

اثر مدول نرمی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی بر خواص مکانیکی و دوام ملات سیمانی

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

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

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

نویسنده مسئول : محمد مهدی رستگار (m.rastegar@basu.ac.ir)

یادداشت پژوهشی

چکیده

از آنجایی که تاکنون کمتر به اثر مدول نرمی سنگدانه‌ها بر عملکرد مکانیکی و به‌ویژه رفتار دوامی مواد پایه سیمانی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی پرداخته شده است، در این تحقیق تلاش شد نقش این پارامتر بر عملکرد ملات‌های ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی با مدول نرمی‌های متفاوت مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین منظور، شش طرح مخلوط ملات با نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۶ و با استفاده از سنگدانه‌های کاملاً طبیعی یا کاملاً بازیافتی تهیه شد. مدول نرمی سنگدانه‌های مصرفی در سه سطح ۲/۵، ۳ و ۳/۵ تنظیم گردید. سپس مجموعه‌ای از آزمایش‌های مکانیکی و دوامی شامل مقاومت فشاری، جذب آب جرمی، جذب آب موئینه، نفوذ و مهاجرت تسریع شده یون کلرید و اندازه‌گیری پتانسیل نیم‌پیل بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که در ملات‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، افزایش مدول نرمی منجر به بهبود مقاومت فشاری، کاهش احتمال خوردگی و ارتقای خواص دوامی از جمله جذب آب جرمی، جذب آب موئینه و نفوذ و مهاجرت تسریع شده یون کلر می‌شود. در مقابل، در ملات‌های دارای سنگدانه‌های طبیعی، روند تغییرات متفاوت بود؛ به‌طوری‌که با افزایش مدول نرمی، مقاومت فشاری کاهش و احتمال بروز خوردگی افزایش پیدا کرد. همچنین سایر شاخص‌های دوامی نظیر جذب آب جرمی، جذب آب موئینه و نفوذ و مهاجرت تسریع شده یون کلر نیز تضعیف شدند. به‌عنوان نمونه، در سن ۹۰ روز، با افزایش مدول نرمی از ۲/۵ به ۳/۵، مقاومت فشاری ملات‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی حدود ۲۰ درصد افزایش یافت، در حالی که این مقدار در ملات‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی حدود ۱۸ درصد کاهش نشان داد.

کلمات کلیدی

سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی، مدول نرمی، مقاومت فشاری، جذب آب موئینه، جذب آب جرمی، پتانسیل خوردگی، نفوذ و مهاجرت

تسریع شده

کاربرد سنگدانه‌های بازیافتی حاصل از بتن‌های تخریبی، نخستین بار پس از جنگ جهانی دوم در پروژه‌های عمرانی از جمله راه‌سازی و احداث سازه‌های مختلف مورد توجه قرار گرفت. با افزایش مصرف بتن و دیگر محصولات پایه سیمانی، بررسی آثار زیست‌محیطی چرخه‌ی تولید و ضرورت حفاظت از منابع طبیعی اهمیت ویژه‌ای یافته است (۱). تولید ضایعات جامد بتنی ناشی از فرآیندهایی نظیر نوسازی و بازسازی شهری، تخریب سازه‌های فرسوده و وقوع بلایای طبیعی نظیر زمین‌لرزه و رانش زمین، همواره به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت پسماندهای ساختمانی مطرح بوده است. در شرایط کنونی که جوامع به‌طور فزاینده‌ای بر بهینه‌سازی مصرف انرژی و صرفه‌جویی در بهره‌برداری از منابع طبیعی تأکید دارند، بهره‌گیری از سنگدانه‌های بازیافتی نه تنها ضرورتی حیاتی، بلکه راهبردی کلیدی در راستای توسعه‌ی پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی محسوب می‌شود (۲). بر اساس آمارهای اخیر، تقاضای جهانی جهت مصالح ساختمانی روندی صعودی را تجربه می‌کند؛ به‌گونه‌ای که در سال ۲۰۱۹ طی یک پژوهش پیش‌بینی شده است، میزان مصرف سالانه در سال ۲۰۱۷ تا پایان سال ۲۰۲۵ از ۴۵ به ۶۶ میلیارد تن افزایش یابد (۳). در این راستا، بهره‌گیری بهینه از سنگدانه‌های بازیافتی در پروژه‌های عمرانی می‌تواند ضمن تأمین بخشی از نیاز روزافزون به مصالح ساختمانی، نقش مؤثری در کاهش فشار بر منابع طبیعی و حفاظت از محیط‌زیست ایفا نماید (۳).

با این حال باید توجه داشت که به دلیل تداخل بیشتر موجود در سنگدانه‌های بازیافتی، میزان نفوذپذیری بتن افزایش می‌یابد. این ویژگی موجب می‌شود که عوامل مهاجم نظیر یون‌های کلرید، دی‌اکسید کربن و آب به سهولت از طریق شبکه منافذ به درون بتن نفوذ کنند و در نتیجه، دوام و عمر مفید بهره‌برداری سازه به طور قابل توجهی کاهش یابد (۴). علاوه بر این، جذب آب زیاد سنگدانه‌های بازیافتی در مخلوط بتن می‌تواند سبب تبخیر سریع آب در مراحل اولیه گیرش شود. این پدیده به طور مستقیم خطر ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی پلاستیک را افزایش و در نهایت دوام بتن سخت‌شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۵). با این وجود، تأثیر ویژگی‌های ذاتی سنگدانه‌های بازیافتی بر میزان جذب آب بتن‌های تولیدشده با این مصالح قابل چشم‌پوشی نیست و ارتقای کیفیت و افزایش چگالی سنگدانه‌های بازیافتی منجر به کاهش قابل توجه ظرفیت جذب آب در بتن نهایی می‌شود. در نتیجه، می‌توان یک رابطه معکوس نسبتاً خطی میان میزان جذب آب در بتن‌های بازیافتی و چگالی سنگدانه‌های بازیافتی مشاهده نمود (۳ و ۶). جذب آب در بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی عمدتاً از طریق پدیده موینگی رخ می‌دهد. موینگی فرآیندی است که در اثر اختلاف فشار میان فشار سطحی سیال در منافذ موین و فشار ناشی از نیروی گرانش ایجاد شده و موجب حرکت سیال تا رسیدن به حالت تعادل می‌شود. فشار موینگی با کاهش قطر منافذ افزایش می‌یابد و این موضوع به‌ویژه در ناحیه‌ی انتقالی بتن اهمیت بیشتری پیدا می‌کند (۷). ضعف موجود در این ناحیه در بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، موجب افزایش ریزترک‌های داخلی در مقایسه با بتن‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های طبیعی می‌شود. در این نوع بتن‌ها، وجود دو ناحیه انتقالی مرزی قابل تشخیص است: نخست، سطح تماس میان سنگدانه‌های قدیمی و ملات سخت‌شده قدیمی چسبیده به آن؛ دوم، سطح تماس میان سنگدانه‌های درشت بازیافتی و خمیر سیمان تازه. لذا حضور این دو ناحیه انتقالی به کاهش بیشتر خواص مکانیکی و فیزیکی بتن منجر می‌شود. ساختار ناحیه انتقالی در بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی غالباً از هیدرات‌های سست و متخلخل تشکیل شده است؛ موضوعی که از طریق مشاهدات میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی تأیید شده است (۸-۱۲).

از دیگر عوامل مؤثر بر خواص بتن، مدول نرمی مصالح سنگی است که به‌عنوان شاخصی کلیدی در طراحی مخلوط بتن شناخته می‌شود. مقدار بهینه این پارامتر بسته به نوع پروژه، نسبت آب به سیمان و شرایط محیطی تعیین می‌گردد. تغییرات مدول نرمی حتی در محدوده‌های کوچک می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر اسلامپ، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و دوام بتن داشته باشد. تاکنون مطالعات محدودی در زمینه اثر مدول نرمی بر خواص محصولات پایه سیمانی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی انجام شده است؛ با این حال، نتایج موجود نشان می‌دهد که کاهش مدول نرمی با افت متناظر در مقاومت فشاری همراه است. بر همین اساس، پژوهشگران استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی با مدول نرمی کم را توصیه نکرده‌اند (۹-۱۰). علاوه بر این، فقدان مطالعات منسجم در خصوص اثر این شاخص بر دوام محصولات پایه سیمانی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی احساس می‌شود.

یکی از روش‌های بسیار رایج غیرمخرب جهت پیش‌بینی خوردگی آرماتور در بتن که از دهه‌ی ۱۹۷۰ تاکنون از آن استفاده شده است، روش نیم‌پیل است. اصول این روش بر اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی نسبت به یک الکتروود مرجع مانند الکتروود کالومل اشباع، یا الکتروود مس-سولفات مس و یا الکتروود نقره-کلرید نقره استوار است (۱۳). در پژوهشی که توسط Pour-Ghaz و همکاران (۱۴) انجام شد، پتانسیل نیم‌پیل به عنوان ابزاری جهت 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.

با توجه به محدود بودن مطالعات پیشین در خصوص بررسی تأثیر مدول نرمی سنگدانه بر خواص مکانیکی و بویژه دوامی محصولات پایه سیمانی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی عملکرد ملات‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی با مدول نرمی‌های متفاوت (از ۲/۵ تا ۳/۵) از طریق مقایسه‌ی شاخصه‌هایی نظیر مقاومت فشاری، جذب آب موئینه، جذب آب جرمی و پتانسیل نیم‌پیل طرح مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌ی بازیافتی و طبیعی است. 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 برخی از نتایج آن تاکنون منتشر شده (۱۵) و برخی دیگر در آینده منتشر خواهد شد.

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 شکسته‌ی کوهی بود. مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در جدول ۳ قابل مشاهده است. ضمناً دانه‌بندی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی با مدول نرمی‌های ۲/۵، ۳ و ۳/۵ 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 آورد و حین ساخت طرح‌ها، سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی را مطابق با شکل ۲ و با مدول نرمی‌های متفاوت برابر با ۲/۵، ۳ و ۳/۵ استفاده نمودند. هم‌چنین آب مصرفی در ساخت طرح‌های مخلوط، آب شرب شهر کبودراهنک 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	
۲۹۱۰	۱۳۴	۱۹۵	۲۰۵	۲۸۸	۴۱۱	۰/۰۸

جدول ۲: مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی در پژوهش

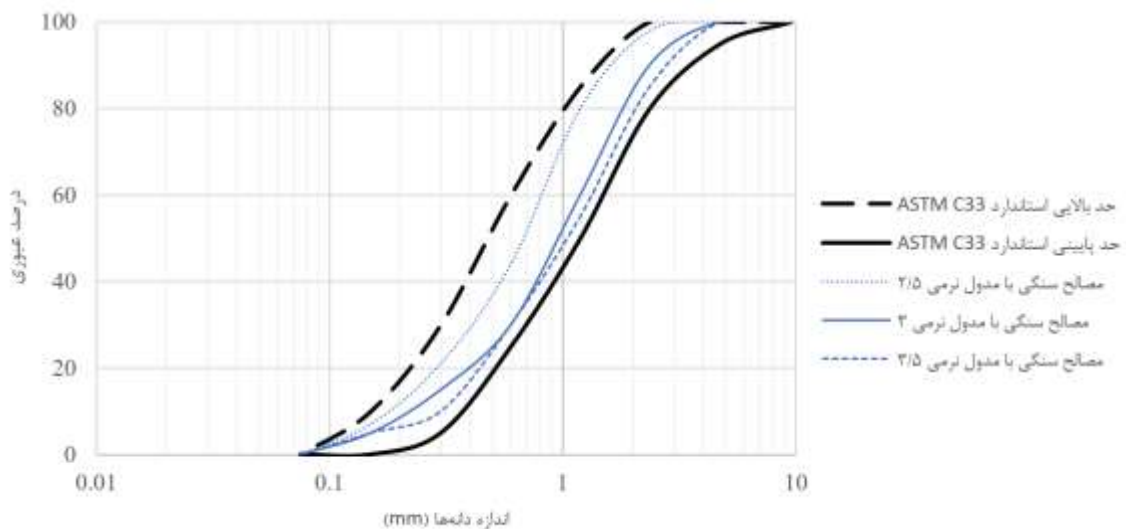
LOI	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
۲/۱۱	۰/۴۹	۰/۶۹	۲/۱۶	۱/۵۵	۶۲/۹۵	۲/۰۳	۴/۴۵	۲۱/۲۷

جدول ۳: مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی در طرح مخلوط‌های مورد بررسی

مشخصه‌ها	ماسه طبیعی	ماسه بازیافتی
وزن مخصوص ظاهری اشباع با سطح خشک (gr/cm^3)	۲/۶	۲/۴۲
جذب آب (درصد)	۳/۵۳	۸/۸۹
مدول نرمی	۳/۵ - ۳ - ۲/۵	۳/۵ - ۳ - ۲/۵



شکل ۱: تبدیل آزمون‌های بتنی به سنگدانه از طریق خردایش



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

۲-۲- مشخصات طرح مخلوط

در این مطالعه از شش طرح مخلوط حاوی مقادیر صفر و ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی و نیز سه مدول نرمی متفاوت (۲/۵، ۳ و ۳/۵) استفاده شد که در جدول ۴ نام‌گذاری این طرح‌های مخلوط و جزئیات اجزای سازنده‌ی آن ارائه شده است.

جدول ۴: جزئیات طرح مخلوط‌های مورد بررسی در این پژوهش

نام طرح	سهم سنگدانه (%)		نسبت آب به		سهم اجزا (kg/m ³)		
	طبیعی	بازیافتی	سیمان	سیمان	آب آزاد	ماسه طبیعی	ماسه بازیافتی
N0-R100-FM2.5	صفر	۱۰۰	۰/۶	۶۹۰	۴۱۴	صفر	۱۱۰۰
N100-R0-FM2.5	۱۰۰	صفر	۰/۶	۶۹۰	۴۱۴	۱۲۴۶	صفر
N0-R100-FM3	صفر	۱۰۰	۰/۶	۶۹۰	۴۱۴	صفر	۱۱۰۰
N100-R0-FM3	۱۰۰	صفر	۰/۶	۶۹۰	۴۱۴	۱۲۴۶	صفر
N0-R100-FM3.5	صفر	۱۰۰	۰/۶	۶۹۰	۴۱۴	صفر	۱۱۰۰
N100-R0-FM3.5	۱۰۰	صفر	۰/۶	۶۹۰	۴۱۴	۱۲۴۶	صفر

- علت استفاده از نسبت آب به سیمان نسبتاً بالا (برابر با ۰/۶ در همه طرح مخلوط‌ها)، افزایش احتمال وقوع خوردگی در مدت زمان نسبتاً کوتاه این پژوهش بوده است.

- بدیهی است با توجه به تفاوت معنادر در جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی در این پژوهش، در طرح‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی مقدار آب اختلاط به میزان قابل ملاحظه‌ای از طرح‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی بیشتر بوده است.

۲-۳- آزمایش‌های انجام شده

در این پژوهش آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب موئینه، جذب آب جرمی، نفوذ و مهاجرت تسریع‌شده یون کلرید و پتانسیل نیم‌پیل بر روی کلیه 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 (۱۶)

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 آزمایش شدند و نتیجه‌ی گزارش شده، میانگین قرائت‌های انجام‌شده در هر طرح و سن بود.

۲-۳-۲- آزمایش جذب آب موئینه (۱۷)

برای انجام این آزمایش از قالب‌های مکعبی با ابعاد ۵ سانتیمتر استفاده شد. اگرچه بر اساس روش استاندارد، استفاده از نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتیمتری مجاز است، اما از آنجا که پژوهش حاضر بر روی ملات (نه بتن) انجام گرفته است، از نمونه‌های مکعبی ۵ سانتیمتری بهره گرفته شد. ضمناً 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 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 با برس سیمی مضرس 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.

$$i = \frac{m_t - m_o}{A} \quad (۱)$$

که در آن، در هر یک از زمان‌های انجام آزمایش، i میزان آب جذب‌شده در واحد سطح بر حسب gr/mm^2 ، m_t وزن آزمونه بر حسب گرم، m_0 وزن آزمونه‌ی خشک‌شده در آون بر حسب گرم 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).

$$i = C + S\sqrt{t} \quad (2)$$

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



شکل ۳: آماده‌سازی آزمونه‌ها جهت انجام آزمایش جذب آب موئینه

۲-۳-۳ آزمایش جذب آب جرمی (۱۸)

آزمایش جذب آب جرمی نیز مانند آزمایش‌های مقاومت فشاری و جذب آب موئینه در سنین ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. نتایج گزارش شده در هر سن از هر طرح، میانگین سه آزمونه است. پس از رسیدن به سنین مقرر، آزمونه‌هایی که برای آزمایش جذب آب جرمی 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، اندازه‌گیری و ثبت شد. بعد از اندازه‌گیری وزن اولیه، آزمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه‌ی 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 جرمی از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌گردد.

$$W = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100 \quad (3)$$

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

۲-۳-۴ آزمایش نفوذ تسریع‌شده یون کلر (۱۹)

این آزمایش برای سنجش مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلرید انجام می‌شود. به این منظور، آزمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر تهیه و از آن دیسک‌هایی با ضخامت حدود ۵۰ میلی‌متر برش داده می‌شوند. پس از اشباع در محیط خلأ (قرار گرفته

در دسیکاتور، نمونه در سلول آزمایش که یک طرف نمونه در آن در معرض محلول ۳ درصد NaCl و طرف دیگر نیز در محلول ۰/۳ مولار NaOH قرار می‌گیرد. در طول آزمایش نمونه در معرض اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت با جریان مستقیم به مدت ۶ ساعت قرار می‌شود و میزان جریان عبوری در فواصل زمانی مشخص ثبت می‌گردد. بار الکتریکی کل (کولمب) از انتگرال جریان-زمان محاسبه شده و میزان نفوذپذیری کلرید بر اساس مقادیر استاندارد طبقه‌بندی می‌شود. به عنوان مثال، در صورتی که میزان بار الکتریکی عبوری بیش از ۴۰۰۰ کولمب باشد، می‌توان میزان مقاومت در برابر نفوذ کلرید را بسیار «ضعیف» قلمداد نمود و در صورتی که میزان بار الکتریکی عبوری کمتر از ۱۰۰۰ کولمب باشد، می‌توان میزان مقاومت در برابر نفوذ کلرید را «خوب» قلمداد نمود. لازم به ذکر است که در هر سن و برای هر طرح مخلوط، سه آزمون آزمایش شد.

۲-۳-۵ آزمایش مهاجرت تسریع شده یون کلر (۲۰)

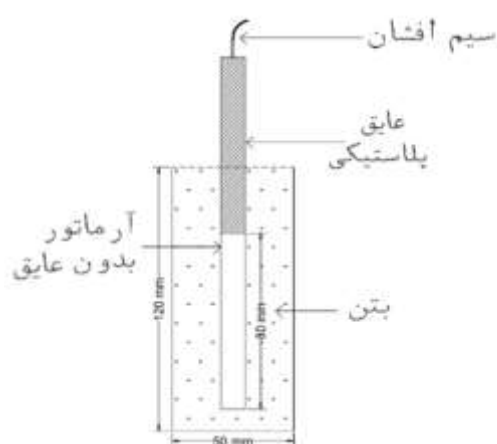
این آزمایش برای تعیین ضریب مهاجرت یون کلرید تحت میدان الکتریکی انجام می‌شود. آزمون‌های دیسکی به ضخامت حدود ۵۰ میلی‌متر که مشابه با روش آماده‌سازی برای آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلر به دست آمده بود، تهیه و پس از اشباع در محیط خلأ (قرار گرفته در دسیکاتور)، بین دو محفظه حاوی محلول ۱۰ درصد NaCl (آندی) و ۰/۳ نرمال NaOH (کاتدی) قرار می‌گیرند. در این آزمایش ولتاژ مناسب، (برابر با میزانی که منجر به افزایش قابل ملاحظه‌ای در دمای آزمون نشود) اعمال شده و آزمایش به مدت حدود ۱۸ ساعت ادامه می‌یابد. پس از پایان آزمایش، نمونه شکافته شده و سطح شکست با محلول $AgNO_3$ اسپری می‌شود تا عمق نفوذ کلرید مشخص گردد. در نهایت میزان نرخ نفوذ کلرید با استفاده از رابطه (۴) نیز به آن اشاره شده، بدست می‌آید.

$$D_{nssm} = \frac{X_d}{Vt} \quad (4)$$

که در آن، D_{nssm} نرخ انتقال یون کلرید بر حسب میلی‌متر بر ولت ساعت، X_d میانگین عمق نفوذ یون کلرید بر حسب میلی‌متر، V اختلاف پتانسیل اعمال شده در طول آزمایش بر حسب ولت و t مدت زمان آزمایش بر حسب ساعت است. لازم به ذکر است که در هر سن و برای هر طرح مخلوط، سه آزمون آزمایش شد.

۲-۳-۶ آزمایش پتانسیل نیم پیل (۲۱)

جهت آماده‌سازی آزمون‌ها برای انجام این آزمایش، مطابق شکل ۴ از قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متر استفاده شده است. در مرکز هر قالب استوانه‌ای، آرماتور بدون آج زنگ‌زدایی شده به قطر ۱۰ میلی‌متر و طول ۱۶۰ میلی‌متر قرار داده شد و پوشش روی آرماتور از هر طرف به میزان یکسان رعایت شد. ۸۰ میلی‌متر از طول هر آرماتور توسط عایق حرارتی جهت جلوگیری از خوردگی پوشانده شده و ۸۰ میلی‌متر دیگر بدون محافظ داخل ملات مدفون گردیده تا در معرض خوردگی قرار داشته باشد. به منظور اندازه‌گیری پتانسیل آرماتورهای مدفون توسط مولتی‌متر، یک سیم مسی افشان ۱×۱ میلی‌متر مربع مطابق شکل ۴ به انتهای هر آرماتور متصل گردید.



شکل ۴: آماده‌سازی آزمون‌های حاوی آرماتور جهت آزمایش نیم پیل

پس از ساخت مخلوطها و آماده‌سازی آزمون‌ها جهت انجام آزمایش نیم‌پیل، به منظور تشکیل لایه‌ی محافظ روی آرماتورها، این آزمون‌ها تا سن ۲۸ روز در محلول آب و آهک اشباع نگهداری شدند و در پایان دوره ۲۸ روزه که آزمون‌ها همچنان در محلول آب و آهک بودند، اولین سری از آزمایش نیم‌پیل روی آزمون‌ها انجام شد. پس از گذشت ۲۸ روز و خروج آزمون‌ها از محلول آب و آهک اشباع، چرخه‌های مورد نظر آغاز شد. این آزمایش شامل چهار چرخه‌ی دو هفته‌ای که هر چرخه، متشکل از یک هفته قرارگیری در هوای آزاد و یک هفته قرارگیری در محلول ۱۰ درصد سدیم کلرید (محلول شبیه‌سازی خوردگی تسریع‌شده) بود. در پایان چرخه‌ی تر و با استفاده از الکتروود نقره-کلرید نقره (Ag/AgCl)، به عنوان الکتروود مرجع، اختلاف پتانسیل بین الکتروود مرجع و الکتروود اصلی ثبت شد و نتایج ارائه شده میانگین چهار آزمون از هر طرح است. در شکل ۵، حضور آزمون‌ها در محلول ۱۰ درصد آب و نمک را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۵ و براساس محدوده مشخص شده در استاندارد ASTM C876 (۲۱)، برای الکتروود مرجع مس / سولفات مس و معادل آن برای الکتروودهای نقره-کلرید نقره و کالومل اشباع (۲۲)، با توجه اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده، وضعیت آرماتور از نظر خوردگی تخمین زده می‌شود.

جدول ۵: محدوده‌ی پتانسیل خوردگی و احتمال وجود خوردگی برای الکتروودهای مختلف

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



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

۳- نتایج آزمایش‌ها

در این بخش، نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب مؤئینه، جذب آب جرمی و پتانسیل نیم‌پیل ارائه و تفسیر می‌شوند. این داده‌ها در راستای ارزیابی تأثیر تغییرات مدول نرمی سنگدانه‌ی طبیعی و بازیافتی بر خواص مقاومتی و دوامی محصولات پایه سیمانی ساخته شده از آن‌ها، به‌ویژه در برابر خوردگی آرماتور، تحلیل شده‌اند.

۳-۱- مقاومت فشاری

مقادیر مقاومت فشاری مخلوط‌ها در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶: مقاومت فشاری مخلوط‌ها

نام طرح	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	
	۲۸ روزه	۹۰ روزه
N0-R100-FM2/5	۳۳/۶	۳۶/۸
N0-R100-FM3	۳۴/۷	۳۸
N0-R100-FM3/5	۳۹	۴۳/۹
N100-R0-FM2/5	۴۷	۵۷/۴
N100-R0-FM3	۴۵/۲	۵۵/۳
N100-R0-FM3/5	۴۳/۳	۴۶/۹

همانطور که انتظار می‌رفت، نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد که در تمامی طرح‌های مخلوط، با افزایش سن نمونه‌ها از ۲۸ به ۹۰ روز، مقاومت فشاری افزایش یافته است. این افزایش مقاومت عمدتاً ناشی از تداوم واکنش‌های هیدراته‌شدن، تشکیل محصولات بیشتر C-S-H و کاهش تدریجی تخلخل خمیر سیمان است که منجر به تراکم ریزساختار ملات می‌شود (۲۴-۲۳). نتایج همچنین نشان داد که اثر مدول نرمی مصالح سنگی بر مقاومت فشاری به نوع سنگدانه مصرفی وابسته است. در ملات‌های حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی، با کاهش مدول نرمی (ریزبافت‌شدن سنگدانه‌ها)، مقاومت فشاری کاهش یافته است؛ در حالی که در ملات‌های ساخته‌شده با ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های طبیعی، کاهش مدول نرمی منجر به افزایش مقاومت فشاری شده است. این رفتار متضاد بیانگر نقش تعیین‌کننده‌ی ویژگی‌های ریزساختاری سنگدانه‌ها و ناحیه‌ی انتقالی در عملکرد مکانیکی ملات‌هاست. در ملات‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، کاهش مدول نرمی باعث افزایش سطح ویژه سنگدانه‌ها و در نتیجه افزایش سهم نواحی انتقالی ضعیف می‌شود. لذا به دلیل وجود ملات چسبیده قدیمی و شکل‌گیری دو ناحیه انتقال (قدیمی و جدید)، ریزبافت‌شدن سنگدانه‌های بازیافتی منجر به افزایش تعداد نواحی انتقال با کیفیت پایین و تضعیف پیوستگی بین آن‌ها می‌شود. این موضوع موجب تمرکز تنش، تسهیل آغاز ریزترک‌ها و در نهایت کاهش مقاومت فشاری ملات می‌گردد (۲۶-۲۵). Xiao و همکاران نیز گزارش کرده‌اند که وجود ITZ دوگانه یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش مقاومت فشاری بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به بتن‌های معمولی است (۸). به عنوان مثال، در سن ۹۰ روز، در ملات‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های بازیافتی، ملات‌های دارای مدول نرمی ۳ و ۲/۵ در مقایسه با ملات با مدول نرمی ۳/۵، به ترتیب حدود ۱۴ و ۱۶ درصد کاهش مقاومت فشاری نشان داده‌اند. مشابه این روند در سن ۲۸ روز نیز مشاهده شده است که بیانگر پایداری اثر مدول نرمی بر رفتار مکانیکی این ملات‌ها در طول زمان است. در مقابل، در ملات‌های حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های طبیعی، کاهش مدول نرمی منجر به افزایش مقاومت فشاری شده است. ریزبافت‌شدن سنگدانه‌های طبیعی باعث افزایش سطح تماس سنگدانه و خمیر سیمان، بهبود تراکم خمیر در ناحیه‌ی انتقالی و توزیع یکنواخت‌تر تنش در ریزساختار ملات می‌شود. این امر از تمرکز تنش در اطراف سنگدانه‌ها کاسته و ظرفیت باربری ملات را افزایش می‌دهد (۲۶). اسکریونر و همکاران (۲۷) با ارائه‌ی مبانی بنیادی ساختار ناحیه‌ی انتقالی، این ناحیه را به دلیل تخلخل بالا و نسبت آب به سیمان مؤثر بیشتر، ضعیف‌ترین حلقه در ریزساختار بتن معرفی کرده‌اند. از این رو، هرگونه بهبود در کیفیت این ناحیه می‌تواند تأثیر مستقیمی بر عملکرد مکانیکی بتن داشته باشد. در پژوهش حاضر نیز، در سن ۹۰ روز، ملات‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های طبیعی و مدول نرمی ۳ و ۲/۵ نسبت به ملات‌های دارای مدول نرمی ۳/۵، به ترتیب حدود ۱۸ و ۲۲ درصد افزایش مقاومت فشاری نشان داده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که در سنگدانه‌های طبیعی، اثر مثبت بهبود ITZ بر افزایش سطح ویژه غالب بوده و منجر به ارتقای عملکرد مکانیکی ملات‌ها شده است. علاوه بر این، در تمامی سطوح مدول نرمی و در هر دو سن ۲۸ و ۹۰ روز، مقاومت فشاری ملات‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی کمتر از ملات‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی بوده است. این موضوع با نتایج آزمایش‌های دوام (جذب آب مویینه، جذب آب جرمی و پتانسیل نیم‌پیل) در این پژوهش هم‌خوانی دارد و نشان‌دهنده‌ی ارتباط مستقیم بین کیفیت ریزساختار، نفوذپذیری و عملکرد مکانیکی ملات‌ها است (۲۴ و ۲۵ و ۲۸).

۳-۲- جذب آب مویینه

مقادیر ضریب جذب آب مویینه‌ی مخلوط‌ها در جدول ۷ ارائه شده است.

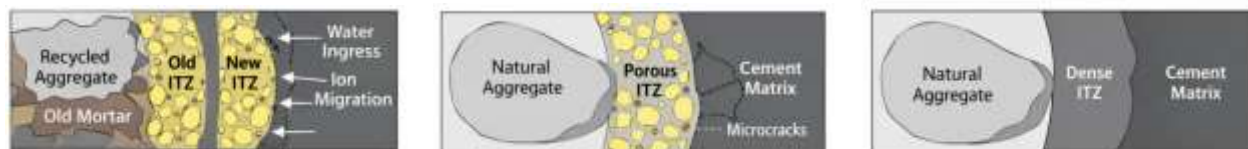
جدول ۷: ضریب جذب آب مویینه‌ی مخلوط‌ها

نام طرح	ضریب جذب آب مویینه بر حسب $\text{mm/min}^{0.5}$	
	۲۸ روزه	۹۰ روزه
N0-R100-FM2/5	۰/۱۸	۰/۱۰۵
N0-R100-FM3	۰/۱۶۳	۰/۰۶۹
N0-R100-FM3/5	۰/۱۵۸	۰/۰۵۶
N100-R0-FM2/5	۰/۱۳۶	۰/۰۹
N100-R0-FM3	۰/۱۵	۰/۰۴۴
N100-R0-FM3/5	۰/۱۵۴	۰/۰۳۹

نتایج جذب آب مویینه نشان می‌دهد که در تمامی طرح‌های مخلوط مورد بررسی، با افزایش سن نمونه از ۲۸ به ۹۰ روز، ضریب جذب آب مویینه کاهش یافته که البته این موضوع کاملاً قابل انتظار بوده است. این رفتار به تکمیل واکنش‌های هیدراته‌شدن و کاهش پیوستگی منافذ مویینه در خمیر سیمان هیدراته مرتبط است، زیرا با افزایش سن هیدراته‌شدن، محصولات C-S-H بیشتر می‌شوند و مسیرهای مویینه در خمیر سیمان بسته‌تر می‌گردند که نفوذ آب را محدود می‌کند (۲۹).

علاوه بر این، اثر مدول نرمی مصالح سنگی بر ضریب جذب آب مویینه همانند نتایج مرتبط با مقاومت فشاری طرح‌های مورد بررسی به نوع سنگدانه وابسته است. در ملات‌های حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی، با افزایش مدول نرمی (یعنی درشت‌تر شدن سنگدانه‌ها)، ضریب جذب آب مویینه کاهش یافته است؛ در حالی که در ملات‌های حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های طبیعی، افزایش مدول نرمی موجبات افزایش ضریب جذب آب مویینه را فراهم آورده است. این تفاوت رفتاری ناشی از تفاوت‌های ذاتی در پراکندگی منافذ و نحوه اتصال آب به ساختار داخلی سنگدانه‌ها و نواحی انتقالی است. در ملات‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، درشت‌تر شدن اندازه دانه‌ها باعث کاهش نسبت سطح به حجم و بهبود تراکم ناحیه‌ی انتقالی می‌شود، که منجر به کاهش تعداد و اندازه منافذ مؤثر مویینه در خمیر سیمان می‌گردد. این پدیده با نتایج تحقیقات اخیر نیز هم‌خوان است، که نشان می‌دهند پارامترهایی مانند پیوستگی منافذ، اندازه و حجم منفذ مؤثر نقش تعیین‌کننده‌ای در جذب آب مویینه دارند و بهبود این پارامترها منجر به کاهش جذب آب مویینه و افزایش دوام می‌شود. ضمن اینکه در مطالعاتی که از تغییرات ساختار منافذ و مدل‌سازی جذب آب مویینه با ابزارهایی نظیر تعیین میزان تخلخل با تزریق جیوه و مطالعه تصاویر میکروسکوپی بهره برده‌اند، کاهش پیوستگی منافذ موجب افزایش ضریب جذب آب گزارش شده است (۳۰). به‌عنوان مثال، در سن ۲۸ روز، در ملات‌های حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی، نمونه‌های دارای مدول نرمی ۳ و ۲/۵ در مقایسه با نمونه‌های دارای مدول نرمی ۳/۵، به‌ترتیب با حدود ۳ و ۱۴ درصد کاهش ضریب جذب آب مویینه مواجه بوده‌اند. این نتیجه با آنچه در چندین مطالعه‌ی تجربی مطابقت دارد؛ زیرا کاهش پیوستگی منافذ و افزایش پیچ‌وخم مسیرهای مویینه، سبب کاهش نرخ نفوذ آب از طریق مویرگ‌ها می‌شود (۳۰). در مقابل، در ملات‌های حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های طبیعی، افزایش مدول نرمی موجب افزایش ضریب جذب آب مویینه شده است. این رفتار را می‌توان به افزایش مقدار منافذ مؤثر و احتمال افزایش مسیرهای پیوسته‌ی مویینه نسبت داد، زیرا در سنگدانه‌های طبیعی درشت‌تر، کاهش تماس خمیر - سنگدانه و افزایش اندازه منافذ منجر به نفوذ سریع‌تر آب از طریق شبکه‌ی منافذ می‌شود. این پدیده با مشاهدات مطالعات اخیر هماهنگ است، که نشان داده‌اند ساختار منافذ تأثیر عمیقی بر ضریب جذب آب مویینه داشته و افزایش پیوستگی منافذ باعث افزایش جذب آب و افت دوام می‌گردد (۳۰). به‌طور کلی، در تمامی سطوح مدول نرمی و در هر دو سن ۲۸ و ۹۰ روز، مقدار ضریب جذب آب مویینه در ملات‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی بیشتر از ملات‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی بوده است، که نشان‌دهنده‌ی نفوذپذیری بیشتر و وجود شبکه‌های مویینه‌ی بازتر در نمونه‌های بازیافتی است و این امر با کاهش دوام مصالح همراه می‌باشد (۲۹-۳۰). این رفتار کلی را می‌توان به اختلاف در ریزساختار منافذ بین سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی نسبت داد، زیرا وجود ملات چسبیده قدیمی و ترک‌های ریز در سنگدانه‌های بازیافتی منجر به افزایش تعداد منافذ مویینه و

مسیرهای پیوسته نفوذ آب می‌شود که با افزایش سن نیز به‌طور کامل بسته نمی‌شود، هرچند روند بسته‌شدن با هیدراته‌شدن ادامه دارد (۲۹). در شکل ۶، به صورت شماتیک ناحیه انتقالی در ملات‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی نمایش داده شده است. در این تصاویر (شکل پ)، وجود دو ناحیه انتقالی قدیمی و جدید در ملات‌های بازیافتی با مدول نرمی پایین، که موجب افزایش پیوستگی حفرات، نفوذ آب و مهاجرت یون‌ها می‌گردد، مشهور است.



الف) ناحیه انتقالی در ملات با سنگدانه طبیعی با مدول نرمی پایین
ب) ناحیه انتقالی در ملات با سنگدانه طبیعی با مدول نرمی بالا
پ) ناحیه انتقالی در ملات با سنگدانه بازیافتی با مدول نرمی پایین
شکل ۶: تصاویر شماتیک ناحیه انتقالی در ملات‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی

۳-۳- جذب آب جرمی

مقادیر جذب آب جرمی مخلوط‌ها در جدول ۸ گزارش شده است.

جدول ۸: جذب آب جرمی مخلوط‌ها

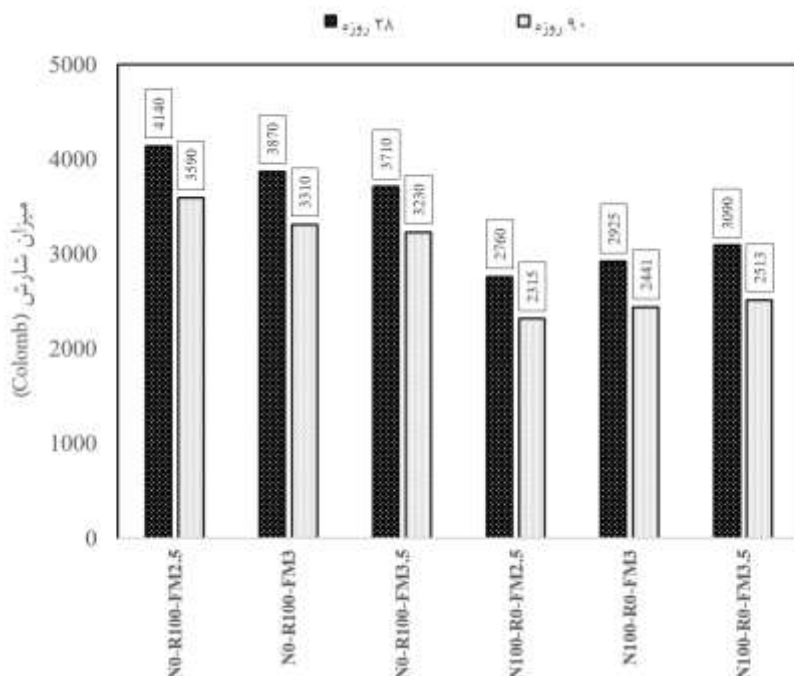
نام طرح	جذب آب جرمی (درصد)	
	۲۸ روزه	۹۰ روزه
N0-R100-FM2/5	۶/۹۵	۶/۴۳
N0-R100-FM3	۶/۵۱	۶/۱
N0-R100-FM3/5	۵/۵۹	۵/۴۱
N100-R0-FM2/5	۴/۴۹	۴/۱۵
N100-R0-FM3	۴/۷۵	۴/۵۵
N100-R0-FM3/5	۵/۱	۴/۹

همانطور که انتظار می‌رفت نتایج آزمایش جذب آب جرمی نیز نشان می‌دهد که در تمامی مخلوط‌ها، با افزایش سن نمونه‌ها از ۲۸ به ۹۰ روز، میزان جذب آب جرمی کاهش یافته است. علل وقوع این رخداد مشابه همان مواردی است که در بخش‌های قبل به آن اشاره شد. ضمناً علاوه بر اثر سن، مشاهده شد که همانند نتایج آزمایش‌های صورت گرفته در بخش‌های قبل، اثر مدول نرمی مصالح سنگی بر جذب آب جرمی بستگی به نوع سنگدانه دارد. در ملات‌های حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی، با افزایش مدول نرمی (درشت‌تر شدن سنگدانه‌ها)، میزان جذب آب جرمی کاهش یافته است؛ در حالی که در ملات‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی، افزایش مدول نرمی باعث افزایش جذب آب جرمی شده است. این تفاوت رفتاری را می‌توان از منظر تفاوت در ریزساختار و توزیع منافذ بین سنگدانه و خمیر سیمان تحلیل کرد. در ملات‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، درشت‌تر شدن سنگدانه‌ها باعث کاهش سطح ویژه و سهم نواحی انتقال ضعیف می‌شود. سنگدانه‌های بازیافتی به دلیل وجود ملات چسبیده قدیمی، معمولاً دارای تخلخل و شبکه‌های منافذ باز بیشتری هستند. با افزایش مدول نرمی، تعداد این نواحی انتقالی ضعیف در واحد حجم کاهش یافته و فرایند بسته شدن منافذ بزرگ‌تر در خمیر سیمان تسریع می‌شود. این امر منجر به کاهش مسیرهای پیوسته برای نفوذ آب و در نتیجه کاهش جذب آب جرمی می‌گردد. چنین رفتاری در مطالعات اخیر نیز تأکید شده است که افزایش حجم منافذ و تخلخل وابسته به سنگدانه بازیافتی موجب افزایش جذب آب در بتن می‌شود (۲۹ و ۳۱). در مقابل، در ملات‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی، درشت‌تر شدن سنگدانه‌ها به افزایش اندازه منافذ مؤثر و کاهش نسبت تماس سنگدانه-خمیر منجر می‌شود. این تغییرات پیرامون ناحیه ITZ می‌تواند موجب افزایش مسیرهای نفوذ آب در سطح بزرگ‌تر سنگدانه‌ها گردد، که در نهایت میزان جذب آب جرمی را افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر، در سنگدانه طبیعی، درشت‌تر شدن باعث ایجاد منافذ بزرگ‌تر و پیوسته‌تر در ساختار می‌شود که به افزایش جذب آب جرمی منجر می‌گردد (۳۱). به عنوان مثال، در سن ۹۰

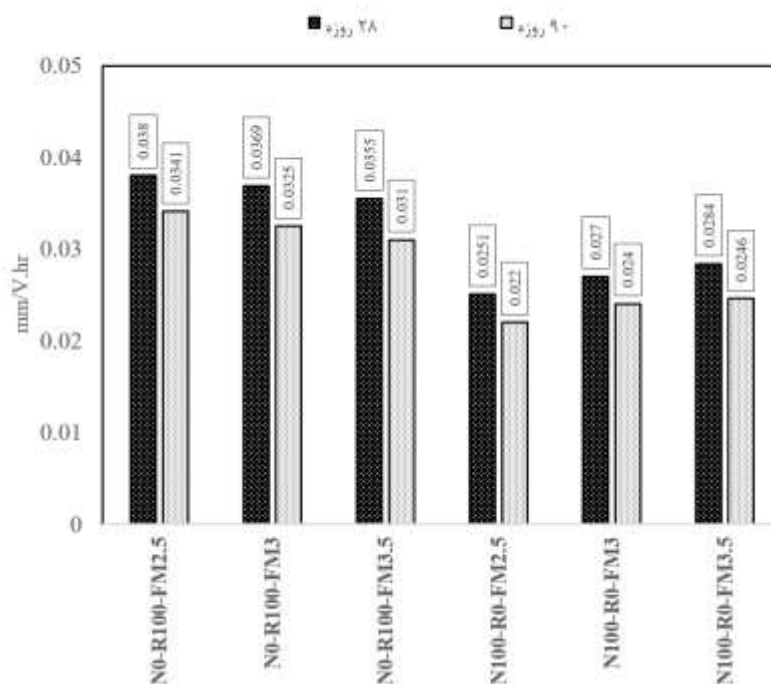
روز، در ملات‌های ساخته‌شده با ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی، نمونه‌های دارای مدول نرمی ۳ و ۲/۵ نسبت به نمونه‌های دارای مدول نرمی ۳/۵ به‌ترتیب حدود ۱۳ و ۱۹ درصد افزایش جذب آب جرمی نشان داده‌اند. این کاهش حاکی از آن است که درشت‌تر شدن سنگدانه‌های بازیافتی به‌طور قابل‌توجهی ریزساختار منافذ را بسته‌تر کرده است. در همین سن، در ملات‌های حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های طبیعی، نمونه‌های دارای مدول نرمی ۳ و ۲/۵ نسبت به مدول نرمی ۳/۵ به‌ترتیب حدود ۷ و ۱۵ درصد کاهش در جذب آب جرمی مشاهده شده است، که نشان می‌دهد رفتار نفوذپذیری در سنگدانه طبیعی نیز تابعی از توزیع منافذ و تعامل ITZ است، اگرچه الگوی آن با سنگدانه‌های بازیافتی متفاوت می‌باشد (۳۱). به‌طور کلی، در تمامی سطوح مدول نرمی و در دو سن ۲۸ و ۹۰ روز، میزان جذب آب جرمی در ملات‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی بیشتر از ملات‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی بوده است، که نشان‌دهنده نفوذپذیری بیشتر و ساختار منافذ بازتر در نمونه‌های بازیافتی است. این یافته‌ها با مشاهدات مشابه در تحقیقات پیشین مبنی بر این که بتن‌های حاوی مصالح بازیافتی به دلیل تخلخل بیشتر و پیوستگی ضعیف‌تر ITZ نسبت به بتن‌های طبیعی جذب آب بیشتری نشان می‌دهند، مطابقت دارد (۲۹ و ۳۱). این رفتار کلی نشان می‌دهد که ساختار منافذ، میزان تخلخل و کیفیت ITZ عوامل کلیدی در تعیین جذب آب جرمی ملات‌های سیمانی هستند و تغییر در مدول نرمی مصالح سنگی می‌تواند این عوامل را به‌طور معناداری تحت تأثیر قرار دهد.

۳-۴- نفوذ و مهاجرت تسریع‌شده یون کلر

نتایج مربوط به آزمایش‌های نفوذ و مهاجرت تسریع‌شده برای کلیه طرح‌های مورد بررسی در شکل ۷ ارائه شده است. نتایج این آزمایش‌ها همانند سایر نتایج دوامی انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهد که میزان نفوذ و مهاجرت تسریع‌شده یون کلر در ملات‌ها به‌طور معناداری تحت تأثیر نوع سنگدانه و مدول نرمی آن‌ها قرار دارد. به عبارت دیگر در بین کلیه طرح‌ها، طرح حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌ی طبیعی با کمترین میزان مدول نرمی (N100-R0-FM2.5) بهترین عملکرد (مطابق با رده‌بندی تعریف شده در استاندارد ASTM C1202 در رده متوسط) و طرح حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی با کمترین میزان مدول نرمی (N0-R100-FM2.5) نیز بدترین عملکرد را به خود اختصاص داده است (نزدیک به رده ضعیف در طبقه‌بندی استاندارد یادشده).



الف) نتایج مرتبط با آزمایش نفوذ تسریع‌شده یون کلر (RCPT)



ب) نتایج مرتبط با آزمایش مهاجرت تسریع شده یون کلر (RCMT)
 شکل ۷: نتایج آزمایش‌های نفوذ و مهاجرت تسریع‌شده یون کلر برای طرح‌های مخلوط مورد بررسی

۳-۵- پتانسیل نیم‌پیل

نتایج مربوط به آزمایش نیم‌پیل در قالب جدول ۹ و شکل ۸ ارائه شده است.

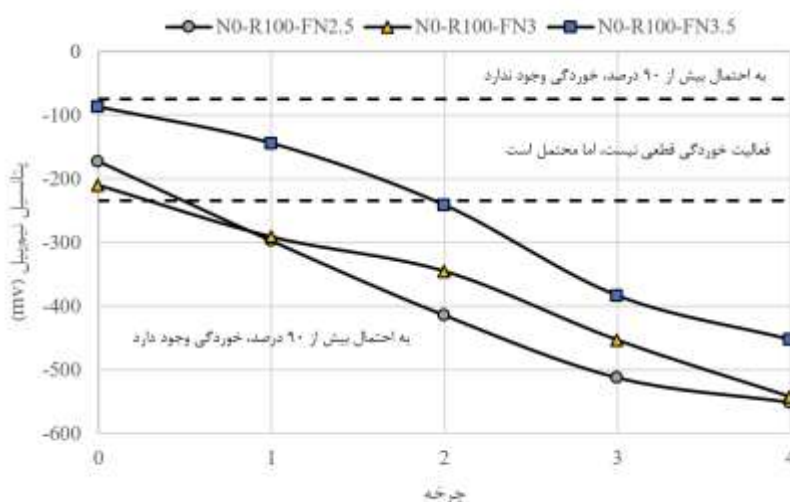
جدول ۹: نتایج آزمایش نیم‌پیل برای طرح‌های مخلوط مورد بررسی

اختلاف پتانسیل (mV)						چرخه	
N100-R0-FM3.5	N100-R0-FM3	N100-R0-FM2.5	N0-R100-FM3.5	N0-R100-FM3	N0-R100-FM2.5	سن آزمایش (روز)	شماره چرخه
- ۱۸۵	- ۱۸۳	- ۵۵	- ۸۷	- ۲۱۰	- ۱۷۲	۲۸	صفر
- ۲۴۶	- ۱۸۹	- ۱۴۵	- ۱۴۴	- ۲۹۱	- ۲۹۷	۴۲	۱
- ۴۱۱	- ۳۱۲	- ۱۸۳	- ۲۴۱	- ۳۴۵	- ۴۱۴	۵۶	۲
- ۵۳۷	- ۴۸۵	- ۲۱۴	- ۳۸۳	- ۴۵۳	- ۵۱۲	۷۰	۳
- ۵۶۴	- ۵۳۲	- ۳۹۷	- ۴۵۲	- ۵۴۲	- ۵۵۱	۸۴	۴

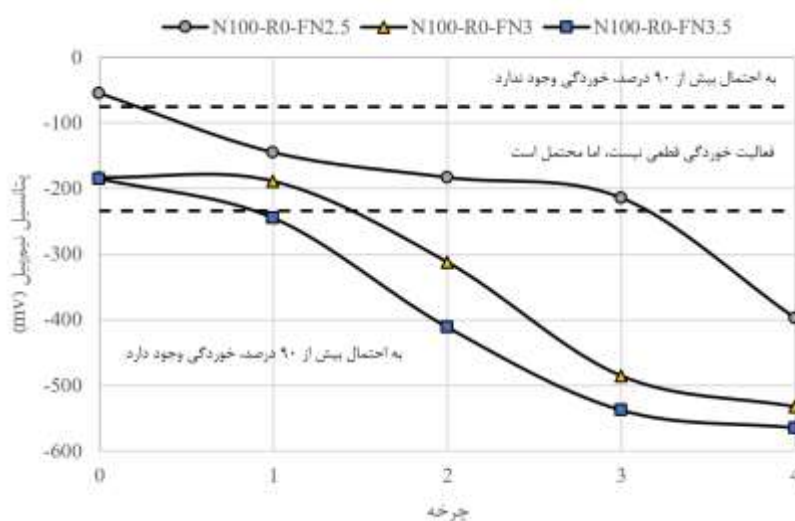
نتایج آزمایش پتانسیل نیم‌پیل نشان می‌دهد که رفتار خوردگی آرماتور در ملات‌ها به‌طور معناداری تحت تأثیر نوع سنگدانه و مدول نرمی آن قرار دارد. به‌گونه‌ای که در طرح‌های حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی با مدول نرمی ۲٫۵، ۳ و ۳٫۵، رسیدن به مقادیر پتانسیل معرف احتمال بالای خوردگی به‌ترتیب در پایان چرخه‌های اول، اول و دوم بوده است؛ در حالی که در طرح‌های حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های طبیعی با همان سطوح مدول نرمی، این وضعیت به‌ترتیب در پایان چرخه‌های چهارم، دوم و اول مشاهده شده است. این تفاوت رفتاری بیانگر مقاومت پایین‌تر ملات‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی در برابر نفوذ عوامل خوردنده و آغاز فرآیند خوردگی آرماتور است. عملکرد ضعیف‌تر ملات‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی را می‌توان به ویژگی‌های ریزساختاری این نوع سنگدانه‌ها نسبت داد. وجود ملات چسبیده قدیمی، تخلخل بیشتر و ریزترک‌های داخلی در سنگدانه‌های بازیافتی، منجر به شکل‌گیری شبکه‌ای پیوسته‌تر از منافذ و تسهیل انتقال یون‌ها و اکسیژن به سطح آرماتور می‌شود؛ عاملی که پتانسیل خوردگی را به سمت مقادیر منفی‌تر سوق می‌دهد.

(۸ و ۲۵). مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که وجود دو ناحیه انتقال (قدیمی و جدید) در بتن‌ها و ملات‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش نفوذپذیری و کاهش دوام این نوع مصالح دارد (۷ و ۸).

نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که در ملات‌های حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی، با افزایش مدول نرمی سنگدانه‌ها، احتمال وقوع خوردگی آرماتور کاهش می‌یابد. این رفتار را می‌توان به کاهش سطح ویژه سنگدانه‌ها، کاهش سهم ملات قدیمی متخلخل و محدود شدن تعداد و پیوستگی نواحی انتقال ضعیف نسبت داد. درشت‌تر شدن سنگدانه‌های بازیافتی باعث کاهش مسیرهای ترجیحی نفوذ یون‌ها شده و در نتیجه، سرعت رسیدن عوامل خوردنده به سطح آرماتور کاهش می‌یابد. این تفسیر با نتایج آزمایش‌های جذب آب موئینه و جذب آب جرمی در این پژوهش هم‌خوانی دارد و نشان‌دهنده‌ی ارتباط مستقیم بین نفوذپذیری و پتانسیل خوردگی است (۷). در مقابل، در ملات‌های حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های طبیعی، افزایش مدول نرمی سنگدانه‌ها منجر به افزایش احتمال وقوع خوردگی آرماتور شده است. در این حالت، درشت‌تر شدن سنگدانه‌ها موجب افزایش ضخامت و ضعف ناحیه‌ی انتقالی بین سنگدانه و خمیر سیمان شده و با ایجاد مسیرهای نفوذ ترجیحی، نفوذپذیری ملات افزایش می‌یابد. این پدیده باعث تسریع انتقال یون‌ها و اکسیژن به سطح آرماتور و در نتیجه افزایش احتمال خوردگی می‌شود؛ رفتاری که با افزایش جذب آب موئینه و حجمی در این طرح‌ها نیز کاملاً هم‌راستا است (۲۵ و ۳۲). به‌طور کلی، کم‌ترین احتمال خوردگی آرماتور در میان کلیه طرح‌های مورد بررسی مربوط به ملات حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های طبیعی با کم‌ترین مدول نرمی طرح (N100-R0-FM2.5) و بیش‌ترین احتمال خوردگی مربوط به ملات حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی با کم‌ترین مدول نرمی طرح (N0-R100-FM2.5) بوده است. همچنین در تمامی سطوح مدول نرمی، ملات‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی پتانسیل‌های منفی‌تری نسبت به ملات‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی نشان داده‌اند که بیانگر عملکرد ضعیف‌تر آن‌ها از نظر دوام در محیط‌های مستعد خوردگی است. این نتایج با گزارش‌های ارائه‌شده توسط Alonso و Andrade در خصوص ارتباط مستقیم بین نفوذپذیری بتن و پتانسیل نیم‌پیل مطابقت دارد (۳۲).



الف) طرح‌های ساخته‌شده از ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی



ب) طرح‌های ساخته‌شده از ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های طبیعی
 شکل ۸: نتایج آزمایش نیم‌پیل برای طرح‌های مخلوط مورد بررسی

۴- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی اثر مدول نرمی مصالح سنگی طبیعی و بازیافتی بر رفتار مکانیکی و دوامی ملات‌های پایه سیمانی، شامل مقاومت فشاری، جذب آب موئینه، جذب آب جرمی و پتانسیل نیم‌پیل بود. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها و تحلیل توأمان شاخص‌های مکانیکی و دوامی، نتایج زیر قابل استنتاج است:

- نخست، نتایج مقاومت فشاری نشان داد که تحت نسبت آب به سیمان ثابت، پاسخ ملات‌ها به تغییر مدول نرمی به نوع سنگدانه وابسته است. در ملات‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، کاهش مدول نرمی (ریزافت‌شدن مصالح سنگی) منجر به افت معنادار مقاومت فشاری در هر دو سن ۲۸ و ۹۰ روز شد. این رفتار را می‌توان به ماهیت خاص ریزساختار ملات‌های بازیافتی نسبت داد؛ به‌گونه‌ای که وجود دو ناحیه انتقالی مجزا شامل ناحیه انتقال قدیمی (بین سنگدانه طبیعی اولیه و ملات قدیمی چسبیده) و ناحیه انتقال جدید (بین سنگدانه بازیافتی و ملات جدید) سبب تضعیف پیوستگی ریزساختاری می‌شود. با کاهش اندازه مؤثر دانه‌ها، سهم سطح تماس این نواحی افزایش یافته و در نتیجه، ضعف‌های موجود در ناحیه انتقالی تشدید شده و مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. در مقابل، در ملات‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های طبیعی، کاهش مدول نرمی باعث بهبود تراکم دانه‌بندی، کاهش تخلخل مؤثر ناحیه انتقالی و در نهایت افزایش مقاومت فشاری شد. این تفاوت رفتاری، بیانگر نقش تعیین‌کننده کیفیت ناحیه انتقالی و یکنواختی ریزساختار در کنترل مقاومت ملات‌هاست.
- از منظر دوام، نتایج جذب آب موئینه و جذب آب جرمی روندی کاملاً هم‌راستا با نتایج مقاومت فشاری نشان دادند. در ملات‌های بازیافتی، کاهش مدول نرمی با افزایش جذب آب موئینه و حجمی همراه بود که حاکی از افزایش پیوستگی شبکه حفرات و نفوذپذیری بالاتر در این مخلوط‌هاست. این موضوع به‌ویژه به وجود ملات قدیمی متخلخل چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی و افزایش سطح ویژه آن در دانه‌بندی ریزتر نسبت داده می‌شود. در مقابل، در ملات‌های طبیعی، کاهش مدول نرمی منجر به کاهش هر دو شاخص جذب آب موئینه و حجمی گردید که بیانگر بهبود تراکم ریزساختاری، کاهش مسیرهای نفوذپذیر و ارتقای عملکرد دوامی است. هم‌خوانی کامل نتایج جذب آب با روند مقاومت فشاری، نشان می‌دهد که کنترل نفوذپذیری و تخلخل مؤثر عامل کلیدی در رفتار مکانیکی و دوامی این ملات‌ها بوده است.
- نتایج آزمایش پتانسیل نیم‌پیل نیز این تفسیر را تأیید می‌کند. در ملات‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، کاهش مدول نرمی موجب حرکت پتانسیل‌ها به سمت مقادیر منفی‌تر و افزایش احتمال آغاز خوردگی آرماتور شد. این رفتار را می‌توان نتیجه افزایش نفوذپذیری و تسهیل انتقال یون‌های مهاجم از طریق شبکه حفرات دانست. در مقابل، نتایج پتانسیل نیم‌پیل ملات‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های طبیعی و مدول نرمی کمتر، حاکی از شرایط مساعدتر محیط اطراف آرماتور و تأخیر

در شروع فرآیند خوردگی در این طرح‌هاست. بدین ترتیب، نتایج نیم‌پیل به‌طور مستقیم با نتایج جذب آب موئینه و حجمی هم‌بستگی داشته و نقش تعیین‌کننده ساختار حفرات را در کنترل رفتار خوردگی آشکار می‌سازد.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاهش مدول نرمی مصالح سنگی اثرات کاملاً متضادی بر عملکرد ملات‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی دارد. در حالی که ریزتر شدن دانه‌بندی در ملات‌های طبیعی منجر به بهبود هم‌زمان خواص مکانیکی و دوامی می‌شود، همین رویکرد در ملات‌های بازیافتی، به دلیل ماهیت ناهمگن ناحیه انتقالی و افزایش سهم ملات قدیمی متخلخل، باعث تضعیف عملکرد می‌گردد. این یافته‌ها بر ضرورت طراحی متفاوت دانه‌بندی و راهکارهای اصلاح ریزساختار برای ملات‌ها و بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی تأکید دارد. بدیهی است که انجام مطالعات تکمیلی ریزساختاری نظیر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و پوروسیمتری تزریق جیوه (MIP) می‌تواند در آینده، درک عمیق‌تری از سازوکارهای حاکم بر این رفتارها فراهم آورد و به توسعه طرح‌های مخلوط بهینه برای کاربردهای پایدار کمک نماید.

۵- تشکر و قدردانی

عمده آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی دانشکده مهندسی کیودراهنگ دانشگاه بوعلی سینا انجام گرفته و بدین‌وسیله از همکاری همه کارکنان گرانقدر آن دانشکده، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶- منابع و مراجع

- [1] Nedeljković. M, Visser. J, Šavija. B, Valcke. S, Schlangen. E, Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review, *Journal of Building Engineering*, 38 (2021) 102196.
- [2] Li. Y, Tao. J.L, Lei. T, Xie. J.J, Experimental study on compressive strength of recycled concrete, *Advanced Materials Research*, 261-263 (2011) 75-78.
- [3] de Brito. J, Agrela. F, Silva. R.V, Construction and demolition waste, In *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, Woodhead Publishing, (2019) 1-22.
- [4] Pereira. M.M.L, Capuzzo. V.M.S, de Brito. J, Concrete produced with recycled concrete aggregate exposed to treatment methods, *Case Studies in Construction Materials*, 18 (2023) e01938.
- [5] Ann. K.Y, Moon. H.Y, Kim. Y.B, Ryou. J, Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials, *Waste Management*, 28(6) (2008) 993-999.
- [6] González-Taboada. I, González-Fonteboa. B, Martínez-Abella. F, Carro-López. D, Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis, *Materiales de Construcción*, 66 (2016) e089.
- [7] Evangelista. L, De Brito. J.M.C.L, Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 32(1) (2010) 9-14.
- [8] Xiao. J, Li. W, Fan. Y, Huang. X, An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011), *Construction and Building Materials*, 31 (2012) 364-383.
- [9] Bai. G, Zhu. C, Liu. C, Liu. B, An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties, *Construction and Building Materials*, 240 (2020) 117978.
- [10] Su. Y, Yao. Y, Wang. Y, Zhao. X, Li. L, Zhang. J, Modification of recycled concrete aggregate and its use in concrete: An overview of research progress, *Materials*, 16(22) (2023) 7144.
- [11] Xiao. J, Li. W, Sun. Z, Lange. D.A, Shah. S.P, Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation, *Cement and Concrete Composites*, 37 (2013) 276-292.
- [12] Thomas. J, Thaickavil. N.N, Wilson. P.M, Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates, *Journal of Building Engineering*, 19 (2018) 349-365.
- [13] Vedalakshmi. R, Thangavel. K, Reliability of electrochemical techniques to predict the corrosion rate of steel in concrete structures, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 36(5) (2011) 769-783.
- [14] Pour-Ghaz. M, Burkan Isgor. O, Ghods. P, Quantitative interpretation of half-cell potential measurements in concrete structures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(9) (2009) 467-475.

- [15] Ghiasvand. E, Rastegar. M.M, Ghasemi. M.H, Ommi. N, Study of Some Corrosion-Related Durability Properties in Mortars Containing Natural and Recycled Aggregates with Constant Fineness Modulus, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 13(02) (2026) 236-250, In Persian.
- [16] ASTM C109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023.
- [17] BS EN-480-5. Tests methods, determination of capillary absorption. British Standards Institution; 1997.
- [18] ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
- [19] ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022.
- [20] AASHTO T 357 (2022). Standard Method of Test for Predicting Chloride Penetration in Hydraulic Cement Concrete Using a Rapid Migration Procedure. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA.
- [21] ASTM C876, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022.
- [22] Song. H-W, Saraswathy. V, Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures-A, *International Journal of Electrochemical Science*, 2(1) (2007) 1-28.
- [23] Taylor HFW. *Cement Chemistry*. 2nd ed. London: Thomas Telford; 1997.
- [24] Neville AM. *Properties of Concrete*. 5th ed. Harlow: Pearson Education; 2011.
- [25] Poon. C.S, Shui. Z.H, Lam. L, Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 18(6) (2004) 461–468.
- [26] Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th ed., McGraw-Hill.
- [27] Scrivener. K.L, Crumbie. A.K, Laugesen. P, The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete, *Interface Science*, 12(4) (2004) 411–421.
- [28] Kou. S.C, Poon. C.S, Properties of concrete prepared with recycled aggregates at different replacement ratios, *Cement and Concrete Composites*, 77 (2015) 28–38.
- [29] Zhong. C, Lu. W, Mao. W, Xin. S, Chen. J, Zhou. J, Shi. C, Research on Capillary Water Absorption Characteristics of Modified Recycled Concrete under Different Freeze–Thaw Environments, *Applied Sciences*, 14(3) (2024) 1247.
- [30] Fan. G, Xiang. W, Yang. J, Yang. S, Xiang. C, Study on Capillary Water Absorption of Waterborne-Polyurethane-Modified Recycled Coarse Aggregate Concrete, *Polymers*, 15(19) (2023) 3860.
- [31] Li. T, Nogueira. R, de Brito. J, Liu. J, A simple method to address the high water absorption of recycled aggregates in cementitious mixes, *Construction and Building Materials*, 411 (2024) 134404.
- [32] Andrade. C, Alonso. C, Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site, *Construction and Building Materials*, 10(5) (1996) 315–328.

The effect of the fineness modulus of natural and recycled aggregates on the mechanical properties and durability of cement mortar

Mohammad Mahdi Rastegar^{a1}, Ebrahim ghiasvand^a, Navid Ommi^b, Mohammad Hossein Ghasemi^b

^a Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University

^b Msc student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University

ABSTRACT

Since the effect of aggregate fineness modulus on the mechanical performance and, in particular, the durability behavior of cement-based materials containing recycled aggregates has rarely been studied to date, this research aimed to evaluate the role of this parameter on the performance of mortars made with natural and recycled aggregates of different fineness moduli. To this end, six mortar mixtures with a constant water-to-cement ratio of 0.6 were prepared using either entirely natural or entirely recycled aggregates. The fineness modulus of the aggregates was adjusted to three levels: 2.5, 3, and 3.5. A series of mechanical and durability tests were then conducted on the specimens, including compressive strength, volumetric water absorption, capillary water absorption, rapid chloride penetration and migration (RCPT/RCMT), and half-cell potential measurement. The obtained results showed that in mortars containing recycled aggregates, increasing the fineness modulus led to improved compressive strength, reduced probability of corrosion, and enhanced durability properties, including lower volumetric water absorption, capillary water absorption, and chloride penetration/migration. In contrast, mortars made with natural aggregates exhibited an opposite trend: as the fineness modulus increased, compressive strength decreased and the probability of corrosion rose. Other durability indicators, such as volumetric water absorption, capillary water absorption, and chloride penetration/migration, were also adversely affected. For example, at 90 days of age, increasing the fineness modulus from 2.5 to 3.5 raised the compressive strength of recycled-aggregate mortars by about 20%, whereas it decreased that of natural-aggregate mortars by approximately 18%.

KEYWORDS

Natural and recycled aggregates, Fineness modulus, Compressive strength, Capillary water absorption, Water absorption by mass, Corrosion potential, Accelerated penetration and migration.

¹ Corresponding Author: Email: m.rastegar@basu.ac.ir