials). Furthermore, half-cell potential test results indicated that recycled aggregates reduce the half-cell potential. This finding suggested that due to the inherent porosity of recycled aggregates, the protective layer on the rebar deteriorates more quickly, thereby initiating the corrosion process sooner.

ARTICLE INFO

Receive Date: 06 April 2025

Revise Date: 07 September 2025

Accept Date: 27 September 2025

Keywords:

Recycled concrete

Rebar corrosion

Half-cell potential

Capillary water absorption

Recycled aggregate

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi. <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.512815.3683>

*Corresponding author: Ebrahim Ghasvand

Email address: e.ghiasvand@basu.ac.ir

مطالعه برخی خواص دوامی مرتبط با خوردگی در ملات‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی با مدول نرمی ثابت

ابراهیم قیاسوند^{۱*}، محمد مهدی رستگار^۱، محمدحسین قاسمی^۲، نوید امی^۲

۱- استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

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

چکیده

به دلیل خواص ضعیف‌تر سنگدانه‌ی بازیافتی مانند جذب آب و تخلخل بیشتر و چگالی کمتر در مقایسه با سنگدانه‌ی طبیعی، بتن‌های ساخته شده از مصالح سنگی بازیافتی دارای مشخصات مکانیکی و دوامی ضعیف‌تری در مقایسه با بتن‌های طبیعی هستند. از طرف دیگر، در سازه‌های بتن مسلح، خوردگی آرماتور یکی از مخرب‌ترین پدیده‌هایی است که این سازه‌ها را تهدید می‌کند و با توجه به ضعف دوامی بتن‌های بازیافتی، بررسی پدیده خوردگی در این نوع از بتن‌ها، حائز اهمیت است. مطالعه‌ی حاضر نتایج بررسی آزمایشگاهی تأثیر سنگدانه‌ی بازیافتی بر خواص مقاومتی و دوامی محصولات پایه سیمانی خصوصاً دوام آن‌ها در برابر خوردگی آرماتور را نشان داد. به این منظور، چهار طرح مخلوط، حاوی مقادیر صفر، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی با حداکثر اندازه‌ی اسمی ۲/۳۶ میلی‌متر و نسبت آب به سیمان برابر ۰/۶ ساخته شد و آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب موئینه، جذب آب حجمی و پتانسیل نیم‌پیل روی آن‌ها انجام شد. پس از انجام آزمایش‌ها و بررسی نتایج مشخص شد که در یک نسبت آب به سیمان برابر، حضور سنگدانه‌ی بازیافتی موجب کاهش مقاومت فشاری، افزایش جذب آب موئینه و جذب آب حجمی می‌شود؛ هرچند مخلوط حاوی ۵۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی رفتاری نسبتاً مشابه با مخلوط شاهد (حاوی ۱۰۰ درصد مصالح طبیعی) داشت. ضمناً بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش نیم‌پیل مشخص شد حضور سنگدانه‌ی بازیافتی موجب کاهش پتانسیل نیم‌پیل می‌شود که این موضوع نشان دهنده‌ی آن است که به دلیل تخلخل موجود در این نوع سنگدانه، لایه‌ی محافظ روی آرماتور زودتر از بین رفته و فرآیند خوردگی آغاز می‌گردد.

کلمات کلیدی: بتن بازیافتی، خوردگی آرماتور، پتانسیل نیم‌پیل، جذب آب موئینه، سنگدانه‌ی بازیافتی.

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:	
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:	
۱۴۰۴/۰۱/۱۷	۱۴۰۴/۰۶/۱۶	۱۴۰۴/۰۷/۰۵	۱۴۰۴/۰۷/۰۵	۱۴۰۵/۰۲/۳۱		
نویسنده مسئول:					ابراهیم قیاسوند	
پست الکترونیکی:					e.ghiasvand@basu.ac.ir	

۱- مقدمه

بتن، به عنوان یکی از پرمصرف ترین مصالح ساختمانی، نقش مهمی در استحکام و دوام سازه های مدرن دارد. با این حال، موضوع پایداری و اثرات زیست محیطی ناشی از استفاده ی گسترده از مصالح طبیعی به طور فزاینده ای مورد توجه قرار گرفته است. در این زمینه، استفاده از مصالح بازیافتی به عنوان جایگزینی پایدار و اقتصادی برای مصالح طبیعی مطرح شده است [۱]. استفاده از مصالح بازیافتی از آنجا حائز اهمیت است که بدانیم هر ساله میلیاردها تن نخاله ی ساختمانی در سراسر دنیا تولید می شود که بخش عمده ای از آن شامل نخاله های بتنی است. به طور مثال در سال ۲۰۲۱ در انگلستان، حدود ۲۰۹ میلیون تن زباله تولید شد که ۶۲ درصد آن مرتبط با صنایع ساخت و تخریب^۱ بوده است و البته بیش از ۹۰ درصد آن نیز بازیافت شد. در هنگ کنگ نیز سالانه حدود ۲۰ میلیون تن نخاله ی ساختمانی تولید می شود که بخش بزرگی از آن بتن و سنگ های تخریب شده است [۲]. هم چنین در ایران، آمارها حاکی از آن است که سالانه حدود ۳۲ میلیون تن زباله صنعتی تولید می شود که حجم قابل توجهی از آن به نخاله های ساختمانی مرتبط است.

با توجه به اینکه ۶۰ تا ۸۰ درصد از حجم بتن را سنگدانه ها تشکیل می دهند، استفاده از سنگدانه های بازیافتی^۲ حاصل از نخاله های ساختمانی می تواند نقش مهمی در کاهش این ضایعات و کمک به محیط زیست ایفا نماید [۳]. قاعداً استفاده از سنگدانه ی بازیافتی نه تنها می تواند به کاهش تخریب محیط زیست و نیز کاهش مصرف منابع طبیعی کمک نماید، بلکه از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه است [۴].

البته لازم است جنبه های مکانیکی و دوامی استفاده از این نوع مصالح در بتن یا محصولات پایه سیمانی مورد توجه قرار گیرد. یکی از جنبه های مهم دوامی بتن که عدم توجه به آن می تواند هزینه های مرتبط با تعمیر و نگهداری سازه های بتنی را به شدت افزایش دهد، خوردگی آرماتورهای مدفون در بتن است. خوردگی^۳ آرماتور در بتن یکی از مهم ترین چالش های پیش روی مهندسان عمران و صنعت ساخت به شمار می رود که می تواند به طور چشم گیری، عمر مفید سازه ها را کاهش دهد [۵ و ۶]. این فرآیند باعث کاهش سطح مقطع موثر آرماتور و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری و عمر مفید سازه می شود [۷]. میزان قلیائیت بالای محلول منفذی بتن که در حدود ۱۲ تا ۱۳ بوده، باعث تشکیل و نگهداری یک لایه انفعالی (لایه ی اکسید) بر سطح آرماتورهای فولادی می شود [۸]. تا وقتی که لایه ی انفعالی تشکیل شده بر سطح آرماتورهای فولادی سالم باقی بماند، آهنگ خوردگی بسیار کم است. با این وجود، اگر لایه ی اکسید شکسته شود، اکسیژن در محیط مرطوب قادر به واکنش با فولاد خواهد بود [۹]. هنگامی که لایه ی غیرفعال به وسیله کلریدها یا کربناته شدن بتن شکسته می شود، خوردگی فعال با سرعت چند میلی متر در سال رخ می دهد [۱۰]. بتن های حاوی مصالح سنگی بازیافتی به دلیل ساختار متخلخل تر و پتانسیل نفوذپذیری بیشتر، در معرض خطر بیشتری از نظر خوردگی آرماتور قرار دارند [۱۱]. از طرفی جذب آب نیز یکی دیگر از عوامل کلیدی است که می تواند بر دوام و طول عمر سازه های بتنی تأثیر بگذارد. بتن های حاوی مصالح سنگی بازیافتی معمولاً جذب آب بیشتری نسبت به بتن های حاوی مصالح سنگی طبیعی دارند. بنابراین، بررسی دقیق این عوامل و بهبود روش های تولید بتن بازیافتی می تواند به طور مؤثری در افزایش کیفیت و دوام سازه ها نقش ایفا نماید [۱۱]. برخی محققان جذب آب حدوداً ۷/۴ درصدی برای بتن حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه ی بازیافتی و ۶/۵ درصدی برای بتن با ۵۰ درصد سنگدانه ی بازیافتی را گزارش نمودند [۱۲]. در تحقیقی که توسط Reddy و همکاران [۱۳] انجام شد، نتایج نشان داد که جذب آب در سنگدانه های بازیافتی بیشتر از سنگدانه های طبیعی است و وزن مخصوص این سنگدانه ها نیز کمتر از سنگدانه های طبیعی گزارش شده است. در مطالعه ای که توسط اشراقی و علیپوری [۳] صورت گرفت، آن ها بیان کردند که بتن تولید شده با سنگدانه های بازیافتی از بتن تقریباً همان مقاومت فشاری بتن اصلی را دارد، اما مقاومت کششی آن تا حدود ۱۰ درصد کاهش می یابد. Ameen و Al-Numan [۱۴] طی یک پژوهش دریافته اند که مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن در محدوده ۳۲ تا ۴۷ مگاپاسکال قرار داشت و با افزایش درصد سنگدانه ی بازیافتی، کاهش حداکثر ۳۸ درصدی در مقاومت مشاهده شد. مقاومت فشاری در سن ۵۶ روزه نیز در محدوده ۴۷/۵۵ تا ۵۴/۱ مگاپاسکال بود و با افزایش درصد سنگدانه ی بازیافتی حداکثر میزان کاهش مقاومت به ۱۳ درصد رسید.

¹ Construction & Demolition² Recycled Aggregate Concrete³ Corrosion

یکی از روش‌های بسیار رایج غیرمخرب جهت پیش‌بینی خوردگی آرماتور در بتن، روش نیم‌پیل^۴ است. اصول این روش اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی نسبت به یک الکتروود مرجع مانند الکتروود کالومل اشباع، یا الکتروود مس-سولفات مس و یا الکتروود نقره-کلرید نقره است. در تحقیقی که توسط Pour-Ghaz و همکاران [۱۵] انجام شد، پتانسیل نیم‌پیل به عنوان ابزاری برای پیش‌بینی احتمال خوردگی در بتن پیشنهاد گردید و آن‌ها عنوان کردند که آزمایش نیم‌پیل برای بررسی احتمال خوردگی یکنواخت و یکپارچه، اطلاعات ارزشمندی را ارائه می‌کند اما در مورد خوردگی موضعی این موضوع صادق نیست و می‌تواند گمراه‌کننده باشد. در پژوهشی نشان داده شد که تخریب بیشتر در سنگدانه‌های بازیافتی ممکن است فضای بیشتری را برای ذخیره محصولات خوردگی فراهم نماید و تا حد زیادی ظهور ترک‌ها را روی سطح پوشش بتنی سرعت بخشد [۱۶]. Zhao و همکاران [۱۷] بیان کردند خوردگی آرماتور در بتن بازیافتی زودتر از بتن معمولی آغاز می‌شود و هرچه مقدار سنگدانه‌ی بازیافتی بیشتر باشد، خوردگی آرماتور نیز سریع‌تر شروع می‌گردد.

هدف اصلی این مطالعه، بررسی عملکرد محصولات پایه سیمانی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی از طریق مقایسه‌ی شاخصه‌هایی نظیر مقاومت فشاری، جذب آب مؤثر، جذب آب حجمی و پتانسیل نیم‌پیل طرح مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌ی بازیافتی و طبیعی است. ضمناً با این پژوهش می‌توان درصد بهینه استفاده از سنگدانه‌ی بازیافتی را در طرح‌های مخلوط مطالعه شده، گزارش نمود. لازم به ذکر است، به منظور 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 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 سایر نتایج آن در آینده انتشار خواهد یافت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱ مواد و مصالح

سیمان استفاده شده در این آزمایش، سیمان نوع دو هگمتان همدان است 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 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 در 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.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی در پژوهش

نرمی (cm ² /gr)	زمان گیرش (دقیقه)	مقاومت فشاری (kg/cm ²)	انبساط (%)
اولیه	نهایی	۳ روزه	۷ روزه
		۲۸ روزه	

^۴ Half-cell

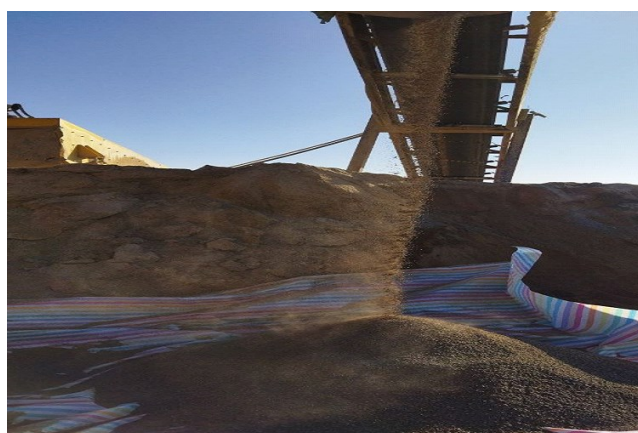
۰/۰۸	۴۱۱	۲۸۸	۲۰۵	۱۹۵	۱۳۴	۲۹۱۰
------	-----	-----	-----	-----	-----	------

جدول ۲: مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی در پژوهش

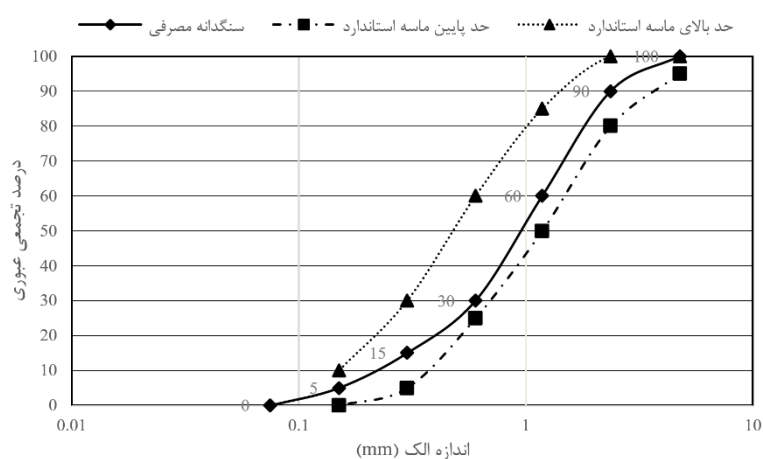
LOI	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
۲/۱۱	۰/۴۹	۰/۶۹	۲/۱۶	۱/۵۵	۶۲/۹۵	۲/۰۳	۴/۴۵	۲۱/۲۷

جدول ۳: مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در طرح مخلوط‌های مورد بررسی

ماسه طبیعی	ماسه بازیافتی
۲/۶	۲/۴۲
وزن مخصوص ظاهری اشباع با سطح خشک (gr/cm ³)	
۳/۵۳	۸/۸۹
جذب آب (درصد)	
۳	۳
مدول نرمی	



شکل ۱: تبدیل آزمون‌های بتنی به سنگدانه از طریق خردایش



شکل ۲: منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی در طرح مخلوط‌ها (اعم از طبیعی و بازیافتی)

۲-۲ مشخصات طرح اختلاط

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. به منظور تسریع در فرآیند خوردگی، در کلیه‌ی طرح مخلوط‌های مورد مطالعه، نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۶، در نظر گرفته شد.

جدول ۴: جزئیات طرح مخلوط‌های مورد بررسی در این پژوهش

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

۲-۳ آزمایش‌های انجام شده

در این پژوهش آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب موئینه، جذب آب حجمی و پتانسیل نیم‌پیل 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 سانتی‌متر استفاده شد که این آزمون‌ها تا رسیدن به سن آزمایش (۲۸ و ۹۰ روز) در مخزن حاوی آب و آهک اشباع عمل‌آوری شدند. در هر سن از هر طرح، تعداد سه آزمون مکعبی بر اساس ASTM C39 [۱۸] آزمایش شدند و نتیجه‌ی گزارش شده، میانگین قرائت‌های انجام‌شده در هر طرح و سن بود.

۲-۳-۲ آزمایش جذب آب موئینه

این آزمایش طبق استاندارد BS EN-480-5:1997 [۱۹] انجام شد. به این منظور از قالب‌های مکعبی به ابعاد ۵ سانتی‌متر استفاده شده و نتایج گزارش شده در هر سن از هر طرح، میانگین سه آزمون است. آزمون‌ها پس از عمل‌آوری در حوضچه آب تا رسیدن به سن ۲۸ و ۹۰ روز، از آب خارج شدند و به مدت ۱۴ روز در دمای ۵۰ درجه سلسیوس در آون^۵ قرار گرفتند تا کاملاً خشک شوند. انتخاب دمای نسبتاً پایین و مدت طولانی برای خشک کردن آزمون‌ها، صرفاً برای جلوگیری از بروز شوک حرارتی به آن‌ها بود. پس از خروج آزمون‌ها از آون، پنج وجه از شش وجه آن‌ها با چند لایه‌ی عایق رطوبتی پوشانده شد تا نفوذ آب و رطوبت صرفاً از طریق وجه زیرین و خاصیت موئینگی آزمون‌ها باشد. برای این کار، وجه ششم که باید با آب در تماس باشد، با دقت سیم زده شد تا هرگونه آلودگی حذف و به سطح نسبتاً زبری دست یابیم. سپس، آزمون‌ها مطابق با شکل ۳، در ظرف‌هایی قرار گرفتند که فاصله‌ای تقریباً دو سانتی‌متری از کف ظرف داشته باشند. قبل از شروع این مرحله، ابتدا وزن اولیه آزمون‌ها ثبت و پس از گذشت نیم، یک، سه، شش، ۲۴ و ۷۲ ساعت بعد از شروع آزمایش (مقارن با همان تماس آزمون با آب)، آزمون‌های مکعبی از آب خارج شده و سطح زیرین که با آب در تماس بوده، با دستمال خشک و وزن آن‌ها سریعاً ثبت گردید. سپس با استفاده از روابط ۱ و ۲، میزان آب جذب شده موئینه و ضریب جذب آب موئینه به همراه ثابت C محاسبه گردید.

⁵ Oven

$$i = \frac{m_t - m_o}{A} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، در هر یک از زمان‌های انجام آزمایش، i میزان آب جذب‌شده در واحد سطح بر حسب gr/mm^2 و m_t وزن آزمونه بر حسب gr ، m_o وزن خشک‌شده‌ی آزمونه در آون بر حسب gr و A نیز سطح مقطع آزمونه در تماس با آب بر حسب mm^2 است.

با ترسیم نقاط بدست آمده در دستگاه $i-t^{0.5}$ و برازش یک خط مستقیم از این نقاط، ضریب جذب آب موئینه S و مقدار ثابت جذب آب موئینه C (عرض از مبدا خط برازش شده) بدست می‌آید (رابطه ۲).

$$i = C + S\sqrt{t} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، t زمان سپری‌شده بر حسب دقیقه، S ضریب جذب آب موئینه بر حسب $(\text{mm/min}^{0.5})$ و C نیز ثابت جذب آب موئینه بر حسب mm است.



شکل ۳: آماده‌سازی آزمونه‌ها جهت انجام آزمایش جذب آب موئینه

۳-۳-۲ آزمایش جذب آب حجمی

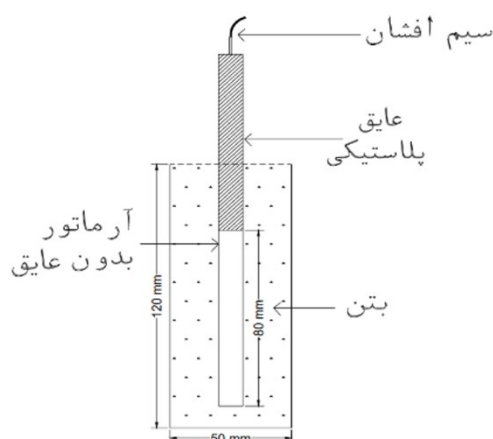
آزمایش جذب آب حجمی نیز مانند آزمایش‌های مقاومت فشاری و جذب آب موئینه در سنین ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. این آزمایش منطبق بر استاندارد ASTM C642 [۲۰] صورت گرفت و نتایج گزارش‌شده در هر سن از هر طرح، میانگین سه آزمونه است. پس از رسیدن به سنین مقرر، آزمونه‌هایی که برای آزمایش جذب آب حجمی انتخاب شده بودند، از آب خارج و سطح آن‌ها با دستمال به‌طور کامل خشک شد. سپس وزن اولیه آن‌ها، که نشان‌دهنده‌ی وزن اشباع با سطح خشک بود، بلافاصله پس از خشک‌کردن سطح آن‌ها اندازه‌گیری و ثبت شد. بعد از اندازه‌گیری وزن اولیه، آزمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس داخل آون قرار گرفتند تا به‌طور کامل خشک شوند. پس از اتمام زمان تعیین‌شده، آزمونه‌ها از آون خارج شده و بلافاصله وزن ثانویه آن‌ها اندازه‌گیری شد. جذب آب حجمی از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌گردد.

$$W = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100 \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن، W جذب آب حجمی بر حسب درصد، W_1 جرم اولیهی آزمونه بر حسب گرم و W_2 نیز جرم ثانویهی آزمونه پس از خشک شدن در آون، بر حسب گرم است.

۴-۳-۲ آزمایش پتانسیل نیم پیل

جهت آماده سازی آزمونه ها برای انجام این آزمایش، مطابق شکل ۴ از قالب های استوانه ای به قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۲۰ میلی متر استفاده شده است. در مرکز هر قالب استوانه ای، آرماتور بدون آج سندبلاست شده به قطر ۱۰ میلی متر و طول ۱۶۰ میلی متر قرار داده شد و پوشش روی آرماتور از هر طرف به میزان یکسان رعایت شد. ۸۰ میلی متر از طول هر آرماتور توسط محافظ حرارتی جهت جلوگیری از خوردگی پوشانده شده و ۸۰ میلی متر دیگر بدون محافظ داخل ملات مدفون گردیده تا در معرض خوردگی قرار داشته باشد. به منظور اندازه گیری پتانسیل آرماتورهای مدفون توسط مولتی متر، یک سیم مسی افشان ۱×۱ میلی متر مطابق شکل ۴ به انتهای هر آرماتور متصل گردید.



شکل ۴: آماده سازی آزمونه های حاوی آرماتور جهت آزمایش نیم پیل

پس از ساخت مخلوط ها و آماده سازی آزمونه ها جهت انجام آزمایش نیم پیل، به منظور تشکیل لایه ی محافظ روی آرماتورها، این آزمونه ها تا سن ۲۸ روز در محلول آب و آهک اشباع نگهداری شدند و در پایان دوره ۲۸ روزه که آزمونه ها همچنان در محلول آب و آهک بودند، اولین سری از آزمایش نیم پیل روی آزمونه ها انجام شد. پس از گذشت ۲۸ روز و خروج آزمونه ها از محلول آب و آهک اشباع، چرخه های مورد نظر آغاز شد. این آزمایش شامل هشت چرخه دو هفته ای که هر چرخه، متشکل از یک هفته قرارگیری در هوای آزاد و یک هفته قرارگیری در محلول ۱۰ درصد سدیم کلرید (محلول شبیه سازی خوردگی تسریع شده) بود. در پایان چرخه ی تر و با استفاده از الکتروده نقره-کلرید نقره ($Ag/AgCl$)، به عنوان الکتروده مرجع، اختلاف پتانسیل بین الکتروده اصلی ثبت شد و نتایج ارائه شده میانگین چهار آزمونه از هر طرح است. در شکل ۵، حضور آزمونه ها در محلول ۱۰ درصد آب و نمک را نشان می دهد. با توجه به جدول ۵ و براساس محدوده مشخص شده در استاندارد ASTM C876 [۲۱]، برای الکتروده مرجع مس / سولفات مس و معادل آن برای الکتروده های نقره-کلرید نقره و کالومل اشباع [۲۲]، با توجه اختلاف پتانسیل اندازه گیری شده، وضعیت آرماتور از نظر خوردگی تخمین زده می شود.

جدول ۵: محدوده ی پتانسیل خوردگی و احتمال وجود خوردگی برای الکترودهای مختلف

محدوده پتانسیل (mV)			احتمال وجود خوردگی
الکتروده مرجع مس / سولفات مس	الکتروده نقره-کلرید نقره	الکتروده مرجع کالومل اشباع	
> -200	> -75	> -126	به احتمال ۹۰ درصد خوردگی وجود ندارد
$-200 >> -350$	$-75 >> -234$	$-126 >> -275$	فعالیت خوردگی قطعی نیست، اما امکان آن وجود دارد
< -350	< -234	< -276	به احتمال ۹۰ درصد خوردگی وجود دارد



شکل ۵: قراردادن نمونه‌های آزمایش نیم‌پیل در محلول ۱۰ درصد NaCl

۳- نتایج آزمایش‌ها

در این بخش، نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب موئینه، جذب آب حجمی و پتانسیل نیم‌پیل ارائه و تفسیر می‌شوند. این داده‌ها در راستای ارزیابی تأثیر جایگزینی سنگدانه‌ی طبیعی با سنگدانه‌ی بازیافتی بر خواص مقاومتی و دوامی محصولات پایه سیمانی، به‌ویژه در برابر خوردگی آرماتور، تحلیل شده‌اند.

۳-۱ نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری در جدول ۶ قابل مشاهده است. باتوجه به نتایج ۲۸ روزه در این پژوهش، در یک نسبت آب به سیمان برابر، استفاده صد درصدی از سنگدانه‌ی بازیافتی کاهش حدود ۲۳ درصدی مقاومت فشاری را به دنبال داشته که این مقدار در سن ۹۰ روز به حدود ۳۱ درصد رسیده است. این کاهش عملکرد را می‌توان به مقاومت کمتر سنگدانه بازیافتی، تخلخل بالاتر، و حضور ملات قدیمی چسبیده به آن نسبت داد که ساختار ضعیف‌تری نسبت به سنگدانه‌ی طبیعی ایجاد می‌کند. مطالعات اخیر نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند؛ به‌عنوان مثال، Pangha و همکاران [۲۵] نشان دادند که سنگدانه‌های بازیافتی به دلیل وجود ناحیه‌ی انتقالی ضعیف‌تر و تخلخل بالا، مقاومت فشاری بتن را تا ۴۰ درصد کاهش می‌دهد [۲۵].

هم‌چنین، با استفاده از اسکن سه‌بعدی پیشرفته در یک مطالعه جامع، تفاوت‌های ساختاری بین سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی به‌وضوح نمایان شد [۲۴]. همان‌گونه که در شکل ۶ قابل مشاهده است، تفاوت‌های رنگی در مقطع دوطبقه‌ای، تغییرات چگالی داخلی را نشان می‌دهند؛ لکه‌های تیره‌تر مربوط به مناطق با چگالی بالا و لکه‌های روشن‌تر نشان‌دهنده مناطق متخلخل‌تر هستند. این تصاویر به وضوح تخلخل بالاتر در سنگدانه‌ی بازیافتی و حضور ملات قدیمی در آن را نشان می‌دهد که در توسعه ترک‌های ریز و کاهش مقاومت بتن‌های حاوی آن‌ها مؤثر است.

در طرح حاوی ۵۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی، کاهش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز کمتر از یک درصد و در سن ۹۰ روز حدود هفت درصد بود. این یافته با مطالعه‌ی Li و همکاران نیز هم‌راستا است. آن‌ها نیز نشان دادند بتن‌های حاوی ۵۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی عملکرد مقاومتی قابل‌مقایسه‌ای با بتن‌های حاوی سنگدانه‌ی طبیعی دارند، در حالی که درصدهای بالاتر جایگزینی (۷۵ و ۱۰۰ درصد)، کاهش قابل‌توجهی در مقاومت ایجاد می‌کنند [۲۶]. Khatib [۲۳] نیز به این نتیجه رسید که جایگزینی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصدی سنگدانه‌ی بازیافتی در سن ۲۸ روز، تأثیر چندانی بر میزان مقاومت فشاری نداشته، اما با افزایش سن بتن، کاهش مقاومت رخ می‌دهد. این محقق ملاحظه نمود در سن ۹۰ روز، جایگزینی ۲۵ و ۱۰۰ درصدی سنگدانه‌ی بازیافتی به ترتیب کاهش ۱۵ و ۲۵ درصدی مقاومت فشاری را به همراه دارد. هم‌چنین، Vintimilla و Etxeberria نیز گزارش نمودند که جایگزینی سنگدانه‌ی طبیعی با سنگدانه‌ی بازیافتی تا ۵۰ درصد در

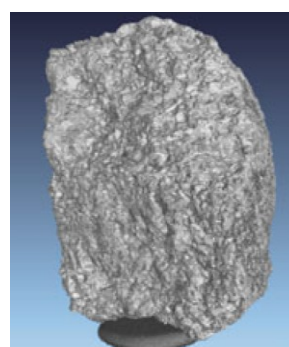
سن ۲۸ روز، تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ندارد، اما با افزایش سن بتن، کاهش مقاومت آشکار می‌شود. یافته‌ای که نشان می‌دهد سنگدانه‌ی بازیافتی ممکن است در فرآیند هیدراسیون طولانی‌مدت، اختلال ایجاد نماید [۲۷].

جدول ۶: نتایج آزمایش مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های بررسی شده

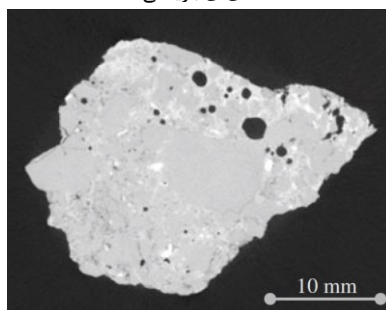
نام طرح	مقاومت فشاری (Mpa)	
	۲۸ روزه	۹۰ روزه
N100-R0	۴۵/۲	۵۵/۳
N50-R50	۴۵	۵۱/۲
N25-R75	۴۰/۸	۴۵/۵
N0-R100	۳۴/۷	۳۸



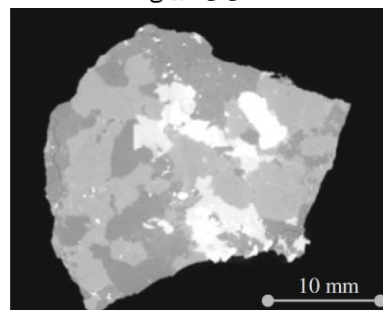
سنگدانه‌ی ی بازیافتی (3D)



سنگدانه‌ی ی طبیعی (3D)



مقطع عرضی سطح داخلی سنگدانه‌ی بازیافتی



مقطع عرضی سطح داخلی سنگدانه‌ی طبیعی

شکل ۶: تحلیل سه بعدی تصاویر سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی [۲۴]

۳-۲ نتایج آزمایش جذب آب موئینه

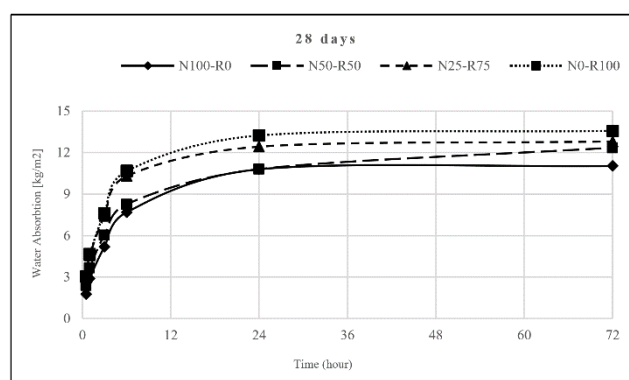
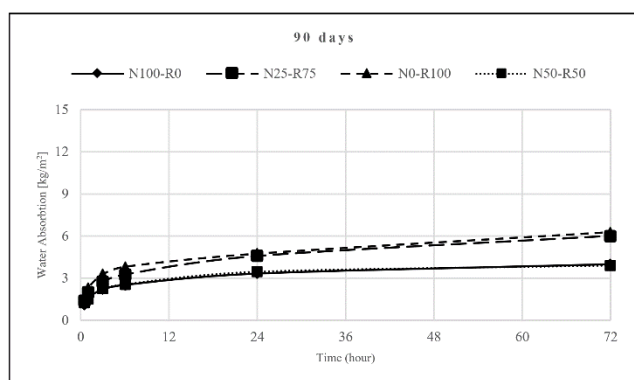
شکل ۷ نشان‌دهنده میزان آب جذب‌شده در واحد سطح بر حسب زمان است. همان‌گونه که مشهود است، میزان آب جذب‌شده توسط طرح مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌ی بازیافتی بیشتر از طرح مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌ی صرفاً طبیعی است. این امر به‌وضوح به تخلخل بالاتر و جذب آب ذاتی سنگدانه‌ی بازیافتی نسبت داده می‌شود. به‌عنوان مثال، در سن ۹۰ روز و پس از ۲۴ ساعت از آغاز آزمایش، طرح‌های حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد مصالح سنگی بازیافت، به‌طور قابل توجهی بیشتر از طرح‌های شاهد و حاوی ۵۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی، آب جذب نموده‌اند. هم‌چنین، شکل ۸ عمق نفوذ معادل (i) را بر حسب جذر زمان نشان می‌دهد. افزایش شیب خطوط در طرح‌های حاوی سنگدانه‌ی بازیافتی، بیانگر ضریب جذب بالاتر و در نتیجه نفوذپذیری بیشتر است. به‌طور مثال، در سن ۹۰ روز، ضریب جذب آب موئینه در طرح حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی حدود ۵۷ درصد بالاتر از نمونه شاهد بود که با یافته‌های Zaharieva و همکاران مطابقت دارد؛ این محققین با انجام آزمایش‌های نفوذپذیری بر روی بتن‌های بازیافتی دریافتند که جایگزینی ۱۰۰ درصدی سنگدانه‌ی طبیعی با سنگدانه‌ی بازیافتی،

موجب افزایش ۴۲ درصدی جذب آب موئینه در سن ۲۸ روزه می‌شود [۲۸]. لازم است اشاره شود که این مقدار در پژوهش حاضر و پس از ۷۲ ساعت، در سن ۲۸ روز برابر با ۲۳ درصد و در سن ۹۰ روز برابر حدود ۵۷ درصد است. در جدول ۷ مقادیر ضریب جذب آب موئینه و ثابت جذب آب موئینه ارائه شده است. شیب خط برازش شده در نمودار $i - t^{0.5}$ بیان‌گر S و عرض از مبدا این خط، نشان‌گر C است. در سن ۹۰ روز، مقادیر ضریب و ثابت جذب آب موئینه کمتر از سن ۲۸ روزه بوده که این موضوع به دلیل تکمیل فرآیند هیدراسیون سیمان است. Kang و همکاران نیز تأکید کردند که شاخص جذب آب موئینه به عنوان یک شاخص قوی برای پیش‌بینی نفوذ یون‌های خورنده در محصولات پایه سیمانی محسوب شده و افزایش آن در بتن‌های ساخته شده از سنگدانه‌های بازیافتی به دلیل اثر توامان تخلخل ذاتی بیشتر و ناحیه انتقالی ضعیف‌تر است [۲۹].

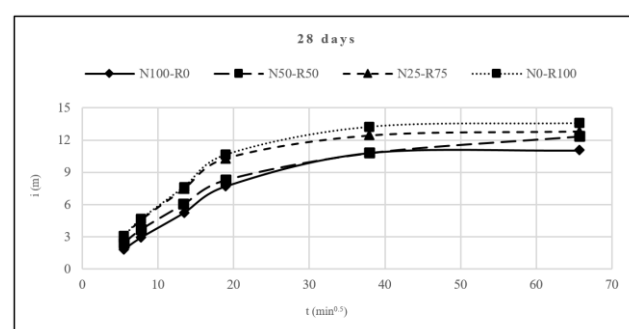
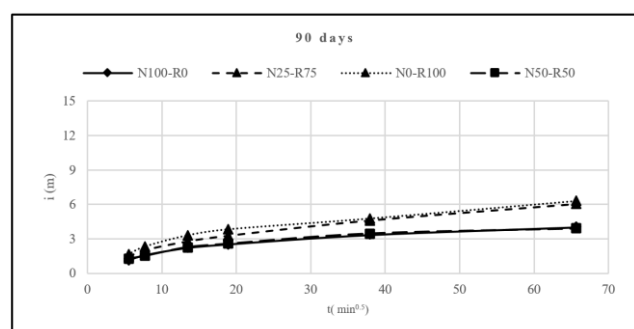
نکته قابل توجه در این آزمایش، همگرایی نمودارهای طرح‌های حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد مصالح سنگی بازیافتی با یکدیگر و نیز همگرایی نمودارهای طرح‌های شاهد و حاوی ۵۰ درصد مصالح سنگی بازیافتی با یکدیگر است.

جدول ۷: مقادیر ضریب و ثابت جذب آب موئینه طرح مخلوط‌های بررسی شده

نام طرح	C (mm)		S (mm/min ^{0.5})	
	روزه ۲۸	روزه ۹۰	روزه ۲۸	روزه ۹۰
N100-R0	۲/۸۲	۱/۳۷	۰/۱۵	۰/۰۴۴
N50-R50	۳/۳۵	۱/۴۵	۰/۱۵۶	۰/۰۴۲
N25-R75	۴/۶۶	۱/۵۵	۰/۱۵۱	۰/۰۷۲
N0-R100	۴/۷۳	۱/۹۵	۰/۱۶۳	۰/۰۶۹



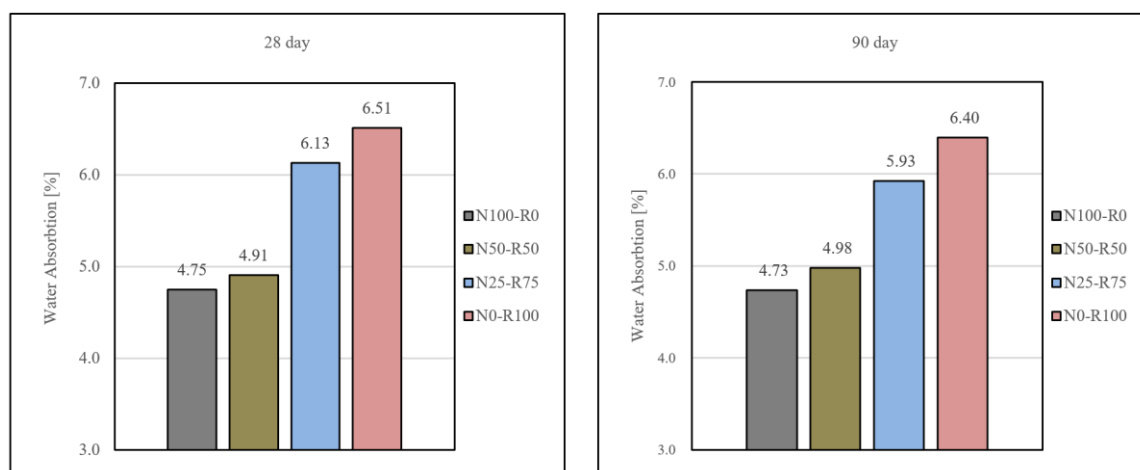
شکل ۷: میزان آب جذب شده در واحد سطح با گذشت زمان در سنین ۲۸ و ۹۰، برای طرح‌های مخلوط مورد بررسی



شکل ۸: عمق نفوذ معادل (i) در جذر زمان‌های آزمایش در سنین ۲۸ و ۹۰، برای طرح‌های مخلوط مورد بررسی

۳-۳ نتایج آزمایش جذب آب حجمی

نتایج آزمایش جذب آب حجمی در شکل ۹ ارائه شده است. میزان آب جذب شده به صورت حجمی، در سنین ۲۸ و ۹۰ روز تقریباً نزدیک به یکدیگر بوده و میزان آب جذب شده در طرح مخلوط حاوی مصالح سنگی بازیافتی بیشتر از طرح مخلوط شاهد است. با دقت در نتایج روشن است که مقادیر مربوط به طرح مخلوط‌های حاوی صفر و ۵۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی، نزدیک به یکدیگر و مقادیر مربوط به طرح مخلوط حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی نیز نزدیک به یکدیگرند. به طور مثال در سن ۲۸ روز، با جایگزینی ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سنگدانه‌ی طبیعی با بازیافتی، میزان جذب آب حجمی به ترتیب برابر با ۳/۳۶، ۲۹/۰۵ و ۳۷/۰۵ درصد نسبت به طرح مخلوط شاهد افزایش می‌یابد. ضمناً میزان افزایش این مقادیر در سن ۹۰ روز، به ترتیب برابر ۵/۲۸، ۲۵/۳۶ و ۳۵/۳ درصد است. سنگدانه‌ی بازیافتی به دلیل تخلخل بالاتر، وجود ملات قدیمی چسبیده به سنگدانه و نیز خاصیت جذب آب بیشتر در مقایسه با سنگدانه‌ی طبیعی، منجر به آن می‌شود که طرح مخلوط‌های ساخته شده از این مصالح نیز دارای جذب آب بالاتری در مقایسه با طرح شاهد شوند. علاوه بر این می‌توان عنوان نمود که استفاده ۵۰ درصدی از سنگدانه‌ی بازیافتی تأثیر چندانی در افزایش جذب آب در مقایسه با طرح پایه ندارد. مطالعات سایر محققین نیز موید نتایج بدست آمده در این پژوهش است. به عنوان مثال، Brand و Roesler نشان دادند که مصالح سنگی بازیافتی به دلیل جذب آب بالاتر، آب موجود در مخلوط را به سمت خود می‌کشند و این امر باعث کاهش آب آزاد در ماتریس سیمانی و نیز افزایش آن در ناحیه انتقالی شده که این موضوع منجر به ضعف مقاومتی و دوامی در ناحیه انتقالی در این نوع از بتن‌ها می‌شود [۳۰]. هم‌چنین، Wang و همکاران نشان دادند جذب آب حجمی در بتن‌های ساخته شده از مصالح سنگی بازیافتی تا ۴۰ درصد بالاتر از بتن‌های ساخته شده از مصالح سنگی طبیعی بوده و این پارامتر همبستگی بسیار قوی‌ای با نفوذ یون کلرید و شروع خوردگی دارد [۳۱].



شکل ۹: میزان درصد جذب آب حجمی در سنین ۲۸ و ۹۰، برای طرح‌های مخلوط مورد بررسی

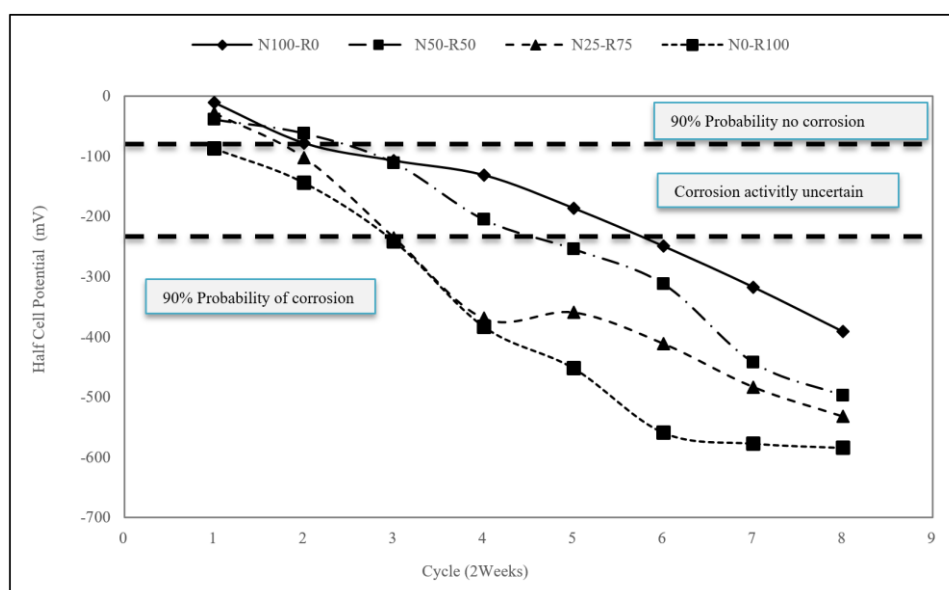
۴-۳ نتایج آزمایش پتانسیل نیم‌پیل

نتایج مربوط به آزمایش نیم‌پیل در قالب جدول ۸ و شکل ۱۰ 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 آرماتور به سرعت تخریب شده و فرآیند خوردگی آغاز گردیده است. بر اساس معیار تعریف شده در استاندارد ASTM C876 [۲۲]، پتانسیل نیم‌پیل کمتر از ۳۵۰ میلی‌ولت (در مقابل الکترود مس-سولفات مس) نشان‌دهنده احتمال بالای خوردگی فعال است. نتایج نشان داد که در پایان چرخه سوم، آرماتورهای موجود در طرح مخلوط‌های حاوی ۱۰۰ درصد مصالح سنگی بازیافتی، به احتمال ۹۰ درصد دچار خوردگی شده‌اند، در حالی که در طرح شاهد، این اتفاق تا پایان چرخه ششم رخ نداده است. این یافته نشان می‌دهد که با افزایش درصد جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با بازیافتی، 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 بازیافتی، پتانسیل نیم‌پیل به سرعت به مقادیر خطرناک می‌رسد، که نشان‌دهنده تخریب زود هنگام لایه محافظ است

[۳۲]. این پدیده را می توان به تخلخل بالا و نفوذپذیری بیشتر این نوع از بتن ها نسبت داد که باعث افزایش دسترسی رطوبت و یون های کلرید به سطح فولاد می شود. Nguyen و همکاران نیز تأکید کردند که ملات قدیمی چسبیده به سنگدانه های بازیافتی، به عنوان مسیر انتقال اولیه جهت نفوذ یون ها عمل می کند و این امر فرآیند خوردگی را تسریع می کند [۳۳].

جدول ۸: نتایج آزمایش نیم پیل برای طرح های 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 ۱۰: نمودار تغییرات پتانسیل نیم پیل برای طرح های مخلوط مورد بررسی

۴- نتیجه گیری

هدف از انجام این مطالعه بررسی و مقایسه مقاومت فشاری، جذب آب موئینه، جذب آب حجمی و پتانسیل نیم پیل طرح مخلوط های حاوی سنگدانه های بازیافتی و طبیعی و تعیین درصد بهینه ای استفاده از سنگدانه های بازیافتی است. از این رو با توجه با آزمایش های انجام شده، نتایج زیر قابل بیان است:

۱. استفاده ی ۵۰ درصدی از مصالح بازیافتی در ساخت محصولات پایه سیمانی در این پژوهش 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 استفاده از سنگدانه های بازیافتی تا ۵۰ درصد، تاثیر ناچیزی بر مقاومت فشاری داشته است.

۲. در نسبت آب به سیمان برابر، وجود سنگدانه‌ی بازیافتی، منجر به افزایش جذب آب مؤئینه شده است. اختلاف مشهود بین طرح‌های حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد با طرح‌های حاوی صفر و ۵۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی حاکی از آن است که استفاده از سنگدانه‌ی بازیافتی تا ۵۰ درصد تاثیر منفی قابل ملاحظه‌ای بر جذب آب مؤئینه ندارد، اما برای مقادیر جایگزینی‌های بیشتر از ۵۰ درصد، افت این مشخصه معنادار بوده است.
 ۳. استفاده از ۵۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی در تولید محصولات پایه سیمانی در این پژوهش، تاثیر کمی بر جذب آب حجمی آزمون در مقایسه با طرح پایه (حاوی ۱۰۰ درصد مصالح سنگی طبیعی) داشته است. هم‌چنین درصد جذب آب حجمی طرح‌های حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد مصالح سنگی بازیافتی نیز نزدیک به یکدیگر است که می‌توان به صورت کلی نتیجه گرفت استفاده‌ی ۷۵ درصدی از سنگدانه‌ی بازیافتی تاثیری مشابه با طرح ساخته شده از ۱۰۰ درصد مصالح بازیافتی دارد.
 ۴. بر اساس پتانسیل‌های نیم‌پیل ثبت شده می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که به احتمال ۹۰ درصد در پایان چرخه سوم آزمایش، آرماتورهای موجود در آزمون‌های طرح مخلوط حاوی ۱۰۰ درصد مصالح سنگی بازیافتی دچار خوردگی شده‌اند که این احتمال در طرح شاهد، در پایان چرخه ششم وجود دارد.
 ۵. وجود سنگدانه‌ی بازیافتی موجب تسریع فرآیند خوردگی و شکستن لایه‌ی محافظ تشکیل شده بر روی سطح آرماتورها شده است. هم‌چنین با مقایسه نتایج بدست آمده می‌توان اظهار نمود در یک زمان مشخص، احتمال خوردگی آرماتور در طرح مخلوط‌های حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی بیش از دو برابر طرح مخلوط شاهد بوده است.
- به طور کلی و براساس نتایج بدست آمده می‌توان اظهار نمود که درصد بهینه‌ی استفاده از سنگدانه‌ی بازیافتی در این مطالعه، ۵۰ درصد بوده و استفاده از سنگدانه‌ی بازیافتی تا ۵۰ درصد، تاثیر کمی بر کاهش مشخصه‌های مقاومتی و دوامی طرح‌های مخلوط داشته است. یافته‌های حاصل از این پژوهش با مطالعات محققین دیگر نیز همسو بود که در متن مقاله به صورت مصداقی نیز به برخی نتایج پژوهش‌های سایرین اشاره شد. هم‌چنین نتایج طرح‌های حاوی ۷۵ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی مشابه نتایج طرح‌های حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی بوده است.

مراجع

- [1] Hartt, W. H. Rodney G. p. Virginie, L. and Diane, K. L. (2004). *Critical literature review of high-performance corrosion reinforcements in concrete bridge applications*. Florida: Atlantic University.
- [2] Huang, X. Tian, S. Jinxu, W. Fub, C. and Chenxia, W. (2023). Bond performance of corroded steel reinforcement and recycled coarse aggregate concrete after freeze-thaw cycles. *Sustainability*, 15 (7), 6122.
- [3] Eshraghi, H. and Alipouri, Y. (2024). Enhancing Concrete Recycling in Iran: A Comprehensive Review of Strategies. In: *First International Conference on the Exchange of Scientific Information in the Fields of Concrete Structures and Materials (ICCONCRETE)*. Tehran: Iranian Concrete Institute, Paper No. 1045
- [4] Pacheco-Torgal, F. and Labrincha, J. A. (2013). The future of construction materials research and the seventh UN Millennium Development Goal: A few insights. *Construction and building materials*, 40, 729-737.
- [5] Bazant, Z. P. (1979). Physical Model for Steel Corrosion in Sea Structures—Applications. *Journal of the Structural Division*, 105 (1), 1155-1166.
- [6] Bamforth, P. B. (2004). *Enhancing reinforced concrete durability Guidance on selecting measures for minimising the risk of corrosion of reinforcement in concrete*. Issue 61 of Technical report, Camberley: Concrete Society, 50-73.
- [7] Cong, S. and Poon, C. (2013). Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 37, 12-19.
- [8] Jennifer, K. L. Darwin, D. and Locke, C. E. (2000). *Evaluation of corrosion protection methods for reinforced concrete highway structures*. University of Kansas Center for Research, 58, 221.
- [9] Richardson, M. G. (2002). *Fundamentals of durable reinforced concrete*. London: Spon Press, 272.
- [10] Hansson, C. M. Poursae, A. and Jaffer, S. J. (2012). Corrosion of reinforcing bars in concrete. *The Masterbuilder*, 15 (3), 106-124.
- [11] Metha, P. K. and Monteiro, P. J. M. (2013). *Concrete: microstructure, properties and materials*. New York: McGraw-Hill Education, 684.
- [12] Chakradhara Rao, M. Bhattacharyya, S. K. and Barai, S. V. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and structures*, 44, 205-220.

- [13] Reddy, C. Ravi, K. Hymavathi, G. and Ramyasri, N. (2014). Study of corrosion of reinforced steel bars in recycled aggregate concrete with fly ash. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3 (11), 192-196.
- [14] Ameen, B. M. and Al-Numan, B (2021). Corrosion rate of reinforced concrete incorporating recycled concrete aggregates. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. London: IOP Publishing, 871.
- [15] Pour-Ghaz, M. Burkan Isgor, O. and Ghods, P. (2009). Quantitative interpretation of half-cell potential measurements in concrete structures. *Journal of materials in civil engineering*, 21 (9), 467-475.
- [16] Millard, S. G. Law, D. Bungey, J. H. and Cairns, J. (2001). Environmental influences on linear polarisation corrosion rate measurement in reinforced concrete. *Ndt & E International*, 34 (6), 409-417.
- [17] Zhao, Yuxi, Jianfeng Dong, Yingyao Wu, Hailong Wang, Xiangmin Li, and Qingfeng Xu. (2014). Steel corrosion and corrosion-induced cracking in recycled aggregate concrete. *Corrosion science*, 85, 241-250.
- [18] ASTM C39. (2012). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International, West Conshohocken.
- [19] BS EN-480-5. (1997). *Tests methods, determination of capillary absorption*. British Standards Institution.
- [20] ASTM C642. (2022). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. ASTM International, West Conshohocken.
- [21] ASTM C876-91. (1999). *Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete*. ASTM International, West Conshohocken.
- [22] Song, H-W. and Saraswathy, V. (2007). Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures-A. *International Journal of Electrochemical Science*, 2 (1), 1-28.
- [23] Khatib, Jamal M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and concrete research*, 35 (4), 763-769.
- [24] Pepe, M. (2015). *A Conceptual Model for Designing Recycled Aggregate Concrete for Structural Applications*. Doctoral Thesis. University of Salerno. Italy.
- [25] Panghal, H. and Kumar, A. (2023). 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.
- [26] Jian Li, Tan Wang, Jian Hong, Sumei Liu, Chao Zheng and Yin Chi. (2024). Axial compressive performance of low-carbon high-strength recycled aggregate concrete. *Low-carbon Materials and Green Construction*, 2 (25), 1-25.
- [27] Vintimilla, Carla. and Etxeberria, Miren. (2025). Durable structural recycled concrete for different exposure environments. *Materials*, 18 (3).
- [28] Zaharieva, R. Buyle-Bodin, F. Skoczylas, F. and Wirquin, E. (2003). Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25 (2), 223-232.
- [29] Kang, X. Tong, XY. Chen, RP. and Chen, YQ. (2024). Effect of ITZ on chloride ion transport in recycled aggregate concrete: Analytical and numerical studies. *Journal of Building Engineering*. 83.
- [30] Brand, AS. and Roesler, J. (2018). Interfacial transition zone of cement composites with recycled concrete aggregate of different moisture states. *Advances in Civil Engineering Materials*, 7 (1), 87-102.
- [31] Wang, Y. Liao, J. and Zhang, B. (2024). A review of chloride penetration of recycled concrete with enhancement treatment and service life prediction. *Materials*, 17 (6).
- [32] Bamshad, O. Hakamian, I. Shirvani, MF. Habibi, A. and Mahdikhani, M. (2025). Long-term corrosion behavior of reinforced recycled aggregate concrete under acid rain condition. *Case Studies in Construction Materials*, 27.
- [33] Nguyen, TD. Cherif, R. Mahieux, PY. Turcry, P. and Bastidas-Arteaga, E. (2025). A review on deterioration Mechanisms, durability prediction and enhancement techniques for recycled aggregate concrete. *Cleaner Materials*, 16.