

## بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان و پوزولان متاکائولن بر خوردگی میلگردها در بتن در شرایط پاشش در منطقه خلیج فارس

محمد شکرچی زاده

استاد دانشکده مهندسی عمران و سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی دانشکده فنی دانشگاه تهران

رایحه خاقانپور \*

کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش سازه، دانشکده فنی دانشگاه تهران

محمد حسین تدین

دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گرایش سازه‌های دریایی، دانشکده فنی دانشگاه تهران

عطیه فراهانی

دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گرایش سازه، دانشکده فنی دانشگاه تهران

### چکیده

محیط‌های دریایی واقع در نواحی گرمسیر از جمله حاشیه خلیج فارس، به عنوان مخرب‌ترین محیط برای سازه‌های بتن مسلح شناخته شده‌اند. به طوری که سالانه بخش عظیمی از هزینه‌های نگهداری، تعمیر یا جایگزینی سازه‌های بتن آرمه به خسارات ناشی از خوردگی اختصاص می‌یابد. کیفیت بتن یکی از عوامل مهم و تعیین‌کننده خوردگی در این منطقه است. امروزه استفاده از پوزولان‌ها به عنوان یکی از راهکارهای بهبود کیفیت بتن مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به این که شرایط رویارویی پاشش یکی از بحرانی‌ترین شرایط برای نفوذ یون کلر و خوردگی محسوب می‌شود، در این تحقیق، با قرار دادن آزمون‌ها با نسبت آب به سیمان‌های مختلف و درصد‌های مختلف پوزولان متاکائولن در منطقه پاشش و اندازه‌گیری سرعت خوردگی و پتانسیل نیم‌پیل توسط دستگاه گالواپالس به بررسی تأثیر این عوامل روی خوردگی میلگردها در طول ۳۲ ماه پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که در آزمون با نسبت آب به سیمان کم‌تر، احتمال خوردگی کمتر خواهد بود. افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ زمان شروع خوردگی را تا دو برابر کاهش می‌دهد. همچنین استفاده از متاکائولن سرعت خوردگی را تا دو برابر در مقایسه با آزمون‌های بدون آن کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: دوام بتن، سرعت خوردگی، متاکائولن، نسبت آب به سیمان.

\* نویسنده مسئول: r\_khaghanpour@ut.ac.ir

## ۱- مقدمه و هدف

مسلح در شرایط رویارویی مختلف، آزمایش‌های پایش خوردگی روی آنها انجام داده است (شکل ۱). در این تحقیق به بررسی نتایج آزمایش‌ها تا سن ۳۲ ماهه روی آزمون‌های واقع در شرایط رویارویی پاشش پرداخته شده و تاثیر پوزولان متاکائولن و نسبت آب به سیمان بر روی روند خوردگی بررسی شده است.

## ۲- بررسی خوردگی فولاد در بتن

خوردگی یکی از مهم‌ترین عوامل زوال و کاهش عمر مفید سازه‌های بتن مسلح است. خوردگی یک فرآیند الکتروشیمیایی است و برای تکمیل این چرخه چهار عامل مورد نیاز است: وجود یک واکنش آندی، یک واکنش کاتدی، جریان یونی و جریان الکترون. در نتیجه، فرآیند خوردگی نیازمند از بین رفتن لایه‌ی محافظ اطراف میلگردها و وجود اکسیژن و رطوبت در اطراف میلگردها می‌باشد. با رسیدن مقدار کلر در اطراف میلگرد به مقدار بحرانی، لایه‌ی محافظ از بین می‌رود. رطوبت بتن یک مسیر الکترونی را برای انتقال یون‌ها بین آند و کاتد فراهم می‌سازد و میلگرد هدایت‌کننده الکتریکی است که پیل خوردگی را تکمیل می‌کند [۴].



شکل ۱- سایت تحقیقاتی پایایی جزیره قشم

در سال‌های اخیر در مناطق مختلف دنیا، خوردگی میلگردهای فولادی در بتن به عنوان دلیل اصلی خرابی‌های زودرس و در برخی موارد تخریب کلی سازه‌های بتن مسلح شناخته می‌شود. محیط‌های دریایی واقع در نواحی گرمسیر به عنوان مخرب‌ترین محیط برای سازه‌های بتن مسلح می‌باشند. در این شرایط نفوذ یون کلر و خوردگی ناشی از آن بسیار زیاد است و در اغلب موارد به کاهش عمر مفید سازه می‌انجامد.

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که شرایط رویارویی پاشش و جزر و مد بحرانی‌ترین شرایط را از نظر دوام سازه‌های بتنی دارند [۱و۲]. به دلیل سیکل‌های مکررتر و خشک شدن و تبخیر بالا، سازه‌های بتنی در معرض شرایط رویارویی پاشش و جزر و مد، دارای بالاترین میزان یون کلرید هستند و در نتیجه احتمال خوردگی میلگردها به شدت افزایش می‌یابد و زمان شروع خوردگی در مقایسه با سایر شرایط رویارویی کاهش می‌یابد [۳و۴]. نتایج تحقیقات انجام شده به وسیله ولی‌پور و همکاران [۳] نشان می‌دهد که سرعت خوردگی در ناحیه پاشش بیشتر از ناحیه جزر و مد است و در نتیجه گسترش خوردگی در شرایط پاشش بیشتر از ناحیه جزر و مد خواهد بود.

ساخت سازه‌های زیربنایی در منطقه خلیج فارس در دهه‌های گذشته به شدت افزایش یافته و امروزه بسیاری از این سازه‌ها به دلیل خوردگی ناشی از نفوذ یون کلر با مشکلات اساسی مواجه هستند. طراحی نامناسب، ضعف در اجرا و در نتیجه بتن نامرغوب و نفوذپذیر عوامل اصلی این مشکلات هستند. کلر اولیه در مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت سازه، منابع آب و برخی افزودنی‌های بتن حاوی یون کلرید و اجرای نامناسب، از جمله دلایل اصلی این مشکل می‌باشند. خوردگی فولاد در سازه‌های بتنی، به طور متوسط، سالانه هزینه‌ای در حدود نیم درصد تولید ناخالص ملی در بردارد که در ایران علی‌رغم نبود آمار رسمی در این زمینه، در حال حاضر حدود ۲ میلیارد دلار برآورد می‌گردد.

با توجه به اهمیت مساله دوام، انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران در اسفندماه سال ۱۳۸۶ برای تخمین عمر مفید سازه‌های بتن مسلح در تماس با یون کلر در محیط خلیج فارس، سایتی تحقیقاتی در منطقه‌ی آزاد قشم احداث نموده است و با قرار دادن آزمون‌های بتن

جدول ۱- تخمین مقدار خوردگی قابل مشاهده از روی

مقدار خوردگی ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	مقدار اندازه گیری شده
در حالت مقاوم	$< 0.5$
کم	$0.5 - 5$
متوسط	$5 - 15$
زیاد	$> 15$

سطح بین میلگرد و بتن غیر ممکن می‌باشد. بنابراین لازم است که الکتروود دیگری برای تکمیل مدار الکتریکی تعریف شود. پتانسیل الکتریکی اندازه گیری شده بین این دو الکتروود پتانسیل پیل نامیده می‌شود که مجموع پتانسیل دو نیم پیل است. در دستگاه گالوپالس از الکتروود مرجع نقره-کلرید نقره ( $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ) استفاده می‌شود. این الکتروودها در دمای بین صفر تا  $240^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد به خوبی کار می‌کنند و اکسیژن و نور تأثیری بر پتانسیل آن‌ها ندارد. مطابق با استانداردهای ASTM C876 [۸] و ASTM G3 [۹]، با توجه به مقدار پتانسیل اندازه گیری شده با استفاده از الکتروود  $\text{Ag}/\text{AgCl}$  احتمالات خوردگی میلگرد مطابق با جدول ۲ طبقه‌بندی می‌گردد.

جدول ۲- احتمال خوردگی از روی قرائت‌های انجام شده با

مقدار پتانسیل نیم پیل	احتمال خوردگی
$> -95 \text{ mv}$	با احتمال بیش از ۹۰ درصد هیچ خوردگی در زمان آزمایش وجود ندارد.
$-95 \text{ mv} < \text{پتانسیل} < -245 \text{ mv}$	فعالیت خوردگی در آن ناحیه نامشخص است
$< -245 \text{ mv}$	با احتمال بیش از ۹۰ درصد در میلگرد در زمان آزمایش خوردگی وجود دارد.

### ۳- پوزولان متاکائولن و تأثیر آن روی خواص بتن

متاکائولن یک ماده آلومینوسیلیکاتی با فعالیت بالا می‌باشد. مواد خام اولیه برای تولید متاکائولن، رس کائولن است. کائولن یک

تا کنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی خوردگی میلگرد در بتن به کار برده شده‌اند که تعداد کمی از آن‌ها در عمل بر روی سازه قابل استفاده هستند. از جمله‌ی این روش‌ها روش اندازه گیری نرخ خوردگی با استفاده از دستگاه گالوپالس است که یک روش پلاریزاسیون سریع برای تعیین میزان خوردگی در آزمایشگاه و سازه‌های بتن مسلح است. در این روش یک شدت جریان در محدوده  $400 - 5 \mu\text{A}$  در مدت ۱۰ ثانیه به میلگرد اعمال می‌شود و تغییرات پتانسیل الکتروشیمیایی میلگرد توسط یک الکتروود اندازه گیری می‌شود و توسط روابط موجود مقاومت الکتریکی و شدت جریان خوردگی محاسبه می‌شود [۳ و ۵].

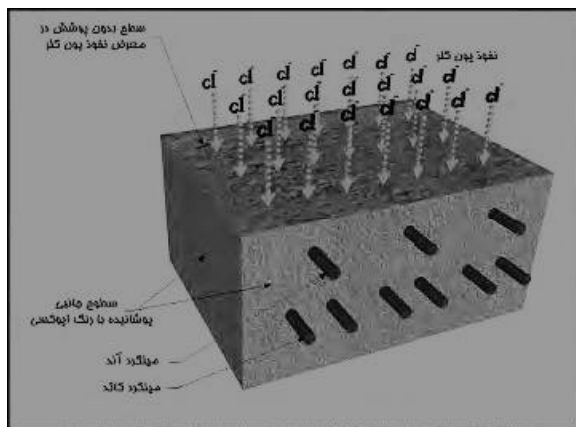
به دلیل مشکلات اندازه گیری پتانسیل نیم پیل در محیط‌های مرطوب و نیمه مرطوب که ناشی از کمبود اکسیژن است، استفاده از روش گالوپالس توسعه یافته است. از مزایای این روش در نظر گرفتن تأثیر شرایط محیطی و همین‌طور سرعت زیاد آن در به دست آوردن میزان خوردگی میلگرد در بتن است. با استفاده از دستگاه گالوپالس، پتانسیل نیم پیل، سرعت (چگالی جریان) خوردگی و مقاومت الکتریکی بتن قابل محاسبه است (شکل ۲) [۷ و ۶]. معیارهای طبقه‌بندی ریسک پذیری میزان خوردگی در جدول ۱ آمده است.



شکل ۲- تعیین سرعت خوردگی با استفاده از دستگاه گالوپالس

وقتی یک فلز در یک محلول غوطه‌ور می‌شود، در سطح بین مایع و جامد به دلیل توزیع غیر یکنواخت بار در فازهای مایع و جامد، اختلاف پتانسیل به وجود می‌آید. تعیین اختلاف پتانسیل ثابت در

است. به ازای سه میلگرد آند در بالا، شش میلگرد کاتد در پایین آزمون وجود دارد که در مجموع سه سیستم ماکروپیل را تشکیل می‌دهد. به طوری که برای هر طرح اختلاط، سه قرائت انجام می‌شود که دقت تحلیل نتایج را افزایش می‌دهد. شکل ۳ جزئیات آزمون‌ها را نشان می‌دهد. از سیمان نوع ۲ هرمرگان و همچنین پوزولان طبیعی متاکائولن شرکت آسان سرام استفاده شده است که آنالیز شیمیایی آن‌ها در جدول ۴ آمده است. مجموع سنگدانه‌ها تقریباً ۱۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و بزرگترین اندازه سنگدانه مورد استفاده ۱۹ میلیمتر است. از فوق‌روان‌کننده با پایه پلی‌کربکسیلات استفاده شده است. طرح اختلاط آزمون‌ها در جدول ۵ آمده است. آزمون‌ها بعد از سه روز عمل‌آوری مرطوب در شرایط محیطی منطقه، برای بررسی خوردگی در ناحیه‌ی پاشش قرار داده شدند و در فواصل زمانی مشخص آزمایش گالوپالاس روی آنها صورت گرفته است.



شکل ۳- جزئیات آزمون‌های بتن مسلح

## ۵- نتایج تحقیق و بررسی آن‌ها

### ۵-۱- تأثیر نسبت آب به سیمان

با استفاده از دستگاه گالوپالاس چگالی جریان خوردگی یا به عبارت دیگر سرعت خوردگی که معیاری برای تعیین میزان خوردگی میلگرد در بتن است در زمان‌های مختلف در آزمون‌های موجود اندازه گرفته شده است. نمودار تغییرات چگالی جریان خوردگی بر حسب زمان برای آزمون‌ها با نسبت آب به سیمان مختلف در شکل ۴ آمده است.

ماده معدنی است که در دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه، بیشتر آب جذب شده خود را از دست می‌دهد. دمایی که در آن کائولینیت اصلی‌ترین جز تشکیل‌دهنده کائولن است به واسطه‌ی دی‌هیدراکسیونیزاسیون آب از دست می‌دهد، بین ۵۰۰ الی ۸۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. به منظور تولید متاکائولن رس کائولن را تا محدوده دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه حرارت می‌دهند [۱۱و۱۰]. خواص فیزیکی متاکائولن در جدول ۳ آمده است [۱۲].

استفاده از متاکائولن باعث کاهش تخلخل بتن می‌شود که نتیجه‌ی آن کاهش نفوذپذیری بتن است. طبق تحقیق گروبر و همکاران<sup>۱</sup> که روی بتن حاوی متاکائولن صورت گرفته است، مشاهده می‌شود که با افزایش زمان رویارویی، ضریب نفوذپذیری یون کلر در داخل بتن نسبت به بتن معمولی کاهش خواهد یافت [۱۳].

شکرچی و همکاران [۱۴] نشان دادند که افزودن متاکائولن، مقاومت الکتریکی ویژه بتن را تا ۵/۵ برابر افزایش می‌دهد. به طوری که بتن حاوی متاکائولن به میزان ۱۵ درصد وزنی سیمان، بیشترین مقاومت را در برابر خوردگی دارد.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی پوزولان متاکائولن [۱۲]

ویژگی	مقدار
جرم مخصوص	۲/۶
چگالی انبوهی (g/cm <sup>3</sup> )	۰/۳-۰/۴
شکل فیزیکی	پودر
رنگ	سفید

بتیس و همکاران<sup>۲</sup> اثر متاکائولن را روی مقاومت خوردگی ملات بررسی کردند. طبق نتایج این تحقیق، نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد متاکائولن بیشترین مقاومت فشاری و مقاومت در برابر خوردگی را نشان داده‌اند و درصدهای بیشتر عملکرد مطلوبی نداشته‌اند [۱۵].

### ۴- مشخصات طرح‌های اختلاط آزمون‌ها

در سایت تحقیقاتی، آزمون‌های بتن مسلح به ابعاد ۲۰×۳۰×۵۵ سانتیمتری برای ارزیابی خوردگی میلگرد در بتن ساخته شده است. به دلیل تسریع در پدیده‌ی خوردگی ضخامت پوشش روی میلگردها ۳ سانتیمتر در نظر گرفته شده و قطر میلگردها ۱۴ میلیمتر

<sup>2</sup> Batis et al.

<sup>1</sup> Gruber et al.

جدول ۴- آنالیز شیمیایی مواد سیمانی مصرفی

عنوان	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	L.O.I (%)
سیمان	۲۱	۵	۳/۵	۶۳	۱/۸	۱/۶	۰/۵	۰/۶	۲
متاکائولن	۵۱/۸	۴۳/۸	۱	۰/۲	۰/۱۸	-	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۶

جدول ۵- طرح اختلاط آزمونه‌ها

کد آزمونه	نسبت آب به سیمان	عیار سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	پوزولان جایگزین (kg/m <sup>3</sup> )	مقدار آب (kg/m <sup>3</sup> )	فوق روان کننده (kg/m <sup>3</sup> )	اسلامپ (cm)
C1	۰/۳۵	۴۰۰	-	۱۴۰	۰/۳۵	۸
C2	۰/۴	۴۰۰	-	۱۶۰	۰/۲	۷
C3	۰/۴۵	۴۰۰	-	۱۸۰	۰/۱	۱۵
MK1	۰/۴	۳۸۰	۲۰	۱۶۰	۰/۸	۵
MK2	۰/۴	۳۶۰	۴۰	۱۶۰	۱/۴	۵/۵
MK3	۰/۴	۳۲۰	۶۰	۱۶۰	۱/۶	۸

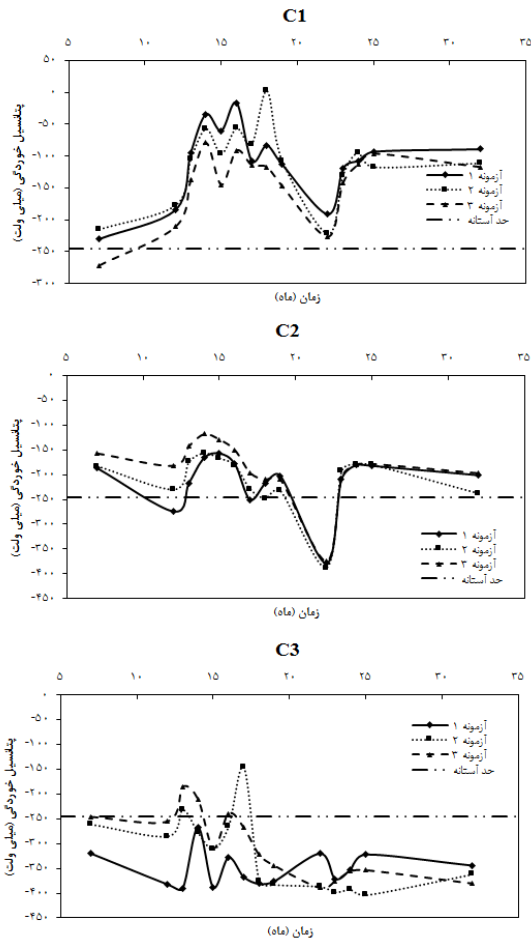
رخ داده است. همچنین شکستگی دائمی در نمودار بیانگر این مطلب است.

در منحنی‌های شکل ۵ یک تغییر ناگهانی بعد از حدود ۲۲ ماه مشاهده می‌شود، این امر می‌تواند بیانگر افزایش دما و کاهش شدید مقاومت الکتریکی ویژه بتن در این زمان باشد که باید در نتایج بلند مدت مورد بررسی بیشتر قرار گیرد.

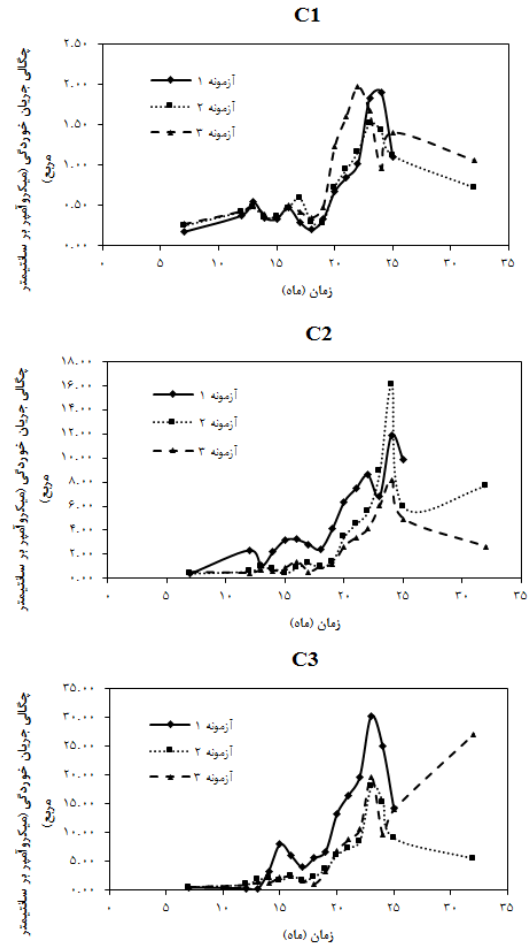
#### ۵-۲- تأثیر پوزولان متاکائولن

نمودار تغییرات چگالی جریان خوردگی بر حسب زمان برای آزمونه‌های حاوی پوزولان متاکائولن در شکل ۶ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود چگالی جریان خوردگی در آزمونه‌ی بدون پوزولان (C2) بسیار بیشتر از آزمونه‌های حاوی پوزولان متاکائولن است و بعد از گذشت حدود ۲۲ ماه از قرارگیری آزمونه، خوردگی به حد بالایی خود رسیده است. این در حالی است که در آزمونه‌های حاوی پوزولان سرعت خوردگی بسیار کم‌تر از مقدار بحرانی است و مقدار خوردگی در حد کم است. این امر نشان می‌دهد که استفاده از متاکائولن مقدار خوردگی را به صورت چشمگیری کاهش می‌دهد.

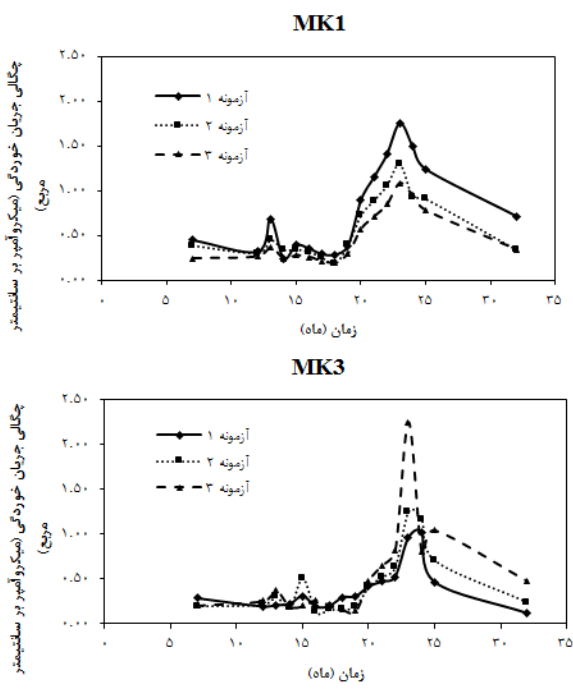
مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت آب به سیمان چگالی جریان خوردگی به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. به طوری که در آزمونه C3 بعد از گذشت حدود ۱۵ ماه، خوردگی به حد آستانه رسیده است. یک شکستگی در این زمان در نمودار مشاهده می‌شود و بعد از آن چگالی جریان خوردگی به شدت افزایش می‌یابد. اما در آزمونه C1 که نسبت آب به سیمان آن ۰/۳۵ است با گذشت ۳۲ ماه از قرارگیری در ناحیه پاشش خوردگی در حد بسیار کم قرار دارد. البته بعد از مدتی افت جریان خوردگی مشاهده می‌شود که دلیل آن نیازمند بررسی‌های بیشتر در طول زمان است. در بررسی آزمونه C2، مشاهده می‌شود که بعد از حدود ۲۰ ماه، در نمودار شکستگی رخ داده است و طبق جدول ۱، میزان خوردگی در حد متوسط قرار دارد. شکل ۵ تغییرات پتانسیل نیم‌پیل را در طول زمان برای این آزمونه‌ها نشان می‌دهد. بررسی این منحنی‌ها نتایج به دست آمده از چگالی جریان خوردگی (شکل ۴) را تصدیق می‌کند. با افزایش نسبت آب به سیمان پتانسیل نیم‌پیل افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که در آزمونه C1 و C2 با گذشت ۳۲ ماه، پتانسیل از حد آستانه تجاوز نکرده است. این در حالی است که پتانسیل هر سه میلگرد آزمونه C3 بعد از گذشت ۳ ماه منفی‌تر از ۲۴۵- است یعنی خوردگی با احتمال بیش از ۹۰ درصد



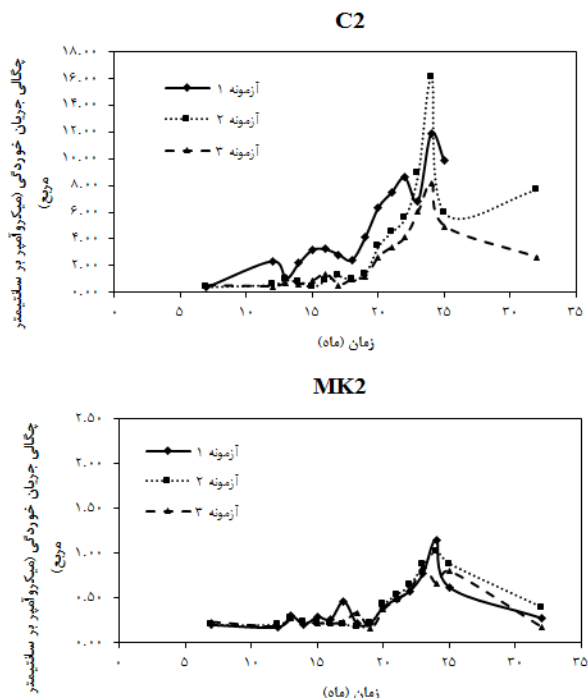
شکل ۵- تغییرات پتانسیل نیم پیل بر حسب زمان برای آزمون‌های با نسبت آب به سیمان مختلف



شکل ۴- تغییرات چگالی جریان خوردگی بر حسب زمان برای آزمون‌های با نسبت آب به سیمان مختلف



شکل ۶- تغییرات چگالی جریان خوردگی بر حسب زمان برای آزمون‌های با مقادیر مختلف متاکائولن



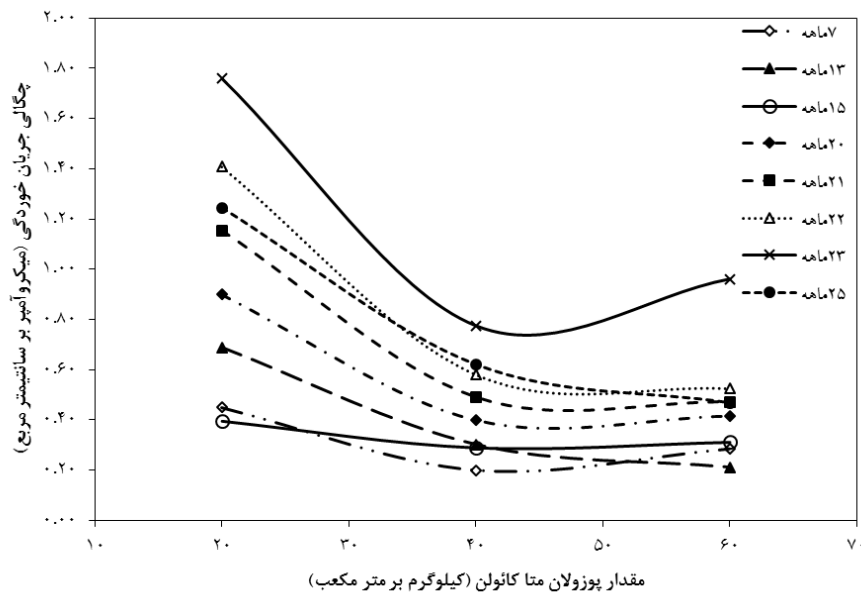
بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان و پوزولان متاکائولن بر خوردگی میلگردها ...

استفاده از متاکائولن حدود ۱۰ درصد وزنی سیمان است که حداقل سرعت خوردگی را دارد. استفاده بیشتر از آن باعث افزایش سرعت خوردگی شده است.

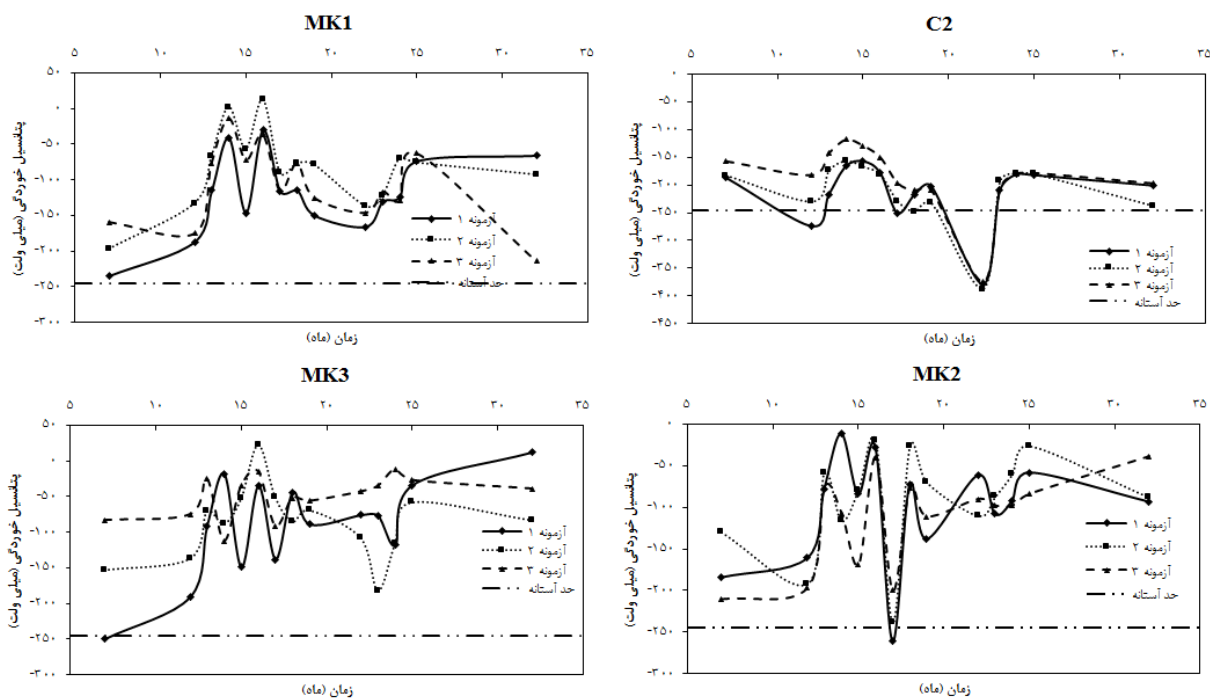
نمودار تغییرات پتانسیل نیم پیل بر حسب زمان برای آزمون‌های مختلف در شرایط رویارویی پاشش در شکل ۸ آمده است.

در این نمودارها نیز بعد از گذشت حدود ۲۲ ماه یک افزایش ناگهانی و افت مجدد چگالی مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از افزایش شدید دما در فصل تابستان باشد و نیاز به بررسی بلند مدت دارد.

نمودار شکل ۷ تغییرات سرعت خوردگی را نسبت به مقادیر مختلف متاکائولن نشان می‌دهد. مطابق شکل، مقدار بهینه



شکل ۷- نمودار تغییرات چگالی جریان خوردگی بر حسب مقدار متاکائولن



شکل ۸- تغییرات پتانسیل نیم پیل بر حسب زمان برای آزمون‌های با مقادیر مختلف متاکائول

۵. درصد بهینه استفاده از متاکائولن در بتن، حدود ۱۰ درصد وزنی سیمان به دست آمده است. استفاده بیشتر یا کم تر از این مقدار، سرعت و احتمال شروع خوردگی را افزایش می دهد.

۶. پوزولان متاکائولن می تواند به افزایش دوام بتن و کاهش نفوذپذیری آن کمک نماید و این مزایا در کنار افزایش مقاومت الکتریکی بتن باعث می شود تا توجه بیشتری برای مصرف داشته باشد.

#### ۷- تشکر و قدردانی

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

#### ۸- مراجع

[1] Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., Khani, S., Moradian, M., "In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment", Construction and Building Materials, 46, 63-70, 2013.

[2] Ghods, P, Chini, R, Alizadeh, R, Hosseini, M, Shekarchi, M, Ramazanianpour, AA., "The effect of different exposure conditions on the chloride diffusion into concrete in the Persian Gulf region." In: Third international conference on construction material, ConMat'05, Vancouver, Canada; 2005.

[3] Valipour, M., Shekarchi, M., Ghods, P., "Comparative studies of experimental and numerical techniques in measurement of corrosion rate and time-to-corrosion-initiation of rebar in concrete in marine environments", Cement & Concrete Composites, 48, 98-107, 2014.

[4] Brown, M.C., "Corrosion Protection Service Life Of Epoxy Coated Reinforcing Steel In Virginia Bridge Decks", PhD Thesis, faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.

[5] GalvaPulse™ GP-5000, Instruction and Maintenance Manual, October 1st, 2009.

[۶] پرگر، فرهاد، "بررسی پارامترهای موثر بر غلظت کلر بحرانی برای شروع خوردگی میلگردهای فولادی در بتن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۵.

[۷] ولی پور، مهدی، "بررسی انتشار یون کلر بر خوردگی بتن مسلح در شرایط اقلیمی جزیره قشم با در نظر گرفتن شرایط

مشاهده می شود که پتانسیل نیم پیل در آزمون C2 بسیار منفی تر از آزمونهای حاوی پوزولان است و از حد آستانه خوردگی تجاوز می کند. در حالی که پتانسیل نیم پیل در آزمونهای حاوی پوزولان کم تر از حد آستانه است. مقایسه این نتایج نشان از عملکرد مثبت پوزولان متاکائولن در برابر خوردگی دارد، به طوری که با وجود احتمال خوردگی در آزمون شاهد در ماه ۲۰م، پس از گذشت ۳۲ ماه در آزمونهای حاوی متاکائولن احتمال خوردگی نزدیک به صفر است.

بعضی از تغییرات نتایج در طول زمان، به دلیل وابستگی پتانسیل و سرعت خوردگی به عوامل مختلفی از جمله دما و درصد رطوبت نسبی است. با افزایش دما و رطوبت نسبی، مقاومت الکتریکی بتن کاهش می یابد و در نتیجه احتمال و سرعت خوردگی افزایش خواهد یافت. البته تأثیرات دما و رطوبت نسبی روی روند خوردگی دارای پیچیدگی است و نیازمند بررسی بیشتر می باشد.

#### ۹- نتیجه گیری

با توجه به نتایج آزمایشها و تحقیقات انجام شده در این مقاله، به نتایج زیر می توان دست یافت:

۱. استفاده از بتن با نسبت آب به سیمان زیاد در منطقه خلیج فارس باعث خوردگی زود هنگام سازه می شود. به طوری که در آزمونهای با نسبت آب به سیمان بیش از ۰/۴ در ناحیه ی پاشش، با گذشت زمان اندکی از قرارگیری در شرایط رویارویی، خوردگی میلگردها آغاز شده است یا در آستانه خوردگی قرار دارند.

۲. افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ باعث افزایش احتمال خوردگی میلگرد در بتن شده و زمان شروع خوردگی را تا دو برابر کاهش می دهد.

۳. استفاده از پوزولان متاکائولن در ترکیب بتن باعث کاهش سرعت خوردگی و پتانسیل نیم پیل می شود. به طوری که بعد از گذشت ۳۲ ماه، احتمال خوردگی در آزمونهای حاوی متاکائولن بسیار اندک است.

۴. در شرایط و زمان رویارویی یکسان، افزودن پوزولان متاکائولن به میزان ۵ تا ۱۵ درصد وزنی سیمان به بتن، می تواند سرعت خوردگی میلگردها را تا حدود ۹۰ درصد کاهش دهد.



قرارگیری و کاربرد مواد پوزولانی مختلف"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۸.

[8] ASTM C 876, Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete, 1991, (Reapproved 1999).

[9] ASTM G3, Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing, 1989 (Reapproved 2004).

[۱۰] شکرچی زاده، محمد. میردامادی، علیرضا. بنکدار، ابوذر.

بخشی، مهدی، "بهبود خواص بتن های توانمند با استفاده از متاکائولن"، مجله تحقیقات بتن، شماره ۲، صفحات ۶۳-۵۵، ۱۳۸۷.

[11] Bonakdar, A., Bakhshi, M., Ghalibafian, M., "Properties of High-performance Concrete Containing High Reactivity Metakaolin", 7th International Symposium on Utilization of High Strength/High-Performance Concrete, Washington DC, USA, Vol. 1, pp 228-295, 2005.

[۱۲] ولی پور، مهدی. پرگر، فرهاد. شکرچی زاده، محمد. "بررسی

خوردگی آرماتور در شرایط محیطی خلیج فارس در بتن های

حاوی پوزولان متاکائولن"، دومین کنفرانس ملی بتن ایران، تهران،

۱۳۸۹.

[13] Gruber, K.A., Ramlochan, T., Boddy, A., Hooton, R.D., Thomas, M.D.A., "Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin", Cement and Concrete Research 23 (6), 479-484, 2001.

[14] Shekarchi, M., Bonakdar, A., Bakhshi, M., Mirdamadi, A., Mobasher, B., "Transport properties in Metakaolin blended concrete", Construction and Building Materials, 24, 2217-2223, 2010.

[15] Batis G, Pantazopoulou P, Tsvilis S, Badogiannis E., "The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars", Cement & Concrete Composites 27 125-130, 2005.

## **Study of the effect of Water-Cement Ratio and Metakaolin on Corrosion of Concrete Reinforcements in Splash Zone in Persian Gulf Region**

**Mohammad Shekarchi Zadeh**

**Professor and Director of Construction Materials Institute, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran**

**Rayehe Khaghanpour\***

**M.Sc. Structural Engineering, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran**

**Mohammad Hossein Tadayon**

**Ph.D. student of Marine Structural Engineering, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran**

**Atiye Farahani**

**Ph.D. student of Structural Engineering, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran**

### **Abstract**

Marine environments such as Qheshm Island, are the most destructive environments for reinforced concrete structures. Concrete quality is one of the important factors in corrosion. Nowadays use of pozzolanic materials is one of the methods to improve the concrete qualities. In this study, by placing specimens with different water to cement ratios and different amounts of Metakaolin in splash zone and measuring the rate of corrosion and half-cell potential using GalvaPulse method, the effect of these factors on corrosion of reinforcements during 32 month is evaluated. The test results indicate that the specimen with lower water to cement ratio has lower likelihood of corrosion. Increasing the water to cement ratio from 0.35 to 0.45, decreases the time-to-corrosion to 50%. Using Metakaolin also reduces the rate of corrosion.

**Keywords:** Concrete durability, Corrosion rate, Metakaolin, Water to cement ratio.

---

\* Corresponding Author: r\_khaghanpour@ut.ac.ir