

تخمین غلظت یون کلرید بحرانی شروع خوردگی میلگرد بتن بدون پوزولان در شرایط پاشش خلیج فارس

محمدحسین تدین^۱، محمد شکرچی زاده^۲، محسن تدین^۳

۱- دانشجوی دکترای سازه‌های دریایی، مهندسی عمران، پردیس دانشکده فنی دانشگاه تهران

۲- رییس مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

۳- رییس هیات مدیره انجمن بتن ایران

Email: tadayon@ut.ac.ir

چکیده

خوردگی میلگرد داخل سازه‌های بتنی یکی از خرابی‌های رایج در سازه‌های در معرض یون کلرید و مخصوصاً در تماس با آب دریا می‌باشد. برای شروع خوردگی میلگرد داخل بتن، باید لایه محافظ تشکیل شده در اطراف میلگرد تخریب گردد که یکی از عوامل تخریب کننده این لایه محافظ، افزایش یون کلرید در محل میلگرد به مقدار مشخصی به نام غلظت یون کلرید بحرانی یا آستانه خوردگی می‌باشد. بنابراین برای تخمین زمان شروع خوردگی میلگرد از روی میزان یون کلرید نفوذ یافته، نیاز به تعیین غلظت یون کلرید بحرانی می‌باشد.

در این تحقیق، زمان شروع خوردگی، میزان یون کلرید در عمق میلگرد و همچنین غلظت یون کلرید بحرانی برای شروع خوردگی در بتن‌هایی با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵۰ بررسی شده است. همه بتن‌ها در شرایط پاشش در سایت تحقیقاتی دانشگاه تهران واقع در جزیره قشم قرار گرفتند. نمونه‌ها پس از ۳، ۹، ۲۷ و ۵۰ ماه در شرایط رویارویی پاشش سایت تحقیقاتی مورد آزمایش نفوذ یون کلرید قرار گرفته و بطور مداوم در بازه‌های زمانی حدود دو هفته، آزمایش‌های اختلاف پتانسیل نیم‌پیل و جریان خوردگی ماکروپیل انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که غلظت یون کلرید بحرانی در شرایط پاشش با افزایش نسبت آب به سیمان افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: خوردگی میلگرد در بتن، غلظت یون کلرید بحرانی، ناحیه پاشش، محیط دریایی خلیج فارس، اختلاف پتانسیل نیم‌پیل، جریان خوردگی ماکروپیل

۱. مقدمه

خوردگی میلگرد داخل سازه‌های بتنی یکی از رایج‌ترین خرابی‌های سازه‌های در معرض یون کلرید بویژه در تماس با آب دریا می‌باشد. خوردگی میلگرد فولادی داخل بتن با از بین رفتن لایه انفعالی میلگرد آغاز می‌گردد. برای از بین رفتن لایه انفعالی میلگرد فولادی داخل بتن، یا باید غلظت کلرید در سطح میلگرد از مقدار معینی (غلظت کلرید بحرانی) بیشتر شود و یا pH بتن اطراف میلگرد افت کند (در اثر کربناته‌شدن یا نفوذ مواد با pH کم). اصلی‌ترین عامل نفوذ کلرید به داخل بتن، انتشار است. انتشار، حرکت ماده به خاطر اختلاف غلظت از نقطه‌ای به نقطه دیگر می‌باشد [۲۱].

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در تعیین عمر مفید وجود دارد، غلظت کلرید بحرانی می‌باشد. عوامل مختلفی نظیر نوع مواد سیمانی، pH مایع منفذی و غیره بر میزان کلرید بحرانی موثرند که تخمین آن را مشکل می‌سازد. در منابع مختلف، مقدار این پارامتر برای کلرید آزاد یا کلرید کل بیان می‌گردد. در ضمن، یا مستقیماً برای آن حدی تعیین می‌شود و یا حدی برای نسبت غلظت کلرید به غلظت یون هیدروکسیل معین می‌گردد. در ادبیات فنی، برای کلرید کل بحرانی مقادیر ۰/۰۴ تا ۸/۳ درصد وزن سیمان، برای کلرید آزاد بحرانی مقادیر ۰/۰۳ تا ۱/۱۶ درصد وزن سیمان (و ۰/۰۴۵ تا ۳/۲۲ مول بر لیتر) و برای نسبت کلرید آزاد به هیدروکسیل مقادیر متفاوتی از ۰/۰۹ تا ۶۳ ارائه شده است [۹-۱]. با توجه به تفاوت فاحش نتایج موجود در ادبیات فنی، بنظر می‌رسد غلظت یون کلرید بحرانی به شرایط رویارویی، دما، رطوبت، نوع بتن و سایر عوامل محیطی وابستگی شدید دارد و باید برای هر شرایط مشخص، آن را مستقیماً بدست آورد.

در این تحقیق، نتایج بررسی بلندمدت نفوذ یون کلرید در بتن برای بررسی زمان شروع خوردگی و غلظت یون کلرید بحرانی در شرایط پاشش در محیط دریایی خلیج فارس در سایت تحقیقاتی دانشگاه تهران در جزیره قشم ارائه می‌شود. به همین منظور، ۴ طرح با نسبت‌های آب به سیمان مختلف (۰/۳۵، ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵) ساخته شد و آزمایش‌های نفوذ یون کلرید در بتن و اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی برای تعیین زمان شروع خوردگی با دو روش جریان ماکروپیل و پتانسیل نیم‌پیل در محل، بر روی آن‌ها انجام گرفت.

برای این منظور، ابتدا بر اساس نتایج دو روش الکتروشیمیایی جریان ماکروپیل و اختلاف پتانسیل نیم‌پیل انجام شده بر روی نمونه‌های قرار گرفته در شرایط پاشش جزیره قشم، زمان شروع خوردگی طبق معیارهای هر کدام از دو روش، تخمین زده شد. سپس با مقایسه زمان‌های تخمین زده شده، مقدار تقریبی زمان شروع خوردگی بدست می‌آید. با داشتن زمان شروع خوردگی و همچنین نتایج غلظت یون کلرید در زمان‌های مختلف در عمق میلگرد، می‌توان مقدار یون کلرید در زمان شروع خوردگی برای هر نمونه را بدست آورد.

۲. برنامه آزمایشگاهی

مواد و مصالح

سیمان مصرفی در این تحقیق سیمان پرتلند نوع ۲ محصول کارخانه سیمان هرمزگان می‌باشد. مشخصات سیمان در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات سیمان مصرفی

مشخصات (%)									نام
LOI	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
۲	۰/۶	۰/۵	۱/۶	۱/۸	۶۳	۳/۵	۵	۲۱	سیمان

مصالح سنگی مصرفی شامل شن با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر و از نوع سنگدانه آهکی شکسته و ماسه از نوع گردگوشه می‌باشد. در همه طرح‌ها از ۶۲ درصد شن و ۳۸ درصد ماسه استفاده گردید. در ضمن در طرح‌های حاوی متاکائولن و همچنین در سایر طرح‌ها در صورت نیاز از افزودنی فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلاتی برای دستیابی به روانی مناسب و پخش یکنواخت مواد سیمانی استفاده گردید.

طرح‌های مخلوط

طرح‌های استفاده شده در این تحقیق شامل ۴ طرح با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵۰ و عیار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم در مترمکعب. جزییات طرح‌های مخلوط استفاده شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات طرح‌های مخلوط مصرفی

نام طرح	w/c	عیار سیمان (kg/m ³)	آب آزاد (kg/m ³)	فوق‌روان‌کننده (kg/m ³)	مشخصات طرح	
					اسلامپ (mm)	یون کلرید اولیه (٪ وزن بتن، C _i)
C1	۰/۳۵	۴۰۰	۱۴۰	۰/۳۵	۸۰	۰/۱۵
C2	۰/۴۰	۴۰۰	۱۶۰	۰/۲	۷۰	۰/۱۵
C3	۰/۴۵	۴۰۰	۱۸۰	۰/۱	۱۵۰	۰/۱۵
C4	۰/۵۰	۴۰۰	۲۰۰	۰	۱۸۰	۰/۱۵

آزمونه‌ها و شرایط رویارویی

برای تعیین غلظت یون کلرید در بتن در عمق میلگرد و همچنین برای اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی بتن مسلح، دو دسته آزمونه تهیه شد. دسته اول آزمونه‌های قرار گرفته در محیط سایت تحقیقاتی به شکل منشور و با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۶۰۰ میلی‌متر می‌باشد. دسته دوم، آزمونه‌های مسلح به شکل منشور و با ابعاد ۲۰۰×۳۰۰×۵۵۰ میلی‌متر و دارای سه میلگرد آند در بخش فوقانی و شش میلگرد کاتد در بخش تحتانی می‌باشد. میلگردهای استفاده شده آجدار و دارای قطر اسمی ۱۴ میلی‌متر می‌باشند. همچنین پوشش بتنی روی میلگردها نیز ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

آزمونه‌ها پس از ساخت، بر روی میز لرزان متراکم شده و پس از یک روز از قالب خارج شدند. سپس آزمونه‌های سایت تحقیقاتی در دمای محیط منطقه ۲ روز عمل‌آوری رطوبتی شدند. پس از آن، آزمونه‌های نفوذ یون کلرید از ۵ وجه توسط پوشش اپوکسی رنگ شدند تا تنها از یک طرف که سمت بالای آزمونه است، نفوذ اتفاق بیافتد.

آزمونه‌های سایت تحقیقاتی در شرایط پاشش آب دریای خلیج فارس در جزیره قشم قرار گرفتند.

نمونه‌برداری و آزمایش‌ها

تعیین غلظت یون کلرید محلول در اسید (یون کلرید کل) در عمق میلگرد پس از ۳، ۹، ۲۷ و ۵۰ ماه در شرایط پاشش سایت تحقیقاتی مطابق استاندارد ASTM C1556 انجام گرفت [۱۰]. پودرگیری از آزمونه‌ها برای اندازه‌گیری میزان یون کلرید در عمق معادل میلگرد آزمونه بتنی با دقت ۰/۵ میلی‌متر انجام شد. پودرهای مربوط به هر آزمونه طبق دستور آزمایش ASTM C114 (بخش ۱۹) و ASTM C1152 آماده‌سازی و سپس غلظت یون کلرید محلول در اسید آن اندازه‌گیری گردید [۱۱، ۱۲].

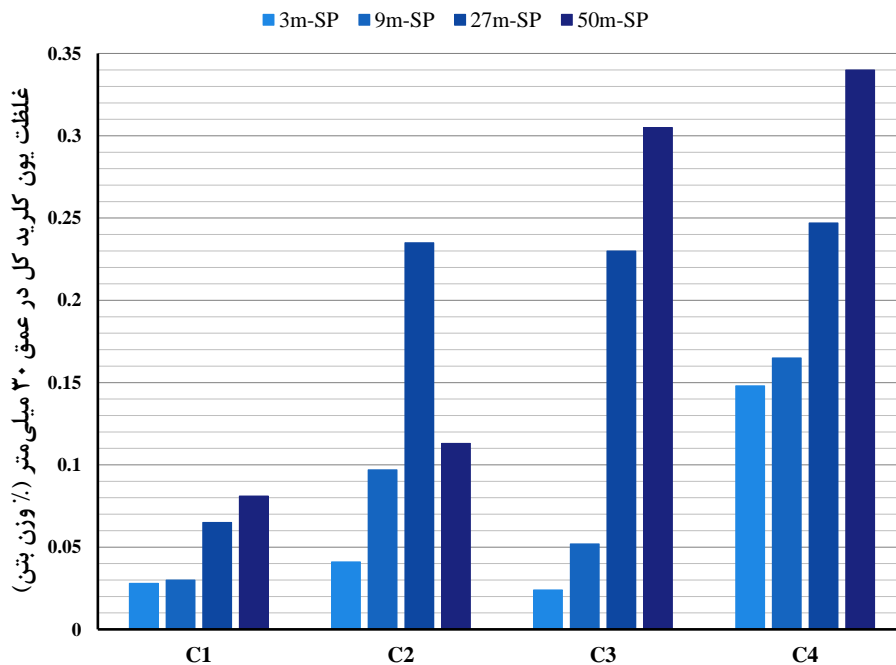
برای تعیین زمان شروع خوردگی از دو روش جریان ماکروپیل و پتانسیل نیم‌پیل استفاده شد. برای تعیین زمان شروع خوردگی ماکروپیل از روش آزمایش ASTM G109 اقتباس شد. این آزمایش بر روی آزمونه‌های مسلح در محیط سایت تحقیقاتی و در فواصل زمانی حدود ۲ هفته یکبار انجام گرفت. میلگرد بالایی (آند) توسط یک مقاومت ۱۰۰ اهمی به دو میلگرد

زیرین (کاتد) متصل می‌گردد. قرائت انجام شده اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد در مدار ایجاد شده می‌باشد. اگر شدت جریان عبوری به ۱۰ میکرو آمپر برسد، نشانه شروع خوردگی می‌باشد. بنابراین با توجه به مقدار مقاومت استفاده شده، اختلاف پتانسیل برای شروع خوردگی معادل ۱ میلی‌ولت خواهد بود [۱۳].

برای تعیین پتانسیل خوردگی و زمان شروع خوردگی نیم‌پیل از روش ASTM C876 استفاده شد. این آزمایش بر روی آزمون‌های مسلح در محیط سایت تحقیقاتی و در فواصل زمانی حدود ۲ هفته یکبار انجام گرفت. در این روش برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل بین بتن و میلگرد، الکتروود (در اینجا از نوع Ag/AgCl) روی سطح بتن قرار می‌گیرد و اختلاف پتانسیل آن توسط یک ولت‌متر با میلگرد بالای (آند) اندازه‌گیری می‌شود. اگر اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده با الکتروود Ag/AgCl موجود، از حدود ۲۴۵-، منفی‌تر باشد، به احتمال بیش از ۹۰ درصد خوردگی آغاز شده است و اگر از حدود ۹۵-، مثبت‌تر باشد، به احتمال بیش از ۹۰ درصد خوردگی آغاز نشده است [۱۴].

۳. نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آن‌ها

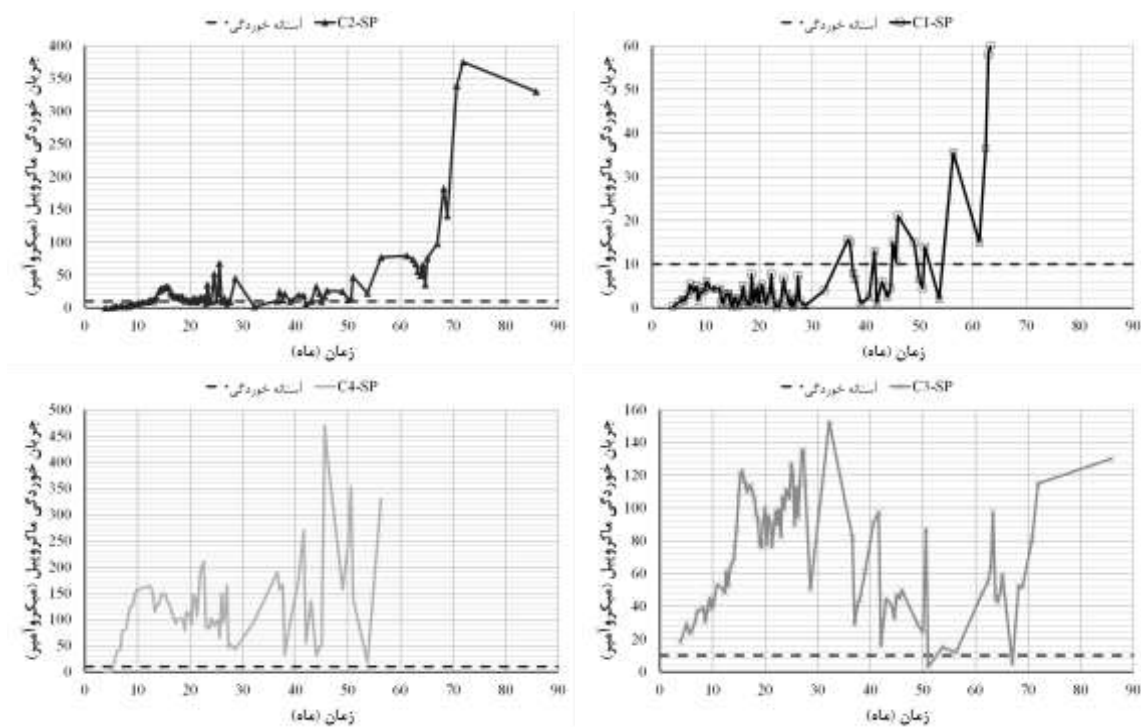
نتایج غلظت یون کلرید کل در عمق ۳۰ میلی‌متر (عمق قرارگیری میلگرد در آزمون‌های مسلح) مربوط به طرح‌های مختلف در طول زمان در شکل ۱ مشاهده می‌شود. مطابق نمودار شکل ۱، افزایش غلظت یون کلرید در اثر افزایش نسبت آب به سیمان در بیشتر موارد مشاهده می‌گردد. بطور کلی، مشاهده می‌شود که با پیشرفت زمان، غلظت یون کلرید نیز افزایش می‌یابد. پس از تعیین زمان تقریبی شروع خوردگی، از نتایج این نمودار برای تعیین غلظت یون کلرید بحرانی استفاده می‌گردد.



شکل ۱- تغییرات غلظت یون کلرید کل در عمق معادل میلگرد (۳۰ میلی‌متر) در طول زمان

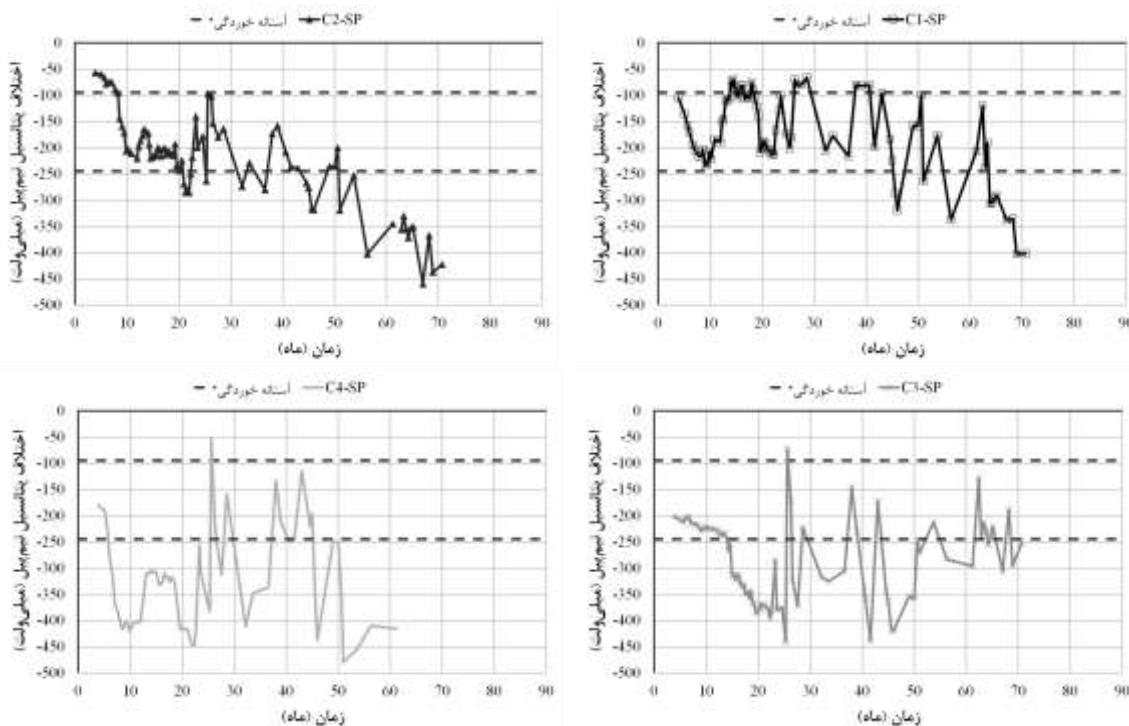
میانگین نتایج آزمایش ماکروپیل بر روی آزمون‌های قرار گرفته در شرایط پاشش در سایت تحقیقاتی در شکل ۲ مشاهده

می‌شود. طبق شکل ۲، با افزایش نسبت آب به سیمان، جریان ماکروپیل نیز افزایش یافته است. در ضمن نوسانات شدید مقادیر جریان ماکروپیل بخاطر تاثیرپذیری آن از شرایط محیطی نظیر تغییرات دمایی و رطوبتی محل قرارگیری می‌باشد. به همین علت، با مشاهده روند کلی تغییرات جریان خوردگی ماکروپیل باید زمان شروع خوردگی را تخمین زد و نمی‌توان گفت که اولین زمانی که مقدار جریان از مقدار آستانه عبور کند، لزوما خوردگی آغاز شده است. بر اساس نتایج جریان خوردگی ماکروپیل و آستانه خوردگی $10 \mu A$ ، زمان شروع خوردگی برای آزمون C4 حدود ۵/۵ ماه، برای آزمون C3 حدود ۳ ماه، برای آزمون C2 حدود ۱۹ ماه و برای آزمون C1 حدود ۳۷ ماه تخمین زده می‌شود.



شکل ۲- تغییرات جریان خوردگی ماکروپیل در آزمون‌های مختلف در طول زمان

میانگین نتایج آزمایش نیم‌پیل بر روی آزمون‌های قرار گرفته در شرایط پاشش در سایت تحقیقاتی در شکل ۳ مشاهده می‌شود. طبق شکل ۳، با افزایش نسبت آب به سیمان، پتانسیل خوردگی نیم‌پیل منفی‌تر شده است. در ضمن نوسانات شدید مقادیر پتانسیل بخاطر تاثیرپذیری آن از شرایط محیطی نظیر تغییرات دمایی و رطوبتی محل قرارگیری می‌باشد. به همین علت، با مشاهده روند کلی تغییرات پتانسیل خوردگی نیم‌پیل، باید زمان شروع خوردگی را تخمین زد و نمی‌توان گفت که اولین زمانی که مقدار پتانسیل از مقدار آستانه عبور کند، لزوما خوردگی آغاز شده است. بر اساس نتایج اختلاف پتانسیل خوردگی نیم‌پیل و آستانه خوردگی $245 mV$ - برای احتمال بیش از ۹۰ درصد خوردگی، زمان شروع خوردگی برای آزمون C4 حدود ۶ ماه، برای آزمون C3 حدود ۱۴ ماه، برای آزمون C2 حدود ۲۱ ماه، و برای آزمون C1 حدود ۵۱ ماه تخمین زده می‌شود.



شکل ۳- تغییرات پتانسیل خوردگی نیم پیل در آزمون‌های مختلف در طول زمان

با توجه به تحلیل نتایج آزمون‌های بررسی خوردگی آزمون‌های قرار گرفته در شرایط پاشش سایت تحقیقاتی، زمان شروع خوردگی مطابق جدول ۳ می‌باشد. زمان شروع خوردگی با مقایسه دو زمان شروع خوردگی تخمینی از دو روش جریان ماکروپیل و اختلاف پتانسیل نیم‌پیل بدست آمده است. به علت نزدیک بودن نسبی نتایج تخمین دو روش، زمان شروع خوردگی میانگین دو مقدار تخمین زده شده در نظر گرفته شد.

جدول ۳- تخمین زمان شروع خوردگی بر اساس نتایج آزمایش‌های خوردگی

نام آزمون	زمان شروع خوردگی (ماه) طبق روش جریان ماکروپیل	زمان شروع خوردگی (ماه) طبق روش اختلاف پتانسیل نیم‌پیل	زمان شروع خوردگی (ماه)
C1-SP	۳۷	۵۱	۴۴
C2-SP	۱۹	۲۱	۲۰
C3-SP	۳	۱۴	۱۴
C4-SP	۵/۵	۶	۶

بر اساس نتایج جدول ۳ برای زمان تقریبی شروع خوردگی و همچنین نتایج نمودار شکل ۱ برای غلظت یون کلرید در عمق میلگرد در زمان‌های مختلف، جدول ۴ غلظت یون کلرید در زمان شروع خوردگی برای آزمون‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۳- تخمین زمان شروع خوردگی بر اساس نتایج آزمایش‌های خوردگی

نام آزمون زمان شروع خوردگی (ماه) غلظت یون کلرید در عمق میلگرد

در زمان شروع خوردگی (% وزن بتن)		
۰/۰۷۴	۴۴	C1-SP
۰/۱۰۱	۲۰	C2-SP
۰/۱۱۲	۱۴	C3-SP
۰/۱۵۵	۶	C4-SP

همانطور که مشاهده می‌شود، خوردگی دو طرح C2 و C3 در غلظت یون کلرید حدود ۰/۱ تا ۰/۱۱ درصد وزن بتن آغاز شده است ولی طرح C1 مقدار غلظت آستانه خوردگی کمتر حدود ۰/۰۷۴ و طرح C4 مقدار حدود ۰/۱۵۵ دارد. بنابراین بر اساس این نتایج می‌توان گفت که غلظت یون کلرید بحرانی در شرایط پاشش موجود، برای نسبت آب به سیمان بیشتر، مقدار بیشتری دارد.

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نفوذ یون کلرید برای شروع خوردگی در بتن در شرایط پاشش سایت تحقیقاتی دانشگاه تهران در جزیره قشم با بتن‌های با نسبت‌های آب به سیمان مختلف بررسی و مقایسه شده است. بر این اساس، می‌توان موارد زیر را به‌عنوان نتایج اصلی این پژوهش بیان نمود.

- افزایش نسبت آب به سیمان بطور کلی منجر به افزایش غلظت یون کلرید در زمان‌های مختلف در عمق میلگرد شده است.

- افزایش نسبت آب به سیمان منجر به افزایش جریان خوردگی در آزمایش ماکروپیل و منفی‌تر شدن اختلاف پتانسیل در آزمایش نیم‌پیل شده است.

- به علت وجود پارامترها و عوامل محیطی مختلف و موثر بر نتایج جریان ماکروپیل و اختلاف پتانسیل نیم‌پیل، نمی‌توان اولین زمان عبور نتایج از معیارهای زمان شروع خوردگی را، به عنوان نتیجه زمان شروع خوردگی بیان نمود بلکه باید با مقایسه نتایج دو روش و همچنین بررسی طولانی مدت نتایج، زمان شروع خوردگی تقریبی را تخمین زد.

- نتایج شروع خوردگی تفاوت زیاد زمان شروع خوردگی برای نسبت آب به سیمان زیر ۰/۴۰ و بالای این مقدار را نشان می‌دهند.

- نتایج نشان می‌دهد که با وجود افزایش زمان شروع خوردگی برای آزمون‌های با نسبت آب به سیمان کمتر، اما در نسبت آب به سیمان بیشتر، غلظت یون کلرید بحرانی مقادیر بزرگتری می‌باشد.

۵. تقدیر و تشکر

از سازمان منطقه آزاد جزیره قشم و انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران برای تامین مالی ساخت سایت تحقیقاتی دوام سازه‌های بتنی دانشگاه تهران در جزیره قشم را که زمینه انجام این پژوهش را فراهم نموده است، تقدیر و تشکر می‌شود.

۶. مراجع

[۱] مهتا، پ. کومار، مترجم رضانیانپور، علی اکبر و همکاران (۱۳۸۳)، "ریز ساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

[۲] نویل، آدام، مترجم فامیلی، هرمز (۱۳۷۸)، "خواص بتن"، بازنگری چهارم، ابوریحان بیرونی، تهران، ایران.

- [3] Isgor, O. B. (2001), "A durability model for chloride and carbonation induced steel corrosion in reinforced concrete members", PhD Thesis, Carlton University.
- [4] Nilsson, L. O., Sandberg, P., Poulsen, E., Tang, L., Andersen, A., Frederiksen, J. M., (1997), "A system for estimation of chloride ingress into concrete", HETEK.
- [5] Andrade, J., Dal Molin, D., Ribeiro, J.L.D. (2002) "A Critical Analysis of Chloride Penetration Models in Reinforced Concrete Structures", ACI SP207-14, 217:228.
- [6] Costa, A., Appleton, J. (1999), "Chloride penetration into concrete in marine environment- Part II: Prediction of long term chloride penetration", Materials & Structures, 32, 354:359.
- [7] Cao, F., Greve, D.W., Oppenheim, I.J. (2005), "Development of Microsensors for Chloride Concentration in Concrete," Sensors, 2005 IEEE Conference, Irvine, CA, USA.
- [8] Ann, K.Y., Song, H.W. (2007), "Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete", Corrosion Science, 49, 4113:4133.
- [9] Angst, U., Elsener, B., Larsen, C.K., Vennesland, Ø. (2009), "Critical chloride content in reinforced concrete - A review", Cement & Concrete Research, 39, 1122:1138.
- [10] ASTM C1556-11a, "Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [11] ASTM Standard C114-13, "Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- [12] ASTM C1152 / C1152M-04(2012)e1, "Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [13] ASTM G109-07, "Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- [14] ASTM C876-15, "Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.