

بررسی خوردگی در آزمون‌های بتنی مسلح با نسبت آب به سیمان مختلف واقع در شرایط رویارویی پاشش در منطقه خلیج فارس

محمد شکرچی زاده^{۱*}، مهدی ولی پور^۲ و فرهاد پرگر^۳

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی عمران و سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

^۲ دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه Missouri S&T آمریکا

^۳ دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه Delft هلند

چکیده

امروزه پدیده خوردگی در سازه‌های بتنی اجرا شده در مناطق جنوبی کشور یکی از معضلات مهم جامعه مهندسی کشور می‌باشد. پدیده خوردگی هر ساله هزینه‌های هنگفت مالی بر کشور تحمیل می‌کند. با این وجود، می‌توان با شناخت بهتر عوامل و دلایل آن در منطقه خلیج فارس، گام‌های مؤثرتری در راستای پیشگیری از خسارت‌های احتمالی و بهبود وضعیت موجود برداشت. در این تحقیق، با توجه به این که شرایط رویارویی پاشش یکی از مناطق حساس برای خوردگی آرماتور و در نتیجه تخریب بتن در محیط‌های دریایی می‌باشد، با ساخت آزمون‌های بتنی مسلح با نسبت‌های آب به سیمان مختلف (۰/۳۵، ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵) واقع در این شرایط رویارویی در منطقه خلیج فارس (جزیره قشم)، وضعیت خوردگی آرماتور با استفاده از روش‌های مختلفی از جمله جریان ماکروپیل، پتانسیل نیم‌پیل و نرخ خوردگی آرماتور در طول هیجده ماه بررسی شده است. بر اساس نتایج حاصله، کاهش نسبت آب به سیمان اثرات قابل ملاحظه‌ای بر کنترل خوردگی و تعویق زمان شروع خوردگی خواهد داشت. همچنین مقایسه روش‌های مورد استفاده برای بررسی خوردگی نشان از دقت مناسب آن‌ها برای تخمین شروع احتمالی خوردگی دارد.

واژگان کلیدی: پایایی بتن، خوردگی آرماتور، ناحیه پاشش، نسبت آب به سیمان، جریان ماکروپیل، پتانسیل نیم‌پیل، نرخ خوردگی.

۱- مقدمه

و ارائه راهکارهای عملی و اجرایی برای حل مشکلات موجود، انستیتو مصالح ساختمانی دانشکده فنی دانشگاه تهران پس از احداث اولین سایت دانشگاهی - تحقیقاتی کشور در زمینه پایایی بتن در بندرعباس، در سال ۱۳۸۲، با پشتیبانی سازمان منطقه آزاد قشم دومین سایت تحقیقاتی - دانشگاهی پایایی بتن کشور را در سال ۱۳۸۶ در جزیره قشم احداث نموده است (شکل (۱)).

در این تحقیق بلند مدت، روش‌هایی مانند جریان ماکروپیل، پتانسیل نیم‌پیل و اندازه‌گیری نرخ خوردگی برای بررسی وضعیت خوردگی آرماتورها در منطقه خلیج فارس مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله، نتایج بررسی وضعیت خوردگی آزمون‌های بتنی مسلح با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵ پس از هیجده ماه از ساخت آن‌ها در شرایط رویارویی پاشش ارائه شده است.

مهمترین عامل بروز پدیده خوردگی در منطقه خلیج فارس مشکلات متعددی مانند طراحی نامناسب، ضعف در اجرا و شرایط محیطی خورنده با حداکثر مقدار دمای میانگین ۳۴/۶ درجه سانتیگراد و حداکثر رطوبت نسبی ۷۳ درصد می‌باشد. شیوع این پدیده عمر مفید سازه‌های بتنی اجرا شده در این منطقه را با چالش‌های جدی مواجه کرده است. در نتیجه این مشکلات اجرایی که حاصل آن بتن نامرغوب‌تر و نفوذپذیرتر است، نفوذ یون کلر توسط آب دریا یا خاک منطقه موجب تسریع زمان شروع خوردگی شده و در نهایت شاهد کاهش چشمگیر عمر مفید سازه‌ها در این منطقه می‌باشیم [۴-۱]. با این وجود، با توجه به گستردگی ابعاد این مشکل، مطالعات و تحقیقات جامع‌اندکی برای حل این معضل و ارائه راهکارهای عملی در این مورد انجام شده است. بدون تردید هزینه‌های زیاد در جهت بهبود عمر سازه‌های جدید به همان اندازه مورد نیاز است که برای ضمانت سازه‌های موجود و تعمیر آن‌ها نیاز است.

در همین راستا و برای شناخت و درک بهتر وضعیت موجود



شکل ۱- سایت تحقیقاتی پایایی بتن در جزیره قشم

۲- بررسی خوردگی فولاد در بتن در اثر نفوذ یون کلر

خوردگی فولاد در بتن یکی از مهم‌ترین مسائلی است که در طول عمر سازه‌های بتنی مسلح وجود دارد. خوردگی شامل دو فرآیند است که عبارتند از فرآیند آندی، جایی که اکسید شدن رخ می‌دهد و فرآیند کاتدی، جایی که احیا شدن اتفاق می‌افتد. همچنین برای خوردگی، هدایت کننده الکتریکی (میلگرد) و الکترولیت (رطوبت) لازم است. آند و کاتد در بتن آرمه می‌تواند در یک میلگرد یا در دو میلگرد مجزا باشد. رطوبت بتن یک مسیر الکترولیتی را برای انتقال الکترون از آند به کاتد فراهم می‌آورد. میلگرد هدایت‌کننده الکتریکی است که پیل خوردگی را تکمیل می‌کند. خوردگی فولاد مسلح کننده در محیط قلیایی بتن شامل واکنش‌های آندی و کاتدی است که منجر به ایجاد حالت مقاوم در میلگرد می‌شود. واکنش آندی شامل اکسید شدن آهن و تولید اکسید فریک یا اکسید فروس است و واکنش کاتدی شامل احیا شدن می‌باشد که در نتیجه آن یون هیدروکسید تولید می‌شود [۵].

تاکنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی خوردگی آرماتور در بتن به کار برده شده‌اند. بسیاری از آن‌ها به تحقیقات آزمایشگاهی محدود شده و تنها تعداد کمی از آن‌ها در عمل قابل استفاده هستند. از جمله این روش‌ها روش جریان ماکروپیل، پتانسیل نیم‌پیل و روش اندازه‌گیری نرخ خوردگی است.

روش ماکروپیل برای اندازه‌گیری جریان بین دو میلگرد موجود در بتن به کار می‌رود. برای این منظور کافی است تا شرایط رویارویی را به نحوی برای آرماتورهای فولادی تغییر دهیم که بر اثر نفوذ یون کلر یا کربناتاسیون فعال شدن تنها در یک آرماتور رخ داده و سایر آرماتورها مقاوم باقی بمانند. این کار برای فولاد داخل بتن به آسانی قابل اجرا است. جریان ماکروپیل می‌تواند با استفاده از اندازه‌گیری ولتاژ بین دو آرماتور کاتد پایینی و یک آرماتور آند بالایی به راحتی اندازه‌گیری شده و

سپس با استفاده از رابطه $I=V/R$ مقدار جریان محاسبه شود. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که با افزایش مقدار جریان ماکروپیل به بیش از $10\mu A$ خوردگی بر روی میلگرد قابل مشاهده خواهد بود. دو روش استاندارد انجام این آزمایش، روش آزمایشگاهی مرکز راه و ترابری آمریکا و روش ASTM G109 است. در تحقیق حاضر، روش اندازه‌گیری جریان ماکروپیل بر اساس استاندارد ASTM G109 است [۶].

در روش نیم‌پیل وقتی یک فلز در یک محلول غوطه‌ور می‌شود، در سطح بین مایع و جامد به دلیل توزیع غیریکنواخت بار در فازهای مایع و جامد، اختلاف پتانسیل به وجود می‌آید. تعیین اختلاف پتانسیل ثابت در سطح بین میلگرد و بتن غیرممکن می‌باشد. بنابراین لازم است که الکترود دیگری برای تکمیل مدار الکتریکی تعریف شود. پتانسیل اندازه‌گیری شده بین این دو الکترود پتانسیل پیلی نامیده می‌شود که مجموع پتانسیل دو نیم‌پیل است. در این آزمایش که طبق استاندارد ASTM C876 انجام می‌شود، اندازه‌گیری‌ها مستقل از اندازه المان بتن آرمه و ضخامت پوشش روی آرماتور می‌باشد و در هر زمان از عمر سازه قابل انجام است. در تحقیق حاضر، الکترود مورد استفاده برای اندازه‌گیری پتانسیل آرماتورها $Ag/AgCl$ است. با توجه به مقدار پتانسیل اندازه‌گیری شده با استفاده از الکترود $Ag/AgCl$ احتمالات زیر متصور است:

$83\text{ mV} >$ پتانسیل: با احتمال بیش از ۹۰ درصد هیچ خوردگی آرماتور در زمان آزمایش وجود ندارد.

$83\text{ mV} <$ پتانسیل $233\text{ mV} <$: فعالیت خوردگی در آن ناحیه نامشخص است.

$233\text{ mV} <$ پتانسیل: با احتمال بیش از ۹۰ درصد در آرماتور آن ناحیه در زمان آزمایش خوردگی وجود دارد.

کاهش مقدار پتانسیل به مقادیر کمتر از 233 mV میلی ولت می‌تواند به عنوان معیاری برای شروع خوردگی در سطح آرماتور به حساب آید [۷].

روز در شرایط محیطی منطقه بوده و ضخامت پوشش بتنی بر روی آرماتورها سه سانتی متر می‌باشد. دلیل انتخاب پوشش بتن به ضخامت سه سانتی متر، سرعت بخشیدن به شروع خوردگی و مطالعه خوردگی در مدت زمان کوتاه می‌باشد. در نهایت، آزمون‌های بتنی برای بررسی وضعیت خوردگی در طول مدت زمان در شرایط رویارویی پاششی در منطقه خلیج فارس (جزیره قشم) قرار داده شدند.

لازم به ذکر است که در آزمون‌های بتنی مسلح این تحقیق به ازای سه میلگرد آند در بالا، شش میلگرد کاتد در پایین آزمون وجود دارد. به طوری که هر آزمون با در نظر گرفتن یک میلگرد آند در بالا و دو میلگرد کاتد در پایین در مجموع تشکیل سه سیستم ماکروپیل را می‌دهد. بنابراین در هر روش بررسی خوردگی در این تحقیق برای هر سیستم ماکروپیل یک قرائت انجام شده که در مجموع سه قرائت برای هر آزمون وجود داشته است (شکل (۲)). لازم به ذکر است که سه ماه پس از شروع زمان رویارویی، اولین قرائت انجام شده و حداکثر فاصله زمانی بین قرائت‌ها یک ماه می‌باشد.

اندازه‌گیری نرخ خوردگی با استفاده از دستگاه گالوپالس نیز یک روش پلاریزاسیون سریع برای تعیین میزان خوردگی در آزمایشگاه و سازه‌های بتن آرمه به حساب می‌آید. این روش به خاطر مشکلات اندازه‌گیری پتانسیل نیم‌پیل در محیط‌های مرطوب و یا نیمه مرطوب به علت کمبود اکسیژن، تأثیر شرایط محیطی و همین طور سرعت زیاد آن در به دست آوردن میزان خوردگی آرماتور در بتن، توسعه یافته است [۸].

۳- ساخت آزمون‌ها

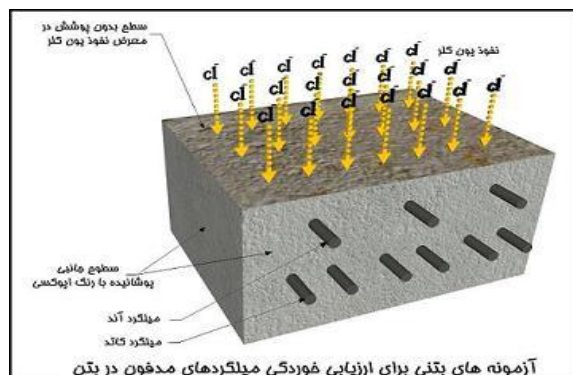
برای انجام این تحقیق آزمون‌های بتنی مسلح به ابعاد $20 \times 30 \times 55$ سانتی متر برای ارزیابی خوردگی آرماتور ساخته شده است. در طرح اختلاط این آزمون‌ها از سیمان پرتلند تیپ دو کارخانه سیمان هرمزگان استفاده شده است. جداول (۱) و (۲) به ترتیب نشان دهنده آنالیز شیمیایی سیمان و مشخصات طرح‌های اختلاط آزمون‌های بتنی می‌باشند. در این آزمون‌ها مجموع سنگ‌دانه‌ها به طور تقریبی 1850 کیلوگرم بر متر مکعب و بزرگترین اندازه سنگ‌دانه مورد استفاده 19 میلی متر می‌باشد. همچنین در طرح اختلاط آزمون‌ها از فوق روان کننده با پایه پلی کربکسیلاتی استفاده شده است. مدت زمان عمل‌آوری سه

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان

عنوان	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I
سیمان	۲۱	۵	۳/۵	۶۳	۱/۸	۱/۶	۰/۵	۰/۶	۲

جدول ۲- مشخصات طرح‌های اختلاط

کد آزمون	نسبت آب به سیمان	عیار سیمان (kg/m ³)	مقدار آب (kg/m ³)	اسلامپ (سانتی متر)	فوق روان کننده (درصد وزنی سیمان)
C1	۰/۳۵	۴۰۰	۱۴۰	۸	۰/۳۵
C2	۰/۴	۴۰۰	۱۶۰	۷	۰/۲
C3	۰/۴۵	۴۰۰	۱۸۰	۱۵	۰/۱
C4	۰/۵	۴۰۰	۲۰۰	۱۸	۰



شکل ۲- جزئیات آزمون‌های بتنی مسلح

شده برای هر نمونه با در نظر گرفتن حد آستانه، معیار شروع احتمالی خوردگی در نظر گرفته شده است. در نهایت با مقایسه وضعیت خوردگی حاصل از روش‌های جریان ماکروپیل و پتانسیل نیم‌پیل با مقادیر به دست آمده از روش اندازه‌گیری نرخ خوردگی، ارزیابی از دقت روش‌های مورد بررسی انجام شده و سپس با اندازه‌گیری میزان نفوذ یون کلر در سطح آرماتور، مقدار کلر بحرانی در ناحیه پاشش در منطقه خلیج فارس تخمین زده شده است.

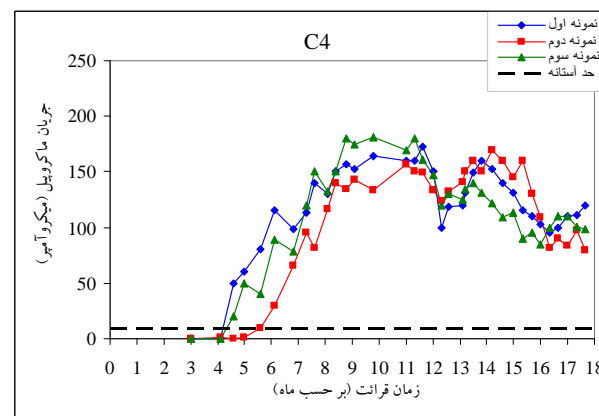
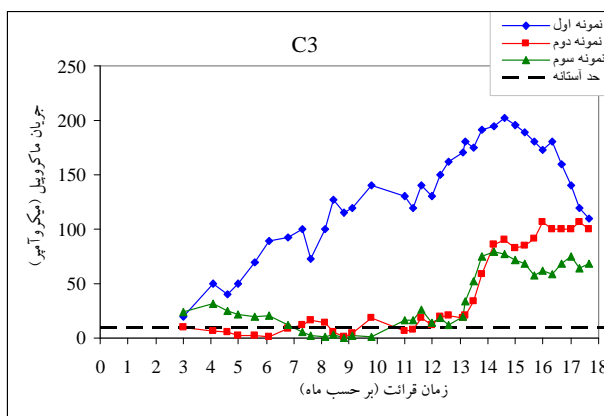
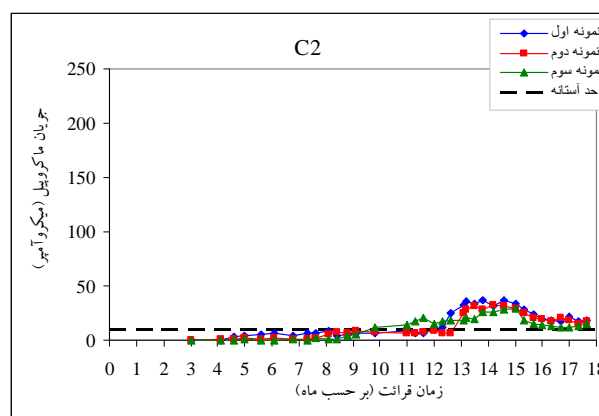
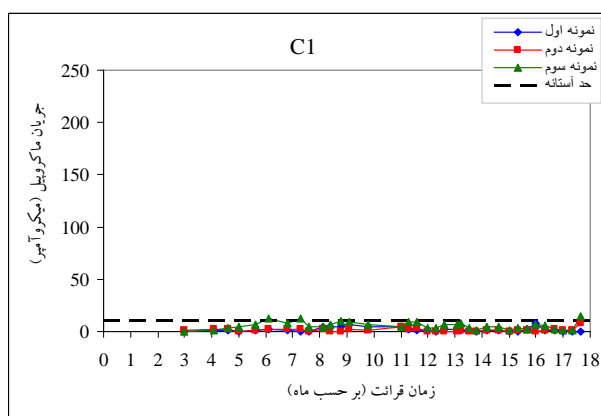
۴-۱- نتایج خوردگی آزمون‌های واقع در ناحیه پاشش

در این تحقیق، بررسی جریان ماکروپیل و پتانسیل نیم‌پیل آزمون‌ها در طول ۱۸ ماه از زمان رویارویی در بازه‌های زمانی یک ماهه در ناحیه پاشش انجام شده است که اولین قرائت سه ماه پس از زمان آغاز رویارویی ثبت شده است. روند تغییرات مربوط به جریان ماکروپیل و پتانسیل نیم‌پیل آزمون‌های با نسبت‌های آب به سیمان مختلف به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) ارائه شده است.

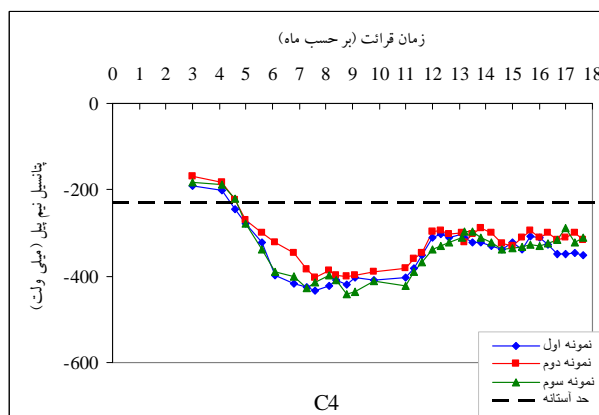
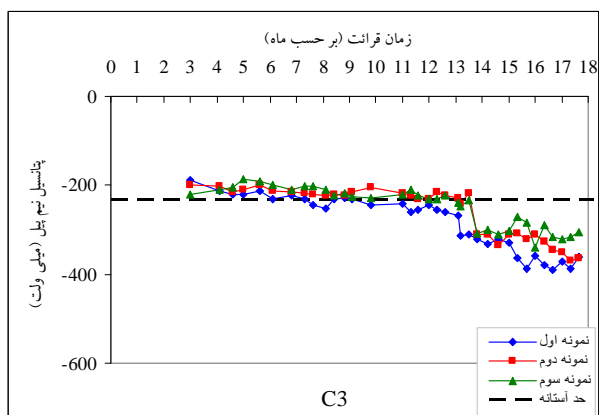
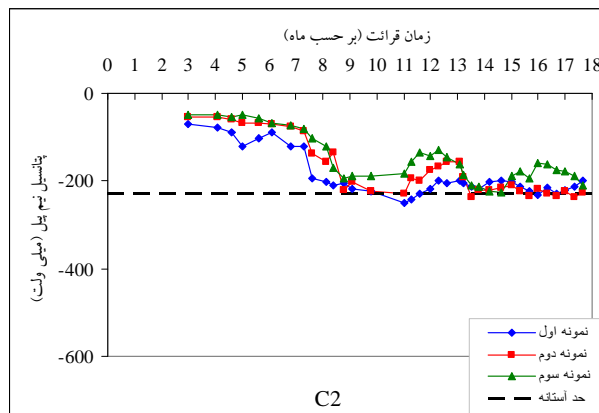
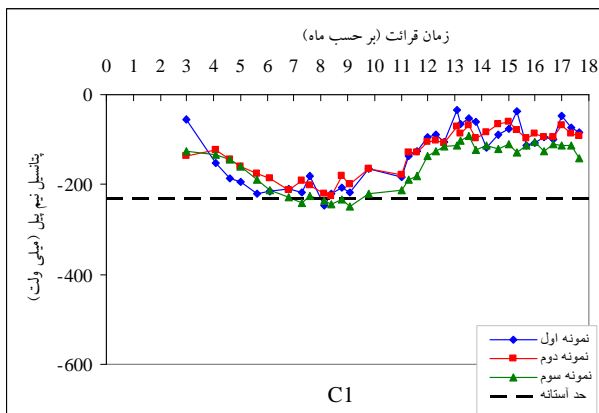
همچنین در این تحقیق هم‌زمان با ساخت آزمون‌های بتنی مسلح، آزمون‌های بتنی منشوری (غیر مسلح) با ابعاد $15 \times 15 \times 60$ سانتی‌متر برای اندازه‌گیری میزان نفوذ یون کلر و تعیین میزان کلر بحرانی ساخته و در شرایط مشابه با آزمون‌های بتنی مسلح در ناحیه پاشش قرار داده شدند. پس از گذشت نه ماه از زمان رویارویی، مقدار نفوذ یون کلر در این آزمون‌ها برای تعیین میزان کلر بحرانی اندازه‌گیری شده است.

۴- نتایج تحقیق و بحث

همان‌طور که اشاره شد در این تحقیق از سه روش اندازه‌گیری جریان ماکروپیل، پتانسیل نیم‌پیل و نرخ خوردگی برای بررسی وضعیت خوردگی آزمون‌ها در بلند مدت و تعیین میزان کلر بحرانی در شرایط رویارویی پاشش در منطقه خلیج فارس استفاده شده است. با توجه به وجود سه ماکروپیل در هر آزمون، سه قرائت برای هر آزمون انجام شده و حد آستانه هر روش در نمودارهای مربوطه مشخص شده است. همچنین در هر روش مورد بررسی، تغییرات ناگهانی در روند قرائت‌های انجام



شکل ۳- تغییرات پتانسیل ماکروپیل آزمون‌های واقع در ناحیه پاشش برای طرح‌های اختلاط مختلف



شکل ۴- تغییرات پتانسیل نیم‌پیل آزمون‌های واقع در ناحیه پاشش برای طرح‌های اختلاط مختلف

تکرار شده است. در آزمون C2 نیز با وجود این که مقادیر پتانسیل نیم‌پیل به خصوص در ماه‌های انتهایی در محدوده نزدیک به حد آستانه بوده‌اند ولی در طول مدت زمان مورد بررسی از حد آستانه خوردگی تجاوز نکرده‌اند. مقادیر مربوط به آزمون C3 نیز پس از ۱۴ ماه به مقادیر منفی‌تر از مقدار ۲۳۰- میلی‌ولت (حد آستانه) رسیده است. این در حالی است که پتانسیل نیم‌پیل هر سه میلگرد آند آزمون C4 بعد از ماه پنجم منفی‌تر از ۲۳۰- میلی‌ولت بوده که نشان می‌دهد خوردگی با احتمال بیش از ۹۰ درصد بعد از ماه پنجم رخ داده است. مشابه آزمون C1، روند تغییرات پتانسیل نیم‌پیل در آزمون‌های C2، C3 و C4 نیز تقریباً مشابه روند تغییرات جریان ماکروپیل در این آزمون‌ها می‌باشد. در این راستا، جدول (۳) مدت زمان تخمینی عبور از حد آستانه خوردگی در روش‌های پتانسیل نیم‌پیل و جریان ماکروپیل در آزمون‌های مختلف را نشان می‌دهد. مقادیر این جدول نشان می‌دهند که نتایج حاصل از دو روش بررسی خوردگی تأیید کننده نتایج همدیگر می‌باشند و تطابق مناسب و قابل قبولی نسبت به یکدیگر دارند.

همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، روند تغییرات جریان ماکروپیل در آزمون C1 با گذشت ۱۸ ماه از زمان رویارویی زیر حد آستانه بوده و در طول این مدت تغییرات محسوسی مشاهده نمی‌شود. با این حال جریان ماکروپیل در آزمون‌های C2 و C3 هر دو پس از گذشت حدود ۱۳ ماه و در آزمون C4 پس از گذشت ۵ ماه از زمان رویارویی از حد آستانه خوردگی مورد نظر تجاوز کرده است. البته در بررسی روند تغییرات آزمون‌های C2 و C4 بعد از مدتی افت جریان ماکروپیل مشاهده می‌شود. دلیل وقوع این افت نیازمند بررسی بیشتر در طول مدت زمان با توجه به روند تغییرات جریان در دیگر آزمون‌ها می‌باشد. در ضمن تغییرات غیرطبیعی نمونه اول آزمون C3 را می‌توان ناشی از عدم اسیدشویی مناسب در زمان ساخت آزمون و وجود ذرات خوردگی بر روی میلگرد دانست.

شکل (۴) نیز نشان دهنده روند تغییرات پتانسیل نیم‌پیل می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند این تغییرات در آزمون C1 در طول ۱۸ ماه از حد آستانه خوردگی تجاوز نکرده و تقریباً روند ثابت و یکنواختی در ماه‌های انتهایی داشته است. مشابه این روند در جریان ماکروپیل مربوط به این آزمون هم

جدول ۳- مدت زمان تخمینی عبور مقادیر قرائت شده از حد آستانه خوردگی

کد آزمون	جریان ماکروپیل (بر حسب ماه)	پتانسیل نیم‌پیل (بر حسب ماه)
C1	بدون خوردگی	بدون خوردگی
C2	۱۳	بدون خوردگی
C3	۱۳	۱۴
C4	۵	۵

نتایج ارائه شده در جدول (۴) نشان می‌دهند که کلیه مقادیر خوردگی در هر سه روش مورد استفاده و همچنین مقادیر نفوذ یون کلر، با افزایش نسبت آب به سیمان افزایش می‌یابد. به طوری که در آزمون‌های C1 و C4 میزان نفوذ یون کلر، مقادیر پتانسیل نیم‌پیل، جریان ماکروپیل و نرخ خوردگی به ترتیب بیشترین و کمترین می‌باشند. مقایسه بین روند تغییرات دو روش اندازه‌گیری جریان ماکروپیل و پتانسیل نیم‌پیل نشان از دقت و مطابقت قابل قبول این دو روش نسبت به یکدیگر در تخمین زمان احتمالی شروع خوردگی دارد. همچنین نتایج نرخ خوردگی نیز تأیید کننده نتایج حاصل از دو روش اندازه‌گیری مذکور می‌باشد. از طرفی مقایسه مقادیر نفوذ یون کلر و مقادیر خوردگی آزمون‌های با نسبت آب به سیمان مختلف نشان می‌دهد که مقدار کلر بحرانی در ناحیه پاشش در منطقه خلیج فارس در حدود ۰/۱۱ درصد وزنی بتن می‌باشد.

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که در طراحی و اجرای سازه‌های بتنی در منطقه خلیج فارس باید شرایط حاد و خورنده منطقه خلیج فارس به خصوص در شرایط رویارویی پاشش را بیش از پیش مورد توجه قرار داد. به طوری که برای شرایط رویارویی پاشش در محیط خورنده خلیج فارس حتی نسبت آب به سیمان ۰/۴ نیز مطمئن نبوده و در صورت استفاده از بتن‌های با این نسبت آب به سیمان باید استفاده از روش‌های دیگر محافظتی از جمله پوزولان‌های مناسب با درصد بهینه و یا استفاده از پوشش‌های محافظتی مد نظر قرار گیرند.

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود با افزایش نسبت آب به سیمان، مدت زمان رسیدن مقادیر جریان ماکروپیل و پتانسیل نیم‌پیل به حد آستانه خوردگی کاهش می‌یابد. به طوری که در آزمون C1 (کمترین نسبت آب به سیمان) با توجه به بهبود ریزساختار بتن در اثر کاهش نسبت آب به سیمان، مقادیر قرائت شده در هر دو روش اندازه‌گیری با گذشت ۱۸ ماه از زمان رویارویی به حد آستانه خوردگی نرسیده‌اند که این نشان‌دهنده عدم وجود خوردگی در طول این مدت در این آزمون می‌باشد.

با توجه به این که پس از نه ماه از زمان رویارویی، میزان نفوذ یون کلر در آزمون‌های مذکور اندازه‌گیری شده است، بنابراین مدت زمان نه ماه به عنوان مبنای زمانی مقایسه میزان نفوذ یون کلر (محلول در اسید) و تغییرات جریان ماکروپیل، پتانسیل نیم‌پیل و نرخ خوردگی، برای تخمین میزان کلر بحرانی در نظر گرفته شده است. نتایج اشاره شده در مقطع زمانی نه ماه پس از رویارویی در ناحیه پاشش در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴- نتایج درصد کلر، نرخ خوردگی و پتانسیل نیم‌پیل آزمون‌ها در ناحیه پاشش پس از نه ماه رویارویی

کد آزمون	درصد کلر در عمق آرماتور	نرخ خوردگی			پتانسیل نیم‌پیل			جریان ماکروپیل		
		میزان خوردگی	قرائت‌ها ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	میزان خوردگی	قرائت‌ها (mV)	وضعیت خوردگی	قرائت‌ها (μA)	میزان خوردگی	قرائت‌ها (μA)	
C1	۰/۰۵	ندارد	۰/۴	۰/۳	-۲۳۲	-۱۸۰	-۲۰۷	ندارد	۰	۴
C2	۰/۰۸	ندارد	۰/۴	۰/۵	-۱۹۴	-۲۳۳	-۲۰۵	ندارد	۶	۵
C3	۰/۱۱	دارد	۰/۸	۲	-۲۱۱	-۲۲۴	-۲۵۳	دارد	۵	۱۴
C4	۰/۱۶	دارد	۱	۲	-۴۴۲	-۴۰۰	-۴۲۰	دارد	۲۰۷	۱۳۵

۵- نتیجه‌گیری

خلاصه نتایج به دست آمده از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱- با بررسی مقدار پتانسیل نیم‌پیل و جریان ماکروپیل و مقایسه آن‌ها با روش اندازه‌گیری نرخ خوردگی می‌توان دریافت که روش‌های پتانسیل نیم‌پیل و جریان ماکروپیل دارای دقت

مناسبی در اندازه‌گیری زمان شروع خوردگی می‌باشند. بنابراین با توجه به شرایط و امکانات موجود می‌توان از این روش‌ها برای بررسی میزان وضعیت خوردگی سازه‌های موجود در منطقه خلیج فارس استفاده کرد.

۲- در این تحقیق مقدار کلر بحرانی برای شروع خوردگی در ناحیه پاشش ۰/۱۱ درصد وزن بتن در شرایط محیطی خلیج فارس تخمین زده شده است.

- [3] Shekarchi, M., Rafiee, A., Layssi, H., "Long-Term Chloride Diffusion in Silica Fume Concrete in Harsh Marine Climates", *Cement & Concrete Composite*, 2009, 31 (10), 769-775.
- [4] Ghods, P., Chini, M., Alizadeh, A., Hoseini, M., Shekarchi, M., Ramezani-pour, A. A., "The Effect of Different Exposure Conditions on the Chloride Diffusion into Concrete in the Persian Gulf Region", 3th ConMat'05, Vancouver, Canada, 2007.
- [5] Benture, A., Diamond, S., Berke, N. S., "Steel Corrosion in Concrete, Fundamentals and Civil Engineering Practice", E & FN Spon, 1997.
- [6] ASTM G109, "Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in concrete Exposed to Chloride Environments", 2003.
- [7] ASTM C876, "Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete", 2003.

[۸] پرگر، ف.، "بررسی پارامترهای مؤثر بر غلظت کلر بحرانی برای شروع خوردگی میلگردهای فولادی در بتن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۵.

۳- استفاده از بتن با نسبت آب به سیمان زیاد در سازه‌های بتنی در منطقه خلیج فارس موجب بروز پدیده خوردگی زود هنگام در این سازه‌ها می‌شود. به گونه‌ای که مشاهده شد، در شرایط محیطی خلیج فارس و در ناحیه پاشش، طی مدت زمان کوتاهی در آزمون‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و بیشتر با ضخامت پوشش سه سانتی‌متر، بدون پوزولان و بدون استفاده از سیستم‌های پوشش سطحی و حفاظت کننده نظیر حفاظت کاتدی، خوردگی شروع شده و یا در آستانه شروع خوردگی قرار گرفته‌اند.

۴- این تحقیق نشان می‌دهد که در اجرای سازه‌های مهم، دو عامل ضعف در کنترل کیفی و ضخامت پوشش کم موجب خوردگی سریع در این سازه‌ها می‌شود.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از همکاری‌ها و حمایت‌های مالی سازمان منطقه آزاد قشم به ویژه معاونت عمرانی این سازمان در احداث این سایت تحقیقاتی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

۷- مراجع

- [1] Neville, A., "Good Reinforced Concrete in the Persian Gulf", *Materials and Structures Journal*, 2000, 33, 655-664.
- [2] Shekarchi, M., Moradi-Marani, F., Pargar, F., "Corrosion Damage of a Reinforced Concrete Jetty Structure in the Persian Gulf: a Case Study", *Structure and Infrastructure Engineering*, 2009, 1-13.