

بررسی تأثیر ضخامت پوشش بتن و جنس روکش میلگرد بر میزان خوردگی آن در بتن خود متراکم

مهدی اژدری مقدم^{۱*}، محمود میری^۲، محسن ریگی^۳

۱-دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۳- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده

در این مقاله تأثیر ضخامت بتن و انواع روکش‌های حفاظتی میلگرد بر خوردگی و دوام سازه‌های بتن خود متراکم در حاشیه دریای عمان مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. به این منظور نمونه‌های بتن خود متراکم با سه نوع پوشش میلگرد از جنس روی با ضخامت ۴۰ و ۶۰ میکرون، اپوکسی و بدون پوشش (شاهد) با ضخامت لایه بتن پوشش ۳، ۵ و ۷ ساخته شده و در محیط شاهد و همچنین نواحی جزر و مد، مستغرق و ساحل بندر چابهار به مدت ۱۴ ماه عمل آوری شده است. بر روی نمونه‌های ساخته شده، آزمایشات مختلف دوام بتن و خوردگی میلگرد در سنین مختلف انجام شد. نتایج آزمایش کاهش جرم و خوردگی میلگرد نشان دهنده عملکرد مناسب میلگرد با روکش اپوکسی و روی در مقایسه با میلگرد بدون پوشش در همه شرایط نگهداری است. نتایج همچنین نشان می‌دهد پوشش روی به ضخامت ۴۰ میکرون، کاهش جرم میلگرد را نسبت به میلگردهای بدون پوشش حدود ۱۰٪ کمتر نموده است. علاوه بر آن افزایش ۱/۵ برابری ضخامت روی باعث کاهش خوردگی در حدود ۳٪ تا ۴٪ می‌شود. استفاده از پوشش اپوکسی نیز درصد کاهش وزن میلگرد را در حدود ۴٪ تا ۸٪ (بسته به ضخامت لایه بتن روی میلگرد) کاسته است. لازم به ذکر است که افزایش ضخامت لایه بتن روی میلگرد از ۳ cm به ۵ و ۷ به ترتیب باعث تغییر کاهش جرم از ۳۴٪ به ۲۷٪ و ۲۱٪ شده است.

کلمات کلیدی: بتن خود متراکم، نفوذ یون کلر، خوردگی میلگرد، روکش میلگرد.

*نویسنده مسئول: مهدی اژدری مقدم

پست الکترونیکی: mazhdary@eng.usb.ac.ir

DOI: 10.22065/jsce.2017.84193.1169

شناسه دیجیتال

<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.84193.1169>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۲۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۱۷

۱- مقدمه

به دلیل خسارات ناشی از خوردگی میلگردها و تاثیر آن بر دوام و عمر مفید سازه‌های بتن آرمه، روش‌های مختلفی برای کنترل و پایش خوردگی توسعه یافته و مورد ارزیابی قرار گرفته است. بطور کلی در حال حاضر دو روش مقاوم سازی سازه‌های بتن آرمه در برابر خوردگی بکار می‌روند که اولی استفاده از مواد افزودنی به بتن و بطور کلی جلوگیری از نفوذ مواد مخرب به داخل جسم بتن و دیگری استفاده از آرماتورهای مقاوم به خوردگی و یا مقاوم‌سازی آرماتورهای معمولی با استفاده از پوشش‌های مختلف است. علاوه بر آن می‌توان از محافظت کاتدیک برای محافظت از فلزات در برابر خوردگی استفاده کرد. در این روش با تبدیل فلزات به کاتدهایی در یک پیل الکتریکی و استفاده از یک آند قربانی از آن‌ها محافظت می‌شود.

بر اساس استاندارد ASTM A 955 [۱] حداقل ۱۶٪ کروم بایستی برای آرماتور فولاد ضدزنگ مورد استفاده در بتن به کار رود. بالما و همکاران [۲] با مطالعه بر روی فولاد ضدزنگ ۲۲۰۵ و ۲۱۰۱ دریافتند که این نوع فولادها، مقاومت خوردگی بسیار بهتری نسبت به فولاد معمولی دارند و میانگین اتلاف خوردگی از ۰/۳٪ تا ۱/۸٪ فولاد معمولی بوده و فولاد ۲۲۰۵ عملکرد بهتری نسبت به فولاد ۲۱۰۱ دارد.

گانک و همکاران [۳] و داروین و همکاران [۴] عملکرد آرماتور روکش شده با فولاد ضدزنگ LN316 (SMI-316 SCTM) را مورد بررسی قرار داده و دریافتند که نرخ خوردگی فولاد ضد زنگ SMI-316 SCTM کمتر از ۰/۴٪ آرماتور معمولی بوده و لذا نتیجه‌گیری کردند که بدنه‌های پل تقویت شده با SMI-316 SCTM در طی عمر ۷۵ سال نیاز به تعمیر ندارند. علاوه بر آن فولاد میکروکامپوزیتی MMFX که حاوی تقریباً ۹٪ کروم است به علت ریزساختار موجود در آن، مقاومت خوبی در برابر خوردگی دارد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که آستانه کلرید MMFX تقریباً ۹ برابر فولاد معمولی و نزدیک به فولاد ضدزنگ ۳۰۴ است [۵].

علیرغم مزایای فوق آنچه مانع استفاده همگانی از آرماتور فولاد ضدزنگ می‌شود، هزینه اولیه بالای آن است. هر چند هزینه اولیه بالا با عمر طولانی آن، به ویژه وقتی در بخش آسیب پذیرتر سازه‌ها (مثل بدنه‌های پل یا محیط‌های آبی) استفاده شود، قابل توجیه است اما باز هم در موارد عملی روش‌های جایگزینی برای استفاده از فولاد ضد زنگ مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اینکه در فولادهای با مشخصات ASTM A615 و ASTM A706 که عمدتاً در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند محدودیت زیادی برای مقابله با خوردگی بکار گرفته نمی‌شود فقط برخی محدودیت‌های شیمیایی در ترکیبات نوع دوم به منظور چکش خوار نمودن و جوش پذیری بیشتر آن به کار می‌رود. لذا برای افزایش مقاومت خوردگی این نوع آرماتورها از روکش‌های مختلف استفاده می‌شود. روکش‌ها مانعی در برابر نفوذ رطوبت، اکسیژن و یون‌های کلرید ایجاد می‌کنند و می‌توانند فولاد مربوطه را ایزوله کنند. یکی از متداول ترین پوشش‌ها، پوشش آرماتور معمولی با روکش اپوکسی است. اگر چه بعضی مطالعات نشان داده اند که آرماتور با روکش اپوکسی بسیار موثر است اما مطالعات دیگری این اثربخشی را مورد تردید قرار داده‌اند. برای مثال پل‌های ساخته شده با استفاده از آرماتور با روکش اپوکسی در فلوریدا، پس از ۶ سال علائم خوردگی را نشان دادند. که دلیل آن از دست رفتن چسب اپوکسی با سطح فولاد بود. فهرست جامعی از مطالعات انجام شده بر روی آرماتور روکش شده با اپوکسی توسط کپلر و همکاران [۶] ارائه شده است.

فولاد روکش شده با پوشش روی نیز از اوایل دهه ۱۹۴۰ مورد استفاده قرار گرفته است. اندود روی با غوطه‌ورسازی فولاد در یک حمام مذاب روی در دمای °C ۴۶۰ ایجاد می‌شود. هافسوی و گوکید [۷] گزارش دادند که پوشش روی به همراه آرماتور گالوانیزه اندود شده، خوردگی در بتن را به تاخیر می‌اندازد. آن‌ها همچنین نشان دادند که قدرت پیوند بین فولاد گالوانیزه و بتن قوی‌تر از فولاد گالوانیزه نشده بود. کوردروی، فورد و هرزوک [۸] نشان دادند که بهبود مقاومت به خوردگی در آرماتور با پوشش روی، تقریباً معادل با ۵۰٪ افزایش ضخامت پوشش بتن است. تریداوی، بران و کوکس [۹] پس از مطالعه عملکرد خوردگی فولاد گالوانیزه دریافتند که فولاد گالوانیزه می‌تواند ترک خوردگی بتن را در مقایسه با فولاد نرم بدون روکش به تاخیر بیاورد. هر چند هیل، اسپلمان و استراتفول [۱۰] گزارش دادند که نمونه‌های بتن تقویت شده با فولاد گالوانیزه و فولاد نرم بدون روکش وقتی در معرض NaCl اشباع قرار گرفتند، آغاز خوردگی همزمانی را نشان دادند. اگرچه نظرات مختلفی پیرامون سطح محافظت از خوردگی توسط پوشش‌های روی وجود دارد اما معمولاً توافق بر این است که ماهیت

محافظت به این صورت است که لایه فلز روی سطح فولاد با آب یا محلول قلیایی منفذ بتن واکنش می‌دهد تا هیدروکسید روی و گاز هیدروژن تشکیل شود. با تجزیه هیدروکسید روی مطابق فرآیند شیمیایی زیر، اکسیدروی و آب نتیجه می‌شود:



اکسید روی سپس با یون‌های کلسیم واکنش می‌دهد تا کلسیم هیدروکسی زینکات تشکیل شود. برای $\text{PH} < 13/3$ کلسیم هیدروکسی زینکات یک رویه پایدار متشکل از بلورهای کوچک را تشکیل می‌دهد که پوشش روی را اثرناپذیر می‌سازد. وقتی PH بالای $13/3$ باشد محصولات خوردگی از بلورهای بزرگ تشکیل می‌شوند که محافظت از خوردگی ایجاد نمی‌کنند. لازم به یادآوری است که ZnO ، 50% فضای بیشتری را نسبت به روی اشغال می‌کند. در صورتی که Fe_2O_3 ناشی از خوردگی حجم ۲ برابری و یا بیشتر نسبت به مواد اولیه دارد که باعث ترک خوردن بتن می‌شود.

فومن لی و همکاران [۱۱] با بررسی خوردگی فولاد در سازه‌های پیش تنیده، تاثیر مقدار تنش و همچنین نوع فولاد در شرایط تهاجمی کلرید را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی‌ها حاکی از افزایش میزان خوردگی با افزایش مقدار تنش و همچنین تاثیر بیشتر خوردگی موضعی در این نوع سازه‌ها بود. علاوه بر آن مشخص شد که خوردگی فولاد در سازه‌های پیش تنیده، احتمال خرابی سازه نسبت به سازه‌های معمولی را به میزان بیشتری افزایش می‌دهد.

قانونی و همکاران [۱۲] تاثیر خوردگی بر کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مقاومت به خوردگی و مقاومت فشاری لزوماً و در همه موارد بطور مستقیم با هم مرتبط نیستند و نمونه‌های با مقاومت فشاری کمتر و افزودنی‌های معدنی مقاومت به خوردگی بیشتری از خود نشان دادند. نتایج آزمایشات همچنین نشان داد که با افزایش زمان نگهداری نمونه‌ها به مدت ۱ تا ۳ ماه زمان شروع خوردگی را می‌توان به میزان ۲ تا ۴ برابر افزایش داد.

جذب آب سطحی و نفوذ نمونه‌های بتن خود متراکم حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیسی توسط لیونگ و همکاران [۱۳] مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور نمونه‌های بتن خود متراکم با طرح اختلاط و افزودنی‌های متفاوت ساخته و پس از نگهداری به مدت زمان لازم، مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده همزمان از این دو افزودنی می‌تواند به میزان قابل ملاحظه‌ای جذب سطحی و نفوذ آب را کاهش دهد. علاوه بر آن افزایش مقدار این افزودنی‌ها سبب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز گردید اگر چه رابطه همبستگی خاصی بین مقاومت فشاری و میزان نفوذ پذیری یافت نشد.

میری و سارانی [۱۴] خوردگی میلگرد و دوام بتن‌های خودمتراکم حاوی پوزولان‌های پومیس و زئولیت را مورد ارزیابی قرار دادند. به این منظور نمونه‌های بتن حاوی درصدهای مختلف پوزولان پومیس و زئولیت ساخته شده و تحت آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده همزمان از این دو پوزولان، مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها را $1/6$ برابر و طول مدت وقوع ترک طی آزمایش خوردگی تسریع شده را نیز، 82% افزایش می‌دهد. لذا به منظور مقابله با خوردگی میلگرد، استفاده همزمان از پوزولان‌های پومیس و زئولیت (به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی) در شرایط محیطی بسیار شدید حاشیه خلیج فارس را توصیه نمودند.

بررسی موارد فوق نشان می‌دهد که اگر چه تحقیقات مختلفی روی خوردگی میلگردها صورت گرفته، اما این مطالعات بیشتر بر روی بتن معمولی تمرکز داشته و بتن‌های خود متراکم، کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به افزایش استفاده از بتن خودمتراکم در ایران و همچنین افزایش سرمایه‌گذاری و ساخت و ساز در سواحل جنوبی کشور و دریای عمان، مطالعه و تحقیق در این زمینه اهمیت بیشتری یافته است. لذا با توجه به موارد فوق و مزایای استفاده از پوشش آرماتور به منظور حفاظت سازه‌های بتنی، در این مطالعه اثر انواع پوشش‌ها در نمونه‌های بتن خود متراکم نگهداری شده در سواحل دریای عمان مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است به منظور کاربردی‌تر شدن نتایج تحقیق، از یک سو نمونه‌ها در شرایط محیطی محل نگهداری شده و از سوی دیگر پوشش‌هایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که هم اکنون در برخی پروژه‌های منطقه و به صورت موردی، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲- مواد و روش‌ها

با توجه به اینکه در این مطالعه بررسی اثرات انواع پوشش میلگرد بر دوام سازه‌های ساخته شده در نواحی جنوبی کشور و دریای عمان مورد بررسی قرار گرفته، لذا مصالح مصرفی از معادن منطقه دمبندف چابهار تامین شده است. وزن مخصوص شن و ماسه مصرفی مطابق استاندارد ASTM C29 به ترتیب $2/78 \text{ gr/cm}^3$ و $2/50 \text{ gr/cm}^3$ بوده است [۱۵]. سیمان پرتلند استفاده شده نیز تپ ۲ با وزن مخصوص $3/15 \text{ gr/cm}^3$ بوده و پودر سنگ مورد استفاده دارای وزن مخصوص 2700 Kg/m^3 و سطح ویژه ذرات آن حدود $550-500 \text{ m}^2/\text{Kg}$ بوده است. به منظور افزایش کارایی بتن از فوق روان کننده PCE برپایه پلی کربوکسیلات اتر و به میزان ۱/۷ درصد وزنی سیمان استفاده شده است. طرح اختلاط بتن خود متراکم مورد استفاده بر اساس روش EFNARC صورت گرفته و برای اطمینان از قرار گیری بتن ساخته شده در رده بتن خود متراکم، تمامی آزمایشات اولیه انجام شده و از قرار گیری مشخصات در محدوده استاندارد اطمینان حاصل شده است. نمونه‌های ساخته شده تا سن آزمایش، در شرایط زیر نگهداری شده اند.

۱- حوضچه عمل آوری با آب معمولی با دمای $20-25^\circ \text{C}$

۲- محیط مستغرق در داخل آب دریای عمان

۳- محیط تر و خشک در خط ساحلی دریای عمان

۴- محیط ساحل در فاصله تقریبی ۴۰ m از دریا

۵- حوضچه شامل آب مقطر به همراه ۵٪ نمک به منظور آزمایشات تسریع شده. که برای حفظ خواص فیزیکی و شیمیایی محیط هر ۱۰ روز یکبار محتویات آن تخلیه و پس از تمیز کردن حوضچه دوباره با آب نمک پر شده است.

طرح اختلاط نهایی مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. علاوه بر آن به منظور مقایسه یک نمونه بتن معمولی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به تاثیر شرایط نگهداری بر خواص نمونه‌ها سعی شده طرح اختلاط این بتن به گونه ای انتخاب شود که هر دو نوع بتن در کوتاه مدت (محیط شاهد و سن ۷ روزه) مقاومت فشاری یکسانی داشته باشند به این ترتیب امکان مقایسه برای پارامترهای مورد نظر فراهم خواهد بود.

جدول ۱: طرح اختلاط نمونه های مورد استفاده (Kg)

طرح اختلاط	مصالح طبیعی		سیمان	پودر سنگ	آب	روان کننده
	ماسه	شن				
SCC	۸۱۰	۹۰۰	۵۴۰	۳۶۰	۳۵۰	۱۰

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایشات مقاومت فشاری برای بتن معمولی و خودمتراکم در سنین مختلف ۷، ۲۸، ۹۰ روزه در شرایط نگهداری مختلف در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: نتایج آزمایش مقاومت فشاری (MPa)

نام طرح	روزه ۷			روزه ۲۸			روزه ۹۰		
	شاهد	ساحل	مستغرق	شاهد	ساحل	مستغرق	شاهد	ساحل	مستغرق
SCC	۲۴/۵	۲۴	۲۴/۵	۳۸/۲	۳۴/۲	۳۲/۶	۴۱/۹	۴۲	۳۷/۱
NC	۲۳/۳	۲۳	۲۲/۳	۳۰/۴	۳۰	۲۷	۲۵/۲	۳۶	۳۰

همانطور که نتایج نشان می‌دهد شرایط نگهداری در کوتاه مدت تاثیر زیادی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها نداشته و تمامی نمونه‌ها مقاومت تقریباً یکسانی داشته‌اند اما با افزایش سن نمونه‌ها تاثیر محیط نگهداری به وضوح مشاهده می‌شود. به گونه‌ای که در سن ۹۰ روز برای نمونه‌های نگهداری شده در شرایط ساحلی، مقاومتی تقریباً برابر با مقاومت نمونه‌های شاهد حاصل شده اما نمونه‌های نگهداری شده در محیط مستغرق و جزر و مد به ترتیب با کاهش مقاومت ۱۸٪ و ۲۴٪ مواجه بوده‌اند. برای نمونه‌های بتن معمولی نیز کاهش مقاومت نمونه‌های نگهداری شده در محیط مستغرق تقریباً مشابه بتن خود متراکم بوده اما در محیط جزر و مد میزان کاهش مقاومت کمی بیشتر و به حدود ۳۳٪ رسیده است. وجود یون سولفات در محیط‌های مستغرق و جزر و مدی، می‌تواند باعث کاهش مقاومت فشاری کلیه مخلوط‌های بتنی نسبت به مخلوط‌های شاهد شود. نفوذ سولفات به داخل بتن در محیط‌هایی که تحت سیکل‌های تر و خشک متوالی قرار دارند، بیشتر از محیط مستغرق است. همچنین مقدار زیاد کلرورها در آب دریا، می‌تواند باعث تشدید خرابی سولفاتی شود، زیرا گچ و سولفوآلومینات کلسیم در محلول‌های کلروری بهتر حل می‌شوند و به خارج محیط بتن راه می‌یابند که باعث افزایش تخلخل بتن و در نتیجه کاهش مقاومت بتن می‌شوند. از آنجایی که ناحیه جزر و مدی دارای بیشترین میزان نفوذ یون کلر می‌باشد، بنابراین خرابی‌های ناشی از یون‌های سولفات در این ناحیه شدیدتر خواهد بود.

۳-۲- نتایج آزمایش جذب آب و نفوذپذیری

نتایج آزمایش درصد جذب آب در سن ۲۸ و ۱۲۰ روزه در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: نتایج آزمایش جذب آب بتن خود متراکم در نمونه‌های مختلف

نام طرح (SCC)	روزه ۲۸			روزه ۱۲۰		
	شاهد	ساحل	مستغرق	شاهد	ساحل	مستغرق
جذب آب (%)	۱/۱۱	۱/۱۰	۰/۹۵	۱/۱۳	۱/۱۳	۰/۹۸

با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده، مشاهده می‌شود که میزان جذب آب نمونه‌های نگهداری شده در محیط تر و خشک بیشترین مقدار و جذب آب نمونه‌های شاهد نیز بیشتر از نمونه‌های نگهداری شده در آب دریا بوده است. علاوه بر آن با گذشت زمان، درصد جذب آب در محیط‌های تر و خشک و مستغرق بیشتر شده، که نشان دهنده تخریب و کاهش عمر بتن در این محیط‌ها و در مدت زمان طولانی است. دلیل کاهش درصد جذب آب نمونه‌های نگهداری شده در محیط مستغرق نسبت به محیط شاهد، ترکیبات شیمیایی ایجاد شده بین یون‌های موجود در آب دریای عمان با محصولات حاصل از هیدراتاسیون C_3A ، $Ca(OH)_2$ ، که اکثراً همراه با افزایش حجم بوده و از میزان منافذ به حد چشمگیری می‌کاهد و همچنین تشکیل لایه محافظ نازک از املاح و مواد موجود در آب دریای عمان دانست که از سرعت نفوذ آب و عوامل دیگری می‌کاهد. نتایج آزمایش نفوذ پذیری تحت فشار آب در سن ۱۲۰ روزه در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: نتایج آزمایش نفوذ پذیری در سن ۱۲۰ روزه

نام طرح	نفوذ آب (mm)		
	شاهد	ساحل	مستغرق
SCC	۱۲	۱۲	۱۵
NC	۱۵	۱۵	۲۳

با توجه به جدول ۴ مشاهده می‌شود عمق نفوذ آب در محیط‌های مختلف متفاوت و در محیط تر و خشک بیشترین مقدار نفوذ آب اندازه‌گیری شده است. این امر به دلایل گفته شده در قسمت قبل مورد انتظار است.

۳-۳- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

نتایج آزمایشات مقاومت الکتریکی در سنین مختلف ۷ تا ۹۰ روزه در جدول ۵ ارائه شده است.

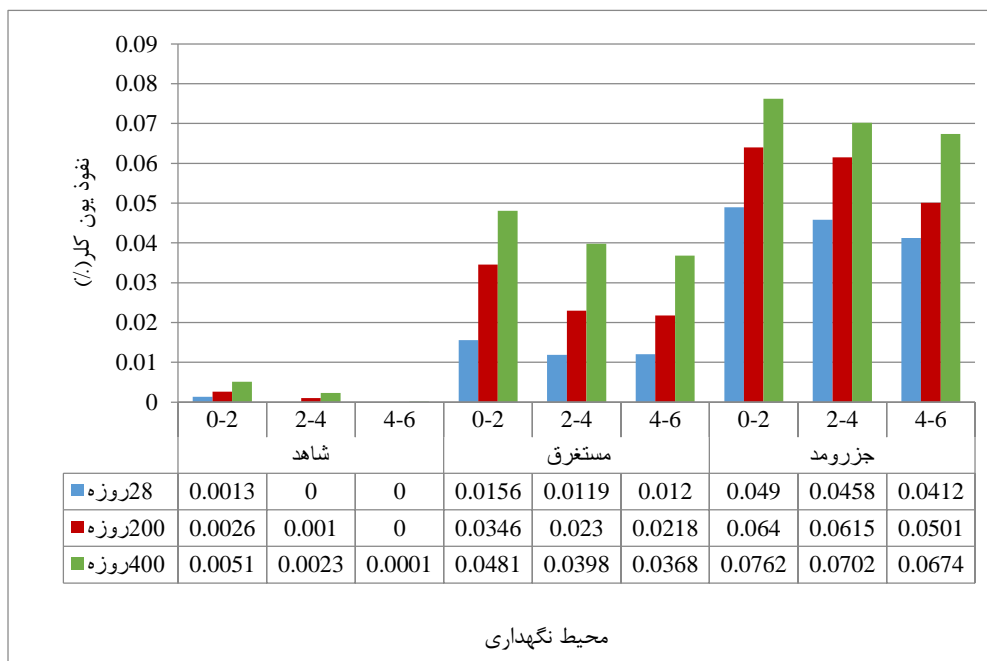
جدول ۵: نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی (kΩ-cm)

نام طرح	روزه ۷			روزه ۲۸			روزه ۹۰		
	شاهد	ساحل	مستغرق	شاهد	ساحل	مستغرق	شاهد	ساحل	مستغرق
SCC	۹/۳	۹	۹	۳۵/۱	۳۴/۹	۳۱	۲۷/۹	۷۲	۶۸
NC	۸/۱	۸	۸	۲۹/۴	۲۹/۳	۲۵	۲۱/۲	۶۳	۵۷

همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود در مدت زمان‌های اندازه‌گیری شده نمونه‌های نگهداری شده در محیط شاهد (همچنین ساحل) و تر و خشک به ترتیب بیشترین و کمترین مقاومت الکتریکی را دارا هستند. با توجه به اینکه نمونه‌های واقع در شرایط جزر و مدی دائماً تحت شرایط تر و خشک شدگی قرار دارند، می‌توان نتیجه گرفت که این مشخصه بتن شدیداً تحت تاثیر شرایط رطوبتی محیط بوده و در شرایطی که بتن تحت تاثیر شرایط رطوبتی غیر متعارف قرار گیرد، مقدار مقاومت الکتریکی بتن کم می‌شود. به نظر می‌رسد با توجه به کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های نگهداری شده در این شرایط، افزایش نفوذ و جذب آب در آن‌ها، چنین نتیجه‌ای دور از انتظار نیست.

۳-۴- نتایج آزمایش نفوذ یون کلر

نتایج آزمایش نفوذ یون کلر برای بتن خود متراکم در سن ۲۸، ۲۰۰ و ۴۰۰ روزه در در شکل ۱ ارائه شده است.



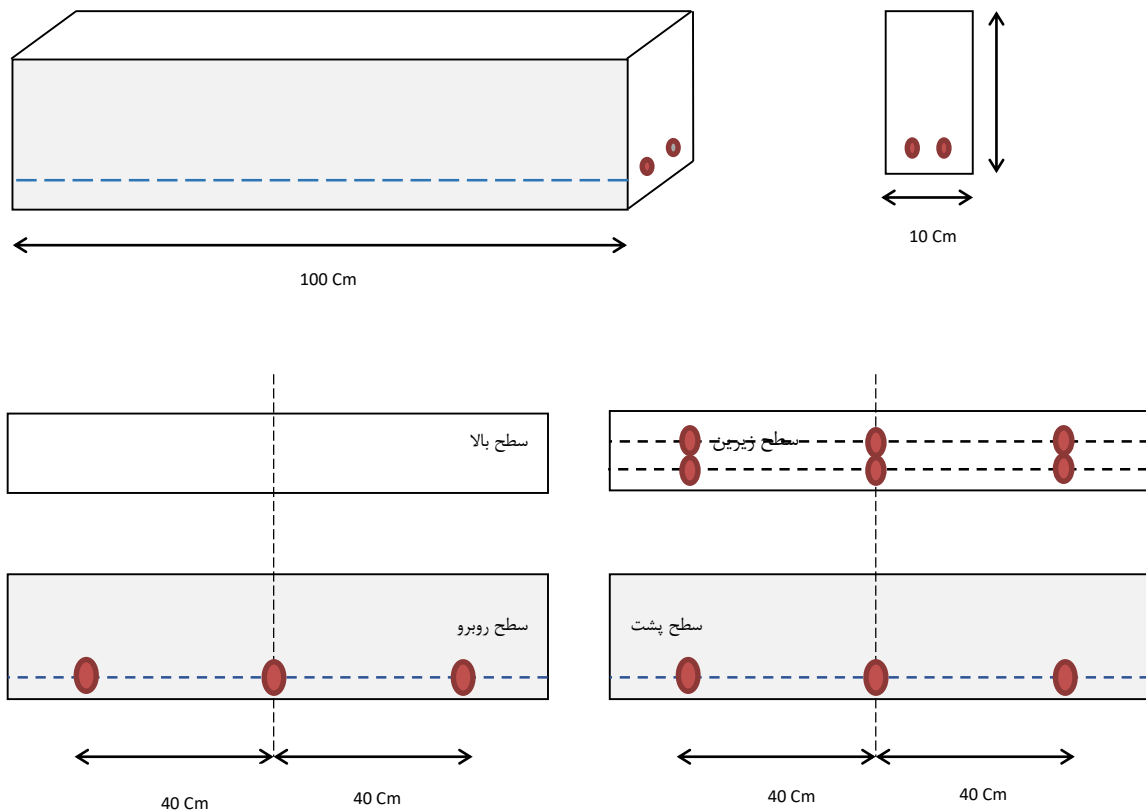
شکل ۱: نتایج آزمایش نفوذ یون کلر بتن خود متراکم در شرایط مختلف.

با بررسی شکل فوق مشاهده می‌شود در محیط تر و خشک نسبت به دو محیط دیگر نفوذ یون کلر بیشتری صورت گرفته که دلیل آن را به این صورت می‌توان بیان کرد که در محیط تر و خشک به علت داشتن دو نوع جذب (جذب موئینگی و جذب با تبعیت از پدیده

تغلیظ سطح) محیط مخرب تری نسبت به محیط مستغرق برای نمونه‌های بتنی ایجاد می‌شود. همچنین با فاصله گرفتن از سطح بتن و افزایش عمق مقدار یون کلر کاهش می‌یابد. با انجام رگرسیون خطی برای زمان ۲۸، ۲۰۰ و ۴۰۰ روزه در محیط‌های مختلف می‌توان به شیب زیاد خط رگرسیون ۲۰۰ و ۴۰۰ روزه پی برد که نشان می‌دهد با گذشت زمان در شرایط تر و خشک و مستغرق مقدار نفوذ یون کلر با شدت بیشتری در حال افزایش است.

۳-۵- نتایج آزمایش خوردگی میلگرد

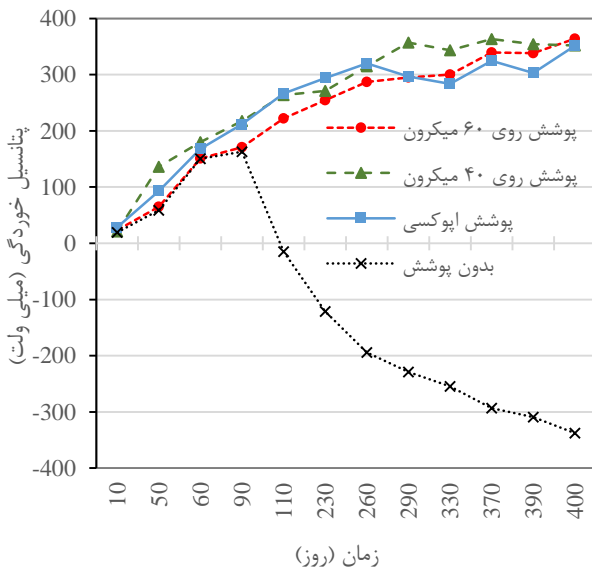
با توجه به زمان کوتاه قرار گیری نمونه‌ها در ساحل و نیز نتایج به دست آمده در قسمت نفوذ یون کلر، به نظر می‌رسد روند خوردگی در این نمونه‌ها شروع نشده، و لذا در ادامه به بررسی نتایج در دو محیط تر و خشک و مستغرق (که نفوذ یون کلر نیز در آنها با توجه به قسمت قبل صورت گرفته است) می‌پردازیم. در این مطالعه برای اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی از الکتروود و سولفات مس استفاده شده است. برای این منظور نقاط دایره‌ای مشخص شده در شکل ۲ پتانسیل خوردگی توسط نیم پیل اندازه گیری شده و سپس میانگین آن‌ها به عنوان نتیجه آزمایش ارائه شده است. ضخامت پوشش بتن روی میلگرد در نمونه‌ها برابر ۳ سانتیمتر بوده است.



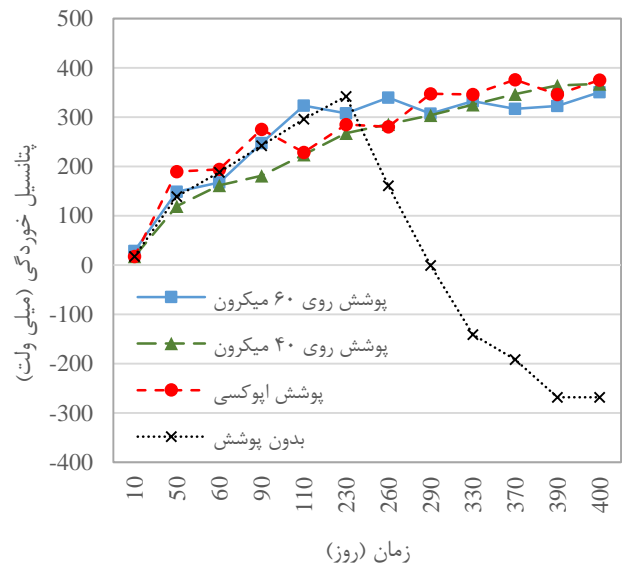
شکل ۲: جزییات تیرهای استفاده شده در آزمایش خوردگی.



شکل ۳: نیم پیل مورد برای اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی.



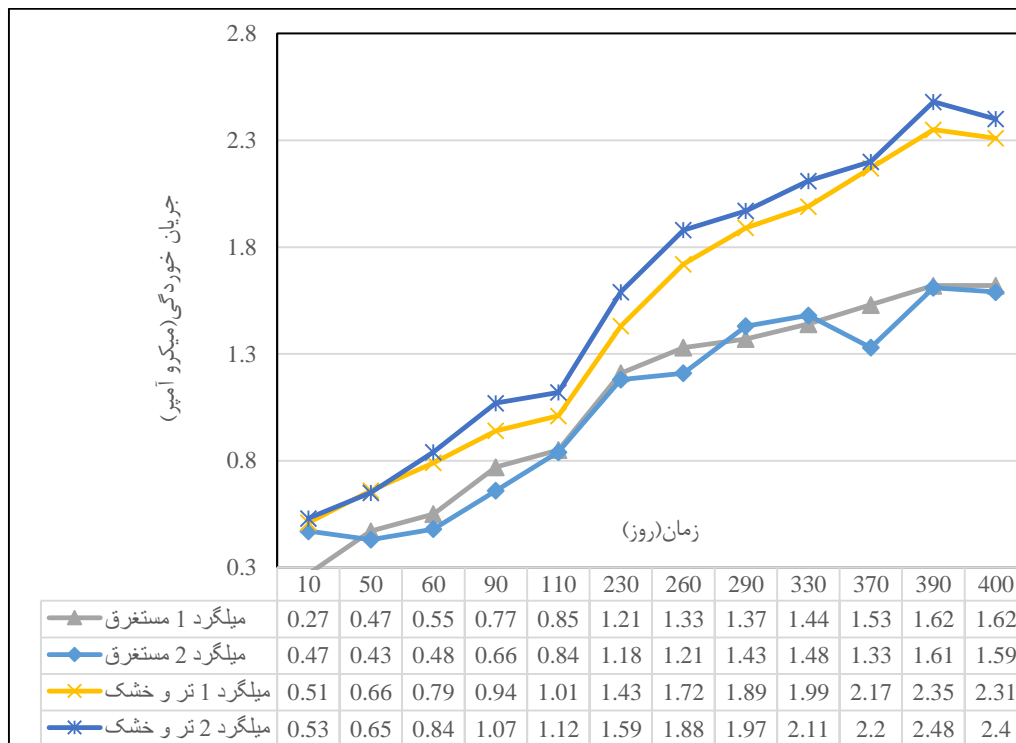
شکل ۵: پتانسیل خوردگی میلگرد با پوشش‌های مختلف در محیط تر و خشک.



شکل ۴: پتانسیل خوردگی میلگرد با پوشش‌های مختلف در محیط مستغرق.

طبق استاندارد ASTM C876 بررسی خوردگی بر اساس نتایج به دست آمده از پتانسیل خوردگی به تنهایی از دقت بالایی برخوردار نیست و باید از جریان خوردگی نیز برای پیش بینی دقیق خوردگی استفاده شود. از اینرو جریان خوردگی در نمونه‌ها نیز اندازه‌گیری شد نتایج نشان می‌دهد که در میلگردهای پوشش‌دار (در مدت زمان ۱۴ ماه نگهداری نمونه‌ها) خوردگی در هیچکدام از نمونه‌ها اتفاق نیفتاده و

به نظر می‌رسد برای مشاهده خوردگی در نمونه‌ها به زمان بیشتری نیاز است اما در مورد میلگردهای بدون پوشش در دو محیط مستغرق و تر و خشک جریان قابل اندازه‌گیری بوده که مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل ۶ ارائه شده است.

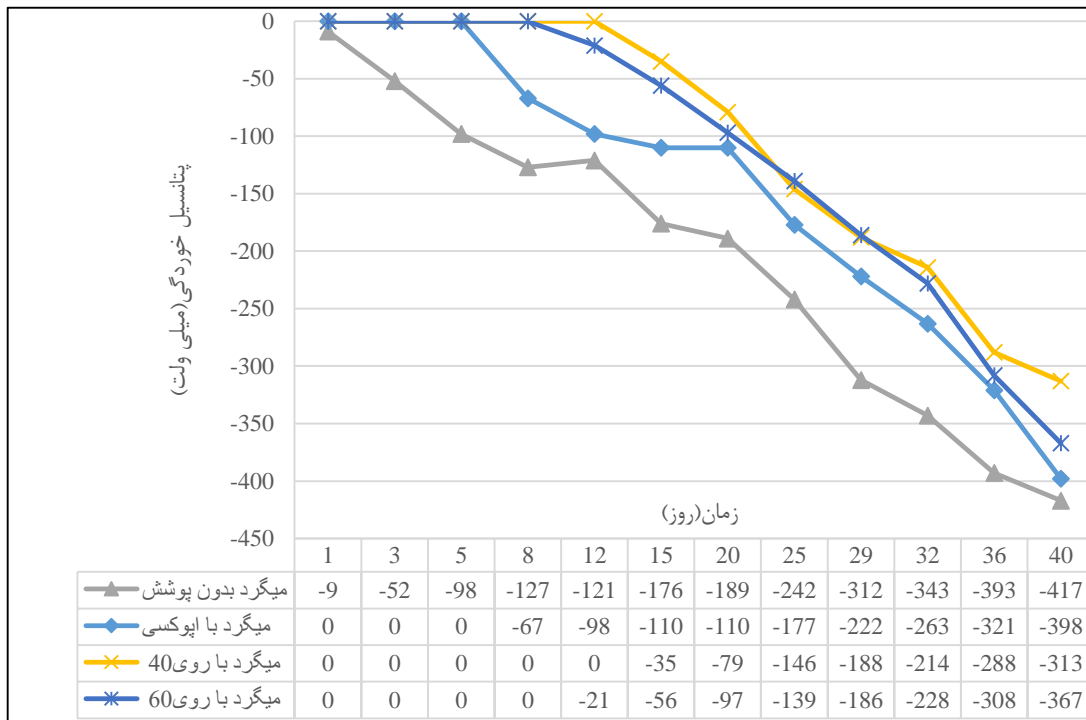


شکل ۶: جریان خوردگی در میلگرد بدون پوشش.

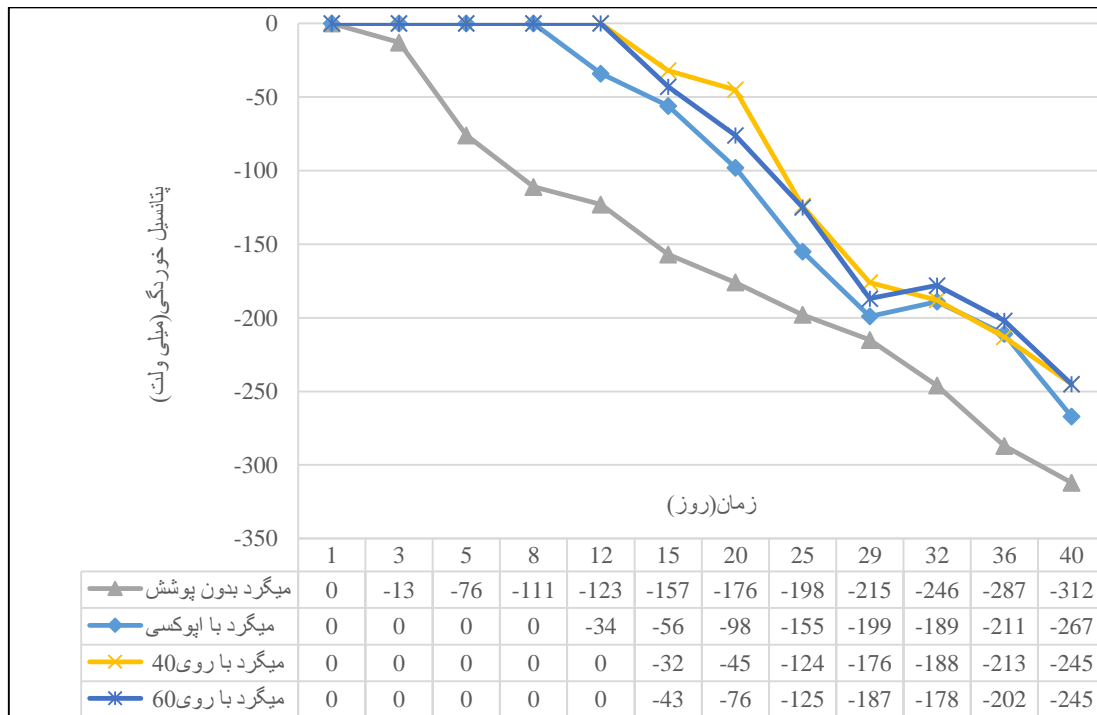
بر اساس استاندارد ASTM C876 در پتانسیل کمتر از ۲۰۰- احتمال خوردگی وجود دارد که با بررسی نتایج فوق مشاهده می‌شود پتانسیل اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های پوشش‌دار مثبت است از این رو می‌توان نتیجه گرفت در تیرها با میلگرد پوشش‌دار در مدت زمان اندازه‌گیری شده احتمال خوردگی وجود ندارد. ولی با بررسی تیرها با میلگرد بدون پوشش جریان خوردگی با گذشت زمان افزایش یافته و پتانسیل منفی نیز اندازه‌گیری شده که نشان دهنده احتمال خوردگی در میلگرد است. همچنین با بررسی دقیق‌تر مشخص می‌شود در دو محیط مستغرق و تر و خشک علی‌رغم منفی بودن پتانسیل اما جریان خوردگی در محیط تر و خشک بیشتر است که نشان دهنده مخرب‌تر بودن این محیط نسبت به محیط مستغرق است. از آنجا که در آزمایش‌های بالا برای مقایسه مقاومت در برابر خوردگی پوشش‌های روی و اپوکسی با همدیگر، به زمان زیادی نیاز است لذا در ادامه نتایج حاصل از آزمایش خوردگی تسریع شده، مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۶- نتایج آزمایش خوردگی تسریع شده

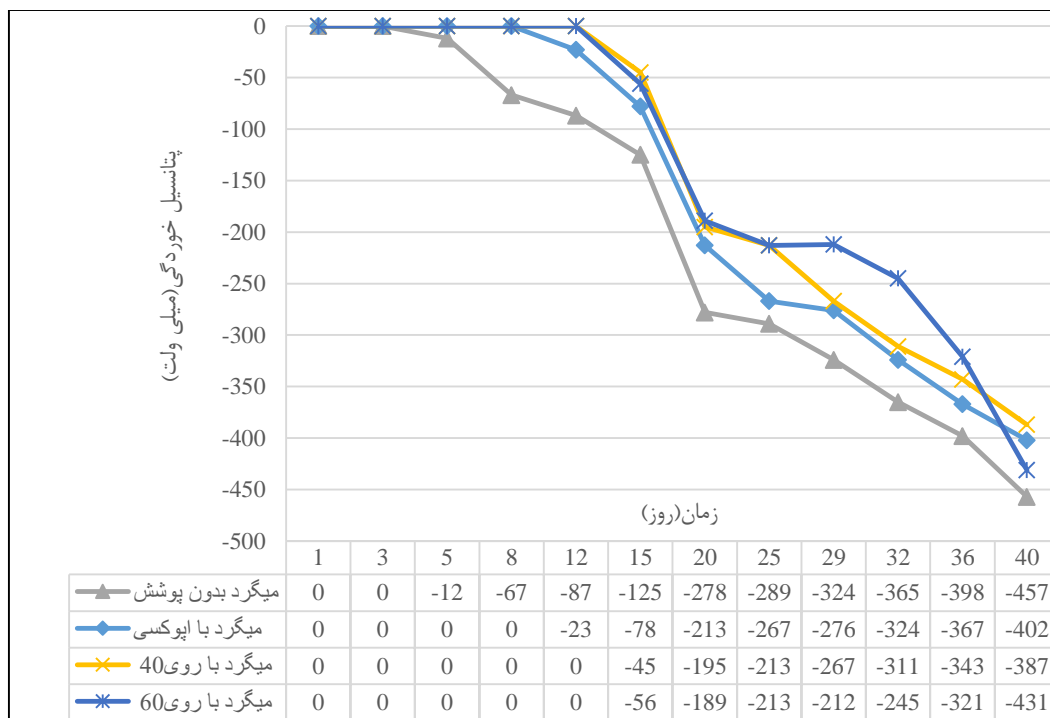
نتایج آزمایش خوردگی تسریع شده در مدت زمان ۴۰ روز برای نمونه‌های بتنی به همراه میلگردهای با پوشش روی به ضخامت ۴۰ و ۶۰ میکرون، اپوکسی و بدون پوشش با ضخامت بتن رویه ۳، ۵ و ۷ سانتی متر در اشکال ۷ تا ۹ ارائه شده است.



شکل ۷: نتایج خوردگی تسریع شده در بتن خودمتراکم با ضخامت بتن ۳ cm.



شکل ۸: نتایج خوردگی تسریع شده در بتن خودمتراکم با ضخامت بتن ۵ cm.



شکل ۹: نتایج خوردگی تسریع شده در بتن خودمتراکم با ضخامت بتن ۷ cm.

همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده در نمونه با میلگرد بدون پوشش از همان روزهای اولیه پتانسیل خوردگی وجود داشته و با شیب تندی که نشان دهنده افزایش احتمال خوردگی با زمان است دنبال می‌شود اما در خصوص بتن با میلگرد اپوکسی و پوشش روی مشاهده می‌شود پتانسیل خوردگی با تاخیر چند روزه قابل اندازه‌گیری است. از آنجاکه آزمایش تسریع شده خوردگی، به مراتب سریعتر از خوردگی در طبیعت است لذا شروع خوردگی با تاخیر در میلگرد با اپوکسی و روی، اولاً نشان دهنده مقاومت این پوشش‌ها در برابر خوردگی است که در حالت طبیعی ممکن است سال‌ها به طول انجامد. ثانیاً نشان دهنده مقاومت بهتر پوشش روی در برابر خوردگی نسبت به پوشش اپوکسی است.

با بررسی شکل‌های ۸ و ۹ و با توجه به تاخیر در قرائت پتانسیل خوردگی و نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود در نمونه‌های با ضخامت پوشش بتن ۵ cm به نسبت ۳ cm خوردگی کمتری مشاهده می‌شود که دلیل آن را می‌توان مقاومت کاور بتن در برابر نفوذ یون کلر دانست که این مقاومت در شکل ۹ نیز در روزهای اولیه کمتر از ۱۵ روز نیز مشاهده می‌شود ولی در بازه زمانی ۲۰-۱۵ روز، خوردگی به شدت و با شیب تندی دنبال می‌شود که دلیل آن را با توجه به بازرسی‌های چشمی صورت گرفته از نمونه‌ها می‌توان ترک بزرگ ایجاد شده بر روی نمونه و نفوذ یون کلر بیشتر به داخل بتن در روز ۱۵ به بعد دانست. لذا به نظر می‌رسد برای جلوگیری از خوردگی ضخامت بتن بایستی با آزمایشات مختلف تعیین شود.

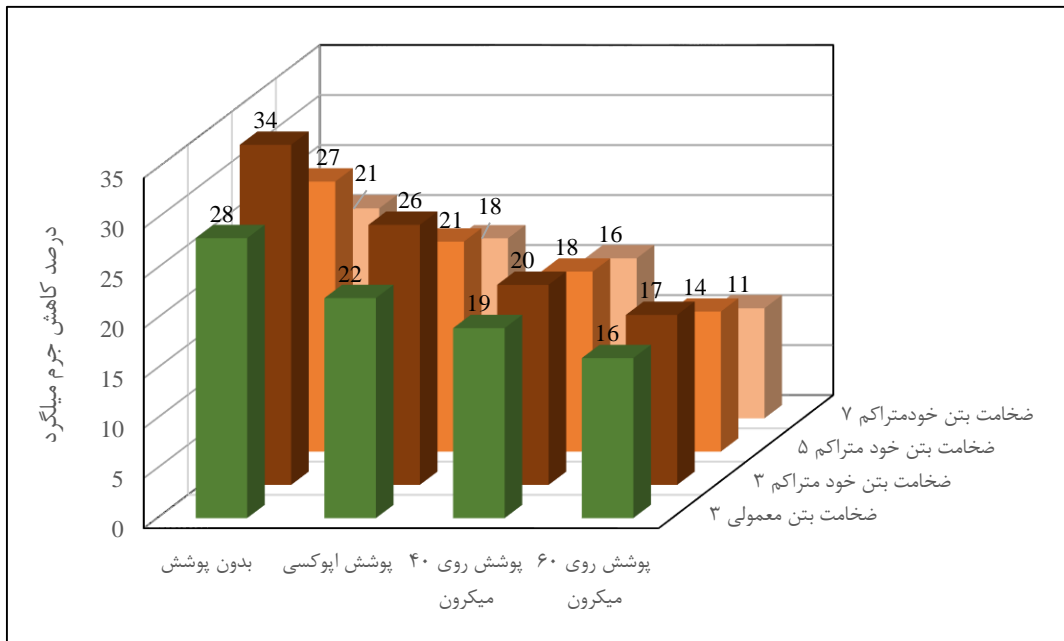
با بررسی نمونه‌ها در حین آزمایش برای نمونه با میلگرد بدون پوشش به طور متوسط در روز سوم و برای نمونه‌های با پوشش اپوکسی و روی به ترتیب در روز ۱۴ و ۱۵ ترک مشاهده شد (شکل ۱۰) از آنجا که ایجاد ترک می‌تواند باعث خرابی بتن و نفوذ یون کلر بیشتر به داخل بتن و خوردگی سریعتر میلگرد شود، لذا به نظر می‌رسد پوشش‌های میلگرد می‌توانند در کنترل گسترش ترک سودمند باشند.



شکل ۱۰: نمونه بتن پس از آزمایش تسریع شده.

۳-۷- نتایج آزمایش کاهش جرم میلگردها

به منظور مقایسه تاثیر نوع پوشش میلگرد و ضخامت پوشش بتن بر روی میلگرد نمونه‌هایی نیز با ضخامت‌های متفاوت بتن (۳، ۵، ۷ و ۹ سانتی متر) ساخته شد و تحت آزمایش خوردگی تسریع شده قرار گرفت. پس از پایان آزمایش کاهش جرم میلگردها اندازه‌گیری و ثبت گردید.



شکل ۱۱: تغییرات کاهش وزن میلگرد در شرایط تسریع شده.

با بررسی شکل ۱۱ مشاهده می‌شود تغییرات وزن در بتن با میلگرد بدون پوشش شدید تر از بقیه نمونه‌ها است که نشان دهنده مقاومت بیشتر نمونه‌های پوشش‌دار در برابر خوردگی است.

بررسی نتایج کاهش جرم نشان می‌دهد پوشش میلگرد روش موثرتری نسبت به افزایش ضخامت بتن در سازه‌های بتن مسلح برای مقابله با خوردگی است. در حالی که افزایش ضخامت بتن از ۳ به ۵ و ۷ کاهش جرم میلگرد را به ترتیب از ۳۴٪ به ۲۷٪ و ۲۱٪ رسانده است. پوشش اپوکسی باعث شده در ضخامت‌های ۳، ۵ و ۷ به ترتیب کاهش جرمی معادل ۲۶٪، ۲۱٪ و ۱۸٪ را شاهد باشیم که بیانگر عملکرد مناسب پوشش اپوکسی و تأیید کننده نتایجی است که قبلاً توسط کپلر و همکاران ارائه شده است. به عبارت دیگر اثر پوشش اپوکسی معادل ۲ cm افزایش ضخامت لایه بتن روی میلگرد بوده است. از آنجا که اثرات افزایش پوشش می‌تواند به دلایل افزایش وزن لایه پس از ترک خوردگی تسرع در جداسازی لایه را نیز به همراه داشته باشد به نظر می‌رسد استفاده از پوشش‌ها (علی‌الخصوص در تیرها و دالها) می‌تواند به عنوان جایگزین افزایش ضخامت لایه بتنی پوشش مورد توجه قرار گیرد.

بررسی نتایج حاصل از خوردگی میلگرد با پوشش روی ۴۰ میکرون و مقایسه آن با خوردگی میلگردهای بدون پوشش، نشان می‌دهد که در آزمایشات انجام شده این نوع پوشش عملکردی معادل افزایش ۴ cm ضخامت لایه بتن داشته است. به عبارت دیگر درصد کاهش جرم میلگرد بدون پوشش با ضخامت لایه ۷ cm تقریباً معادل مقادیر ثبت شده برای میلگرد با پوشش روی ۴۰ میکرون با ضخامت لایه بتن ۳ cm بوده است. از این حیث نیز می‌توان گفت با انتخاب روکش مناسب برای میلگرد می‌توان ضخامت لایه پوشش بتنی روی آن را کمتر در نظر گرفت، که مشابه نتایج ارائه شده توسط کوردروی، فورد و هرزگوگ است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله اثر انواع پوشش میلگرد و همچنین ضخامت پوشش میلگرد برای نمونه‌های بتن متراکم که در مدت زمان ۴۰۰ روز در سواحل دریای عمان و در شرایط مختلف نگهداری شده بود، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از آزمایشات نشان می‌دهد که:

- بررسی نتایج حاصل از میزان جذب آب و نفوذ آب نشان می‌دهد که بیشترین جذب و عمق نفوذ آب در در شرایط جزر و مدی صورت گرفته که بیانگر مخرب‌تر بودن این محیط است.
- با انجام آزمایش نفوذ یون کلر مشاهده شد نفوذ یون کلر در شرایط ساحل کمترین مقدار و در شرایط جزر و مدی بیشترین مقدار را دارد.
- بررسی نتایج حاصل از آزمایشات پتانسیل خوردگی و جریان خوردگی نشان می‌دهد که در مدت زمان نگهداری نمونه‌ها در هیچکدام از محیط‌ها احتمال خوردگی وجود ندارد اما ارقام منفی ثبت شده برای میلگردهای بدون پوشش نشان می‌دهد که احتمال خوردگی برای این نمونه‌ها بر اساس استاندارد وجود دارد اگر چه پس از اتمام آزمایش و بررسی میلگردها، هیچگونه آثار خوردگی بر روی آن‌ها مشاهده نشد.
- نتایج آزمایش تسریع شده نشان می‌دهد که در بین انواع روکش‌های مورد استفاده روکش روی به ضخامت ۶۰ میکرون، روی به ضخامت ۴۰ و پوشش اپوکسی به ترتیب بیشترین اثر را بر کاهش خوردگی میلگردها داشته‌اند. علاوه بر آن پوشش اپوکسی اثری معادل افزایش ۲ cm ضخامت لایه بتن روی میلگرد داشته است. با توجه به اینکه افزایش ضخامت لایه بتن همواره مقدور نبوده و در برخی موارد مشکلاتی نیز به همراه دارد، لذا می‌توان پوشش اپوکسی میلگردها را به عنوان جایگزینی برای افزایش ضخامت بتن در نظر گرفت.
- افزایش ضخامت روکش از ۴۰ به ۶۰ میکرون نیز اثری معادل با ۲ cm افزایش ضخامت بتن در نمونه‌های مورد آزمایش داشته است.

سیاسگزاری

در مراحل مختلف اجرای این تحقیق، اداره کل راه و شهر سازی ایران شهر، اداره کل بنادر و کشتیرانی چابهار، شرکت ساختمانی مکران و شرکت تامین ماشین آلات فاروق مساعدت نموده‌اند که بدینوسیله از حمایت آن‌ها نهایت تشکر و قدر دانی به عمل می‌آید.

مراجع

- [1] ASTM A 955-07a (2007). *Standard Specification for Deformed and Plain Stainless- Steel Bars for Concrete Reinforcement*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [2] Balma, J., Darwin, D., Browning, J. P., and Locke, C. E. (2005). Evaluation of Corrosion Protection Systems and Corrosion Testing Methods for Reinforcing Steel in Concrete. *SM Report No. 76*, The University of Kansas Center for Research, Inc., Lawrence, KS.
- [3] Gong, L., Darwin, D., Browning, J. P., and Locke, C. E. (2006). Evaluation of Multi Corrosion Protection Systems and Stainless Steel Clad Reinforcement for Reinforced Concrete. *SM Report No. 82*, Lawrence, KS.
- [4] Darwin, D., Browning, J. P., Nguyen, T. V., and Locke, C. E. (2007). Evaluation of Metallized Stainless Steel Clad Reinforcement. *South Dakota Department of Transportation Report, SD2002-16-F*, also *SM Report No.90*, University of Kansas Center for Research, Inc., Lawrence, KS, 156 pp.
- [5] Gong, L., Darwin, D., Browning, J. P., and Locke, C. E. (2002). Evaluation of Mechanical and Corrosion Properties of MFMX Reinforcing Steel for Concrete. *SM Report No. 70*, The University of Kansas Center for Research, Inc., Lawrence, KS.
- [6] Kepler, J. L., Darwin, D. and Locke, C.E. (2000). Evaluation of Corrosion Protection Methods for Reinforced Concrete Highway Structures. *SM Report No. 58*, University of Kansas Center for Research, Lawrence, KS, 221 pp.
- [7] Hofsoy, A., and Gukild, I. (1969). Bond Studies on Hot-dip-galvanized Reinforcement in Concrete. *ACI Journal*, Proceedings Vol. 66, No. 3, pp. 174-184.
- [8] Corderoy, D. J. H., Ford, P. R., and Herzog, H. (1977). *Corrosion Behavior of Galvanized Steel in Concrete*, Preprinted Papers, Annual Conference, Australasian Corrosion Association, Paper No. J2, 11 pp.
- [9] Treadaway, K. W. J., Brown, B. L., and Cox, R. N. (1980). Durability of Galvanized Steel in Concrete. *ASTM Special Technical Publication 713*, Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete, pp. 102-131.
- [10] Hill, G. A., Spellman, D. L., and Stratfull, R. F. (1976). Laboratory Corrosion Tests of Galvanized Steel in Concrete, *Transportation Research Record*, No. 604, pp. 25- 37.
- [11] Fumin Li, Yingshu Yuan, Chun-Qing Li, Corrosion propagation of prestressing steel strands in concrete subject to chloride attack, *Construction and Building Materials*, Vol 25 (2011), pp. 3878-3885.
- [12] M. Ghanooni-Bagha, M.A. Shayanfar, A.A. Shirzadi-Javid, H. Ziaadiny. Corrosion-induced reduction in compressive strength of self-compacting concretes containing mineral admixtures, *Construction and Building Materials*, Vol 113 (2016), pp. 221-228.
- [13] H.Y. Leung, J. Kim, A. Nadeem, Jayaprakash Jaganathan, M.P. Anwar, Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume, *Construction and Building Materials*, Vol 113 (2016), pp. 369-375.
- [۱۴] میری، محمود. سارانی، ناصر. "ارزیابی آزمایشگاهی استفاده از ترکیب پومیس و زئولیت بر خوردگی میلگرد و دوام بتن خودتراکم"، *مجله علوم و مهندسی خوردگی*، شماره ۲، ص ۲۱ تا ۳۲، سال ۱۳۹۳.
- [15] ASTM C 29. *Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate*, American society for testing and Materials. Philadelphia.