

بررسی اثر یون‌های کلرید در خوردگی بتن مسلح سازه‌های دریایی تحت سیکل تر و خشک شدن و راهکارهای مقابله با آن

مسعود دهقانی^۱، سیدمحمد مهدی جمال^{۲*}، فائزه السادات خادمی^۳، رضا ترکمندی^۴

۱- استادیار گروه عمران دانشگاه هرمزگان (dehzad38@yahoo.com)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های دریایی دانشگاه هرمزگان (sayedmohammadmehdi_jamal@yahoo.com)

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه Illinois Institute of Technology (faezehossadat_khademi@yahoo.com)

۴- کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه هرمزگان (hamed.torkamandi@gmail.com)

چکیده

با توجه به رشد اقتصادی و گسترش حمل و نقل دریایی و فعالیت‌های نفتی، تعداد سازه‌های بتن مسلح احداث شده در پهنه‌ی دریا مانند سکوها و اسکله‌ها در حال افزایش است. خوردگی فولاد در بتن دلیل اصلی انهدام‌ها و شکست‌های زود هنگام بتن مسلح می‌باشد که از این میان خوردگی ناشی از نفوذ یون کلرید در این سازه‌ها که سبب کاهش یافتن میزان قلیایی محیط بتن می‌شود قابل توجه است و همواره سبب ایجاد خسارات جبران ناپذیری در سواحل و بنادر کشور شده است. با توجه به شرایط آب و هوایی خاص خلیج فارس و میزان کلرید موجود در آب، این منطقه یکی از مهاجم‌ترین نقاط دنیا در حوزه‌ی خوردگی بتن مسلح می‌باشد.

یون‌های کلرید از طرق مختلف وارد بتن می‌شوند و با از بین بردن لایه محافظ فولاد سبب ایجاد خوردگی می‌لگرد می‌شوند. هدف از این مقاله بررسی اثر یون‌های کلرید در ایجاد خوردگی سازه‌ها و تاسیسات دریایی جنوب کشور می‌باشد. همچنین با مروری بر مطالعات انجام شده اثر سیکل تر و خشک شدن بر این پدیده نیز بررسی شده است و در ادامه با معرفی انواع راهکارهای نوین پیش‌رو برای مقابله با خوردگی، مناسب‌ترین روش‌ها برای کاهش خسارات ناشی از این پدیده و افزایش دوام سازه‌ها پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: خوردگی، بتن مسلح، سازه‌های دریایی، یون کلرید، سیکل تر و خشک شدن، خلیج فارس

۱. مقدمه

در سال های اخیر خوردگی آرماتورهای فولادی در سازه های بتن آرمه ی دریایی یکی از عمده ترین دلایل خرابی و حتی فروپاشی این سازه ها قبل از رسیدن به عمر مفیدشان می باشد. از عوامل اصلی خوردگی در محیط های دریایی نفوذ یون کلرید به داخل بتن و خوردگی ناشی از آن است که سالانه هزینه های گزافی را برای تعمیرات و رفع خرابی ها به جای می گذارد. بر طبق آماری که در سال ۲۰۰۱ از اداره فدرال معابر^۱ (FHWA) منتشر شد، هزینه به جای مانده از خوردگی بنادر عمومی و آبراه ها را معادل ۱۸۲.۳ میلیارد دلار در سال تخمین زده شد (Koch et al, ۲۰۰۱). همچنین در سال ۲۰۰۶ وزارت دفاع ایالات متحده (DOD)^۲ اعلام کرد که مبلغ ۱۰ میلیارد دلار صرف هزینه تعمیرات و نگهداری کرده است که از این مبلغ ۱.۸ میلیارد دلار مربوط به تعمیرات ناشی از خوردگی بوده است (Herzber, ۲۰۰۹).

خوردگی میلگردهای بتن مسلح در محیط دریایی در صورت عدم محافظت و در نظر گرفتن تمهیدات لازم خیلی زود به وقوع می پیوندد. محیط بتن تازه به دلیل وجود مقادیر بسیاری از هیدروکسید کلسیم، محیطی بسیار قلیایی با PH بین ۱۲ تا ۱۳ می باشد. وجود این محیط قلیایی باعث ایجاد یک لایه نازک اکسید بر روی سطح میلگرد می گردد، این لایه اکسید تا زمانی که پدیده خوردگی آغاز نشده است در نقش محافظ آرماتور عمل می کند. کربناسیون و وجود یون کلرید در بتن از مهمترین عواملی است که در شروع خوردگی موثر می باشد. وقتی که بتن مجاور میلگرد کربناته می شود لایه محافظ اکسید تخریب می گردد زیرا PH محیط در اثر کربناسیون کاهش یافته درحالی که این لایه محافظ فقط در محیط قلیایی پایدار است. زمانی که مقدار یون کلرید از حد مجاز فراتر می رود تعادل بین یونهای کلرید و هیدروکسید (OH) بهم خورده و به دلیل ترجیح دادن فولاد به جذب یونهای کلرید نسبت به هیدروکسید این یون ها توسط فولاد جذب شده و تشکیل کمپلکس ناپایداری را می دهند که در محلول منفذی اطراف آرماتور حل شده و بنابراین نقش حفاظتی لایه اکسید از بین می رود (رمضانیان پور و همکاران، ۱۳۷۸).

از طرف دیگر میزان آسیب پذیری یک سازه بتنی کنار ساحل وابستگی شدیدی به محل قرار گیری بتن نسبت به تراز آب دریا دارد که از این نظر سازه قرار گرفته شده در کنار ساحل را می توان به چهار ناحیه اتمسفری، پاششی، جزر و مدی و غوطه وری تقسیم کرد (Mohammed et al, ۲۰۰۱).

تا کنون پژوهش های گوناگونی با محوریت خوردگی بتن مسلح در محیط های دریایی ایران صورت گرفته است که اکثر آنها در زمینه دوام بتن و پایداری آن در برابر خوردگی با توجه به نوع مصالح مصرفی می باشد البته پژوهش هایی نیز مبنی بر مکان قرار گیری بتن و شرایط حاکم بر آن صورت گرفته که از این میان میتوان به تحقیقات دانشگاه صنعتی سهند در سال ۲۰۰۵ اشاره کرد که دوام بتن حاوی پوزولان های مختلف را در مدت ۶ ماه در محیط های آزمایشگاهی آزاد، مغروق و جزر و مدی بررسی کردند (Karbalayi faraji & Afshin, ۲۰۰۵). همچنین مرکز ساختمان و مسکن در سال ۲۰۰۶ به بررسی دوام نمونه های بتنی در شرایط مختلف خلیج فارس پرداخت (Ramezaniyanpour et al, ۲۰۰۶).

^۱ Federal Highway Administration

^۲ U.S. Department of Defense

محمودی و همکاران نیز (۲۰۰۹ م.) به بررسی دوام و پتانسیل خوردگی بتن مسلح در سواحل پرداختند و تحقیقات خود را در نواحی جزر و مد و ناحیه پاششی ارائه کردند (محمودی و همکاران، ۱۳۸۸).

در پژوهشی دیگر پیکرنگار و همکاران، در سال ۲۰۱۱ به بررسی تاثیر استفاده از ترکیب پوزولان های مختلف در بتن بر میزان نفوذ یون کلر و پتانسیل خوردگی فولاد پرداخته اند (پیکرنگار و همکاران، ۱۳۹۰).

هدف از این مقاله بررسی اثر سیکل تر و خشک شدن بر پدیده خوردگی میلگردهای بتن مسلح در محیط دریایی می باشد. که این مفهوم مشابه حالتی است که پدیده ی جزر و مد در دریا رخ می دهد. در نتیجه عمل جزر و مد یک سازه ی دریایی در منطقه جزر و مد دو بار در روز تحت سیکل تر و خشک شدن قرار می گیرد.

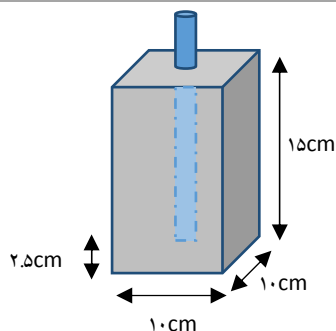
۲. مواد و روش ها

در این پژوهش برای ساخت نمونه از سیمان تیپ ۲ با مشخصات جدول ۱ استفاده می شود.

جدول ۱: مشخصات سیمان تیپ ۲ مصرفی

Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
۰.۳	۰.۵	۱.۵	۱.۵	۶۳	۳.۵	۴.۶	۲۰.۵
LSF	C ₄ AF	C ₃ A	C ₂ S	C ₃ S	AlM	SiM	L.I.O
۹۲	۱۰	۱۵	۱۵	۵۰	۱.۲	۲.۴	۱

طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰.۴۵ و نسبت سیمان به ماسه ۱ به ۳ انتخاب شده است. همچنین حداکثر اندازه شن مصرفی ۲۵ میلیمتر بوده و نسبت ریز دانه به درشت دانه ۲ به ۱ در نظر گرفته شده است. اسلایمپ مورد نظر نیز ۱۰ تا ۱۰.۵ می باشد که با افزودن روان کننده تامین شده است. آرماتور فولادی مصرف شده در نمونه از نوع A^۳ بوده و قطر آن ۱۰ میلیمتر است. نمونه ی بتنی به ابعاد ۱۵۰ X ۱۰۰ X ۱۰۰ میلیمتر می باشد که در میان آن ها یک میلگرد با قطر ۱۰ میلیمتر قرار داده شده است. پوشش زیرین میلگرد ۲۵ میلیمتر بوده و اتصال الکتریکی پتانسیو استات به قسمت بالای آرماتور خارج شده از نمونه متصل می گردد. در شکل ۱ نمای شماتیکی از نمونه نشان داده شده است.



شکل ۱: نمای شماتیک نمونه ساخته شده

قبل از ساخت نمونه ابتدا میلگردهای فولادی را در اسید کلریدریک^۳ اسیدشویی کردیم و سپس با کاغذ سمباده از جنس SiC P600 پولیش شدند. قسمت بالای آرماتور برای جلوگیری از خوردگی اتمسفری رنگ خورده اند. نمونه پس از ۴۸ ساعت از زمان ساخت، از قالب خارج شده و به مدت ۷۲ ساعت در حوضچه عمل آوری با آب شیرین در دمای ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی گراد قرار گرفته است. سپس نمونه در دو سل مخصوص اندازه گیری که با آب مشابه به آب دریا به مشخصات جدول ۲ دارد، قرار می گیرد.

جدول ۲: مشخصات آب شیبه سازی شده دریا در آزمایشگاه

KHCO ₃	CaSO ₄ .۲H ₂ O	MgSO ₄ .۷H ₂ O	MgCl ₂ .۶H ₂ O	NaCl
۰.۲ gr/lit	۱.۵ gr/lit	۵ gr/lit	۶ gr/lit	۳۰ gr/lit

الکتروود استاندارد کالومال اشباع (SCE) به عنوان الکتروود مرجع و برای الکتروود کاری از فولاد I ۳۱۶ با مشخصات جدول ۳ استفاده می شود.

جدول ۳: مشخصات الکتروود کاری فولاد I ۳۱۶

Mo	Ni	Cr	Mn	Si	C
۲.۸۰٪	۱۲.۰۰٪	۱۸.۰۰٪	۰.۶۰٪	۰.۸۰٪	۰.۰۲٪

برای اندازه گیری از یک دستگاه پتانسیواستات استفاده می شود. اندازه گیری طیف امپدانس EIS با استفاده از یک دامنه پتانسیل ۱۰ MV در بازه‌ی فرکانس ۱۰ m HZ تا ۱۰۰ kHz صورت گرفته است. به منظور محاسبه دانسیته جریان خوردگی از رابطه استرن-گری^۴ استفاده می کنیم.

^۳ Hydrochloric acid

$$I_{corr} = B/R_{ct} \quad (1)$$

که در آن I_{corr} دانسیته جریان خوردگی و R_{ct} مقاومت انتقال بار می باشد که از معادله ۲ محاسبه می شود.

$$R_{ct} = R_p - R_s \quad (2)$$

در این معادله R_s مقاومت الکتریکی و R_p مقاومت پلاریزاسیون می باشد که R_p از رابطه ۳ به دست می آید.

$$R_p = \Delta E / \Delta I \quad (3)$$

اغلب برای محاسبه B در معادله ۱ مقادیر ۵۲ و ۲۶ استفاده می شود که به ترتیب برای میلگرد در حالت پسیو و اکتیو استفاده می شود (Lui et al, ۲۰۰۳).

در این پژوهش با فرض غیر فعال بودن میلگرد در سیکل های صفر و یک مقدار ۵۲ و در مابقی حالات مقدار ۲۶ در محاسبات استفاده شده است.

در طول هر مرحله نمونه در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵ روز قرار می گیرد و سپس نمونه در محلول داخل سل قرار داده می شود و پس از گذشت یک روز اندازه گیری صورت می گیرد. لازم به ذکر است تمامی اندازه گیری ها در دمای اتاق یعنی ۲۵ درجه سانتی گراد صورت گرفته است.

۳. نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایش نشان می دهد که میزان R_{ct} تا مرحله پنجم به شدت کاهش می یابد و پس از این مراحل به مقدار ثابتی میل می کند. که این موضوع نشانگر افزایش نرخ خوردگی در نتیجه افزایش تعداد سیکل های تر و خشک شدن تا سیکل های مذکور در نمونه ها می باشد و پس آن نرخ خوردگی ثابت می شود. اطلاعات اندازه گیری شده از طیف امپدانس الکتروشیمیایی EIS در جدول شماره ۴ ارائه شده است.

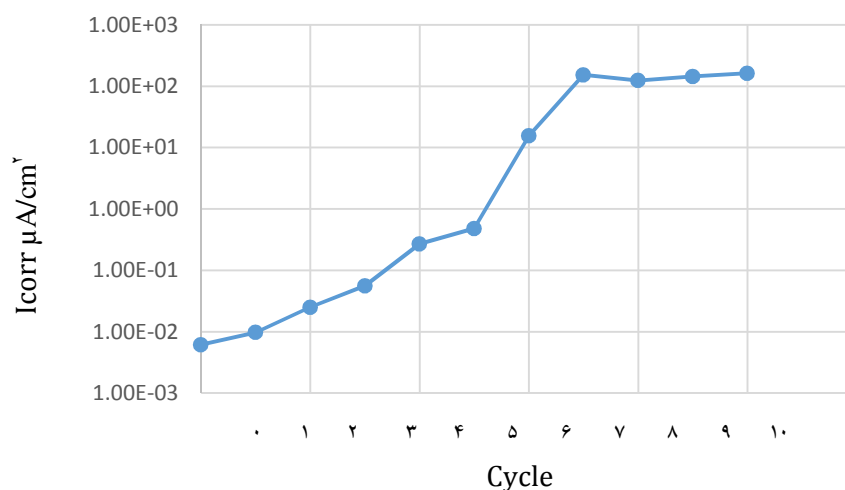
جدول ۴: اطلاعات اندازه گیری شده از طیف امپدانس الکتروشیمیایی EIS

شماره دوره	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$	$R(K\Omega.cm^2)$	$R_{ct}(K\Omega.cm^2)$	$E_{corr}(V)$
۰	$6.10E-3$	۳.۵۴	۸۴۵۲	-۰.۲۱

^۴ Stern-Geary

۱	۹.۷۶E-۳	۲.۸۲	۵۳۲۳	-۰.۲۴
۲	۰.۰۲۵	۱.۴۵	۱۰۳۹	-۰.۶۲
۳	۰.۰۵۶	۰.۹۳	۴۵۸	-۰.۷۱
۴	۰.۲۷	۰.۵۷	۹۶	-۰.۷۹
۵	۰.۴۸	۰.۴۲	۵۴	-۰.۸۴
۶	۱۵.۵۷	۰.۴۳	۱.۶۷	-۰.۷۵
۷	۱۵۲.۹۴	۰.۴۵	۰.۱۷	-۰.۶۲
۸	۱۲۳.۸۰	۰.۶۷	۰.۲۱	-۰.۵۴
۹	۱۴۴.۴۴	۰.۷۷	۰.۱۸	-۰.۷۶
۱۰	۱۶۲.۵	۰.۸۰	۰.۱۶	-۰.۷۱

بر طبق معیارهای تخمین خوردگی میلگرد در صورتی که $I_{corr} < 0.1 \mu A/cm^2$ باشد شدت خوردگی ناچیز بوده و یا به عبارتی میلگرد در حالت پسیو قرار دارد و اگر $0.5 \mu A/cm^2 < I_{corr} < 0.1$ باشد خوردگی میلگرد بین مقادیر کم و متوسط است و چنانچه $1.0 \mu A/cm^2 < I_{corr} < 0.5$ بود میزان خوردگی متوسط تا حد زیاد می‌باشد و در نهایت اگر $I_{corr} > 1.0 \mu A/cm^2$ باشد شدت خوردگی زیاد خواهد بود. نمودار ۱ میزان دانسیته خوردگی را برای نمونه در ۱۰ سیکل تر و خشک شدن نشان می‌دهد.

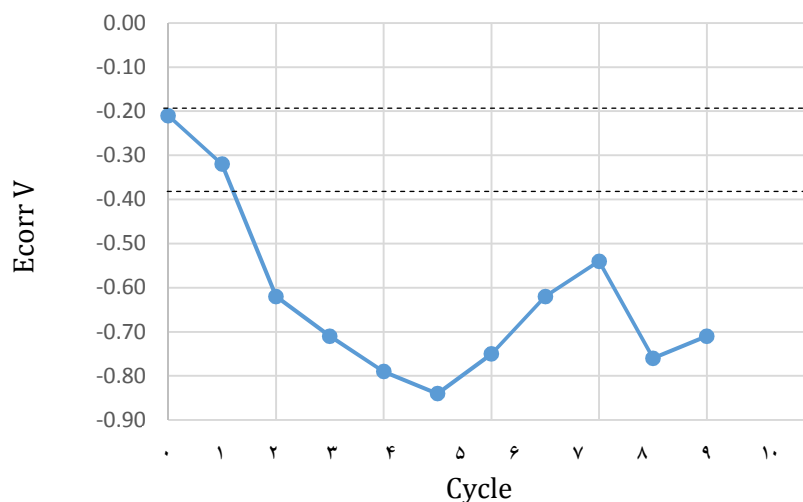


نمودار ۱: میزان دانسیته خوردگی برای نمونه در ۱۰ سیکل تر و خشک شدن

همچنین بر طبق استاندارد ASTM C۸۶۷ برای آرماتور فولادی داخل بتن سه مقیاس از E_{corr} جهت مشخص کردن احتمال خوردگی بیان شده است. در این استاندارد چنانچه $E_{corr} > -0.2 V$ باشد احتمال خوردگی آرماتور داخل بتن کمتر از ۱۰٪

می باشد و در صورتی که $E_{corr} < -0.35 V$ باشد احتمال خوردگی آرماتور بیش از ۹۰٪ خواهد بود. در این استاندارد در بازه میانی احتمال رخداد نامشخص می باشد.

نمودار شماره ۲ میزان پتانسیل خوردگی را در طول سیکل های تر و خشک شدن نمایش می دهد.



نمودار ۲: میزان پتانسیل خوردگی برای نمونه در ۱۰ سیکل تر و خشک شدن

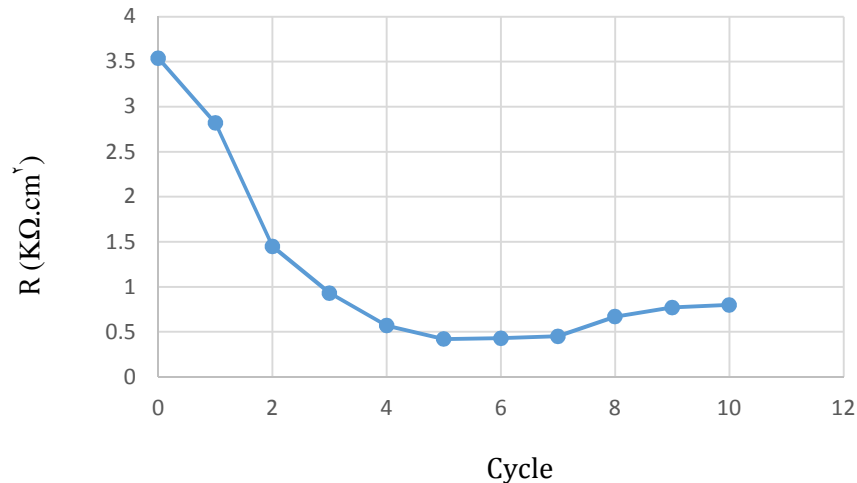
با توجه به آنچه در نمودار مشخص شده دو سیکل اول تر و خشک شدن نمونه در مرحله خوردگی نامشخص و مابقی در شرایط خوردگی با احتمال بیشتر از ۹۰ درصد قرار گرفته اند.

سیکل تر و خشک شدن شرایط ویژه ای به وجود می آورد. در این شرایط تنش های حاصل از مکش مویینگی اضافه می شود که خود به شدت عملکرد خوردگی اضافه می نماید با این عمل مقداری محلول وارد بتن شده و در آن پخش می شود و وقتی به سطح سازه می رسد در هوا تبخیر می شود و موجب تشدید تنش های درونی را فراهم می کند. وقتی سرعت تبخیر از سرعت ورود مایع بیشتر باشد، تبخیر تا عمق بتن اثر می کند و کریستالیزاسیون املاح صورت گرفته و ازدیاد حجم ناشی از آن باعث تبخیر درونی می شود.

اگر در محلول مهاجم (مثل آب دریا) ماده ای وجود داشته باشد که حلالیت را تشدید کند هیدرات کلسیم از ساختار بتن جدا شده و مواد معدنی که اسکلت سیمان سخت شده را تشکیل می دهند، هیدرولیز شده و منجر به آسیب بتن می گردد. اگر سرعت تبخیر کمتر از جذب موئینه محلول باشد آزاد شدن نمک های حل شده در سطح بتن با پوسته ای شدن نمک ظاهر می شود. بنابراین بتنی که در ناحیه جزر و مد واقع شده است و در معرض تر و خشک شدن متناوب قرار دارد، به شدت مورد حمله قرار می گیرد در حالیکه وضعیت برای بتن مستغرق این چنین نیست (نعمت الهی و سوادکوهی، ۱۳۹۱).

پوشش بتنی روی آرماتور در بتن به عنوان الکترولیت در سل خوردگی عمل می نماید انتقال الکترون نقش تعیین کننده ای در پروسه خوردگی دارد بنابراین توزیع جریان با مقاومت بتن کنترل می شود مقاومت الکتریکی بالای بتن سبب کاهش

انتقال الکترون در میان منطقه‌ی آندی و کاتدی می‌شود. نمودار ۳ مقاومت الکتریکی به دست آمده از آزمایش را نشان می‌دهد.



نمودار ۳: مقاومت الکتریکی برای نمونه در ۱۰ سیکل تر و خشک شدن

همان طور که در نمودار ۳ نمایان شده است در ابتدا نمونه در مقابل انتقال الکترون مقاومت می‌کند ولی با تکرار سیکل تر و خشک شدن و به وجود آمدن حفرات در نمونه و با نفوذ یون کلر در آن و حضور اکسیژن مقاومت الکتریکی کاهش یافته و در نهایت به مقدار ثابتی میل می‌کند.

۴. راهکارهای مقابله با پدیده خوردگی

محافظت در برابر خوردگی میلگرد بتن مسلح نیازمند آگاهی و درک مکانیزم خوردگی و مصالح مصرفی می‌باشد. راه‌های گوناگونی برای محافظت در برابر خوردگی وجود دارد که شامل اصلاح بتن مصرفی و یا میلگرد استفاده شده در میان بتن می‌باشد (McDonald, ۲۰۱۱)

یکی از مهمترین دلایل رخداد خوردگی در محیط دریایی وجود یون کلر است. بنابراین چنانچه بتن در برابر نفوذ این یون مقاوم باشد پدیده خوردگی دیرتر اتفاق می‌افتد. نفوذپذیری بتن به عوامل زیادی بستگی دارد که از میان آنها می‌توان به نسبت آب به سیمان، عیار سیمان، اسلامپ و روانی، سنگدانه‌ها، پوزولان‌ها و سرباره و میکروسیلیس، دمای هوا و مصرف افزودنی و... اشاره کرد. نسبت آب به سیمان عامل مهمی در نفوذپذیری بتن و خمیر سیمان است و با افزایش آن نفوذپذیری به شدت بالا می‌رود. برای بتنی که در ناحیه جزر و مد قرار می‌گیرد حداکثر میزان آب به سیمان ۰.۴۵ می‌باشد. افزایش عیار

سیمان تاحدودی به کاهش نفوذپذیری منجر می شود اما در صورت عدم کنترل سبب ایجاد ترک و جمع شدگی در بتن می شود. تجربه نشان داده است که روانی زیاد منجر به افزایش نفوذپذیری در برابر یون کلر می شود. پوزولانها و میکروسیلیسها با آهک موجود در خمیر سیمان ترکیب می شود و با تولید یک ژل چسباننده تاحدودی از قلیائیت محیط بتن می کاهد و ساختار ریزی به وجود می آید. همچنین سرباره های کوره ذوب آهن در مجاورت آهک با آب ترکیب می شود و باعث چسبندگی می گردد.

پیکرنگار و همکاران (۱۳۹۰ ه. ش.)، تاثیر ترکیب پوزولانهای گوناگون را بر خوردگی میلگرد بتن مسلح بررسی کردند و دریافتند که کمترین میزان نفوذپذیری یون کلر مربوط به بتن حاوی ترکیب میکروسیلیس و خاکستر بادی است و نشان دادند سیکل تر و خشک شدن این پدیده را تشدید می کند (پیکرنگار و همکاران، ۱۳۹۰).

ضخامت پوشش بتنی از دیگر عوامل موثر بر رخداد خوردگی می باشد. یون کلر و مواد مضر برای رسیدن به میلگردها باید از پوشش بتنی روی آن عبور کنند. آزمایش ها نشان داده است که زمان رسیدن یون کلر به میلگردها تابع توانی از پوشش بتن است. مرتضوی و همکاران (۱۳۸۸ ه. ش.) طی مطالعه ای خود پیرامون رفتار خوردگی آرماتور فولادی در بتن آبهای خلیج فارس دریافتند که افزودن میکروسیلیس به بتن نسبت به ضخیم کردن پوشش بتن تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت بتن در برابر خوردگی دارد به طوریکه مقاومت بتن حاوی میکروسیلیس ۲ برابر شده است (مرتضوی و همکاران، ۱۳۸۸).

نوع آرماتور مصرفی نیز در تسریع این پدیده موثر است و فولادهای پرمقاومت و فولادهای سردنورد شده و یا گرم نوردشده سرد اصلاح شده سریعتر دچار خوردگی می شوند. همچنین زنگ زدگی اطراف میلگرد یا وجود هر نوع ماده زائد اطراف آرماتور این پدیده را تسریع می کند زیرا مانع ایجاد لایه محافظ انفعالی اکسید آهن به دور آرماتور می شود و خوردگی در محیط قلیایی را هموار می کند. لذا برخی دانشمندان استفاده از فولاد ضد زنگ را برای مقابله با این پدیده مقرون به صرفه دانسته اند.

از دیگر روش های مقابله با این پدیده استفاده از پوشش های سطحی بر روی بتن و یا میلگردها است. پوشش های سطحی دارای انواع مختلفی هستند. دسته اول یک پوشش رنگ مانند بر روی بتن ایجاد می نماید (مانند اپوکسی ها)، دسته دوم هم موادی هستند که سوراخ های سطحی را تا مقدار زیادی مسدود و پر می کنند (مانند مواد سیمانی دارای پلیمر و پلی اورتان)، دسته سوم آن هایی هستند که بدون پر کردن ریزه سوراخ های سطحی بتن جهت جریان رطوبت را معکوس می نمایند و به جای این که رطوبت حاوی یون کلر به داخل بتن نفوذ کند رطوبت داخل بتن به خارج منتقل می شود که اصطلاحاً به آن ها مواد قابل تنفس می گویند (مانند Siloxan – Silan).

پوشش اپوکسی روی میلگردها نیز از مسرعت خوردگی می کاهد. مطالعات سوئی و همکاران (۲۰۰۷ م.) و لولر و همکاران (۲۰۱۱ م.) هر دو نشانگر این بود که زمان رسیدن کلر به میلگرد برای آنهایی که پوشش اپوکسی دارند بیشتر از فاقد اپوکسی است (Lawler et al, ۲۰۱۱; Cui et al, ۲۰۰۷).

استفاده از بازدارنده های شیمیایی و یا آلی نیز از روش های نوین مقابله با خوردگی است. نیتريت کلسیم مطرح ترین بازدارنده خوردگی شناخته شده می باشد که مصرف آن در دنیا بتدریج رو به افزایش است، این ماده برای ساخت سازه های جدیدی بکار می رود که قرار است در محیط های آلوده به یون های کلراید احداث شوند. دو ماده بازدارنده آلی دیگر نیز باتیل

استرها و تریس امتهای دریایی می باشند که هر کدام بطریقی مانع از خوردگی فولاد در بتن می گردند (نعمت الهی و سوادکوهی، ۱۳۹۱).

حفاظت کاتدی یکی دیگر از روش های محافظت از سازه در برابر خوردگی می باشد که اغلب به عنوان تکنیکی برای تعمیر یک سازه مطرح می شود (Sahanghpurwala, 2009).

حفاظت کاتدی عبارت است از کاهش سرعت خوردگی فلزات توسط اعمال یک جریان الکتریکی خارجی (یکسو) و یا تماس آن با یک آند از بین رونده، روی سطح فلز مورد نظر که دارای مناطق کاتدی و آندی باشد. این روش اولین بار در سال ۱۸۲۴ میلادی توسط همفری دیوی مطرح گردید.

۵. نتیجه گیری و پیشنهادات

پس از بررسی سیر تکامل و خوردگی میلگرد در بتن نتایج حاکی از آن بود که رفتار خوردگی میلگرد تحت شرایط تر و خشک شدن متناوب به سه بخش خوردگی با سرعت آرام، خوردگی با نرخ تغییرات زیاد (خوردگی سریع) و خوردگی با نرخ تغییرات ثابت تقسیم می شود. همچنین وجود یون کلر تحت سیکل تر و خشک شدن متوالی سبب شوره زدگی بتن می شود. نمک ها هنگام کریستالیزه شدن فشار مخربی به سازه وارد می کنند و پدیده خوردگی و زنگ زدگی آرماتور را تسریع می کنند. برای جلوگیری از خوردگی آرماتور بتن مسلح، در ابتدا باید به رعایت نکات اجرایی به هنگام ساخت بتن، بتن ریزی و زمان گیرش توجه داشت تا بتن و نحوه آرماتوربندی از کیفیت بالایی برخوردار باشند و پدیده خوردگی زودرس صورت نگیرد. استفاده از میکروسیلیس برای تهیه بتن مقاوم و همچنین فولاد ضدزنگ و یا استفاده از پوشش اپوکسی روی میلگرد برای دستیابی به مقاومت مطلوب در برابر خوردگی توصیه می شود. با توجه به شرایط آب و هوایی گرم منطقه خلیج فارس و وجود یون های مهاجم در این آب ها استفاده از بازدارنده های مناسب جهت کاهش سرعت خوردگی نیز مناسب می باشد.

۶. مراجع

- پیکر نگار، میثم، رنجبر، ملک محمد و مدندوست، رحمت (۱۳۹۰). بررسی تاثیر استفاده از ترکیب پوزولان های مختلف در بتن بر میزان نفوذ یون کلر و پتانسیل خوردگی فولاد، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران.
- رمضانیان پور، علی اکبر و همکاران (۱۳۷۸). فناوری بتن در شرایط محیطی خلیج فارس، جلد اول آسیب شناسی بتن و ارزیابی آن، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ک-۲۸۳، چاپ اول.
- محمودی، امین و همکاران (۱۳۸۸). بررسی دوام بتن مسلح در محیط دریایی خورنده شدید بر حسب موقعیت قرارگیری بتن نسبت به تراز آب دریا، نشریه مهندسی دریا شماره ۵ سال دهم.

مرتضوی، رضا، دولتی، ابولقاسم و عسگری، مسعود (۱۳۸۸). بررسی رفتار خوردگی آرماتور فولادی در بتن آب‌های خلیج فارس، یازدهمین کنگره ملی خوردگی، دانشگاه کرمان، کرمان.

نعمت الهی، ابوذر و سواد کوهی فر، ساسان. (۱۳۹۱). بررسی خوردگی بتن در سواحل دریا (منطقه عسلویه)، نشریه مقاوم سازی و بهسازی صنعت، شماره ۲۵، صفحات ۴۳-۳۴.

Cui, F., J. Lawler, et al. (۲۰۰۷). Corrosion Performance of Epoxy-Coated Reinforcing Bars in a Bridge Substructure in a Marine Environment. Corrosion ۲۰۰۷. Nashville TN, NACE

H. Karbalayi Faraji, H. Afshin, (۲۰۰۵). Durability of Reinforcement Concrete Containing Pozzolans In Oroomiyeh Lake Environment. M.Sc. Thesis Sahand University of Technology

Herzber, E. (۲۰۰۹). The Annual Cost of Corrosion For DoD. ۲۰۰۹ DoD Corrosion Conference. Washington DC, Department of Defence.

Koch, G. H., M. P. H. Brongers, et al. (۲۰۰۱). Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States. Washington DC. FHWA-RD-۰۱-۱۵۶.

Lawler, J. S., P. D. Krauss, et al. (۲۰۱۱). Condition Survey of Older West Virginia Bridge Decks Constructed with Epoxy-Coated Reinforcing Bar. TRB ۲۰۱۱. Washington DC.

Liu, C., Bi, Q., Leyland, A., & Matthews, A. (۲۰۰۳). An electrochemical impedance spectroscopy study of the corrosion behaviour of PVD coated steels in ۰.۵ N NaCl aqueous solution: Part II: EIS interpretation of corrosion behaviour. *Corrosion Science*, ۴۵(۶), ۱۲۵۷-۱۲۷۳.

McDonald, D. B. (۲۰۱۱). Corrosion Protection for Concrete Structures in Marine Environments. In Coastal Engineering Practice (pp. ۷۸-۸۸). ASCE.

Mohammed, T. U., Yamaji, T., Aoyama, T., & Hamada, H. (۲۰۰۱). Marine Durability of ۱۵-Year Old Concrete Specimens Made with Ordinary Portland, Slag, and Fly Ash Cements. ACI Special Publication, ۱۹۹.

Ramazanianpour, A.A., Parhizkar, T., Pourkhorshidi, R., Raisghasemi, M. (۲۰۰۶), "Assessing Concrete Durability with Different Cements and Pozzolans in Persian Gulf Environment", Concrete journal, Research Report, BHRC Publication No. R-۴۳۴, ۲۰۰۶.

Sohanghpurwala, A. A. (۲۰۰۹). Cathodic Protection for Life Extension of Existing Reinforced