

تعمیر و نگهداری سازه‌های بتنی مسلح تحت تاثیر خوردگی کلریدی واقع در ناحیه جزرومدی منطقه خلیج فارس

عطیه فراهانی^{۱*}، حسین تقدس^۲، محمد شکرچی‌زاده^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه دانشگاه تهران

۲- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

۳- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران و سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

چکیده

دوام، عمر مفید و عملکرد سازه‌های بتن مسلح در معرض مناطق دریایی مانند جنوب ایران که در معرض خوردگی ناشی از نفوذ یون کلرید هستند، از اهمیت زیادی برخوردار است. خوردگی ناشی از نفوذ یون کلرید در بتن موجب تخریب سازه‌های بتن مسلح مانند پل‌ها و اسکله‌ها می‌شود. بنابراین، بررسی روش‌های تعمیر و نگهداری سازه‌های بتن مسلح در معرض خوردگی به منظور کاهش هزینه‌های چرخه عمر و افزایش عمر مفید و دوام این سازه‌ها حائز اهمیت می‌باشد.

در این تحقیق، در بخش مدلسازی عددی، مدل عددی یک ستون بتنی مسلح تحت تاثیر خوردگی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود به منظور بررسی تاثیر خوردگی و روش‌های مختلف تعمیر و نگهداری در جلوگیری از تخریب زودرس سازه‌های بتن مسلح در منطقه خلیج فارس ایجاد شده است. در این مدلسازی، از نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی عددی ضریب انتشار یون کلرید در بتن و غلظت کلرید سطحی در مرحله شروع خوردگی حاصل از نمونه‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان مختلف در ناحیه جزرومدی خلیج فارس، ارائه شده توسط نویسندگان مقاله، و مدل عددی شدت جریان خوردگی در بتن در مرحله گسترش خوردگی، موجود در ادبیات فنی، استفاده شده است. مدل المان محدود ستون بتنی مسلح تحت تاثیر خوردگی، درصد خوردگی میلگرهای طولی و عرضی و عرض ترک خوردگی پوشش بتنی را در طول زمان مورد ارزیابی قرار می‌دهد. همچنین، تاثیر استفاده از دو روش تعمیر شامل استفاده از شاتکریت و استفاده از پوشش سطحی پلی اورتان روی سطح خارجی بتن را مورد بررسی قرار می‌دهد.

کلمات کلیدی: بتن مسلح، تعمیر و نگهداری، ترک خوردگی، خوردگی، نسبت آب به سیمان.



نهمین کنفرانس ملی بتن ایران
۱۵ و ۱۶ مهرماه ۱۳۹۶
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



Repair and Maintenance of RC Corroded Structures Located in Tidal Zone of Persian Gulf Region

Atiye Farahani^{1*}, Hosein Tghaddos²,
Mohammad Shekarchi³

- 1- Ph.D. Candidate of Structural Engineering, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
- 2- Assistant Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
- 3- Full Professor and Director of Construction Materials Institute, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

Structural performance, durability and service life of Reinforced Concrete (RC) structures exposed to marine environments such as south of Iran is very significant and considerable. Chloride-induced corrosion is the main reason for premature deterioration and failure of RC structures (e.g., jetty structures and bridge columns) in such aggressive environments. Thus, modeling of chloride permeation and investigation of different methods for repair and maintenance of RC structures exposed to corrosive environments are very important for prediction of service life and life cycle cost of these structures. In this research, a finite element model is applied for time-dependent capacity assessment of corroded RC structures includes corrosion percent of longitudinal and horizontal reinforcements and crack width of concrete cover. In this part, a number of repair or rehabilitation methods have been investigated for damaged RC structures due to chloride induced corrosion, including polyurethane concrete surface coatings applied on external surface of concrete and shotcrete repair after initial cracking of concrete cover.

Keywords:

Reinforced Concrete, Repair and Maintenance, Crack, Corrosion, Water-to-cement ratio.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، سازه‌های بتن مسلح بسیاری در اثر خوردگی میلگرد در بتن در مناطق دریایی به دلیل هجوم یون کلرید به داخل بتن، دچار تخریب شده‌اند. بنابراین بررسی روش‌های مختلف تعمیر و نگهداری سازه‌های بتن مسلح در مناطق خورنده مانند خلیج فارس به منظور افزایش دوام و عمر مفید این سازه‌ها و کاهش هزینه‌های بازسازی و تخریب سازه اولیه حائز اهمیت است. برای جلوگیری از نفوذ افزایشده یون کلرید به داخل بتن می‌توان از راهکارهای مختلف شامل شاتکریت کردن سطح بتن یا افزایش ضخامت پوشش بتنی پس از شروع ترک خوردگی، تزریق اپوکسی به داخل ترک‌های سطحی بتن، استفاده از میلگردهای از جنس پلیمر مسلح شده به الیاف (FRP)^۱، استفاده از میلگردهای زنگ‌نزن و استفاده از پوشش‌های سطحی مختلف نام برد.

چو و همکاران^۲ [۱] تاثیر افزایش ضخامت پوشش بتنی روی خوردگی میلگردها ناشی از نفوذ یون کلرید را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که با افزایش ضخامت پوشش بتنی، شدت جریان خوردگی کاهش می‌یابد. لیکن، پتانسیل خوردگی، مقاومت الکتریکی بتن و چگالی جریان خوردگی به ضخامت پوشش بتنی وابسته نیست. علاوه بر این، در تحقیق دیگری اینرایت و همکاران^۳ [۲] تاثیر استفاده از شاتکریت را به عنوان روش تعمیر سازه‌های بتنی در معرض یون کلرید پیشنهاد کردند. باید قبل از استفاده از این نوع تعمیر، آسیب ناشی از خوردگی میلگرد به کمک پاشش ماسه^۴ روی میلگردها از بین برود. پاشش ماسه موجب می‌شود که فرآیند خوردگی میلگرد متوقف شود و سپس، لایه شاتکریت اعمال شود. در این حالت، تیر آسیب دیده ناشی از خوردگی همانند تیر بدون خوردگی عمل کرده و پس از مدتی دوباره زمان شروع خوردگی آغاز می‌شود. نتایج نشان داده است که روش تعمیر شاتکریت، تاثیر کمی روی تابع خرابی در آنالیز احتمالاتی دارد. خانزاده و همکاران [۳] تاثیر استفاده از پوشش‌های سطحی مختلف را روی سطح خارجی بتن، به منظور کاهش نفوذ یون کلرید به داخل بتن را در ناحیه جزرومدی منطقه خلیج فارس مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که پوشش‌های سطحی پلی اورتان (PU) و آلفاتیک اکریلیک (AA) بهترین عملکرد را در کاهش ضریب انتشار یون کلرید در بتن نسبت به نمونه شاهد داشته است.

به منظور انجام عملیات تعمیر و نگهداری سازه‌های بتنی مسلح، باید پدیده خوردگی و چگونگی نفوذ یون کلرید به داخل بتن را شناخت.

خوردگی میلگرد در بتن ناشی از نفوذ یون کلرید در بتن دارای دو مرحله است:

الف- مرحله شروع خوردگی

در این مرحله نفوذ یون کلرید موجود در آب دریا به داخل بتن از سطح بتن آغاز می‌شود و تا هنگامیکه غلظت یون کلرید روی سطح آرماتور به مقدار بحرانی غلظت یون کلرید (C_{cr}) برسد، ادامه می‌یابد. این مرحله نیازمند اکسیژن و رطوبت کافی در محیط می‌باشد. غلظت یون کلرید بحرانی به عوامل مختلفی شرایط محیطی دما و رطوبت نسبی و غلظت یون کلرید موجود در آب وابسته است [۴]. زمانیکه غلظت یون کلرید روی سطح میلگرد به مقدار بحرانی خود می‌رسد، زمان شروع خوردگی (T_{corr}) نامیده می‌شود. غلظت کلرید سطحی روی سطح بتن و ضریب انتشار یون کلرید

¹ Fiber Reinforced Polymer

² Cho et al.

³ Enright et al.

⁴ Sand Blasting

در بتن با استفاده از پروفیل غلظت یون کلرید در عمق بتن محاسبه می‌شود. به این منظور، باید پروفیل غلظت یون کلرید بر حسب عمق بتن را با راه‌حل یک بعدی عددی و یا تحلیلی ارائه شده از قانون دوم انتشار فیک^۱ مطابقت داد. لوپینگ^۲ [۵] مطابق رابطه (۱) راه‌حل تحلیلی قانون دوم انتشار فیک را ارائه داده است.

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \operatorname{erf}(x / \sqrt{4Dt}) \quad (1)$$

که در آن، C میزان درصد وزنی یون کلرید، x فاصله از سطح بتن بر حسب متر، t مدت زمان رویارویی بر حسب ثانیه، D ضریب انتشار یون کلرید در بتن بر حسب متر مربع بر ثانیه، C_s میزان درصد وزنی یون کلرید در سطح بتن، C_i میزان درصد وزنی یون کلرید اولیه و erf تابع خطا می‌باشد. میزان یون کلرید اولیه در آزمون‌های بدون پوزولان و دارای آب به سیمان مختلف برابر ۰/۰۱۵ درصد وزنی بتن بدست آمده است. از برازش هر پروفیل یون کلرید بر حسب عمق پودرگیری با رابطه (۱) و با استفاده از نرم افزار MATLAB اعداد D و C_s بدست می‌آیند.

در ادبیات فنی مدل‌های تجربی و عددی زیادی برای پیش‌بینی ضریب انتشار یون کلرید در بتن و غلظت یون کلرید سطحی ناشی از نفوذ یون کلرید به داخل بتن در محیط‌های دریایی و یا آزمایشگاهی ارائه شده است [۹-۶]. فراهانی [۱۰] بر اساس داده‌های حاصل از سایت تحقیقاتی واقع در منطقه خلیج فارس، مدلی عددی برای ضریب انتشار یون کلرید در بتن برای آزمون‌های بتنی با نسبت آب به سیمان مختلف واقع در منطقه جزرومدی منطقه خلیج فارس مطابق رابطه (۲) ارائه کرده‌است.

$$D = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^n \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \left[1 + \frac{(100-h)^4}{(100-h_c)^4} \right]^{-1} \quad (2)$$

که در آن، D ضریب انتشار یون کلرید در بتن بر حسب m^2/s و D_{ref} ضریب انتشار مرجع یون کلرید در بتن پس از ۳ ماه رویارویی در محیط کلریدی بر حسب m^2/s به صورت تابعی از نسبت آب به سیمان، t زمان رویارویی آزمون در محیط کلریدی بر حسب ماه، t_{ref} زمان رویارویی مرجع و برابر ۳ ماه و n ضریب سن بتن به صورت تابعی از نسبت آب به سیمان، U انرژی فعال‌سازی در فرایند انتشار بر حسب $J.mol^{-1}$ ، R ثابت گازها برابر $8.314 J.mol^{-1}.K^{-1}$ ، T دمای آزمون در محیط کلریدی بر حسب کلوین (K) و T_{ref} دمای مرجع پس از ۳ ماه رویارویی در محیط کلریدی بر حسب کلوین (K)، مقدار نسبت U/R در منطقه خلیج فارس برابر $2948 K$ بدست آمده است [۷، ۱۱و۶]. همچنین، h رطوبت نسبی محیط کلریدی بر حسب درصد و hc رطوبت نسبی بحرانی و برابر ۷۵٪ می‌باشد [۷و۶].

علاوه بر ضریب انتشار یون کلرید در بتن، مدلی تجربی برای غلظت یون کلرید سطحی در بتن در منطقه خلیج فارس ارائه شده است. خاقانپور و همکاران [۱۲] مدلی تجربی برای پیش‌بینی غلظت یون کلرید سطحی در بتن با نسبت‌های آب به سیمان مختلف در ناحیه جزرومدی در منطقه خلیج فارس مطابق رابطه (۳) بدست آورده‌اند.

$$C_s = K t^d + C_0 \quad (3)$$

¹ Fick Second Law of Diffusion

² Luping T.

که در آن، C_s میزان درصد وزنی یون کلرید در سطح بتن، t زمان رویارویی آزمونه در محیط کلریدی و K, d و C_0 ثابت هستند.

ب- مرحله گسترش خوردگی

این مرحله پس از زمان شروع خوردگی آغاز می‌شود و تا زمان فروپاشی سازه ناشی از خوردگی ادامه دارد. با افزایش غلظت یون کلرید روی سطح میلگرد، به تدریج پس از T_{corr} محصولات خوردگی یا زنگ آهن تولید می‌شود و شدت جریان خوردگی و در نتیجه آن درصد خوردگی افزایش می‌یابد.

محققان زیادی مدل‌های تجربی برای پیش‌بینی شدت جریان خوردگی میلگرد در بتن ناشی از نفوذ یون کلرید را پیش‌بینی کرده‌اند [۱۳-۱۵]. وو و استوارت^۱ [۱۶] در مطالعه خود شدت جریان خوردگی میلگرد ناشی از نفوذ یون کلرید در بتن بدون پوزولان با نسبت‌های آب به سیمان مختلف را مطابق رابطه (۴) پیش‌بینی کردند.

$$i_{corr}(t) = 32.1(1 - w/c)^{-1.64} t_p^{-0.29} / x \quad (4)$$

که در آن، $i_{corr}(t)$ شدت جریان خوردگی میلگرد ناشی از نفوذ یون کلرید، w/c نسبت آب به سیمان، t_p زمان رویارویی پس از زمان شروع خوردگی و x فاصله سطح بتن تا سطح میلگرد می‌باشد.

به منظور بررسی تاثیر خوردگی روی عملکرد و دوام سازه‌های بتن مسلح و افزایش عمر مفید این سازه‌ها در حین کاهش هزینه، باید با توجه به مدل‌های عددی پیش‌بینی پدیده خوردگی در طول چرخه عمر سازه، روش‌های مختلف تعمیر و نگهداری سازه‌ها مدلسازی شود و بهینه‌ترین روش با توجه به عملکرد سازه تحت تاثیر بار ثقلی و جانبی و پدیده خوردگی به طور همزمان، انتخاب شود.

در این تحقیق، با توجه به تحقیقات گسترده از مهندسیین مجری روش‌های تعمیر و نگهداری سازه‌های بتن مسلح در معرض خوردگی کلریدی در جنوب ایران، دو روش تعمیر و نگهداری ستون بتن مسلح در معرض خوردگی ناشی از نفوذ یون کلرید در بتن در ناحیه جزرومدی منطقه خلیج فارس ارائه شده است. روش اول، استفاده از پوشش سطحی پلی اورتان (PU) روی سطح بتن و روش دوم، استفاده از شاکریت کردن بتن روی سطح پوشش بتنی قبل از اعمال تعمیر می‌باشد. این دو روش تعمیر در زمان شروع ترک خوردگی پوشش بتنی اعمال می‌شود.

۲- مدلسازی عددی

با استفاده از مدل المان محدود یک ستون بتن مسلح با مقطع مربع، تحلیل وابسته به زمان تغییرات عرض ترک خوردگی پوشش بتنی، قطر میلگردهای طولی و عرضی و همچنین درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی در اثر خوردگی ناشی از نفوذ یون کلرید در بتن انجام شده است.

¹ Vu and Stewart

۱-۲- مشخصات ستون بتنی مسلح و مصالح مصرفی قبل از خوردگی

ابعاد مقطع، ارتفاع ستون، ضخامت پوشش بتنی اولیه، قطر میلگرد طولی، تعداد میلگرد طولی در مقطع، قطر میلگرد عرضی و فاصله میلگردهای عرضی به ترتیب برابر ۲۵۰ میلیمتر، ۱۸۰۰ میلیمتر، ۳۵ میلیمتر، ۱۶ میلیمتر، ۸، ۸ میلیمتر و ۸۰ میلیمتر می‌باشد. مشخصات مکانیکی میلگردهای طولی و عرضی در جدول ۱ خلاصه شده است. مقاومت فشاری بتن برابر ۳۰ مگاپاسکال فرض شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی میلگردهای طولی و عرضی

| Bar Diameter | | 16 mm | 8 mm |
|--------------------------|-----------------|---------|------------|
| Yield strain | ϵ_y | 0.00252 | 0.00247 |
| Yield stress (MPa) | σ_y | 530 | 510 |
| Elastic modulus (MPa) | E_s | 210000 | 212099 |
| Hardening strain | ϵ_{sh} | 0.0083 | No plateau |
| Strain at maximum stress | ϵ_u | 0.06 | 0.06033 |
| Maximum stress (MPa) | σ_u | 630 | 616 |
| Fracture strain | ϵ_f | 0.18 | 0.161 |

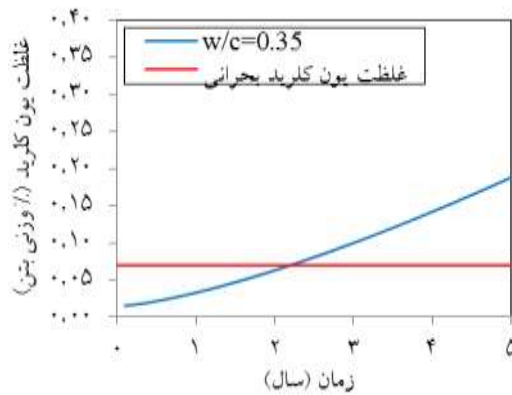
۳- تجزیه و تحلیل نتایج

۳-۱- پیش‌بینی زمان شروع خوردگی

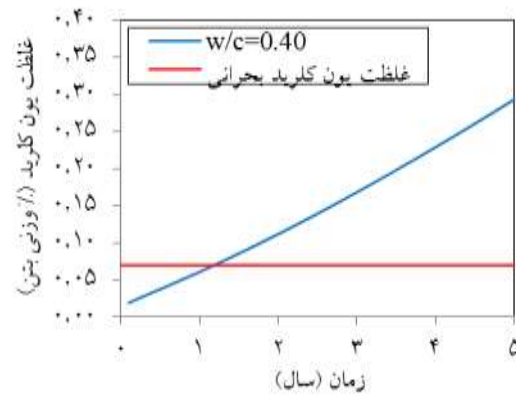
به منظور محاسبه زمان شروع ترک خوردگی پوشش بتنی به دلیل انبساط محصولات خوردگی، بایستی زمان شروع خوردگی مطابق رابطه (۵)، مستخرج از رابطه (۱)، تخمین زده شود.

$$T_{corr} = \left(\frac{x^2}{4D} \right) \times \left(\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{C_s - C_{cr}}{C_s - C_i} \right) \right)^{-2} \quad (5)$$

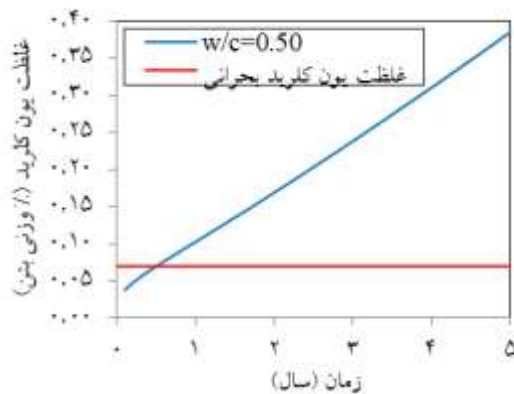
با توجه به رابطه (۵)، زمان شروع خوردگی میلگرد ناشی از نفوذ یون کلرید برای طرح اختلاط بتن با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۰ و ۰/۵۰ به ترتیب برابر ۲/۲۶، ۱/۳۵ و ۰/۵۰ سال می‌باشد. شکل ۱ نمودار غلظت یون کلرید بر حسب زمان بر اساس رابطه (۱) و با جایگذاری روابط (۲) و (۳) برای ضریب انتشار یون کلرید و غلظت کلرید سطحی برای منطقه خلیج فارس را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، زمانی که غلظت یون کلرید در بتن به مقدار بحرانی (C_{cr}) خود یعنی ۰/۰۷ درصد وزنی بتن برای منطقه خلیج فارس می‌رسد، فرایند خوردگی شروع می‌شود و مرحله گسترش خوردگی آغاز می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱- غلظت یون کلرید در سطح میلگرد برحسب زمان برای بتن حاوی سیمان پرتلند (الف) $w/c = 0.35$ ، (ب) $w/c = 0.40$ و (ج) $w/c = 0.50$

نتایج حاصل از شکل ۱ حاکی از آن است که بتن حاوی سیمان پرتلند و بدون پوزولان و ضخامت پوشش بتنی کم برای محیط‌های دریایی خورنده مانند منطقه خلیج فارس مناسب نیست. به طوریکه، بسیاری از پروژه‌های عمرانی مانند پل‌ها، اسکله‌ها و باراندازها در سال‌های اولیه بهره‌برداری و حتی در حین ساخت دچار تخریب شده‌اند. بدین منظور، روش‌های تعمیر و نگهداری سازه‌های بتن مسلح در مناطق دریایی به منظور افزایش عمر مفید این سازه‌ها و کاهش هزینه‌های تخریب و بازسازی مجدد، حائز اهمیت می‌باشد.

همانطور که ذکر شد، یکی از روش‌های تعمیر و نگهداری سازه‌های بتن مسلح در معرض خوردگی، استفاده از انواع پوشش‌های سطحی بر روی سطح خارجی بتن است. در این تحقیق روشی به منظور مدلسازی این پوشش‌های سطحی استفاده شده است که در ادامه برای پوشش سطحی پلی اورتان (PU) قابل استفاده در این تحقیق به عنوان روش تعمیر، توضیح داده خواهد شد.

۳-۲- مدلسازی پوشش بتنی معادل پوشش سطحی بتن در روش تعمیر به کمک پوشش سطحی پلی اورتان

خانزاده و همکاران [۳]، زمان از بین رفتن انواع پوشش‌های سطحی را از زمان مصرف این پوشش‌ها روی سطح بتن در تحقیق خود بدست آوردند. در تحقیق حاضر، پوشش پلی اورتان (PU) به دلیل عملکرد بهتر در محیط خورنده کلریدی از میان سایر پوشش‌ها به عنوان یکی از روش‌های تعمیر و نگهداری انتخاب شد. به منظور مدلسازی پوشش PU، از داده‌های مربوط به غلظت کلرید سطحی و ضریب انتشار یون کلرید در بتن بدون پوشش PU و دارای پوشش PU در زمان مصرف و در زمان از بین رفتن این نوع پوشش استفاده شده است. با استفاده از این داده‌ها و به کمک رابطه (۶) می‌توان از اختلاف مقدار x برای آزمون بتنی دارای پوشش PU و آزمون بتنی بدون پوشش PU، مقدار پوشش بتنی معادل پوشش سطحی PU را محاسبه کرد.

$$x = \operatorname{erf} \operatorname{inv} \left(\frac{C_s - C_{cr}}{C_s - C_i} \right) \times 2\sqrt{D.t} \quad (6)$$

که با توجه به توضیحات داده شده، مقدار پوشش بتنی معادل پوشش سطحی PU، برابر $31/2$ میلی‌متر محاسبه می‌شود.

در این تحقیق، زمان اعمال روش‌های تعمیر و نگهداری شامل استفاده از شاتکریت و پوشش سطحی PU، در زمان شروع ترک‌خوردگی پوشش بتنی می‌باشد. در ادامه نحوه محاسبه زمان ترک‌خوردگی پوشش بتن در اثر خوردگی با توجه به شدت جریان خوردگی و مشخصات بتن توضیح داده خواهد شد.

۳-۳- پیش‌بینی زمان شروع ترک‌خوردگی پوشش بتنی

زمان شروع ترک‌خوردگی پوشش بتنی مطابق رابطه (۷) توسط لیو و ویرز^۱ [۱۷] ارائه شده است.

$$t_{cr} = \frac{W_{crit}^2}{2k_p} \quad (7)$$

که در آن، W_{crit} مقدار کل محصولات خوردگی که فضای متخلخل بتن اطراف میلگرد را پر می‌کند و منبسط می‌شود، k_p نرخ تولید محصولات خوردگی مطابق رابطه (۸) ارائه شده توسط وال^۲ [۱۸] می‌باشد.

$$k_p = 9.8 \times 10^{-5} \frac{\pi d_0 i_{corr}(t)}{\alpha} \quad (8)$$

که در آن، $i_{corr}(t)$ شدت جریان خوردگی میلگرد ناشی از نفوذ یون کلرید، d_0 قطر اولیه میلگرد و α نسبت وزن ملکولی فولاد و وزن ملکولی محصولات خوردگی می‌باشد.

با توجه به رابطه (۷)، زمان شروع ترک خوردگی پوشش بتنی، در حالتی که روش‌های تعمیر اعمال نشده است، برای طرح اختلاط بتن با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۰ و ۰/۵۰ به ترتیب برابر ۳/۹۰، ۳/۵۳ و ۲/۶۹ سال محاسبه می‌شود.

¹ Liu and Weyers

² Val

۳-۴- پیش‌بینی عرض ترک خوردگی پوشش بتنی

در حالت کلی، عرض ترک خوردگی پوشش بتنی ناشی از تخریب یک عضو بتن مسلح مطابق رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۱۹].

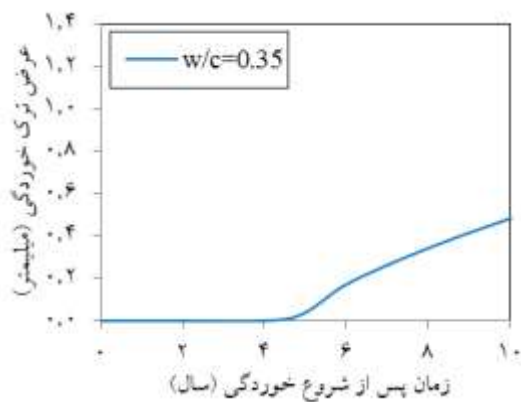
$$w = K (\Delta A_s - \Delta A_{s0}) \quad (9)$$

که در آن، ΔA_s سطح مقطع کاهش یافته میلگرد برحسب میلی‌مترمربع در زمان t پس از زمان شروع ترک خوردگی، ΔA_{s0} سطح مقطع کاهش یافته میلگرد برحسب میلی‌مترمربع در زمان شروع ترک خوردگی و K ضریب تجربی و برابر ۰/۰۵۷۵ می‌باشد.

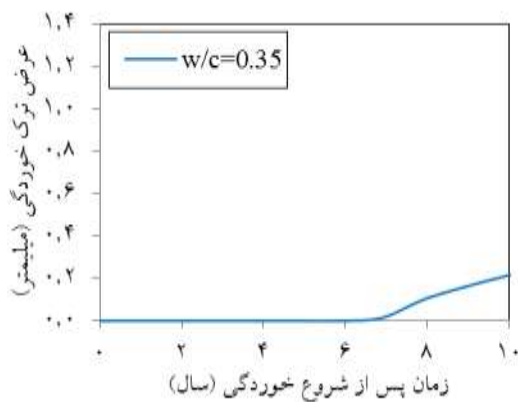
کاشانی و همکاران [۲۰] زمان عمر مفید میلگرد را زمانی محاسبه کردند که عرض ترک در پوشش بتنی در اثر خوردگی به مقدار ۰/۵ میلیمتر برسد. این مقدار بحرانی عرض ترک در پوشش بتنی برای حالت حدی بهره‌برداری تعیین شده است.

شکل‌های ۲-۴ به ترتیب، عرض ترک خوردگی پوشش بتنی تا زمان ۱۰ سال پس از زمان شروع خوردگی را برای ستون بتن مسلح بدون استفاده از تعمیر، استفاده از شاتکریت و استفاده از پوشش سطحی PU برای بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۰ و ۰/۵۰ نشان می‌دهد.

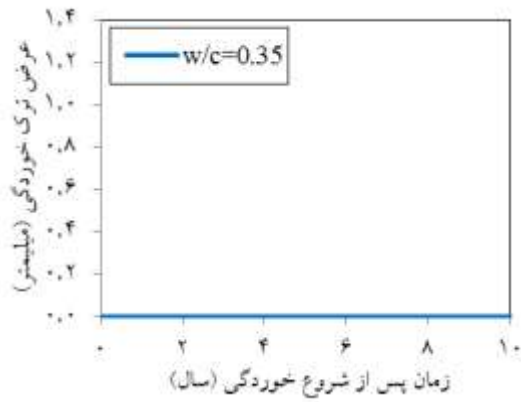
همانطور که در شکل ۲ مشخص است، عرض ترک خوردگی پوشش بتنی قبل از زمان شروع ترک خوردگی بدون استفاده از تعمیر، برابر صفر است و پس از زمان شروع ترک خوردگی افزایش می‌یابد. مقایسه شکل ۲ و ۳ نشان می‌دهد که با استفاده از شاتکریت روی سطح بتن به ضخامت ۷ میلی‌متر نسبت به روش بدون تعمیر، عرض ترک به ترتیب در بتن با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۰ و ۰/۵۰، ۰/۵۶٪، ۵۰٪ و ۴۲٪ کاهش می‌یابد. همچنین، شکل ۲ نشان می‌دهد که با استفاده از شاتکریت روی سطح بتن، زمان شروع ترک خوردگی پس از اعمال شاتکریت به ترتیب در بتن با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۰ و ۰/۵۰ به ۵/۹، ۵/۴ و ۴/۱ سال افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۳، عرض ترک در بتن با آب به سیمان مختلف در اثر استفاده از روش تعمیر اعمال پوشش سطحی PU روی سطح بتن تا زمان ۱۰ سال برابر صفر است. این نتیجه بدین معنی است که زمان شروع ترک خوردگی پس از اعمال PU تا زمان ۱۰ سال رخ نداده است.



(الف)

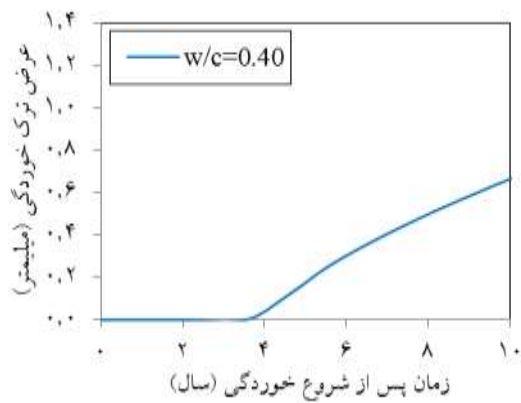


(ب)

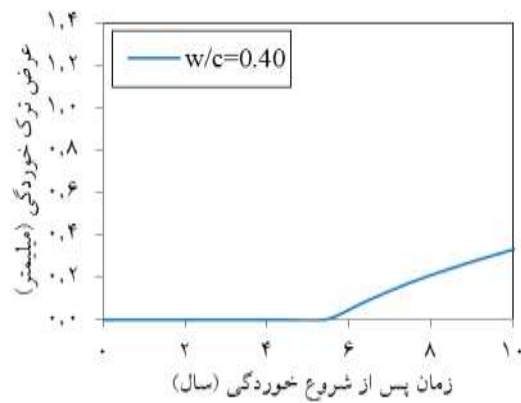


(ج)

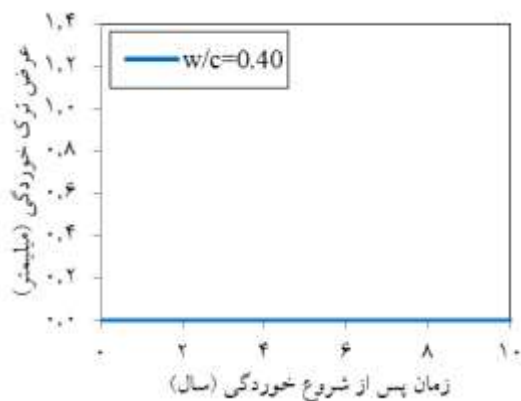
شکل ۲- عرض ترک خوردگی پوشش بتنی برحسب زمان (الف) بدون اعمال تعمیر، (ب) استفاده از شاتکریت و (ج) استفاده از پوشش سطحی PU ($w/c = 0.35$)



(الف)

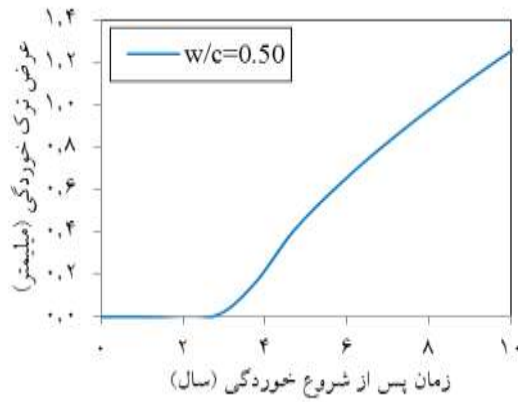


(ب)

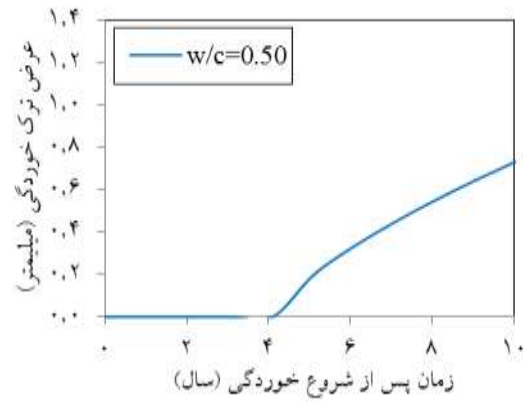


(ج)

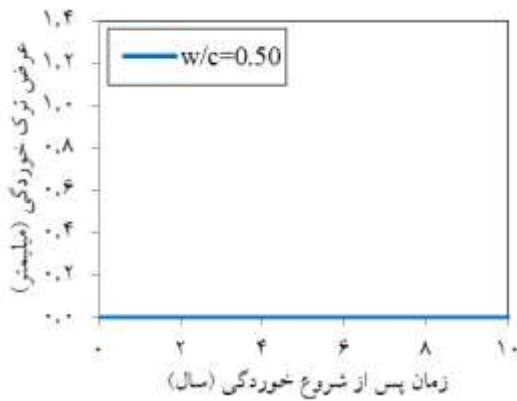
شکل ۳- عرض ترک خوردگی پوشش بتنی برحسب زمان (الف) بدون اعمال تعمیر، (ب) استفاده از شاتکریت و (ج) استفاده از پوشش سطحی PU ($w/c = 0.40$)



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴- عرض ترک خوردگی پوشش بتنی برحسب زمان (الف) بدون اعمال تعمیر، (ب) استفاده از شاتکریت و (ج) استفاده از پوشش سطحی PU ($w/c = 0.50$)

۳-۵- محاسبه قطر میلگردهای عرضی و طولی پس از خوردگی

قطر کاهش یافته میلگردهای طولی (dt) و عرضی (dt_{tie}) به ترتیب، به کمک روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$dt = d_0 - \alpha P_{avg} \quad (10)$$

$$dt_{tie} = d_{0_tie} - \alpha P_{avg_tie} \quad (11)$$

که در آن، d_0 و d_{0_tie} به ترتیب قطر اولیه میلگردهای طولی و عرضی قبل از شروع فرایند خوردگی می‌باشد. α برای خوردگی یکنواخت میلگرد برابر ۲ و برای خوردگی حفره‌ای و موضعی میلگرد بسته به میزان خوردگی، بین ۴ تا ۸ متغیر است [۱۹]. P_{ave} میانگین عمق خوردگی براساس کاهش جرم حجمی در زمان پس از شروع خوردگی می‌باشد که مطابق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$P_{ave}(t) = \kappa \int_{T_{cor}}^t i_{cor}(t) dt \quad (12)$$

که در آن، κ ضریب تبدیل واحد از $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ به mm/year و برابر 0.116 ، $i_{corr}(t)$ چگالی جریان خوردگی میلگردها در زمان پس از زمان شروع خوردگی مطابق رابطه (۴) می‌باشد. با محاسبه قطر میلگردهای طولی و عرضی در هر زمان پس از خوردگی، می‌توان درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی را در هر زمان محاسبه نمود.

۳-۶- محاسبه درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی

در نهایت، با توجه به روابط (۱۳) و (۱۴) می‌توان به ترتیب درصد خوردگی میلگردهای طولی (ψ) و عرضی (ψ_{tie}) را بدست آورد.

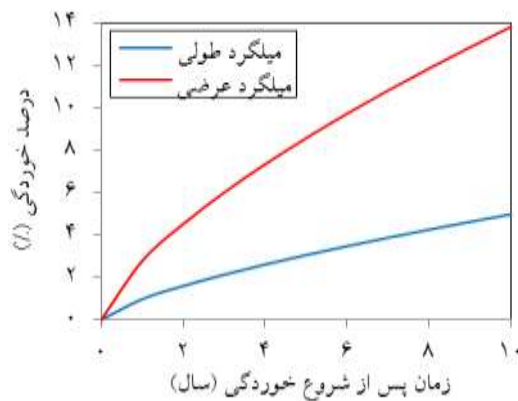
$$\psi = 100 \left(1 - \left(\frac{dt}{d_0} \right)^2 \right) \quad (13)$$

$$\psi_{tie} = 100 \left(1 - \left(\frac{dt_{tie}}{d_{0_{tie}}} \right)^2 \right) \quad (14)$$

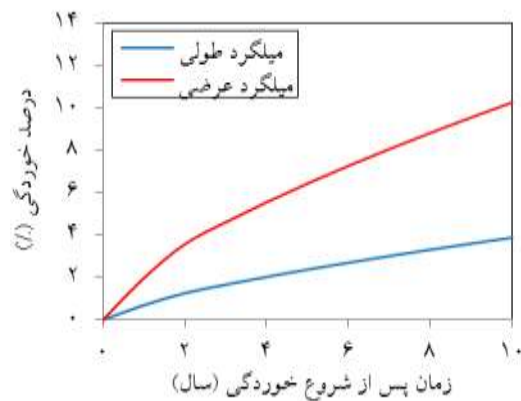
شکل ۵- (ب و ج) نشان می‌دهد که درصد خوردگی میلگرد طولی و عرضی به ترتیب 22.1% و 25.8% در روش تعمیر استفاده از شاتکریت، و 43.9% و 48.8% در روش تعمیر استفاده از پوشش سطحی PU نسبت به بدون اعمال تعمیر کاهش یافته است.

شکل ۶- (ب و ج) نشان می‌دهد که درصد خوردگی میلگرد طولی و عرضی به ترتیب 22.2% و 25.7% در روش تعمیر استفاده از شاتکریت، و 43.8% و 48.7% در روش تعمیر استفاده از پوشش سطحی PU نسبت به بدون اعمال تعمیر کاهش یافته است.

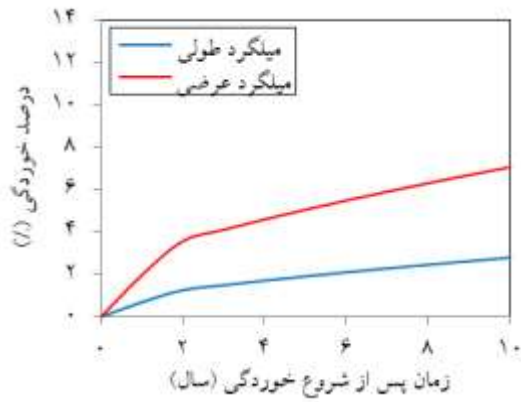
شکل ۷- (ب و ج) نشان می‌دهد که درصد خوردگی میلگرد طولی و عرضی به ترتیب 24.3% و 28.3% در روش تعمیر استفاده از شاتکریت، و 49.7% و 55.4% در روش تعمیر استفاده از پوشش سطحی PU نسبت به بدون اعمال تعمیر کاهش یافته است.



(الف)

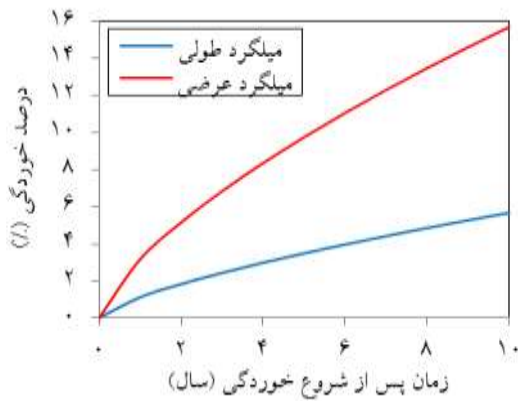


(ب)

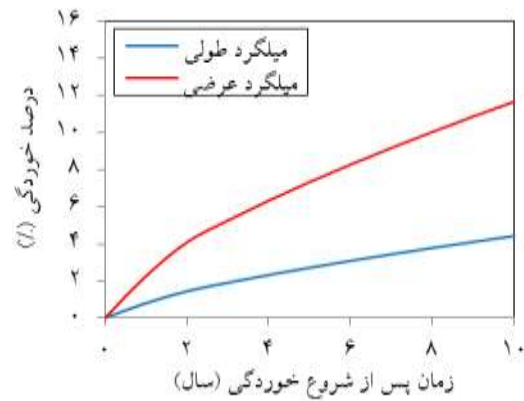


(ج)

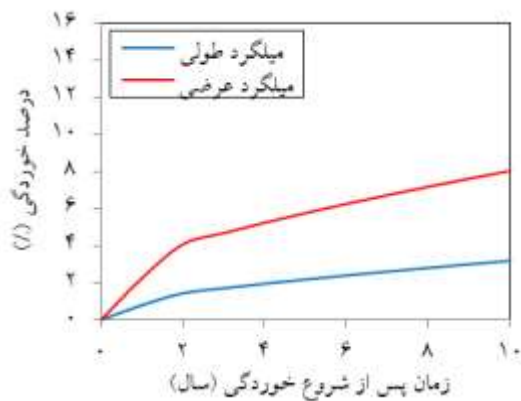
شکل ۵- درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی برحسب زمان (الف) بدون اعمال تعمیر، (ب) استفاده از شاتکریت و (ج) استفاده از پوشش سطحی PU ($w/c = 0.35$)



(الف)

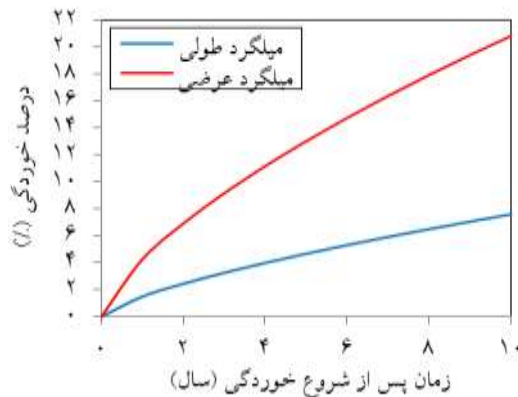


(ب)

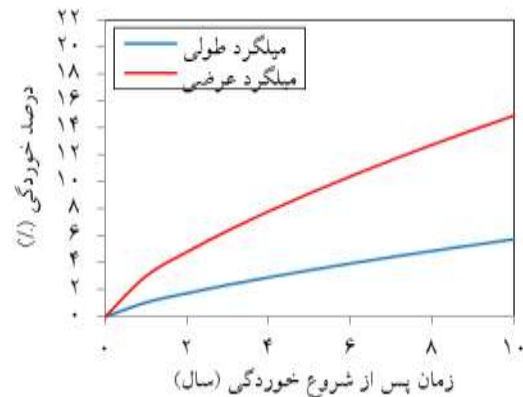


(ج)

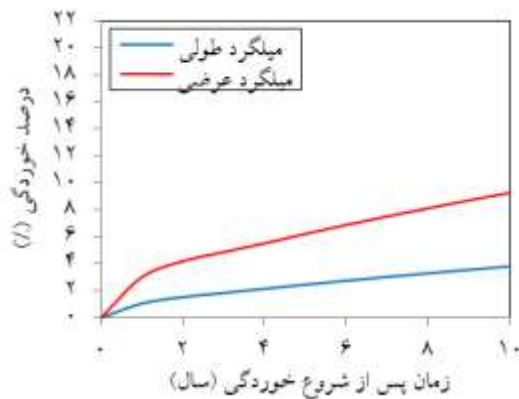
شکل ۶- درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی برحسب زمان (الف) بدون اعمال تعمیر، (ب) استفاده از شاتکریت و (ج) استفاده از پوشش سطحی PU ($w/c = 0.40$)



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷- درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی برحسب زمان (الف) بدون اعمال تعمیر، (ب) استفاده از شاتکریت و (ج) استفاده از پوشش سطحی (PU) $(w/c = 0.50)$

۴- نتیجه گیری

تعمیر و نگهداری سازه‌های بتن مسلح تحت تاثیر خوردگی در محیط‌های دریایی مانند منطقه خلیج فارس به منظور افزایش دوام، عملکرد، عمر مفید و کاهش هزینه بازسازی این سازه‌ها حائز اهمیت می‌باشد. در این تحقیق، ضخامت پوشش بتنی معادل پوشش سطحی پلی اورتان با استفاده از نتایج آزمون‌های سایت برای آزمون‌های بتنی بدون پوشش سطحی و با پوشش سطحی، به منظور مدلسازی و شبیه‌سازی عملکرد این پوشش سطحی در کاهش خوردگی کلریدی محاسبه شده است. استفاده از دو روش اعمال پوشش سطحی و شاتکریت روی سطح خارجی مقطع سازه بتن مسلح در زمان شروع ترک خوردگی به عنوان تعمیر و نگهداری ستون خورده شده بتن مسلح با مقطع مربعی در طول زمان ۱۰ سال مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، عرض ترک خوردگی پوشش بتنی، کاهش قطر میلگردهای طولی و عرضی و درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی برای بتن حاوی سیمان پرتلند با نسبت‌های آب به سیمان مختلف محاسبه شده است. نتایج حاکی از آن است که درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی با استفاده از پوشش سطحی پلی اورتان نسبت به استفاده از شاتکریت به ضخامت ۷

میلیمتر کمتر است. همچنین، عرض ترک خوردگی پوشش بتنی با استفاده از روش تعمیر پلی اورتان تا زمان ۱۰ سال برابر صفر و در روش استفاده از شاتکریت نسبت به روش بدون تعمیر کمتر است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد با افزایش نسبت آب به سیمان، درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی و عرض ترک خوردگی پوشش بتنی افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] Cho, S.H., Chung, L., Roh, Y.S. (2005). "Estimation of rebar corrosion rage in reinforced concrete structure." *Corros. Rev.*, 329-353.
- [2] Enright, M.P., and Frangopol, D.M. (1999). "Maintenance planning for deteriorating concrete bridges." *J. Struct. Eng.*, 10.1061/(ASCE)0733-9445, 125(12), 1407-1414.
- [3] Khanzadeh Moradllo, M., Shekarchi, M., Hoseini, M. (2012). "Time-dependent performance of concrete surface coatings in tidal zone of marine environment." *Constr. Build. Mater.*, 30, 198-205.
- [4] Ghoddousi, P., Ganjian, E., Parhizkar, T., Ramezani-pour, A.A. (1998). "Concrete technology in the environmental conditions of Persian Gulf." BHRC Publication.
- [5] Luping, T. (1996). "Chloride Transport in Concrete, Measurement and Prediction." *Ph.D. Dissertation*, Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, Goteborg, Sweden, 104 pp.
- [6] Saetta, A.V., Scotta, R.V., Vitaliani, R.V. (1993). "Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete." *ACI Mater. J.*, 90(5), 441-451.
- [7] Farahani, A., Taghaddos, H., Shekarchi, M. (2015). "Prediction of long-term chloride diffusion in silica fume concrete in a marine environment." *Cem. Concr. Compos.*, 59, 10-17.
- [8] Ferreira, R.M. (2010). "Optimization of RC structure performance in marine environment." *Eng. Struct.*, 32(5), 1489-1494.
- [9] Chalee, W., Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P. (2009). "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater." *Marine Structures*, 22, 341-353.
- [10] Farahani, A. (2014). "Performance evaluation of numerical models for study of chloride ion diffusion in concrete structures in Persian Gulf." *M.Sc. Thesis*, University of Tehran, School of Civil Engineering, Tehran, Iran, 154 pp.
- [11] Ehlen, M.A. (2012). "Life-365™ Service Life Prediction Model™ and computer program for predicting the service life and life-cycle cost of reinforced concrete exposed to chlorides." *Manual of Life-365™ Version 2.1*, Produced by the Life-365™ Consortium II.
- [12] Khaghanpour, R., Dousti, A., Shekarchi, M. (2016). "Prediction of cover thickness based on long-term chloride penetration in a marine environment." *J. Perform. Constr. Facil.*, 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000931, 1-10.
- [13] Kong, Q., Gong, G., Yang, J., Song, X. (2006). "The corrosion rate of reinforcement in chloride contaminated concrete." *Low Temperature Architecture Technology*, 111, 1-2.
- [14] Alonso, C., Andrade, C., Gonzalez, J. (1988). "Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types." *Cem. Concr. Res.*, 8, 687-698.
- [15] Liu, T., and Weyers, R.W. (1998b). "Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures." *Cem. Concr. Res.*, 28(3), 365-379.
- [16] Vu, K.A.T., and Stewart, M.G. (2000). "Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models." *Struct. Saf.*, 22(4), 313-333.
- [17] Liu, Y., and Weyers, R.E. (1998a). "Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures." *ACI Mater. J.*, 95(6), 675-681.
- [18] Val, D.V. (2007). "Factors affecting life-cycle cost analysis of RC structures in chloride contaminated environments." *J. Infrastruct. Syst.*, 13(2), 135-143.
- [19] Vidal, T., Castel, A., Francois, R. (2004). "Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete." *Cem. Concr. Res.*, 34(1), 165-174.



مرکز تحقیقات
راه، مسکن و شهرسازی

نهمین کنفرانس ملی بتن ایران
۱۵ و ۱۶ مهرماه ۱۳۹۶
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



انجمن علمی بتن ایران



انجمن بتن ایران
انجمن علمی بتن ایران

[20] Kashani, M.M., Lowes, L.N., Crewe, A.J., Alexander, N.A. (2014). "Finite element investigation of the influence of corrosion pattern on inelastic buckling and cyclic response of corroded reinforcing bars." *Eng. Struct.*, 75, 113-125.