

بررسی آزمایشگاهی پارامترهای ناشی از خوردگی در تیرهای بتنی حاوی نانولاستونیت

حسین بهشتی نژاد

دانشجوی دکتری عمران سازه، دانشگاه سیستان و بلوچستان

محمود میری*

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

محمد رضا قاسمی

استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

چکیده

یکی از راه‌های تشخیص خرابی و در نتیجه افزایش عمر مفید سازه‌های بتن مسلح در محیط‌های مخرب، سنجش پارامترهای ناشی از خوردگی به صورت دوره‌ای است. در این تحقیق تعداد ۱۰ عدد تیر بتنی مسلح به ابعاد $100 \times 100 \times 1500$ میلی‌متر در دو گروه: بتن معمولی (NC) و بتن حاوی نانولاستونیت (NCW) جهت ارزیابی در برابر خوردگی ساخته و در معرض هم‌زمان اعمال بار و خوردگی تسریع شده قرار گرفتند. ارزیابی خوردگی با استفاده از اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل نیم‌پیل، مقاومت الکتریکی و کاهش جرم میلگرد صورت پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد اختلاف پتانسیل و مقاومت الکتریکی در نمونه‌های NCW نسبت به نمونه‌های NC بهبود یافته به گونه‌ای که مقدار اختلاف پتانسیل در درجات کم خوردگی در نمونه‌های NC، ۲۰٪ نسبت به نمونه‌های NCW منفی‌تر است. همچنین مقدار مقاومت الکتریکی تیرهای NCW به طور میانگین حدود ۲/۱ برابر نمونه‌های NC می‌باشد. از دیگر نتایج این تحقیق، اختلاف ۳۵٪ کاهش جرم در نمونه‌های NCW نسبت به نمونه‌های NC در درجات کم خوردگی می‌باشد. بهبود این نتایج نشان‌دهنده افزایش عمر بهره‌برداری در سازه‌های بتن مسلح حاوی نانولاستونیت است.

واژه‌های کلیدی: تیر بتن مسلح، خوردگی، اختلاف پتانسیل نیم‌پیل، مقاومت الکتریکی، نانو ولاستونیت.

* نویسنده مسئول: Mmiri@eng.usb.ac.ir

۱- مقدمه

فول و «اسپلمن» و «ون دویر» استاندارد ASTM C876 برای اندازه‌گیری پتانسیل نیم پیل میلگردهای غیرپوشش‌دار اولین بار در سال ۱۹۷۷ منتشر شد [۶]. در دهه‌های اخیر اندازه‌گیری پتانسیل نیم پیل در مطالعات آزمایشگاهی و میدانی برای سنجش وضعیت خوردگی میلگرد در بتن و احتمال خوردگی مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از افزودنی‌ها در بتن جهت کاهش تخلخل و در نتیجه کاهش نفوذپذیری در کار محققین زیادی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. میکروسیلیس، خاکستر بادی، زئولیت، متاکائولن از جمله این افزودنی‌هاست. نفوذپذیری بتن را می‌توان با اصلاح ساختار ماتریسی و کاهش تخلخل بتن کنترل نموده و مانع از نفوذ رطوبت، اکسیژن و یون‌های مخرب به داخل بتن شد. این مهم معمولاً با استفاده از افزودنی‌های طبیعی و سایر افزودنی‌های اصلاح‌کننده با قابلیت نفوذناپذیری انجام می‌شود [۷]. رسیدن به یک طرح اختلاط با طول عمر بهره‌برداری زیاد از طریق حفظ منابع، کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و کاهش هزینه تعمیر و نگهداری به طبیعت کمک نموده و سبب توسعه پایدار می‌شود. در میان افزودنی‌های موجود مورد مطالعه در بتن ولاستونیت با ساختاری سوزنی و فیبری شکل که ساختار ماتریسی بتن را اصلاح می‌کند و سبب بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن می‌شود کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. ولاستونیت یا متاسیلیکات کلسیم یک ماده معدنی طبیعی است که از واکنش بین سنگ آهک و سیلیس در ماگمای داغ ایجاد می‌شود. در مطالعات اخیر ولاستونیت به‌عنوان ذرات فیبری شکل در بتن مورد استفاده قرار گرفته و نشان داده شد که ویژگی‌های بتن را بهبود می‌بخشد [۸]. در سال ۲۰۱۱، نی و همکاران با تحقیق بر روی ویژگی‌های بتن‌های اتو کلاو شده حاوی ولاستونیت نشان دادند که میزان ولاستونیت بهینه جهت افزودنی در بتن ۱۵٪ جای‌گزینی وزنی سیمان است که این میزان مقاومت خمشی را تا ۳۰٪ و مقاومت فشاری را تا ۱۰٪ افزایش می‌دهد [۹]. در سال ۲۰۱۳ «ژانگ» با کار بر روی خصوصیات دوام بتن حاوی ولاستونیت و خاکستر بادی نشان داد اضافه نمودن حدود ۱۵٪ از ترکیب حاوی ولاستونیت و خاکستر بادی می‌تواند خصوصیات مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشد [۱۰]. «سلیمان» و همکاران در سال ۲۰۱۴ تأثیر ولاستونیت در بتن‌های با سن کم و عملکرد بالا را مورد بررسی قرار دادند، ایشان نشان دادند که اضافه نمودن میکرو فیبرهای ولاستونیت مقاومت

خوردگی میلگرد در بتن یکی از دلایل اصلی خرابی سازه‌های بتن مسلح می‌باشد. زمانی که یک سازه بتن مسلح در یک محیط خورنده قرار می‌گیرد یون کلراید به داخل بتن نفوذ کرده و در نهایت خود را به سطح میلگرد می‌رساند و با از بین بردن لایه قلیایی محافظ سطح میلگرد، خوردگی شروع می‌شود [۱]. با شروع خوردگی میلگرد در بتن، آهن به اکسید با افزایش حجمی تا ۶ برابر نسبت به حجم اولیه تبدیل می‌شود که میزان این افزایش حجم بستگی به شرایط اکسیداسیون دارد. افزایش حجم سبب ایجاد تنش‌های کششی بر روی بتن محصورکننده میلگرد می‌شود و در نهایت منجر به ترک خوردگی پوشش بتنی میلگرد می‌گردد. این ترک‌ها به‌صورت طولی در امتداد میلگردها توسعه می‌یابند و با ترک‌های ناشی از خمش که معمولاً عمود بر میلگردها می‌باشند متفاوت هستند [۲]. ترک ناشی از خوردگی به‌عنوان یک معیار برای طول عمر بهره‌برداری، تأثیر قابل توجهی بر دوام سازه‌های بتن مسلح دارد. از آنجایی که ترک‌ها سبب افزایش سرعت نفوذ و در نتیجه افزایش سرعت خوردگی و توسعه خرابی می‌شوند پایش سریع قبل از خرابی‌های قابل مشاهده امری ضروری است. به‌تازگی روش‌های ارزیابی و پایش غیرمخرب جهت تخمین خوردگی و ارزیابی محیط خورنده مورد استفاده قرار می‌گیرند. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، قطبش خطی، ترموگرافی مادون قرمز و پتانسیل نیم پیل از روش‌های مرسوم جهت تعیین خوردگی و ارزیابی محیط خورنده می‌باشند [۳ و ۴]. روش اندازه‌گیری مقاومت پلازما روشی ارجح است که شرایط خوردگی را از طریق اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن ارزیابی می‌کند اگرچه این روش به دما و رطوبت حساس است اما با عنایت به شرایط پایدار آزمایشگاهی در کارهای محققین مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. روش پتانسیل نیم پیل روش مناسب و قابل قبولی است که معیارهای مشخصی را برای احتمال خوردگی ارائه می‌دهد. در روش پتانسیل نیم پیل اختلاف پتانسیل بین یک الکتروود خارجی واقع بر سطح بتن و میلگرد قرار گرفته در بتن با یک ولت‌متر امپدانس بالا اندازه‌گیری می‌شود [۵]. استفاده از روش اندازه‌گیری پتانسیل نیم پیل به‌صورت کیفی برای سنجش وضعیت خوردگی میلگرد در بتن اولین بار توسط «استارت فول» در سال ۱۹۷۵ در یک مقاله علمی ارائه گردید. بر اساس کارهای استارت

تحقیق حاضر به منظور ارزیابی دوام تیرهای حاوی نانولاستونیت، پارامترهای ناشی از خوردگی در طول تیر در بازه زمانی اعمال خوردگی مورد بررسی قرار گرفتند. بدین منظور دو سری تیر ساخته شد، که در طرح اختلاط سری اول از بتن معمولی و در سری دوم از نانولاستونیت استفاده گردید. سطوح خوردگی هدف در پنج سطح ۰.۲٪، ۰.۵٪، ۱.۰٪، ۱.۵٪ و ۲.۵٪ می‌باشند. به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی به هنگام خوردگی، تیرها تحت بار به صورت هم‌زمان قرار گرفتند. پارامترهای اختلاف پتانسیل نیم پیل، مقاومت الکتریکی در طول تیر در مدت زمان اعمال خوردگی تسریع شده اندازه‌گیری شد. ترک‌های ناشی از خوردگی در انتهای زمان خوردگی هدف اندازه‌گیری و کاهش جرم میلگردهای کلیه تیرها محاسبه گردید.

۲-۱ مشخصات و جزئیات نمونه‌ها

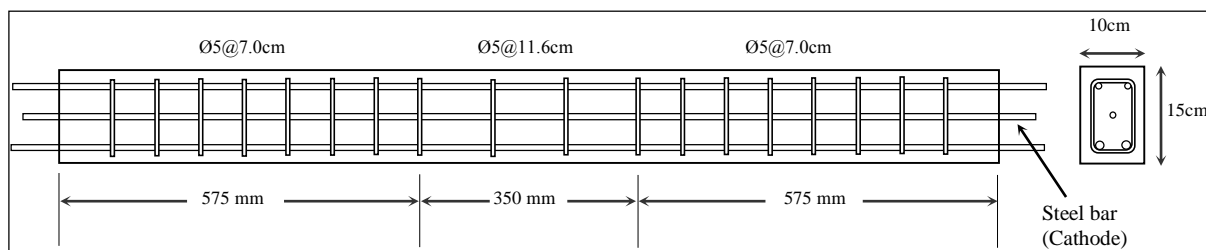
نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق شامل ۱۰ عدد تیر بتنی مسلح به ابعاد $100 \times 150 \times 1500$ mm مطابق شکل ۱ می‌باشند. از دو عدد میلگرد آج‌دار با قطر ۱۲ میلی‌متر و از نوع AI II جهت میلگرد کششی و از دو عدد میلگرد آج‌دار با قطر ۸ میلی‌متر و از نوع AI II جهت میلگرد فشاری استفاده شده است. خاموت‌ها از میلگرد بدون آج با قطر ۵ میلی‌متر و با فواصل نشان داده شده در شکل ۱ ساخته شده‌اند. به منظور جلوگیری از خوردگی خاموت‌ها، سطح آن‌ها با اپوکسی به صورت کامل پوشش داده شد و در محل اتصال به میلگردهای کششی ایزوله الکتریکی شدند. از یک میله استیل بدون آج و با قطر ۸ میلی‌متر جهت کاتد در داخل بتن استفاده شد. میلگردهای کششی و کاتد به میزان ۵۰ mm از بتن بیرون‌زده بودند تا اتصال الکتریکی مناسب ایجاد شود. سطح کلیه میلگردها قبل از بتن‌ریزی تمیز و عاری از هرگونه زنگ‌زدگی احتمالی شد.

فشاری را بهبود بخشیده و در کاهش کرنش‌های ناشی از انقباض بتن مؤثر است [۱۱]. کالا و همکاران در سال ۲۰۱۴ خصوصیات دوام بتن‌های حاوی ولاستونیت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند جای‌گزینی ۱۰ تا ۱۵ درصدی ولاستونیت به جای سیمان می‌تواند باعث بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن شود. با جای‌گزینی ولاستونیت ماتریس مواد چسبنده بتن سخت‌تر و متراکم‌تر می‌شود. این جای‌گزینی در راستای کاهش مصرف سیمان، کاهش آلودگی و کاهش هزینه‌ها مؤثر خواهد بود [۱۲]. در تحقیق میری و همکاران در سال ۲۰۱۵ از ولاستونیت در ابعاد نانو به‌عنوان جای‌گزین سیمان در بتن استفاده شد و خواص مکانیکی بتن از طریق اندازه‌گیری مقاومت فشاری و خمشی ارزیابی گردید. نتایج حاکی از افزایش مقاومت خمشی به میزان ۶۳٪ و مقاومت فشاری به میزان ۹٪ می‌باشد. افزایش مقاومت در برابر نفوذ آب حدود ۵۰٪ با جای‌گزینی ۱۰٪ نانولاستونیت به جای سیمان حاصل شد [۸].

در این تحقیق برای اولین بار ولاستونیت در ابعاد نانو به‌عنوان افزودنی و جای‌گزین بخشی از سیمان در طرح اختلاط تیرهای خمشی در ابعاد شبه واقعی مورد استفاده قرار گرفته و به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی نمونه‌ها به طور هم‌زمان تحت بار و خوردگی تسریع شده قرار گرفتند. پارامترهای ناشی از خوردگی اعضای خمشی شامل مقاومت الکتریکی، پتانسیل نیم‌پیل و جرم کاهش یافته اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار گرفتند.

۲-۲ برنامه آزمایشگاهی

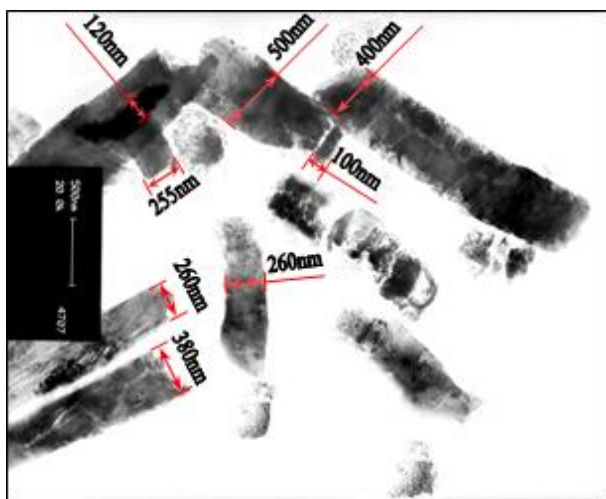
در دوره بهره‌برداری از سازه‌های بتن مسلح، پایش به موقع به منظور جلوگیری از بروز خرابی‌ها امری مهم است. لذا بررسی تغییر ویژگی‌های سازه‌های بتنی مسلح ناشی از خوردگی و انجام تحقیقات آزمایشگاهی در این خصوص ضروری می‌باشد. در



شکل ۱- طرح شماتیک تیرهای مورد استفاده

۵ عدد از تیرها (سری NCW) حاوی ۱۰٪ نانولاستونیت و در ۵ عدد دیگر (سری NC) از بتن معمولی استفاده شد. جهت مقایسه نمونه‌ها از مصالح یکسان در ساخت آن‌ها استفاده شد. تنها تفاوت تیرهای ساخته شده، استفاده از نانولاستونیت و فوق روان کننده در طرح اختلاط نمونه‌های سری NCW می‌باشد.

طرح اختلاط نمونه‌های ساخته شده برابر جدول ۲ می‌باشد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های سری NC و NCW به‌طور میانگین به ترتیب برابر 372 kg/cm^2 و 403 kg/cm^2 است. عیار مصالح پودری (سیمان + نانولاستونیت) در همه نمونه‌ها ثابت و برابر ۰/۴۵ می‌باشد. در نمونه‌های سری NCW برابر تحقیق [۸] از ۱۰٪ نانولاستونیت به‌عنوان جای‌گزین سیمان استفاده شده است. میلگردهای کششی و فشاری مورد استفاده آج‌دار، از نوع AIII و از رده S400 و میلگرد مورد استفاده جهت خاموت، بدون آج و از رده S240 است.



شکل ۲- عکس میکروسکوپی (TEM) از ذرات نانولاستونیت

۲-۲- مصالح
سیمان مصرفی، پرتلند (OPC) نوع ۲ کارخانه سیمان قاین-ایران، منطبق بر استاندارد ASTM C150 [۱۳] می‌باشد. نرمی سیمان $2950 \text{ cm}^2/\text{gr}$ و مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است. ولاستونیت مورد استفاده در این تحقیق دارای ساختاری سوزنی و فیبری شکل با بعد عرضی ۱۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر برابر شکل ۲ بوده که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

بر اساس استاندارد ASTM C618 (ASTM 2008 b) ولاستونیت در رده C پوزولان‌ها قرار می‌گیرد [۱۴]. ریزدانه مورد استفاده، ماسه با اندازه حداکثر قطر اسمی $4/75 \text{ mm}$ و مدول نرمی ۳ بوده و وزن مخصوص آن $2/57 \text{ gr/cm}^3$ و جذب آب آن ۱/۵٪ است. درشت‌دانه مورد استفاده، شن با اندازه حداکثر قطر اسمی $12/7 \text{ mm}$ و دانه‌بندی پیوسته بوده و وزن مخصوص آن $2/52 \text{ gr/cm}^3$ و جذب آب آن ۰/۹٪ است. دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها الزامات استاندارد ASTM C33 [۱۵] را برآورده می‌سازد.

از فوق‌روان‌کننده SPA Plast 403 منطبق بر استاندارد ASTM C494 [۱۶] و نوع F استفاده گردید. وزن مخصوص آن

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی سیمان و نانولاستونیت مورد استفاده (مقادیر بر حسب درصد)

مواد	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	L.o.I
سیمان	۲۲/۳۹	۴/۳۱	۳/۴۰	۶۳/۵۶	۲/۹۵	۱/۸۳	-	-	-	۰/۹۲
نانولاستونیت	۴۶/۹۶	۳/۹۵	۲/۷۹	۳۹/۷۷	۱/۳۹	۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۰۴	۰/۲۲	۴/۳۱

جدول ۲- طرح اختلاط به‌کاررفته در نمونه‌های سری NC و NCW

طرح اختلاط	سیمان (Kg/m ³)	آب (Kg/m ³)	ماسه (Kg/m ³)	شن (Kg/m ³)	نانولاستونیت (Kg/m ³)
NC	۴۰۰	۱۸۰	۹۴۳	۶۹۵	-
NCW	۳۶۰	۱۸۰	۹۴۳	۶۹۵	۴۰

۳-۲- ساخت تیرها و نگهداری

مطابق شکل ۳ قرار گرفتند. براساس مرجع [۱۹] رویارویی با محیط خورنده تنها از یک وجه صورت پذیرفت. جریان از طریق یک منبع D.C. به صورت یکنواخت به نمونه‌ها اعمال شد. قبل از اعمال جریان خوردگی، داخل حوضچه‌ها مطابق مرجع [۲۰] به مدت ۴۸ ساعت با محلول نمک ۵٪ پر شد، تا نفوذ آب نمک به داخل نمونه‌ها صورت پذیرفته و شرایط نسبتاً یکسانی در کلیه تیرها ایجاد گردد.

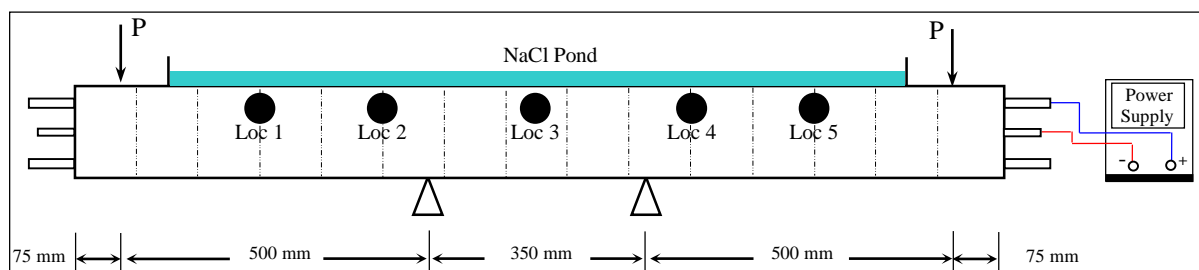
جدول ۳- نمونه‌های آزمایش شده

گروه	نمونه‌ها	مدت زمان اعمال خوردگی (روز)	درصد خوردگی هدف (%)
NC	NC1	۱۲	۲
	NC2	۳۲	۵
	NC3	۵۸	۱۰
	NC4	۸۵	۱۵
	NC5	۱۴۲	۲۵
NCW	NCW1	۱۲	۲
	NCW2	۳۲	۵
	NCW3	۵۸	۱۰
	NCW4	۸۵	۱۵
	NCW5	۱۴۲	۲۵

دو طرح اختلاط معرفی شده در جدول ۲ جهت ساخت بتن مورد استفاده قرار گرفت. ارزیابی کارایی بتن با روش استاندارد ASTM C143 [۱۷] انجام شد. بتن در قالب‌های فلزی آماده شده، ریخته و از یک ویراتور برقی به منظور ایجاد تراکم مناسب و یکنواخت به هنگام بتن‌ریزی استفاده شد. نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری جهت تعیین مقاومت فشاری برابر استاندارد BS1881-116-83 [۱۸] از هر طرح اختلاط تهیه گردید. پس از ۲۴ ساعت از بتن ریزی، تیرها از قالب خارج و تا زمان شروع آزمایش در شرایط مرطوب مراقبت و نگهداری شدند. در این تحقیق تعداد ۵ عدد تیر از گروه NC و تعداد ۵ عدد تیر از گروه NCW برابر جدول ۳ ساخته شد.

۲-۴- خوردگی تسریع شده به همراه اعمال بار

به منظور اعمال خوردگی در تیرهای بتن مسلح ساخته شده، از روش خوردگی تسریع شده استفاده شد. پس از گذشت ۲۸ روز از بتن‌ریزی، تیرها تحت مواجهه با آب نمک ۵٪ از طریق حوضچه ساخته شده بر روی وجه کششی آن‌ها



شکل ۳- طرح شماتیک خوردگی و اعمال بار هم‌زمان در تیرهای بتنی مسلح

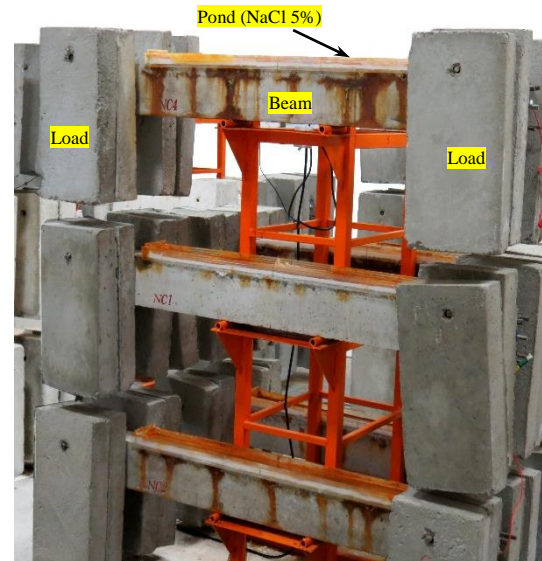
با توجه به این مسأله که در سازه‌های واقعی خوردگی هم‌زمان با تحمل بارهای بهره‌برداری می‌باشد و اعمال این دو به صورت هم‌زمان اثر هم‌افزایی بر میزان خوردگی می‌گذرد و در نتیجه خرابی سازه دارد، لذا به منظور شبیه سازی شرایط واقعی، تیرها تحت خوردگی هم‌زمان با اعمال بار قرار گرفتند. بار ثقلی وارده بر اساس مرجع [۲۲] به میزان ۸٪ ظرفیت نهایی مطابق شکل ۴ در نظر گرفته شد. مقدار بار به گونه‌ای می‌باشد که از لنگر خمشی ترک خوردگی تیر کمتر است. بارگذاری به صورت ثقلی و چهارنقطه‌ای بوده و مقدار آن در طول انجام آزمایش ثابت است.

قطب مثبت منبع به آند و قطب منفی به کاتد متصل شد. کاتد یک میله استیل با قطر ۸ میلی‌متر می‌باشد که مطابق مرجع [۱۹] داخل بتن قرار گرفت. جریان اعمالی به استناد مرجع [۲۱] کمتر از $200 \text{ A/cm}^2 \mu$ و به صورت متوسط $159 \text{ A/cm}^2 \mu$ در نظر گرفته شد.

آب نمک داخل حوضچه‌ها به منظور اکسیژن رسانی بهتر هر ۷۲ ساعت تعویض شد. دما و رطوبت محیط در طی فرآیند خوردگی به منظور جلوگیری از بروز خطا در هنگام قرائت داده‌ها ثابت نگه داشته شد.

در این تحقیق از دستگاه گالوپالس با بهره‌گیری از روش گالوانوستاتیک و بر پایه تکنولوژی FORCE دانمارک برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن مورد استفاده قرار گرفت. طرح شماتیک و نحوه اندازه‌گیری این روش در شکل ۶ نشان داده شده است. جنس الکترود مرجع این دستگاه Ag/AgCl می‌باشد.

کلیه آزمایشات در آزمایشگاه بتن دانشگاه سیستان و بلوچستان و آزمایشگاه بتن دانشگاه آزاد اسلامی بیرجند انجام شد.



شکل ۴- نمونه‌ها تحت اعمال بار و خوردگی همزمان

۲-۲- اندازه‌گیری ترک‌ها

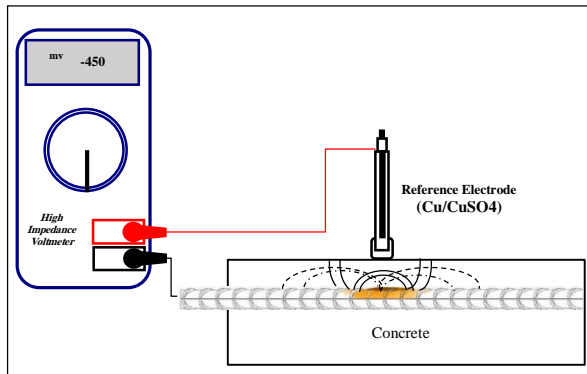
پس از اتمام مدت زمان خوردگی هر تیر با قطع جریان، عرض ترک‌های ناشی از خوردگی در امتداد میلگردهای کششی در طول تیر توسط یک میکروسکوپ چشمی با بزرگ‌نمایی ۳۵X و دقت ۰/۰۲mm اندازه‌گیری و برداشت گردید.

۲-۸- تعیین جرم کاهش یافته

پس از اتمام مدت زمان خوردگی هر تیر، نمونه‌ها شکسته، میلگردهای کششی خارج و بر اساس ASTM G1-03 [۲۵] سطح آن‌ها عاری از زنگ‌زدگی گردید. در ادامه با استفاده از ترازوی با دقت ۰/۱gr کلیه میلگردها توزین و نتایج ثبت و با وزن اولیه مقایسه و میزان کاهش جرم محاسبه شد.

۲-۵- اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل نیم پیل

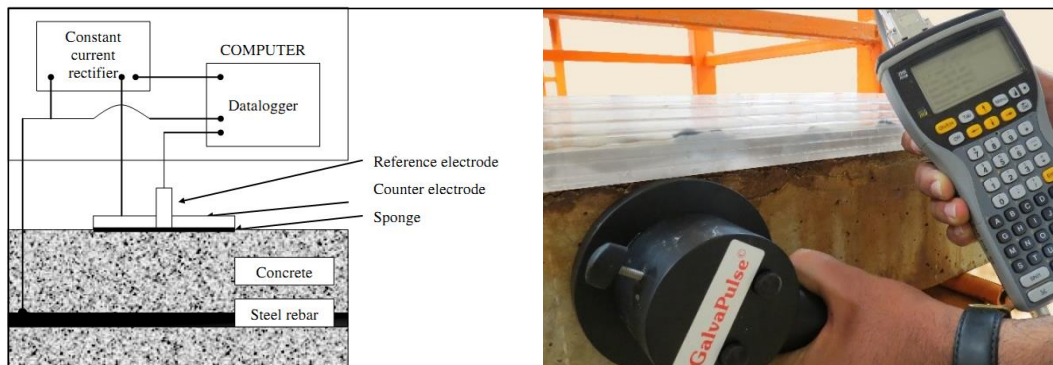
تعیین پتانسیل نیم پیل در این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM C876 [۲۳] با استفاده از الکترود مرجع (Cu-CuSO4) در نقاط مشخص شده مطابق شکل ۳ در وجه جانبی تیر، در امتداد میلگردهای کششی و به صورت هفتگی صورت پذیرفت. دما، رطوبت محیط و رطوبت سطح نمونه‌ها در هنگام برداشت، ثابت نگه داشته شدند.



شکل ۵- اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل نیم پیل در تیرها

۲-۶- اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن

مقاومت الکتریکی بتن یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر سرعت خوردگی میلگرد در بتن می‌باشد. مقاومت الکتریکی کم بتن سبب تسریع در انتقال یون‌ها می‌شود [۲۴].



شکل ۶- اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی تیرها با استفاده از دستگاه گالوپالس

۳- بحث و نتایج

۳-۱- اختلاف پتانسیل نیم پیل

شکل ۷ تغییرات اختلاف پتانسیل نیم پیل تیرهای بتنی مسلح NC و NCW را در برابر مدت زمان اعمال خوردگی برای موقعیت‌های مختلف در طول تیر نشان می‌دهد.

همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود مقدار اختلاف پتانسیل نیم پیل در تیرهای NC نسبت به تیرهای NCW منفی‌تر است. علت این موضوع مقاومت کمتر بتن معمولی نسبت به بتن حاوی نانولاستونیت در برابر نفوذ یون‌های کلر و در نتیجه احتمال خوردگی بیشتر میلگردها در تیرهای NC نسبت به تیرهای NCW است. مقدار اختلاف پتانسیل در نقطه میانی تیر (Location ۳) در تیرهای NC پس از ۱۲ روز از شروع خوردگی تسریع شده و در تیرهای NCW پس از ۳۲ روز از شروع خوردگی نسبت به سایر نقاط منفی‌تر شده است.

افزایش کرنش‌های میانی تیر و در نتیجه بازشدگی عرض ترک‌ها در این ناحیه به علت اعمال بار در حین خوردگی و لنگر بیشتر، روند خوردگی میلگرد در موقعیت میانی تیر را تسریع نموده و سبب منفی‌تر شدن مقدار اختلاف پتانسیل این بخش از تیر نسبت به سایر بخش‌ها می‌گردد.

با بررسی شکل ۷ مشاهده می‌شود در تیرهای NCW مقدار اختلاف پتانسیل نیم پیل در برداشت‌های اول و دوم تقریباً برابر بوده و تغییرات ناگهانی در برداشت سوم رخ داده است، این در حالی است که در تیرهای سری NC این افت در برداشت دوم دیده می‌شود. در واقع نمونه‌های سری NCW به علت دارا بودن نانولاستونیت ساختار متراکم‌تری نسبت به نمونه‌های سری NC داشته و در برابر شرایط محیطی مخرب از خود مقاومت بیشتری نشان می‌دهند، اما پس از آن با ایجاد ترک در پوشش بتنی میلگرد، روند نزولی نسبتاً ثابتی مشاهده گردید.

با بررسی نمودار مربوط به دو تیر NC5 و NCW5 در شکل ۷ مشاهده می‌گردد میزان اختلاف پتانسیل در زمان شروع خوردگی برای تیرهای NC5 و NCW5 به ترتیب برابر (mV) -۴۷۵ و (mV) -۳۸۵ و در زمان پایان خوردگی به ترتیب برابر (mV) -۶۳۹/۸ و (mV) -۶۲۰ است.

این نتایج نشان می‌دهد تأثیر نانولاستونیت بر میزان اختلاف پتانسیل در شروع خوردگی بیشتر است به گونه‌ای که سبب بهبود

اختلاف پتانسیل نیم پیل به میزان حدود ۱۹٪ در تیر NCW5 نسبت به تیر NC5 می‌شود. اما با شروع خوردگی و ایجاد ترک در پوشش بتنی میلگرد، نقش آن در فرایند خوردگی کم‌رنگ‌تر می‌شود.

به هر حال نانولاستونیت نقش مؤثری در کاهش احتمال خوردگی دارد به گونه‌ای که متوسط میزان اختلاف پتانسیل در طول دوره خوردگی برای تیر NC5 برابر (mV) -۵۹۹ و برای تیر NCW5 برابر (mV) -۵۶۶ است. در خصوص سایر تیرهای تحت آزمایش نیز روند مشابهی مشاهده گردید.

در شکل ۸ رابطه بین کاهش اختلاف پتانسیل نیم پیل و درصد کاهش جرم برای نمونه‌های NC و NCW نشان داده شده است. رابطه غیرخطی مناسبی بین کاهش اختلاف پتانسیل و درصد کاهش جرم در نمونه‌های NC و NCW وجود دارد. میزان کاهش اختلاف پتانسیل بر اساس روابط ۱ و ۲ به دست می‌آید:

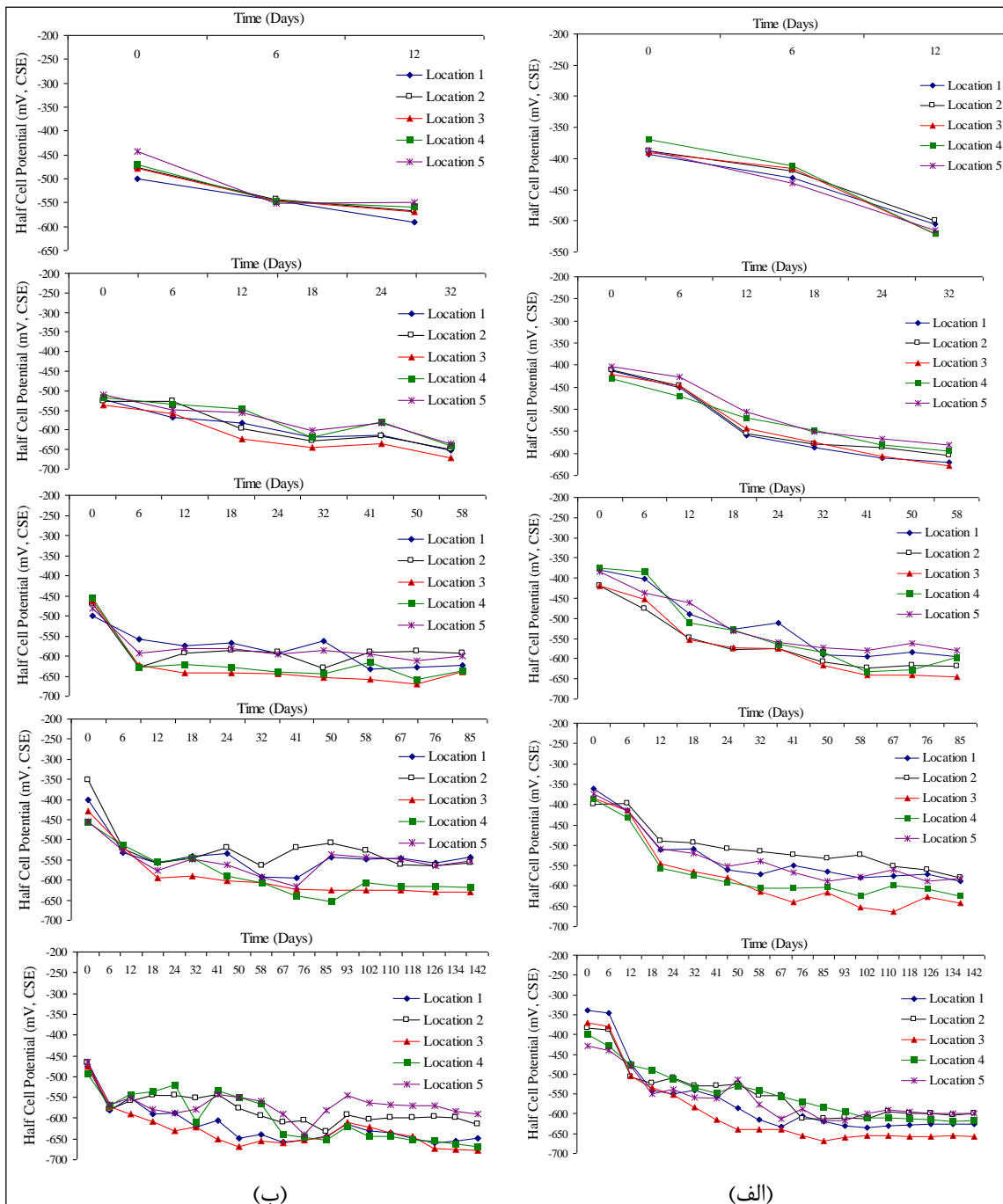
$$\Delta E_{Corr} = -170.14 \times \exp\left(-\frac{1.27}{CL}\right) \quad R^2 = 0.9955 \quad (1)$$

و برای نمونه‌های NCW:

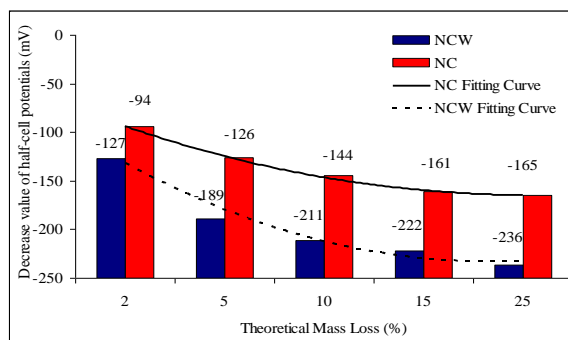
$$\Delta E_{Corr} = -244.56 \times \exp\left(-\frac{1.32}{CL}\right) \quad R^2 = 0.9685 \quad (2)$$

که در روابط ۱ و ۲ ΔE_{Corr} میزان کاهش اختلاف پتانسیل نیم پیل در اثر خوردگی نسبت به مقدار اولیه و CL درصد کاهش جرم تئوری میلگرد می‌باشد. به استناد روابط فوق می‌توان با استفاده از تست غیرمخرب HCP و پایش دوره‌ای، وضعیت خوردگی میلگردهای سازه‌های تحت شرایط محیطی مخرب را ارزیابی و برآورد نمود.

بر اساس شکل ۸ همان‌طور که مشاهده می‌شود به منظور رسیدن به درصد‌های برابر کاهش جرم، میزان کاهش اختلاف پتانسیل در نمونه‌های NCW بیشتر از نمونه‌های NC است. با افزایش خوردگی از ۲٪ تا ۵٪ میزان رشد کاهش اختلاف پتانسیل در نمونه‌های NCW بیشتر از نمونه‌های NC می‌باشد. پس از آن سرعت کاهش تقریباً با نمونه‌های NC برابر می‌شود. علت این امر مقاومت الکتریکی اولیه بالاتر نمونه‌های NCW نسبت به نمونه‌های NC می‌باشد که پس از افزایش میزان خوردگی و رسیدن به درجات بالای خوردگی با ایجاد ترک مقدار مقاومت الکتریکی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.



شکل ۷- اختلاف پتانسیل نیم پیل تیرهای تحت خوردگی، (الف) با نانولاستونیت (ب) بدون نانولاستونیت



شکل ۸- رابطه کاهش اختلاف پتانسیل نیم پیل و درصد کاهش جرم

۲-۳- مقاومت الکتریکی

نزدیک تر می شود. در نقاط شکست BP1 و BP2 به ترتیب نمونه های NC و NCW بخش عمده ای از مقاومت خود را از دست می دهند. زمان مرتبط با آن در نمونه های NCW حدود دو برابر نمونه های NC می باشد.

در ناحیه دوم (Region 2) روند کاهش اختلاف مقاومت الکتریکی با سرعت کمتر از ناحیه اول وجود دارد.

در ادامه به دلیل گسترش ترک ها میزان مقاومت الکتریکی بتن و نقش نانولولاستونیت بر آن کاهش یافته و میزان اختلاف مقاومت الکتریکی نمونه های دو رده NC و NCW به حداقل مقدار می رسد (Region 3).

شکل ۱۱ رابطه بین اختلاف پتانسیل الکتریکی (HCP) و مقاومت الکتریکی در نمونه های NC و NCW را نشان می دهد. با توجه به شکل مشاهده می گردد منحنی برازش شده از دقت بالایی برخوردار است.

معادلات ۳ و ۴ توابع برازش شده برای نمونه های NC و NCW می باشد.

$$R_c = 0.00004 \times (HCP)^2 + 0.0506 \times (HCP) + 17.855 \quad (3)$$

$$R^2 = 0.8913$$

$$R_c = 0.0001 \times (HCP)^2 + 0.1247 \times (HCP) + 38.423 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.9667$$

که در آن ها R_c مقاومت الکتریکی بتن و HCP اختلاف پتانسیل الکتریکی می باشد.

۳-۳- کاهش جرم

پس از اتمام مدت زمان خوردگی، محاسبه کاهش جرم با استفاده از یک ترازوی دقیق صورت گرفت. درصد کاهش جرم واقعی بر اساس رابطه ۵ محاسبه گردید.

$$\%Measured\ Mass\ Loss = \frac{(w_1 - w_2)}{w_1} \times 100 \quad (5)$$

که در آن w_1 وزن اولیه و w_2 وزن ثانویه میلگرد می باشد.

درصد کاهش جرم میلگردها به صورت تئوری با استفاده از رابطه فارادی مطابق معادله ۶ محاسبه می شود.

$$\%Theoretical\ Mass\ Loss = \frac{(\Delta w)}{w_1} \times 100 \quad (6)$$

$$\Delta w = \frac{t \times i \times 55.847}{2 \times 96487}$$

شکل ۹ میانگین مقاومت الکتریکی تیرهای NC و NCW را در طی دوره خوردگی به طور هم زمان با تغییرات اختلاف پتانسیل نیم پیل نشان می دهد. همان طور که مشاهده می گردد مقدار مقاومت الکتریکی بتن حاوی نانولولاستونیت در کلیه تیرهای NCW1 تا NCW5 بیشتر از تیرهای با بتن معمولی NC1 تا NC5 است.

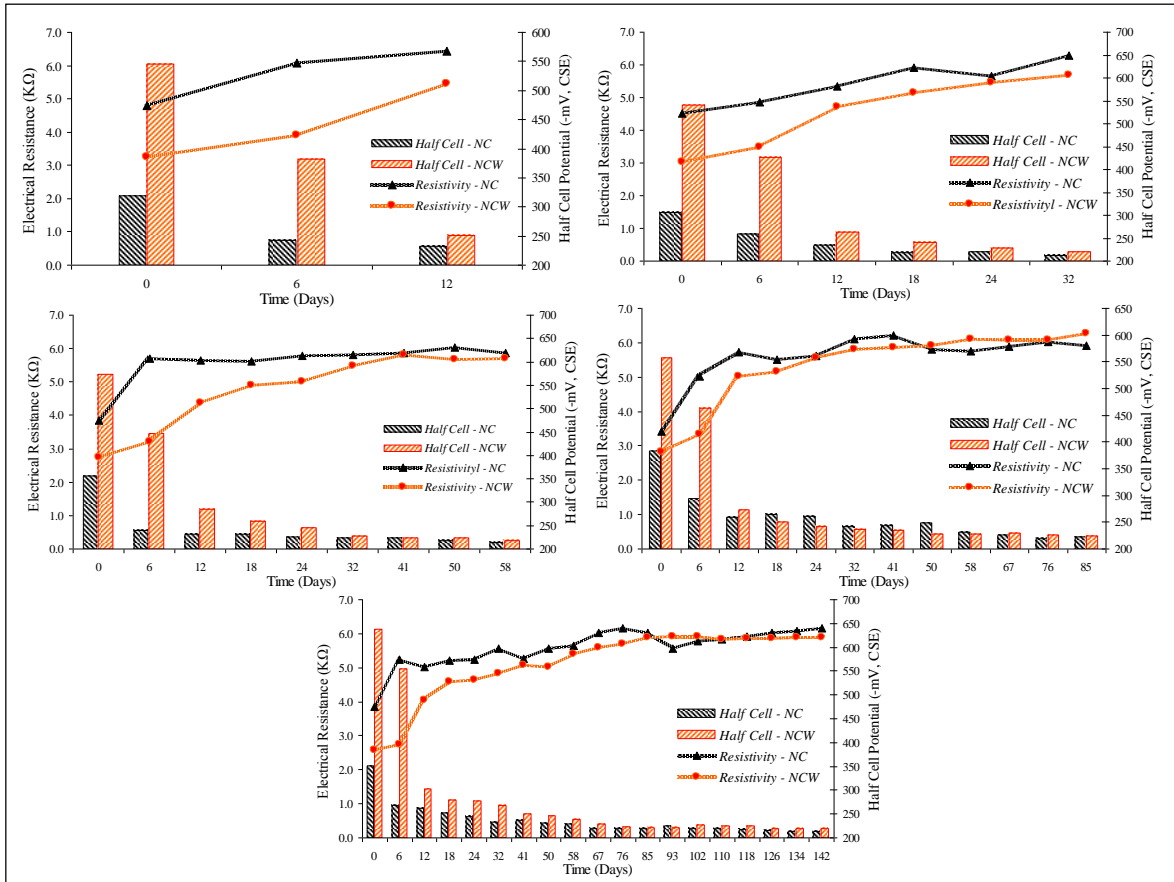
میزان این اختلاف در ابتدای دوره خوردگی بیشتر بوده و با گذر زمان و ترک خوردگی پوشش بتنی میلگرد کاهش می یابد. به گونه ای که مقدار مقاومت الکتریکی در تیرهای NC5 و NCW5 در شروع فرایند خوردگی تسریع شده به ترتیب برابر $2/1k\Omega$ و $6/1k\Omega$ است، حال آن که در انتها مقادیر آن ها به ترتیب برابر $0/2k\Omega$ و $0/3k\Omega$ می شود.

در این شکل، روند تغییرات اختلاف پتانسیل نیم پیل و مقاومت الکتریکی تیرهای NC و NCW به صورت هم زمان در طول دوره خوردگی نشان داده شده است. مشاهده می شود با گذر زمان و کاهش مقاومت الکتریکی، مقدار اختلاف پتانسیل نیم پیل منفی تر می شود. نقطه شکست نمودار اختلاف پتانسیل نیم پیل با تغییرات ناگهانی مقاومت الکتریکی هم خوانی دارد که این امر ناشی از ایجاد ترک های مؤثر در پوشش بتنی میلگرد می باشد.

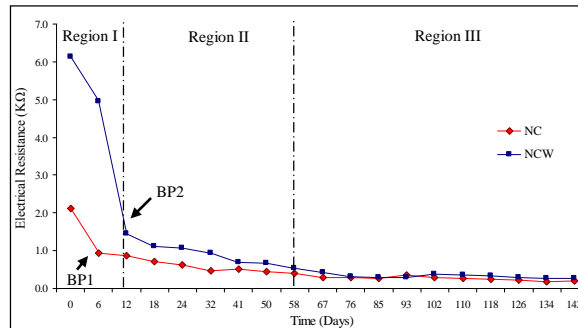
در واقع با شروع خوردگی و ایجاد ترک ناشی از آن در پوشش بتنی میلگرد، مقاومت الکتریکی کاهش یافته و با افزایش میزان نفوذ یون کلراید، اکسیژن و رطوبت میزان خوردگی افزایش می یابد و نقش پوشش بتنی در دوام نمونه های بتن مسلح کاهش می یابد. ولاستونیت با افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ پذیری، مقاومت الکتریکی بتن را افزایش داده که این امر سبب افزایش عمر مفید نمونه های بتن مسلح در شرایط خوردنده می گردد.

شکل ۱۰ تغییرات اختلاف مقاومت الکتریکی متوسط در تیرهای NC5 و NCW5 را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می گردد در ناحیه اول (Region 1) مقدار اختلاف مقاومت الکتریکی در برداشت های اول و دوم (۰ و ۶ روز) حدود $4k\Omega$ بوده و پس از آن با ادامه روند خوردگی در برداشت سوم (۱۲ روز) و رسیدن به ۲٪ کاهش جرم تئوری با ایجاد ترک میزان اختلاف به صورت فاحشی کاهش یافته است.

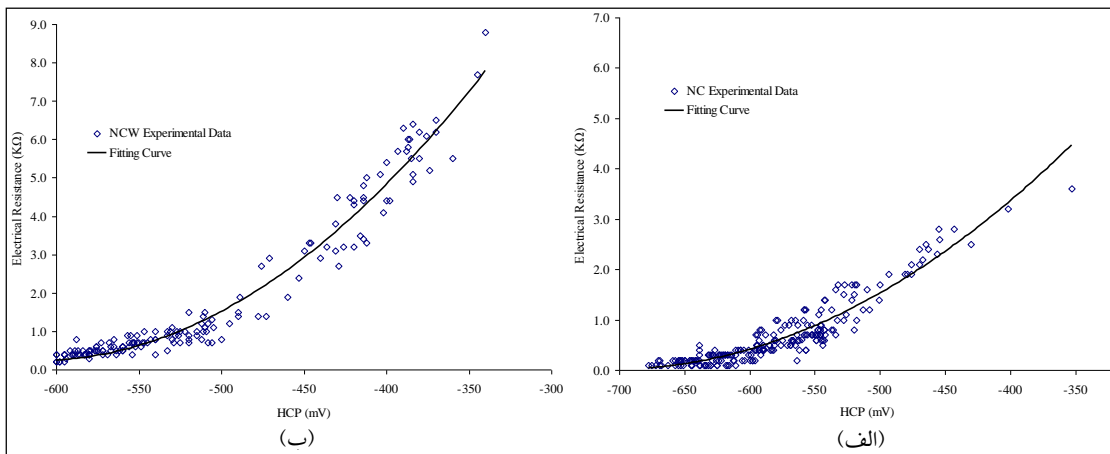
به دلیل ایجاد ترک علاوه بر کاهش میزان مقاومت الکتریکی مقادیر مقاومت الکتریکی تیرهای دو رده NC و NCW به یکدیگر



شکل ۹- مقاومت الکتریکی و اختلاف پتانسیل نیم پیل تیرهای مورد آزمایش



شکل ۱۰- تغییرات اختلاف پتانسیل نیم پیل و مقاومت الکتریکی تیرهای NC5 و NCW5



شکل ۱۱- رابطه بین اختلاف پتانسیل الکتریکی و مقاومت الکتریکی (الف) نمونه های NC، (ب) نمونه های NCW

میلگردها برای نمونه‌های NC1 و NCW1 به ترتیب برابر $60/9 \text{ gr}$ و $39/3 \text{ gr}$ می‌باشد؛ حال آن‌که کاهش جرم برای نمونه‌های NC5 و NCW5 به ترتیب برابر $496/2 \text{ gr}$ و $435/6 \text{ gr}$ است.

در واقع در نمونه‌های با مدت زمان رویارویی کم اختلاف کاهش جرم تیرهای NC و NCW زیاد و به حدود ۳۵٪ می‌رسد در صورتی‌که با گذر زمان خوردگی، به علت افزایش و توسعه ترک‌ها و از بین رفتن بخش عمده مقاومت الکتریکی بتن، میزان این اختلاف کم و به حدود ۱۲٪ می‌رسد. در این شکل عرض ترک‌های ایجاد شده، به صورت میانگین نشان داده شده است.

در تیرهای NCW1 تا NCW3 عرض ترک با رشدی نسبتاً ثابت در حال افزایش است پس از آن با افزایش ناگهانی عرض ترک نقطه شکستی در نمودار مشاهده می‌گردد. در خصوص تیرهای بدون نانولاستونیت نقطه شکست در NC2 مشاهده می‌گردد. از طرفی عرض میانگین ترک‌ها در تیرهای NCW از تیرهای NC کمتر است به گونه‌ای که مقدار میانگین عرض ترک در تیرهای NC1 و NCW1 به ترتیب برابر $0/07 \text{ mm}$ و $0/24 \text{ mm}$ و در تیرهای NC5 و NCW5 به ترتیب برابر $1/35 \text{ mm}$ و $1/52 \text{ mm}$ می‌باشد.

افزایش عرض ترک‌ها با کاهش مقاومت الکتریکی تیرها همراه است و اختلاف مقاومت الکتریکی تیرهای سری NC و NCW را کاهش می‌دهد و در نتیجه با گذر زمان اختلاف کاهش جرم این دو رده کمتر می‌شود.

که در آن t مدت زمان اعمال خوردگی بر حسب ثانیه و i جریان خوردگی بر حسب آمپر است.

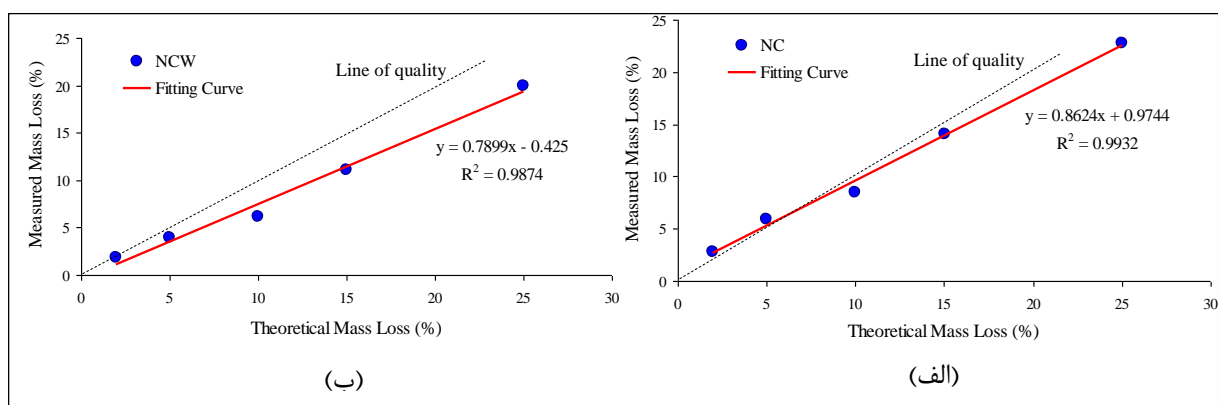
شکل ۱۲ (الف) و (ب) نمودار درصد کاهش جرم تئوری در مقابل درصد کاهش جرم اندازه‌گیری شده را به ترتیب برای نمونه‌های NC و NCW نشان می‌دهند.

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود مقدار ضریب R^2 برای نمونه‌های NC و NCW به ترتیب برابر $0/9932$ و $0/9874$ می‌باشد که این مقادیر نشان می‌دهد تابع با دقت بالایی برازش شده است و میزان خطای آن ناچیز است.

با بررسی شکل ۱۲ همچنین مشاهده می‌گردد میزان شیب نمودار مربوط به NCW نسبت به NC کمتر است و تابع برازش زاویه بیشتری نسبت به نیمساز گرفته است. علت این موضوع کاهش جرم کمتر نمونه‌های NCW نسبت به نمونه‌های NC است.

کاهش جرم تمامی میلگردهای کششی تیرهای سری NC و NCW در شکل ۱۳ ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در کلیه تیرهای رده NC میزان کاهش جرم از تیرهای سری NCW کمتر است. دلیل این موضوع آن است که میزان خوردگی میلگرد در تیرهای NCW به علت استفاده از نانولاستونیت در طرح اختلاط کمتر است. همچنین در درجات کم خوردگی میزان این اختلاف نسبت به درجات بالای خوردگی بیشتر است این نتایج با نتایج حاصل از اختلاف پتانسیل نیم پیل و مقاومت الکتریکی انطباق دارد. مقدار کاهش جرم



شکل ۱۲- مقایسه درصد جرم کاهش یافته تئوری با اندازه‌گیری شده، (الف) بتن معمولی، (ب) بتن حاوی نانولاستونیت

۵- رابطه مناسبی بین کاهش اختلاف پتانسیل نیم پیل و درصد کاهش جرم در نمونه‌های NC و NCW وجود دارد. با استفاده از این رابطه می‌توان بر اساس درصد کاهش جرم میزان کاهش اختلاف پتانسیل نیم پیل نسبت به مقدار اولیه آن را تعیین نمود.

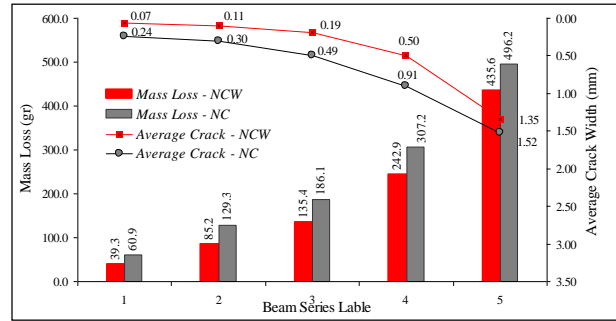
۶- نتایج مقاومت الکتریکی نشان داد مقاومت الکتریکی تیرهای NCW به طور میانگین حدود ۲/۱ برابر تیرهای NC در طی انجام آزمایش خوردگی تسریع شده می‌باشد. استفاده از ذرات نانولاستونیت در طرح اختلاط تیرهای NCW سبب اصلاح ساختار ماتریسی سیمان و پرشدن منافذ بتن و افزایش مقاومت الکتریکی آن می‌شود. این عامل می‌تواند سبب افزایش عمر مفید سازه‌های بتن مسلح در شرایط محیطی خوردنده شود.

۷- نتایج کاهش جرم میلگردها نشان داد میزان کاهش جرم در اثر خوردگی در نمونه‌های NCW در مقایسه با نمونه‌های NC کمتر است. میزان این اختلاف در تیرهای با مدت زمان رویارویی کم (NC1 و NCW1) حدود ۳۵٪ بوده که با افزایش میزان خوردگی به علت توسعه ترک‌ها و از بین رفتن بخش عمده مقاومت الکتریکی بتن مقدار اختلاف کم و به حدود ۱۰٪ می‌رسد. این نتیجه با داده‌های حاصل از اختلاف پتانسیل نیم پیل و مقاومت الکتریکی تیرها انطباق دارد.

۸- عرض میانگین ترک‌های ایجاد شده در تیرهای NCW در سطوح مختلف خوردگی کمتر از تیرهای NC می‌باشد که می‌تواند نقش قابل توجهی در افزایش دوام سازه‌های بتن مسلح داشته باشد.

۵- مراجع

- [1] Hassan, A. A. A., Hossain, K. M. A, and Lachemi, M., "Corrosion resistance of self-consolidating concrete in full-scale reinforced beams," *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, no. 1, p. 29-38, 2009.
- [2] Avelaño, R. R., and Ortega, N. F., "Characterization of concrete cracking due to corrosion of reinforcements in different environments", *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 2, p. 630-637, 2011.
- [3] Leelalerkiet, V., Kyung, J.-W., Ohtsu, M., et al., "Analysis of half-cell potential measurement for corrosion of reinforced concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 18, no. 3, p. 155-162, 2004.
- [4] Kim, Y. Y., Kim, J. M., Bang, J.-W., et al., "Effect of cover depth, w/c ratio, and crack width



شکل ۱۳- کاهش جرم میلگرد در تیرهای سری NC و NCW در مقایسه با عرض میانگین ترک‌های ناشی از خوردگی

۴- نتیجه گیری

تیرهای بتن مسلح حاوی نانولاستونیت (NCW) تحت بار اعمالی در شرایط خوردگی تسریع شده مورد ارزیابی قرار گرفته و با تیرهای بتن معمولی (NC) مقایسه شدند. ارزیابی‌ها بر اساس پارامترهای اختلاف پتانسیل نیم پیل، مقاومت الکتریکی و کاهش جرم میلگرد صورت پذیرفت. نتایج به دست آمده از این تحقیق عبارتند از:

- ۱- نانولاستونیت به دلیل دارا بودن ساختاری سوزنی و فیبری شکل و ابعاد کوچک نسبت به سیمان منافذ موئینه داخل بتن را پر نموده و شبکه ماتریسی متراکم تری ایجاد می‌نماید و سبب کاهش احتمال خوردگی میلگرد، افزایش مقاومت الکتریکی، کاهش عرض ترک و در نتیجه کاهش جرم میلگرد می‌شود.
- ۲- نتایج آزمایش نیم پیل نشان داد که نانولاستونیت تأثیر چشمگیری در بهبود مقادیر اختلاف پتانسیل و در نتیجه کاهش احتمال خوردگی دارد. به گونه‌ای که در درجات کم خوردگی میزان اختلاف پتانسیل تیرهای NC نسبت به تیرهای NCW به صورت میانگین حدود ۲۱٪ منفی تر است.

۳- در کلیه تیرها میزان اختلاف پتانسیل نیم پیل در وسط دهانه بیشتر از سایر قسمت‌ها است. علت آن وجود تنش‌های ناشی از لنگر خمشی است که سبب افزایش کرنش‌ها و بازشدگی ترک‌ها، افزایش نفوذ یون کلر و تسریع روند خوردگی میلگرد می‌شود.

۴- اختلاف پتانسیل نقطه میانی تیرهای NCW پس از گذشت مدت زمان بیشتری (حدود ۲ برابر) نسبت به تیرهای NC نسبت به سایر قسمت‌های تیر منفی می‌شود. علت این مسئله افزایش مقاومت تیرهای NCW نسبت به NC در برابر نفوذ یون کلر و کاهش میزان خوردگی میلگرد در آن‌ها می‌باشد.

- [17] American Society for Testing and Materials, ASTM C 143. Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete, 2001.
- [18] British Standard Institution, BS 1881-116:83, Method for determination of compressive strength of concrete cubes, 1983.
- [19] Malumbela, G., Moyo, P., and Alexander, M., "A step towards standardising accelerated corrosion tests on laboratory reinforced concrete specimens", *Journal of the south African institution of civil engineering*, vol. 54, no. 2, p. 78–85, 2012.
- [20] Rinaldi, Z., Imperatore, S., and Valente, C., "Experimental evaluation of the flexural behavior of corroded P/C beams", *Construction and Building Materials*, vol. 24, p. 2267–2278, 2010.
- [21] El Maaddawy, T. and Soudki, K., "Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete." *Journal of Material in Civil Engineering*, vol. 15:1(41), p. 41-47, 2003.
- [22] Malumbela, G., Moyo, P., and Alexander, M., "Longitudinal strains and stiffness of RC beams under load as measures of corrosion levels," *Engineering Structures*, vol. 35, p. 215-227, 2012.
- [23] American society for testing and materials, ASTM C 876. Standard test method for half cell potential of reinforcing steel in concrete, 1991.
- [24] Markeset, G., and Myrdal, R., Modelling of reinforcement corrosion in concrete - State of the art, COIN P4 Operational service life design, SP 4.1 F Service life modelling and prediction, Concrete Innovation Center, 2008.
- [25] Society for Testing and Materials, ASTM G1. Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens, 2003.
- on half cell potential in cracked concrete exposed to salt sprayed condition", *Construction and Building Materials*, vol. 54, p. 636-645, 2014.
- [5] Zou, Z. H., Wu, J., Wang, and Z. Wang, "Relationship between half-cell potential and corrosion level of rebar in concrete", *Corrosion Engineering, Science and Technology*, p. 1-8, 2016.
- [6] Nygaard, P. V., "Non-destructive electrochemical monitoring of reinforcement corrosion", Phd thesis, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2008.
- [7] Kalla, P., Misra, A., Gupta, R. C., et al., "Mechanical and durability studies on concrete containing wollastonite-fly ash combination", *Construction and Building Materials*, vol. 40, p. 1142-1150, 2013.
- [8] Miri, M., Beheshti Nezhad, H., and Jafari, M., "Experimental investigation on mechanical properties of concrete containing nano wollastonite and modeling with GMDH- type neural networks", (in Persian), *Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)*, vol. 46, No. 2, p. 49- 51, 2014.
- [9] Ni, T., Zhang, L., and Yuan, B., "Influence of wollastonite or plant fiber on performance of autoclaved cement concrete", *Applied Mechanics and Materials* Vol. 99-100, p. 692-695, 2011.
- [10] Zhang, LC., "Durability of concrete containing wollastonite and fly ash", *Advanced Materials Research*, vol. 800, p. 361-364, 2013.
- [11] Soliman, A. M., and Nehdi, M. L., "Effects of shrinkage reducing admixture and wollastonite microfiber on early-age behavior of ultra-high performance concrete", *Cement and Concrete Composites*, vol. 46, p. 81-89, 2014.
- [12] Kalla, P., Rana, A., Chad, Y. B., et al., "Durability studies on concrete containing wollastonite", *Journal of Cleaner Production*, vol. 87, p. 726-734, 2015.
- [13] American Society for Testing and Materials, ASTM C 150. Standard specification for portland cement
- [14] American Society for Testing and Materials, ASTM C 618. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete,
- [15] American Society for Testing and Materials, ASTM C33. Standard specification for concrete aggregates,
- [16] American Society for Testing and Materials, ASTM C 494-99a. Standard specification for chemical admixtures for concrete, 2001

Experimental Investigation on Corrosion Parameters in Reinforced Concrete Beams Containing Nano Wollastonite

H .Beheshti Nezhad

Ph.D. Student of Civil Engineering, Sistan and Baluchestan University, Iran

M .Miri*

Associate Professor, Sistan and Baluchestan University, Iran

M .R .Ghasemi

Professor, Sistan and Baluchestan University, Iran

Abstract

Periodic evaluation of the corrosion parameters is one of the methods usually used to assess the defects, resulting in increasing the service life of reinforced concrete (RC) structures in aggressive environments. In this paper the performance of NC and NCW beams in aggressive environment were compared. Ten RC beams (100×150×1500 mm) including 5 normal (NC) and 5 nano wollastonite concrete (NCW) samples were prepared and tested. All beams were monitored under simultaneous loading and accelerated corrosion. Evaluation of corrosion was conducted with measurement of half-cell potential difference (HCP), electrical resistance and rebar mass loss. The results showed that the terms of potential difference and electrical resistance were improved in NCW beams compared to NC beams. Potential difference in NC beams was 20% more negative than NCW beams at slight corrosion levels. Also, the average amount of electrical resistance of NCW beams was 2.1 times as that of NC beams. Another finding of this study was a 35% difference between the rebar mass loss of NCW samples compared with the NC samples at low corrosion levels. In general, NCW beams showed superior performance compared to their NC counterparts in terms of corrosion cracking, half-cell potential values, Electrical resistance, and rebar mass loss. As a result, the use of nano wollastonite, as a green admixture, can increase the service life of RC structures.

Keywords: RC beam, Corrosion, Half-cell potential difference, Electrical resistance, Nano wollastonite.

*Corresponding author: Mmiri@eng.usb.ac.ir.