



تحلیل هزینه‌ی چرخه‌ی عمر ترک ناشی از خوردگی یکنواخت کلریدی در تیر بتن آرمه

معصومه تقی پور، مهدی دهستانی*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۲

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۸/۱۷

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

کلمات کلیدی:

خوردگی میلگرد

قابلیت اعتماد

چرخه عمر

احتمال گسیختگی

نرخ خوردگی.

خلاصه: خوردگی آرماتور، فرآیندی پیچیده و از مهم‌ترین عوامل شکست سازه‌های بتن مسلح است که باعث کاهش مقاومت و خدمت‌پذیری سازه می‌گردد که جلوگیری از این اثرات منفی، مستلزم صرف هزینه‌های گزافی است. به همین دلیل نیاز است که این فرآیند با استفاده از تحلیل‌های احتمالاتی و آنالیز قابلیت اعتماد با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در فاز خوردگی، مدل‌سازی شود. همچنین با در نظر گرفتن روش‌های مختلف نگهداری و آنالیز چرخه عمر، می‌توان هزینه تعمیر و نگهداری ناشی از خوردگی را به حداقل رساند. از اثرات خوردگی بر عملکرد سازه، ترک ناشی از گسترش محصولات خوردگی است. عرض ترک یک پارامتر مهم برای طراحی و ارزیابی عملکرد سازه‌های بتنی است. بنابراین در این مقاله ابتدا مدلی تحلیلی برای محاسبه عرض ترک ناشی از خوردگی ارائه گردید. پیش‌بینی ترک در مراحل مختلف در طول انتشار ترک از سطح میلگرد تا سطح پوشش بتن مورد بررسی قرار می‌گیرد. از جمله ویژگی‌های بارز این مدل این است که به طور مستقیم به فاکتورهای بحرانی موثر بر عرض ترک مربوط می‌شود. در ادامه ضمن در نظر گرفتن عرض ترک به عنوان متغیر تصادفی در محاسبه احتمال ترک خوردگی سازه‌های بتنی که بر اساس فرآیند تصادفی گاما صورت می‌پذیرد، به بررسی هزینه‌های چرخه عمر و تعیین بازه بهینه تعمیر از طریق فرآیند تجدید، پرداخته می‌شود. همچنین اثر پارامترهای سازه‌ای شامل قطر میلگرد و نرخ خوردگی، بر احتمال گسیختگی سازه و هزینه‌های ناشی از خرابی در چرخه عمر بررسی می‌شود. نتایج حاکی از آن است که از بین این پارامترها، نرخ خوردگی بیشترین تاثیر را بر عرض ترک و هزینه چرخه عمر دارد.

۱- مقدمه

امروزه بتن آرمه از جمله پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی محسوب می‌شود که به دلیل در دسترس بودن، نسبتاً ارزان است و در صورت طراحی و اجرا به روش مناسب، بسیار با دوام است. با این حال نفوذ عوامل خارجی مانند دی اکسید کربن، یون‌های کلر و سولفات باعث کاهش عملکرد، دوام و تخریب آن می‌شود. علت اصلی تخریب سازه‌های بتن مسلح، به خصوص سازه‌های در معرض محیط‌های دریایی، خوردگی میلگرد مدفون در بتن است. بتن به دلیل خاصیت قلیایی، یک لایه منفعل اطراف میلگرد ایجاد می‌کند که از میلگرد در برابر خوردگی محافظت می‌کند. اما هنگامی که میزان کلراید موجود در محیط زیاد باشد و یا کربناسیون اتفاق بیفتد، این

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: dehestani@nit.ac.ir

لایه منفعل از بین می‌رود و منجر به خوردگی میلگرد می‌شود [۱]. پس از نفوذ یون‌های کلر به بتن، از طریق خلل و فرج و ریزترک‌های موجود در بتن، یون‌ها به سطح میلگرد می‌رسند و با شکستن لایه منفعل، خوردگی آغاز می‌شود. با شروع خوردگی و واکنش شیمیایی، محصولات خوردگی یا همان زنگ آهن بر سطح میلگرد تشکیل می‌شود. زنگ ایجاد شده حجمی در حدود شش برابر حجم اولیه میلگرد دارد [۲]. ابتدا محصولات خوردگی فضای متخلخل بین بتن و میلگرد را پر می‌کنند. پس از پر شدن این ناحیه و پیشروی خوردگی، این محصولات نیاز به فضای بیشتری دارند. بنابراین برای اینکه بتواند در محل تماس میلگرد و بتن جا شوند، بایستی بتن اطراف میلگرد را جابجا کند. به همین دلیل فشاری به بتن اطراف وارد می‌شود. این



فشار سبب ایجاد تنش‌های کششی در بتن شده و زمانی که این تنش از مقاومت کششی بتن بیشتر شود، کاور بتن ترک می‌خورد. نهایتاً بعد از ترک خوردن کاور، میلگردها در معرض حمله کلراید بیشتری قرار می‌گیرند، فرآیند خورده شدن تسریع می‌یابد و باعث کاهش مقاومت سازه می‌شود. در نتیجه عملکرد بخشی از سازه یا کل سازه دچار مشکل شده و خسارات مالی و جانی زیادی وارد می‌کنند. خرابی‌های ناشی از خوردگی میلگرد یکی از مشکلات اساسی پیش‌روی مهندسین عمران است. جهت به حداقل رساندن این تأثیرات منفی در سازه‌های بتنی، دامنه وسیعی از روش‌های تعمیر و کنترل در حال توسعه است [۱]. هزینه‌های تعمیر و نگهداری سازه‌های تحت خوردگی در حدود ۱۰۰ میلیون دلار در سال تخمین زده شد [۳]. براساس آماری در کشور ایالات متحده آمریکا ۱۵۰ میلیون دلار ارزش آسیب خوردگی به پل‌های آزادراه‌های بین ایالتی آن‌ها به دلیل خوردگی ناشی از نمک دریا و نمک ضدیخ می‌باشد [۱]. در ایران نیز هرساله میزان قابل توجهی از سرمایه ملی صرف مسائل مربوط به خوردگی می‌شود که طبق نظر کارشناسان در حدود ۵ درصد از تولید ناخالص ملی را به خود اختصاص می‌دهد که سهم قابل توجهی از این هزینه‌ها مربوط به استفاده از بتن مسلح در محیط‌های مهاجم است [۴]. به همین دلیل، ارزیابی عملکرد مبتنی بر پیش‌بینی عرض ترک ناشی از خوردگی و کاهش مقاومت سازه‌ای از اهمیت زیادی برای ارزیابی مقاومت سازه و ساماندهی یک برنامه موثر برای تعمیر سازه‌ها در طول عمر سرویس آن، برخوردار است [۵].

در دهه‌های اخیر تحقیقات زیادی در رابطه با اثر خوردگی میلگرد و ترک بتن بر عملکرد سازه‌های بتنی، انجام شد. برای پیش‌بینی زمان ترک خوردن پوشش بتن، از مدل استوانه جدار ضخیم با ضخامت دیوار برابر با پوشش خالص بتن استفاده شده است. با استفاده از آن و تحلیل الاستیک تحت خوردگی یکنواخت [۲] با در نظر گرفتن مقاومت کششی باقی‌مانده بتن ترک خورده [۶] و اصل انرژی و فاکتور کاهش سختی [۷] مدل‌های تحلیلی برای ترک در بتن ارائه شده است. به دلیل پیچیدگی رفتار بتن ترک خورده و خوردگی موضعی میلگرد، تحلیل عددی برای پیش‌بینی ترک ناشی از خوردگی ارائه شد [۸]. همچنین آزمایشاتی برای بررسی اثر خوردگی میلگرد بر ترک پوشش بتن با استفاده از تست خوردگی تسریع شده [۹] یا خوردگی طبیعی [۱۰، ۱۱] انجام شد. برای بررسی توسعه ترک در اثر فشار ایجاد شده

در حدفاصل میلگرد و بتن، از مدل ترک اندود^۱ استفاده شده است [۱۲، ۱۳]. عوامل موثر بر ترک ناشی از خوردگی در آزمایشات مطالعه گردید و نتایج نشان داد که مشخصات بتن، از فاکتورهای بحرانی در عرض ترک است [۱۴].

اغلب برای ارزیابی امنیت سازه در طول عمر سرویس از آنالیز قابلیت اعتماد^۲ استفاده می‌شود [۱۵]. مدل‌های احتمالی و توابع شکنندگی برای برآورد شکنندگی لرزه‌ای ستون‌ها و پل‌های بتنی دچار خوردگی، ارائه گردید [۱۶]. برای جلوگیری از اثرات منفی ناشی از خوردگی از روش‌های تعمیر و نگهداری استفاده می‌شود که مستلزم صرف هزینه‌های گزافی است. بدین منظور، استفاده از آنالیز هزینه چرخه عمر برای به حداقل رساندن هزینه‌ها، می‌تواند بسیار کارآمد باشد. برای رسیدن به هزینه بهینه عمر، ادغام دوام با طراحی سازه مد نظر قرار گرفت [۱۷]. برای بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری، با روش یکپارچه الگوریتم ژنتیک عصبی مصنوعی^۳ مبتنی بر ریسک بر اساس میزان آسیب‌دیدگی و هزینه‌های چرخه عمر، یک برنامه بازرسی برای کاهش هزینه‌های چرخه عمر ارائه نموده‌اند [۱۸].

در این تحقیق، فرآیند ترک در قالب یک روش تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرآیند خوردگی در اطراف میلگرد به صورت یکنواخت اتفاق می‌افتد که نتیجه آن توسعه یکنواخت محصولات ناشی از خوردگی در اطراف میلگرد می‌باشد. همچنین بتن به عنوان مصالح شبه ترد در نظر گرفته شده است. با استفاده از یک روش تحلیلی، عرض ترک بتن در اثر خوردگی محاسبه می‌شود. سپس عرض ترک پیش‌بینی شده به عنوان متغیر تصادفی برای مدل‌سازی فرآیند تخریب انتخاب شده و بر اساس فرآیند گاما، احتمال وقوع شکست و بر اساس فرآیند تجدید، هزینه چرخه عمر به دست می‌آید. همچنین به بررسی اثر نرخ خوردگی و قطر میلگرد بر احتمال وقوع شکست، پرداخته می‌شود.

پدیده‌ی خوردگی و اثرات آن، عمر مفید سازه‌های بتن مسلح را کاهش می‌دهد در نتیجه مدیریت خوردگی از جمله مسائل مهم مهندسی عمران است. تحقیقات گذشته در این زمینه محدودیت‌هایی دارد که زوال عملکرد و خدمت‌پذیری سازه را نادیده گرفته و قادر به پیش‌بینی عملکرد سازه‌ای در آینده نیست. همچنین بررسی

1 Smearred Crack Model

2 Reliability Analysis

3 ANN-GA

دلیل وجود فضای خالی در بتن، گسترش ترک در پوشش بتن افزایش می‌یابد و عملکرد سازه‌های بتنی با زمان کاهش می‌یابد. با گذر زمان، ترک در پوشش بتن انتشار یافته، عریض‌تر می‌شود تا به حد غیر قابل قبول در خدمت‌پذیری و دوام برسد.

۳. عمر باقی‌مانده: این فاز از حد خدمت‌پذیری شروع می‌شود تا به حد نهایی برسد زمانی که فروپاشی سازه‌ای اتفاق می‌افتد.

یک برنامه موثر برای نگهداری سازه‌ها نیاز است تا سازه خدمت‌پذیر باقی بماند. اگر قبل از حد خدمت‌پذیری هیچ تعمیراتی انجام نشود، سطح مقطع میلگرد کاهش می‌یابد، ورقه و ورقه شدن کاور بتن اتفاق می‌افتد و مقاومت آن کاهش می‌یابد تا به حد نهایی و گسیختگی برسد. برای کنترل گسترش ترک در بتن و افزایش مقاومت، باید تعمیراتی قبل از رسیدن به حد خدمت‌پذیری برنامه‌ریزی شود. همان‌طور که از شکل ۱ پیداست با اعمال استراتژی‌های تعمیر، عمر سرویس سازه افزایش می‌یابد. استراتژی تعمیر برای سازه‌های دچار خوردگی، باید بر اساس پیش‌بینی گسترش ترک در پوشش بتن و تخمین احتمال شکست مرتبط با ترک بتن، تعیین شود.

۳- خوردگی میلگرد

در اثر نفوذ یون‌های کلر و واکنش آند و کاتد، میلگرد دچار خوردگی شده و محصولات خوردگی و زنگ آهن در سطح میلگرد تشکیل می‌شوند که البته تشکیل محصولات خوردگی، به مقدار اکسیداسیون بستگی دارد. لیو و ویرا^۱ با در نظر گرفتن یک ناحیه متخلخل با ضخامت d_0 در اطراف میلگرد فرض کردند که ابتدا این ناحیه از محصولات خوردگی پر می‌شود سپس با توسعه زنگ آهن، حجم میلگرد شش برابر حجم اولیه آن می‌شود که در این صورت فشاری به بتن اطراف وارد می‌شود و باعث ترک خوردن پوشش بتن می‌گردد. نرخ تولید محصولات خوردگی با زمان کاهش می‌یابد زیرا نفوذ یون‌های آهن نسبت معکوس با ضخامت لایه اکسید دارد^[۲]. در این حالت معادله حاکم به صورت رابطه‌ی ۱ می‌باشد^[۶].

$$J_r = \frac{dM_r}{dt} = \frac{\beta}{M_r} \Rightarrow \int M_r dM_r = \beta \int dt \quad (1)$$

با حل معادله‌ی ۱ جرم محصولات خوردگی M_r برابر است با رابطه‌ی ۲:

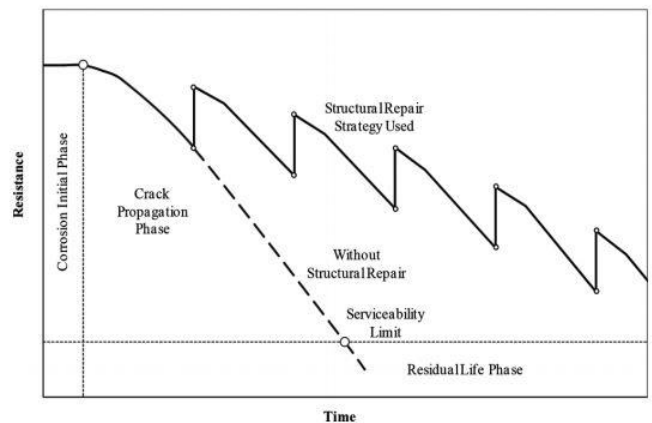
تحقیقات انجام شده به شرح فوق نشان می‌دهد که مطالعات مربوط به گسترش ترک ناشی از خوردگی در زمینه مشخصات بتن مانند نرم‌شدگی در مقاومت کششی، بسیار محدود است. همچنین ابهامات متعددی در رابطه با اثرات پارامترهای طرح سازه‌ای بر ترک ناشی از خوردگی و هزینه چرخه عمر وجود دارد. سازه‌های عمرانی در طول زمان تخریب می‌شوند و نیاز است که این فرآیند به درستی و با استفاده از روش‌های احتمالاتی و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در هندسه سازه و مشخصات مصالح، مدل‌سازی شود. استفاده از آنالیز قابلیت اعتماد روشی مناسب برای مدل‌سازی فرآیند شکست است. همچنین از آنالیز قابلیت اعتماد برای بهینه‌سازی استراتژی‌های نگهداری در عمر سرویس استفاده می‌شود^[۱۹]. نتایج به‌دست آمده از تحلیل قابلیت اعتماد در سازه‌های بتنی دچار خوردگی، برای تامین روش‌های بهینه تعمیر و نگهداری، بسیار مفید است. بنابراین، به ایجاد یک رویکرد مبتنی بر پیش‌بینی عرض ترک و ارزیابی احتمال خرابی به منظور جلوگیری از خرابی‌های زودرس و تعیین روش بهینه تعمیر در عمر سرویس، نیاز است.

۲- فرآیند شکست

فرآیند کاهش مقاومت شامل سه مرحله است که در شکل ۱ نشان داده شده‌است^[۲۰].

۱. مرحله شروع ترک: این مرحله از زمان ساختن سازه شروع می‌شود و زمانی که ترک ناشی از خوردگی در سطح میلگرد آغاز شود، پایان می‌یابد. به طور کلی، بازه زمانی شروع ترک در مقایسه با کل عمر سرویس سازه، کوتاه است.

۲. مرحله انتشار ترک: بعد از تشکیل ترک در سطح میلگرد، به



شکل ۱. فرآیند کاهش مقاومت^[۲۰]

Fig. 1. Resistance deterioration process [20]

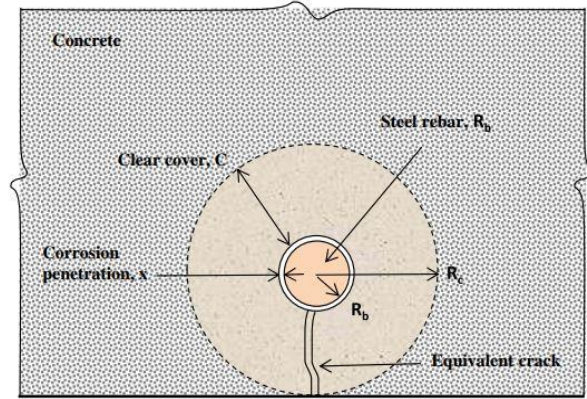
۴- مدل ترک در بتن

برای تحلیل ترک پوشش بتن از مدل استوانه جداره ضخیم مطابق شکل ۲ استفاده می‌شود. در این مدل، میلگرد با قطر اولیه D_b درون بتن با پوشش خالص C مدفون شده‌است [۲۰]. ابتدا ناحیه متخلل به تدریج با زنگ آهن پر می‌شود تا هیچ فضای خالی باقی نماند. با گسترش زنگ، تنشی به بتن اطراف وارد می‌شود و زمانی که تنش مماسی یا همان تنش کششی در استوانه برابر با مقاومت کششی بتن می‌شود، ترک‌های شعاعی از سطح میلگرد $R_b = D_b/2$ شروع می‌شود تا به سطح پوشش بتن $R_c = C + D_b/2$ می‌رسد. با پیشروی فرآیند خوردگی، بتن اطراف میلگرد کاملاً ترک می‌خورد [۵]. بنابراین به بررسی ترک در مراحل مختلف از شروع ترک تا ترک خوردن کامل پوشش بتن پرداخته می‌شود. در مرحله شروع ترک محصولات زنگ به طور کامل ناحیه متخلل را پر می‌کنند و ترک از سطح میلگرد آغاز می‌شود و در پوشش بتن ترکی ایجاد نمی‌شود بنابراین عرض ترک صفر است.

۴-۱- انتشار ترک و مدل ترک یکپارچه^۱

ترک خوردگی در بتن می‌تواند به صورت یک فرآیند نرم‌شدگی کششی^۲ مدل شود که در این مدل ترک به صورت یکپارچه در نظر گرفته می‌شود و همچنین عرض ترک نباید از مقدار مجاز بیشتر شود [۵]. در مدل ترک یکپارچه برای مواد شبه ترد مانند بتن، فرض می‌شود که تنش منتقل شده از ترک‌های یکپارچه تابعی از دهانه ترک هستند. تابع یا نمودار نرم‌شدگی از طریق آزمایشات به دست می‌آید و به عنوان جایگزینی برای روابط تنش-کرنش در تئوری‌هایی مانند پلاستیسیته استفاده می‌شود [۲۱]. آزمایش‌های متفاوت نشان داده است که شکل نمودارهای نرم‌شدگی برای ترکیب‌های مختلف بتن، شباهت زیادی با همدیگر دارند [۲۲]. علاوه بر این، زمانی که عرض ترک زیاد می‌شود، مقاومت کششی بتن ترک‌خورده ناچیز و قابل صرف‌نظر است. در این مطالعه، برای به دست آوردن راه‌حل تحلیلی برای عرض ترک، از یک نمودار نرم‌شدگی خطی برای مدل کردن ترک استفاده شده‌است که رابطه آن به صورت رابطه ۶ است [۲۰]:

$$\sigma_w = f_t \left(1 - \frac{W}{W_{cr}}\right) \quad (6)$$



شکل ۲. مدل استوانه جداره ضخیم برای مدل‌سازی کاور بتن [۵]
Fig. 2. Thick-walled cylinder model for modeling of concrete concrete [5]

$$M_r(t) = (2 \int_0^t \beta(\tau) d\tau)^{1/2} \quad (2)$$

که M_r جرم محصولات خوردگی برحسب کیلوگرم بر متر (kg/m), t مدت زمان خوردگی برحسب سال (year)، تابع خوردگی $\beta(\tau)$ تابعی از قطر اولیه میلگرد D_b برحسب متر و متوسط نرخ خوردگی سالانه در واحد طول i_{corr} (A/m^2) است و از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید.

$$\beta(\tau) = 1.05 \times 10^{-2} \pi D_b i_{corr}(\tau) \quad (3)$$

ضخامت لایه زنگ t_r نسبت به شعاع اولیه میلگرد r_0 نسبتاً کوچک است و از حجم زنگ در محیط میلگرد تخمین زده می‌شود. نرخ نفوذ خوردگی t_r/r_0 که به صورت نسبت ضخامت زنگ بر قطر میلگرد تعریف می‌شود، از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید [۲۰].

$$\frac{t_r}{r_0} = \frac{M_r}{2\pi r_0^2 \rho_r} \quad (4)$$

که در آن ρ_r چگالی زنگ آهن و برابر با 3600 کیلوگرم بر متر مکعب است. به دلیل افزایش حجم ناشی از خوردگی، حداقل بین بتن و میلگرد دچار تغییر مکان می‌شود. این جابه‌جایی مجاز در طول زمان \bar{r}_s از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید.

$$\bar{r}_s = \frac{\alpha_m}{2\pi r_0} M_r(t) - d_0 \quad (5)$$

α_m ضریب تجربی و برابر با $\alpha = 2/0.5 \times 10^{-4}$ است [۲] در این مطالعه فرض شده‌است که خوردگی میلگرد به صورت یکنواخت اتفاق می‌افتد.

- 1 Cohesive Crack Model
- 2 Process of Tensile Softening

و ضریب $\delta_{bc}(R_c, R_b)$ از رابطه‌ی ۱۳ به دست می‌آید وقتی $r=R_b$.. با استفاده از تنش شعاعی صفر در سطح بتن و استفاده از تئوری الاستیک ناهمگون در مسائل تنش صفحه‌ای، عرض ترک در سطح میلگرد W_b از رابطه‌ی ۱۴ به دست می‌آید.

$$W_b = (1+\nu)R_c(l_0 - R_c)\delta_{bc}(R_c, R_b) \times W_{cr} \quad (14)$$

با استفاده از W_b و معادله‌ی ۵، جرم محصولات خوردگی مورد نیاز

$$M_r(T_c - T_p) = \left[1 + \frac{(l_0 - R_b) W_b}{R_b W_{cr}} \right] \times R_b \frac{f_t}{E} \times \frac{\pi D_b}{\alpha_m} \quad (15)$$

برای گسترش در سطح کاور از رابطه‌ی ۱۵ به دست می‌آید.

زمان مورد نیاز برای نفوذ کامل ترک در کاور T_c از معادله‌ی ۲ به دست می‌آید. از معادله‌ی ۱۵ و معادله‌ی ۴، بحرانی‌ترین نرخ نفوذ خوردگی t_{cr} به دست می‌آید.

۲-۴- ترک پوشش بتن

زمانی که ترک به سطح بتن می‌رسد، کاور به‌طور کامل ترک می‌خورد. در این حالت عرض ترک نرمال شده از رابطه‌ی ۱۶ به دست می‌آید [۱۸]:

$$W = W_c + \frac{\delta_{bc}(R_c, r)}{\delta_{bc}(R_c, R_b)} (W_b - W_c) \quad (16)$$

عرض ترک در سطح بتن W_c از رابطه‌ی ۱۷ به دست می‌آید.

$$W_c = \frac{1 - \frac{W_{cr}}{W_b} R_c (l_0 - R_c) \delta_{bc}(R_c, R_b)}{1 - R_c (l_0 - R_c) \delta_{bc}(R_c, R_b)} \times W_b \quad (17)$$

که در آن W_b عرض ترک نرمال شده در سطح میلگرد است و برابر با رابطه‌ی ۱۸ است.

که σ_w تنش کششی بتن ترک خورده، f_t مقاومت کششی بتن ترک خورده، W_{cr} عرض ترک نرمال شده بحرانی و W عرض ترک واقعی نرمال شده $w(r)$ که به صورت رابطه‌ی ۷ تعریف می‌شود.

$$W = \frac{f_t}{G_f} w(r) \quad (7)$$

در این معادله، G_f انرژی شکست بتن (N/m) است و w_{cr} عرض واقعی بحرانی است که از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید [۲۳]:

$$w_{cr} = \alpha_f \frac{G_f}{f_t} \quad (8)$$

جابه‌جایی شعاعی u در بتن ترک خورده به صورت رابطه‌ی ۹ تعریف می‌گردد [۲۰]:

$$u = \frac{f_t}{E} \left[r + (l_0 - r) \frac{W}{W_{cr}} \right] \quad (9)$$

که در آن $l_0 = \frac{n_c W_{cr}}{2\pi} l_{ch}$ است و n_c تعداد کل ترک‌هاست. معادله حاکم بر بتن ترک خورده که به صورت پیوستگی الاستیک ناهمگون مدل می‌شود [۶] به صورت رابطه‌ی ۱۰ تعریف می‌شود.

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \beta \frac{u}{r^2} = 0 \quad (10)$$

که β ضریب کاهش سختی کششی مانده است.

با جایگذاری جابه‌جایی u در معادله‌ی ۹، رابطه حاکم می‌تواند به صورت رابطه‌ی ۱۱ بازنویسی شود.

$$(l_0 - r) \frac{d^2 W}{dr^2} + (l_0 - 3r) \frac{1}{r} \frac{dW}{dr} = 0 \quad (11)$$

با حل معادله دیفرانسیل ۱۱، عرض ترک نرمال شده می‌تواند از رابطه‌ی ۱۲ حساب شود.

$$W = \frac{\delta_{bc}(R_c, r)}{\delta_{bc}(R_c, R_b)} W_b \quad (12)$$

که ضریب عرض ترک $\delta_{bc}(R_c, r)$ به صورت رابطه‌ی ۱۳ تعریف می‌شود.

$$\delta_{bc}(R_c, r) = \frac{(R_c - r)}{l_0(l_0 - R_c)(l_0 - r)} + \frac{1}{l_0^2} \ln \frac{R_c |l_0 - r|}{r |l_0 - R_c|} \quad (13)$$

$$w(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq T_c \\ a^c t^{1/2} - b^c & T_c < t \leq T_{cr} \\ a^d t^{1/2} - b^d & t > T_{cr} \end{cases} \quad (24)$$

که a^c و b^c ضرایب مربوط به انتشار ترک یکپارچه در مرحله ترک هستند و از روابط ۲۵ و ۲۶ به دست می‌آیند.

$$a^c = 0.145 \alpha_m \frac{E}{f_t} \quad (25)$$

$$\sqrt{\frac{i_{corr}}{\pi D_b}} \times \frac{1}{(l_0 - R_b)[1 - R_c(l_0 - R_c)\delta_{bc}(R_c, R_b)]} \times n_c W_{cr}$$

$$b^c = \frac{\frac{R_b}{(l_0 - R_b)} + R_c(l_0 - R_c)\delta_{bc}(R_c, R_b)}{[1 - R_c(l_0 - R_c)\delta_{bc}(R_c, R_b)]} \times n_c W_{cr} \quad (26)$$

a^d و b^d ضرایب مربوط به عرض ترک پس از زمان بحرانی می‌باشد که از رابطه‌ی ۲۷ و ۲۸ به دست می‌آید.

$$a^d = 0.145 \alpha_m \frac{\sqrt{\pi D_b i_{corr}}}{R_{cr}} \quad (27)$$

$$b^d = \pi D_b \left(1 - \frac{R_b}{R_{cr}}\right) - n_c W_{cr} \quad (28)$$

۵- مدل سازی فرآیند شکست

به دلیل ماهیت تصادفی بار و متغیرهای خوردگی و فرآیند زوال، عملکرد سازه‌ای که وابسته به این متغیرها است، نیز یک متغیر تصادفی است و بر حسب قابلیت اعتماد بیان می‌شود. قابلیت اعتماد یک سیستم به معنای احتمال ارضا اهداف خاص سازه‌ای یا طراحی می‌باشد [۲۵] تابع حالت حدی یا حاشیه ایمنی M ، با استفاده از رابطه‌ی ۲۹ بیان می‌شود.

$$M(t) = R(t) - S(t) \quad (29)$$

وقتی $M(t) > 0$ است سازه در زمان t ایمن است، $M(t) < 0$ زوال را بیان می‌کند و $M(t) = 0$ حالت حدی بین ایمنی و زوال می‌باشد. $S(t)$

$$W_b = \left(\frac{E}{f_t} \times \frac{\alpha_m M_r(t)}{\pi D_b} - R_b\right) \times \frac{W_{cr}}{(l_0 - R_b)} \quad (18)$$

زمانی که عرض ترک در سطح میلگرد به مقدار بحرانی می‌رسد، عرض ترک در پوشش بتن نیز به مقدار بحرانی می‌رسد بنابراین زمان بحرانی T_{cr} با مساوی قرار دادن $W_b = W_{cr}$ در معادله‌ی ۱۸ به صورت رابطه‌ی ۱۹ به دست می‌آید.

$$M_r(T_{cr}) = l_0 \frac{f_t \pi D_b}{E \alpha_m} \quad (19)$$

۴-۳ ترک پس از زمان بحرانی

مدل ترک یکپارچه در این مرحله برای مدل سازی مناسب نمی‌باشد زیرا یتن ترک خورده به مقدار بحرانی می‌رسد و هیچ تنش کششی در بتن باقی نمی‌ماند [۲۰] در این مرحله عرض ترک مستقل از شعاع r است و از افزایش محیط محصولات زنگ و از رابطه‌ی ۲۰ به دست می‌آید.

$$w = w_{cr} + \frac{2\pi \Delta t_r}{n_c} \quad (20)$$

که در آن Δt_r (m) ضخامت لایه زنگ پس از زمان بحرانی است و از رابطه‌ی ۲۱ به دست می‌آید.

$$\Delta t_r = \sqrt{R_{cr}^2 + \frac{\Delta V}{\pi}} - R_{cr} \quad (21)$$

افزایش حجم محصولات خوردگی در واحد طول نیز از رابطه‌ی ۲۲ به دست می‌آید.

$$\Delta V = \alpha_m \Delta M_r = \alpha_m [M_r(t) - M_r(T_{cr})] \quad (22)$$

R_{cr} شعاع تشکیل زنگ است که برابر با رابطه‌ی ۲۳ است.

$$R_{cr} = R_b + \bar{r}_s(T_{cr}) = R_b + \frac{\alpha_m M_r(T_{cr} - T_p)}{\pi D_b} \quad (23)$$

با توضیحات ارائه شده و با فرض ثابت بودن نرخ خوردگی، عرض ترک معادل [۲۴]، به صورت رابطه‌ی ۲۴ بیان می‌گردد.

$\Gamma(\eta(t))$ تابع گاما و برای $\eta(t) > 0$ برابر است با رابطه‌ی ۳۳ [۵]:

$$\Gamma(\eta(t)) = \int_0^{\infty} \eta^{(t)-1} e^{-\nu} d\nu \quad (32)$$

که در آن $\eta(t)$ تابع شکل^۲ است و از متغیر تصادفی S در طول زمان t از رابطه‌ی ۳۳ به دست می‌آید.

$$\eta(t) = \lambda S(t) \quad (33)$$

از تابع توزیع گاما، توزیع طول عمر^۳ متناسب با متغیر تصادفی S از رابطه‌ی ۳۴ به دست می‌آید.

$$F(t) = Pr\{t \geq T_i\} = Pr\{S(t) \geq S_i\} \\ = \int_{S_i}^{\infty} f_{S(t)}(S) dS = \frac{\Gamma^u(\eta(t), S_i, \lambda)}{\Gamma(\eta(t))} \quad (34)$$

که $\Gamma^u(\eta(t), x) = \int_{\nu=x}^{\infty} \eta^{(t)-1} e^{-\nu} d\nu$ است که برای $\eta(t) > 0$ و $x \geq 0$ برابر با تابع گاما ناتمام^۴ است.

در رابطه‌ی ۳۴ نشان دهنده بیشترین حد مجاز عرض ترک است که آستانه‌ای برای الزامات ایمنی و نگهداری در سازه‌های بتن مسلح است. یک سازه بتن مسلح به عنوان یک سازه خدمت‌پذیر و مداوم به گسیختگی و شکست می‌رسد زمانی که عرض ترک معادل از مقدار مجاز مشخص شده برای حالت حدی سرویس در زمان T_1 تجاوز کند. عرض ترک معادل مجاز پوشش بتن $S_1 = W_1$ ممکن است مطابق با الزامات مربوط به حالت سرویس تغییر کند [۲۰]. به عنوان مثال در محیط‌های مهاجم برابر با ۰/۳ میلی‌متر است [۲۴]. با توجه به تعریف فوق الذکر برای محاسبه احتمالاتی خرابی‌های ناشی از خوردگی، احتمال شکست در بازه زمانی t از رابطه (۳۵) به دست می‌آید.

$$p_i = F(t) - F(t_{i-1}) \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (35)$$

و $R(t)$ به ترتیب تابع وابسته به زمان مقاومت و پاسخ سازه را بیان می‌کند. زوال و شکست سازه‌ها همواره به معنای فروپاشی سازه‌ای نیست بلکه به موقعیتی نیز اطلاق می‌شود که عملکرد سازه از یک حالت حدی تعیین شده تجاوز کند. به طور مثال اگر غلظت کلر در سطح میلگرد از مقدار مجاز، تجاوز کند، خوردگی شروع شده و این حالت به عنوان زوال تعبیر می‌شود.

قابلیت اعتماد سازه‌ای سازه‌های بتن مسلح دچار خوردگی، اساساً به دو پارامتر بستگی دارد: تخریب و پاسخ سازه. هر دو پارامتر وابسته به زمان هستند، بنابراین قابلیت اعتماد این سازه‌ها به زمان بستگی دارد. خوردگی میلگرد یک فرآیند پیچیده است به همین دلیل عدم قطعیت‌های زیادی مربوط به خرابی ناشی از خوردگی و اثر آن در عملکرد چرخه عمر این سازه‌ها وجود دارند [۲۶]. سازه‌های بتن مسلح در طول زمان خراب می‌شوند و فرآیند تخریب با استفاده از روش‌های احتمالی و فرض عدم قطعیت در هندسه سازه‌ای و مشخصات مصالح مدل می‌شود. برای تیرهای بتنی خورده‌شده، عرض ترک ناشی از خوردگی در بتن به عنوان متغیر تصادفی S برای مدل خرابی تصادفی انتخاب می‌شود. متغیر تصادفی عرض ترک معادل $S = \tilde{w}(t)$ از بخش قبل که بحث شده، به دست می‌آید.

از فرآیند گاما برای مدل کردن فرآیند تخریب استفاده شده است [۱۹]. فرآیند گاما یک فرآیند تصادفی با نمو غیر منفی مستقل است که دارای توزیع گاما با میانگین معینی از نرخ خرابی است. بنابراین این فرآیند برای مدل کردن عرض ترک معادل مناسب است که فرض می‌شود به طور تصادفی در زمان‌های استفاده مداوم رخ می‌دهد. تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی S در زمان $(t \geq 0)$ به صورت رابطه‌ی ۳۰ بیان می‌شود [۲۷]:

$$f_{S(t)}(s) = Ga(S | \eta(t), \lambda) = \frac{\lambda^{\eta(t)}}{\Gamma(\eta(t))} S^{\eta(t)-1} e^{-\lambda s} \quad (30)$$

که λ پارامتر مقیاس^۱ است و با داشتن میانگین μ_x و انحراف معیار σ_x از رابطه‌ی ۳۱ به دست می‌آید [۲۸]:

$$\lambda = \frac{\mu_x}{\sigma_x^2} \quad (31)$$

2 Shape Function
3 Life Time Distribution
4 Incomplete Gamma Function

1 Scale Parameter

۶- آنالیز هزینه چرخه عمر

از نقطه نظر طراحی سازه‌ای، هزینه‌های اصلی ساختمان شامل هزینه‌های اولیه طراحی و ساخت و هزینه‌های آینده، مربوط به تعمیر و نگهداری است. هزینه‌های انرژی و عملکردی مانند گرمایشی و سرمایشی نیز جز مهمی از هزینه‌های کل هستند ولی به طور کلی این هزینه‌ها به پارامترهای طراحی سازه‌ای مانند مقاومت و خدمت‌پذیری ارتباطی ندارد. بنابراین در فرآیند طراحی هزینه چرخه عمر سازه، هدف اصلی رسیدن به تعادل بین هزینه‌های اولیه و هزینه‌های تعمیر در آینده است. عملکرد سازه‌های بتن‌آرمه مانند پل‌ها در معرض محیط خورنده با گذشت زمان رو به زوال می‌روند. خوردگی میلگرد سبب ترک خوردن بتن و کاهش مقاومت آن می‌شود این امر نشان‌دهنده نیاز به ارزیابی ایمنی، تعمیر و بازرسی مکرر است که همه این‌ها مستلزم صرف درصد زیادی از بودجه برای تعمیر سازه‌های موجود است [۲۹].

تعمیر و نگهداری می‌تواند با استفاده از فرآیند تجدید زمان گسسته^۱ مدل می‌شود که به موجب آن تجدید، سازه را به شرایط اولیه خود باز می‌گرداند. از دو نوع استراتژی نگهداری در این تحقیق استفاده شده است: ۱- نگهداری پیشگیرانه^۲ قبل از شکست و ۲- نگهداری اصلاحانه^۳ بعد از شکست [۲۷].

از نظر ریاضی فرآیند تجدید یک فرآیند تصادفی با ارزش عددی غیرمنفی است که تجدید متوالی را در بازه زمانی داده شده ثبت می‌کند. زمان‌ها و دفعات تجدید به عنوان متغیرهای تصادفی مثبت، مستقل، یکسان و توزیع شده دارای تابع احتمالی گسسته محسوب می‌شود [۱۹].

هزینه مورد انتظار ناشی از خرابی در بازه زمانی $(0, k]$ به هزینه نگهداری پیش‌گیرانه C_p و هزینه نگهداری اصلاحانه C_F و طول چرخه تجدید بستگی دارد که با استفاده از تئوری تجدید، از رابطه (۳۶) به دست می‌آید [۲۰]:

$$C^d(k) = \frac{(\sum_{i=1}^k \alpha^i p) C_F + \alpha^k (1 - (\sum_{i=1}^k p) C_p)}{1 - \left[(\sum_{i=1}^k \alpha^i p) + \alpha^k (1 - (\sum_{i=1}^k p)) \right]} \quad (36)$$

- 1 Discrete time renewal process
- 2 Preventive Maintenance
- 3 Corrective Maintenance

جدول ۱. مشخصات مصالح بتن

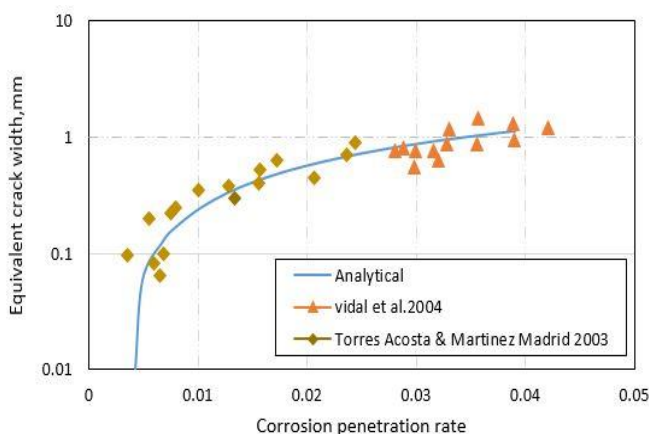
Table 1. Concrete material properties

پارامتر	مقدار
f_c مقاومت فشاری	۳۶ مگاپاسکال
f_t مقاومت کششی	۴/۱۴ مگاپاسکال
E مدول الاستیسیته بتن	۲۸ گیگاپاسکال
ضریب پواسون ν	۰/۱۸
G_f انرژی شکست	۹۷/۳۲ نیوتون بر متر
W_{cr} عرض ترک بحرانی	۰/۱۴ میلی‌متر
عرض ترک بحرانی نرمال شده	۵/۹
n_c تعداد ترک	۴
R_c شعاع کاور	۴۱ میلی‌متر

که $k=1,2,3,\dots$ تعداد فاصله زمانی مشخص شده، $\alpha = (1+r)^{-1}$ فاکتور تخفیف در واحد زمان و r نرخ نزول در واحد طول است. با مینیمم کردن هزینه مورد انتظار بهینه‌ترین فاصله زمانی k^* به دست می‌آید.

۷- بررسی عددی

به منظور بررسی اثر پارامترهای سازه‌ای، سازه با عمر سرویس ۶۰ سال در نظر گرفته شد. میلگرد با قطر ۱۲ میلی‌متر درون بتن با پوشش خالص ۳۵ میلی‌متر مدفون شده است. خوردگی به صورت یکنواخت و نرخ خوردگی ۱ میکروآمپر بر سانتی‌متر مربع ($\mu A/cm^2$) فرض شده است. بتن مقاومت فشاری برابر با ۳۶ مگاپاسکال دارد همچنین بر اساس مطالعات لیو و ویر [۲] ضخامت ناحیه متخلل



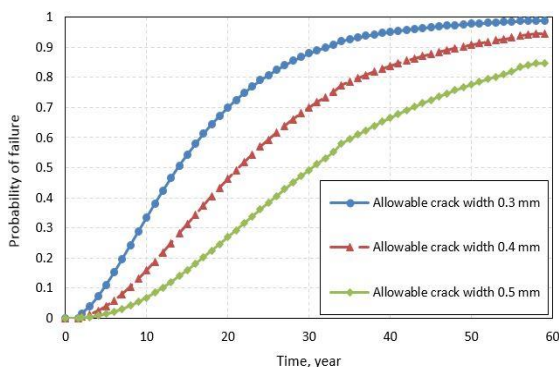
شکل ۳. نمودار عرض ترک معادل برحسب نرخ خوردگی و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی

Fig. 3. Equivalent crack width as function of corrosion penetration rate compared with experimental data

خوردگی، جرم محصولات خوردگی افزایش یافته و در نتیجه باعث افزایش ضخامت لایه زنگ و جابه‌جایی بتن اطراف میلگرد و عرض ترک می‌گردد. احتمال گسیختگی متناسب با عرض ترک به حالات حدی بستگی دارد که بیشترین احتمال گسیختگی به ازای کمترین عرض ترک مجاز است. احتمال گسیختگی به طور پیوسته افزایش می‌یابد و در زمانی که عرض ترک برابر با حد مجاز است، به ۵۰ درصد می‌رسد.

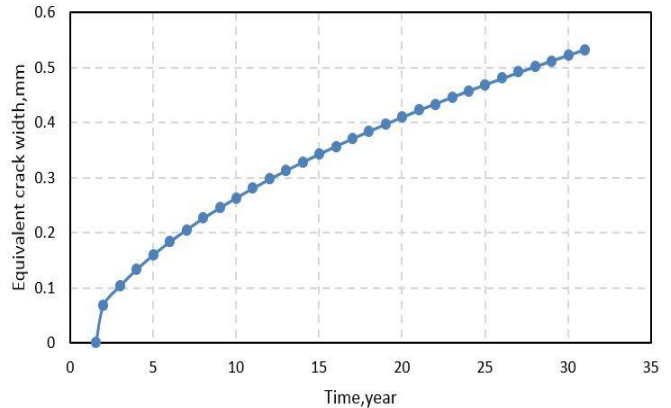
برای به‌دست آوردن زمان بهینه برای تعمیر، هزینه ارائه شده در معادله ۳۶ نسبت به فاصله زمانی k کمینه می‌شود. تنها مقدار نسبی هزینه نگهداری پیشگیرانه C_p و هزینه نگهداری اصلاحانه C_f برای محاسبات نیاز است. هزینه اصلاحانه برای پل‌های بتن مسلح با عمر سرویس ۶۰ سال که شامل هزینه‌های ناشی از تاخیر در ترافیک می‌باشد، با در نظر گرفتن نرخ تورم ۵۶/۸ درصد در آمریکا در ۲۳ سال اخیر به صورت $C_f = \$3522/tonne$ است [۲۰]. در این مطالعه هزینه پیشگیرانه $C_p = \$340/tonne$ است که به صورت نسبتی از هزینه اصلاحانه و نرخ تنزل $\alpha = 5\%$ در نظر گرفته شده است. شکل ۶ نمودار هزینه در طول زمان تعمیر را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشخص است سه نمودار مربوط به سه حالت حدی تقریباً تا زمان ۲ سال کاملاً بر هم منطبق هستند که دلیل آن هزینه یکسان تا ۲ سال اول است. زیرا زمان شروع ترک در سطح بتن برای نرخ خوردگی ۱ میکروآمپر بر سانتی‌متر مربع در حدود ۱/۵۵ سال است و پیش از این زمان، عرض ترک و در نتیجه احتمال ترک خوردگی صفر است بنابراین تنها هزینه مربوط به نگهداری پیشگیرانه در هزینه کل تاثیر دارد. نتایج نشان می‌دهد بازه زمانی بهینه تعمیر



شکل ۵. احتمال وقوع شکست بر حسب زمان برای مقادیر مختلف ترک مجاز

Fig. 5. Probability of failure as function of time for different value allowable crack width



شکل ۴. نمودار عرض ترک معادل بر حسب زمان برای مقدار قطر میلگرد ۱۲ میلی‌متر و جریان خوردگی ۱ میکروآمپر بر سانتی‌متر مربع

Fig. 4. Equivalent crack width as function of time for rebar diameter 12 mm and corrosion penetration rate 1 $\mu A/cm^2$

در جدول ۱ مشخصات مصالح بتن ارائه شده است.

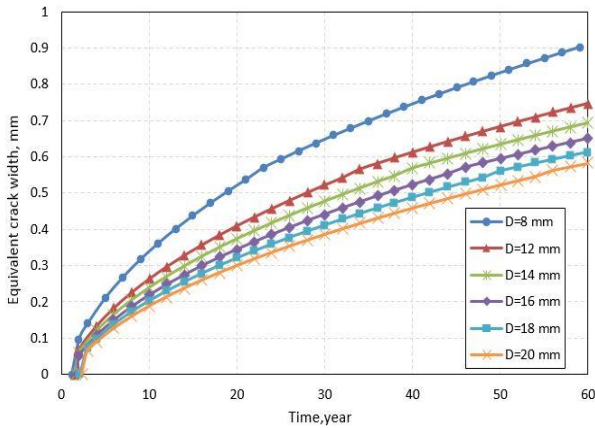
۷-۱- صحت سنجی

به منظور صحت‌سنجی مدل پیش‌بینی شده، عرض ترک معادل برحسب نرخ نفوذ خوردگی در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج پیش‌بینی شده با داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده از تست خوردگی تسریع‌شده و طبیعی [۹، ۱۰] مقایسه گردید. با توجه به شکل ۳، نتایج پیش‌بینی شده با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد. شکل ۴ نمودار عرض ترک در طول زمان را نشان می‌دهد. در زمانی که استوانه بتنی کاملاً ترک می‌خورد، یک افزایش ناگهانی در عرض ترک مشاهده می‌شود که به دلیل خاصیت شبه ترد بتن است. پس از T_c با گسترش زمان، عرض ترک معادل نیز افزایش می‌یابد. کاهش عملکرد سازه‌ای در حالت خدمت‌پذیری و دوام مربوط به عرض ترک ناشی از خوردگی با استفاده از فرآیند گاما مدل شده است. به همین منظور عرض ترک معادل محاسبه شده به عنوان متغیر تصادفی S در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار متلب^۱ و رابطه ۳۴، نتایج مربوط به احتمال گسیختگی در طول زمان برای سه حالت حدی ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ میلی‌متر [۲۴] در شکل ۵ نشان داده شده است.

بدیهی است که با افزایش زمان، احتمال گسیختگی ناشی از ترک کاور بتن افزایش می‌یابد زیرا با افزایش زمان و پیشروی فرآیند

2 Discount rate

1 Matlab



شکل ۸. نمودار عرض ترک معادل بر حسب زمان برای میلگردها با قطرهای متفاوت

Fig. 8. Equivalent crack width as function of time for different value of bar diameter

گسیختگی، برای کاهش ریسک گسیختگی بسیار ضروری است زیرا با افزایش هزینه پیشگیرانه زمان تعمیر به تاخیر می‌افتد.

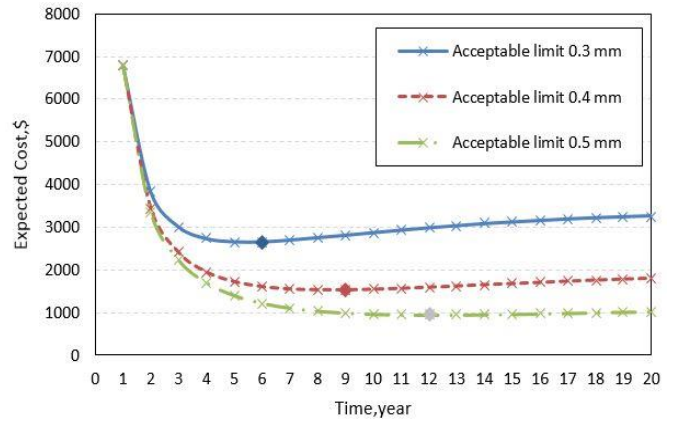
۷-۲- اثر قطر میلگرد بر احتمال وقوع شکست

برای بررسی اثر قطر میلگرد، مقادیر ۸، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نمودار عرض ترک بر حسب زمان به صورت شکل ۸ نشان داده شده است.

با افزایش قطر میلگرد، ناحیه کمتری از سطح مقطع میلگرد دچار خوردگی می‌شود، نرخ نفوذ خوردگی و ضخامت لایه زنگ کاهش می‌یابد بنابراین بتن اطراف میلگرد بر اثر فشار ناشی از محصولات خوردگی، جابه‌جایی کمتری خواهد داشت در نتیجه عرض ترک در کاور بتن کاهش می‌یابد.

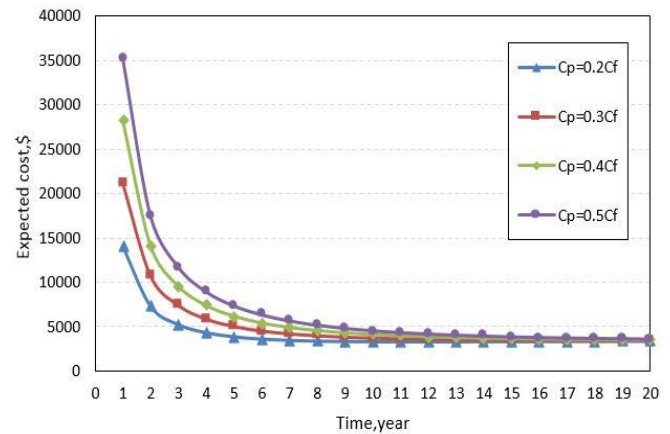
با در نظر گرفتن حد مجاز ترک ۰/۴ میلی‌متر، نمودار ۹ نشان دهنده تغییرات احتمال برای مقادیر مختلف قطر میلگرد می‌باشد. با افزایش قطر میلگرد، افزایش حجم محصولات زنگ در اطراف میلگرد کاهش می‌یابد در نتیجه ضخامت لایه زنگ کم شده و بتن اطراف جابه‌جایی کمتری خواهد داشت در نتیجه عرض ترک کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش قطر میلگرد، در زمان کمتری ترک در بتن شروع می‌شود و باعث می‌شود بتن در مدت زمان کمتری گسیخته شود در نتیجه احتمال گسیختگی افزایش می‌یابد.

اثر قطر میلگرد بر هزینه گسیختگی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با کاهش قطر میلگرد و افزایش احتمال گسیختگی، زمان



شکل ۶. نمودار هزینه گسیختگی در طول زمان تعمیر برای مقادیر مختلف عرض ترک مجاز

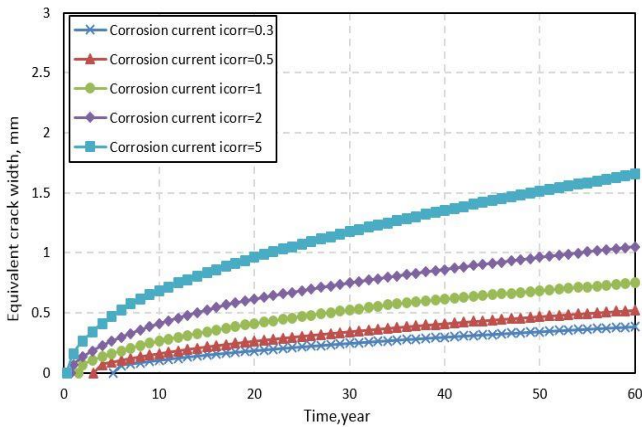
Fig. 6. Cost of failure over repair time for different value allowable crack width



شکل ۷. نمودار هزینه گسیختگی در طول زمان تعمیر برای مقادیر مختلف هزینه پیشگیرانه به ازای حد عرض ترک مجاز ۰/۳ میلی‌متر

Fig. 7. Cost of failure over repair time for different value of preventive cost for $w_L=0.3$ mm

برای $w_L=0.3$ mm بازه ۵ تا ۶ سال، $w_L=0.4$ mm بازه ۸ تا ۹ سال و $w_L=0.5$ mm بازه ۱۱ تا ۱۲ سال است. بنابراین با کاهش حد مجاز ترک، سازه زودتر به حالت شکست می‌رسد پس زمان بهینه تعمیر کاهش می‌یابد. اثر هزینه نگهداری پیشگیرانه بر زمان بهینه تعمیر در شکل ۷ برای عرض ترک مجاز ۰/۳ میلی‌متر نشان داده شده است که هزینه پیشگیرانه از $C_p=0.2 C_f$ تا $C_p=0.5 C_f$ تغییر می‌کند. همان‌طور که از نمودار ۷ مشخص است، زمان بهینه تعمیر با افزایش هزینه پیشگیرانه افزایش می‌یابد. به صورتی که زمان بهینه تعمیر از ۱۲ سال برای $C_p=0.2 C_f$ به ۵۹ سال در $C_p=0.5 C_f$ می‌رسد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که تعمیرات پیشگیرانه پیش از زمان



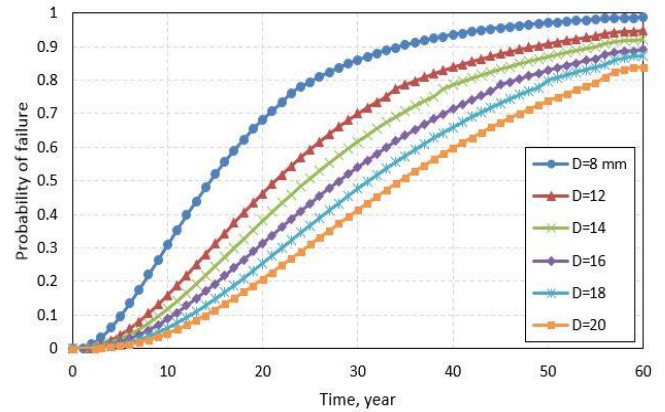
شکل ۱۱. عرض ترک معادل بر حسب زمان در سطح کاور بتن برای مقادیر مختلف نرخ خوردگی

Fig. 11. Equivalent crack width as function of time for different value of corrosion penetration rate

با افزایش نرخ خوردگی، سرعت خوردگی افزایش یافته در نتیجه در طول زمان باعث عریض شدن ترک در کاور بتن می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که عرض ترک در سطح بتن تا حد زیادی به نرخ خوردگی بستگی دارد. زمانی که نرخ خوردگی از ۱ به ۵ میکروآمپر افزایش می‌یابد، مقدار عرض ترک پیش‌بینی شده حدوداً سه برابر می‌شود.

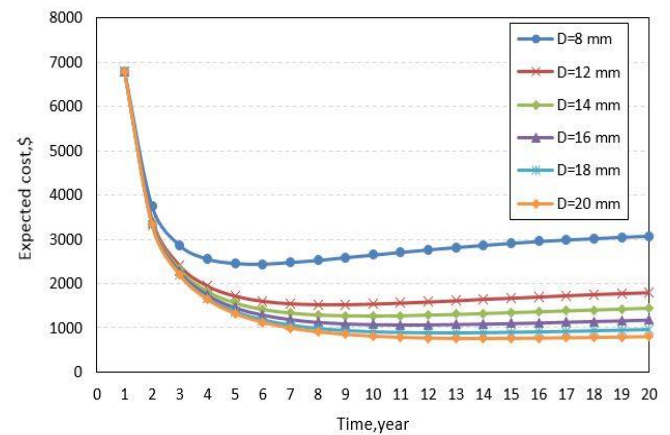
همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است عرض ترک در کاور به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر نرخ خوردگی است بنابراین احتمال گسیختگی نیز مرتبط با نرخ خوردگی است که در شکل ۱۲ نشان داده شده‌است. مقدار مجاز ترک 0.3 میلی‌متر فرض شده‌است. احتمال گسیختگی برای نرخ خوردگی نسبتاً زیاد، سریعاً به مقدار ۱ نزدیک می‌شود. زیرا سرعت خوردگی افزایش می‌یابد، ترک در زمان کمتری به سطح بتن می‌رسد و سازه زودتر گسیخته می‌شود. به ازای نرخ خوردگی ۵ میکروآمپر بر سانتی متر مربع، در زمان تقریباً ۲۰ سال احتمال ۱۰۰ درصد می‌شود در حالی که این زمان برای نرخ خوردگی ۱ میکروآمپر بر سانتی متر مربع در حدود ۵۰ سال می‌باشد. با به حداقل رساندن رابطه $C_d(k)$ و فرض هزینه پیشگیرانه و اصلاحانه به ترتیب برابر با $C_f = 3522$ \$/tonne و $C_p = 340$ \$/tonne می‌توان بازه بهینه تعمیر را حساب کرد. در شکل ۱۳ و ۱۴ نمودار هزینه گسیختگی در بازه زمانی تعمیر به ترتیب برای $i_{corr} = 2$ و $i_{corr} = 5$ $\mu A/cm^2$ نشان داده شده‌است.

با مقایسه دو نمودار نتیجه می‌شود که با افزایش نرخ خوردگی،



شکل ۹. نمودار احتمال گسیختگی بر حسب زمان گسیختگی برای مقادیر مختلف قطر

Fig. 9. Probability of failure as function of time for different value of bar diameter



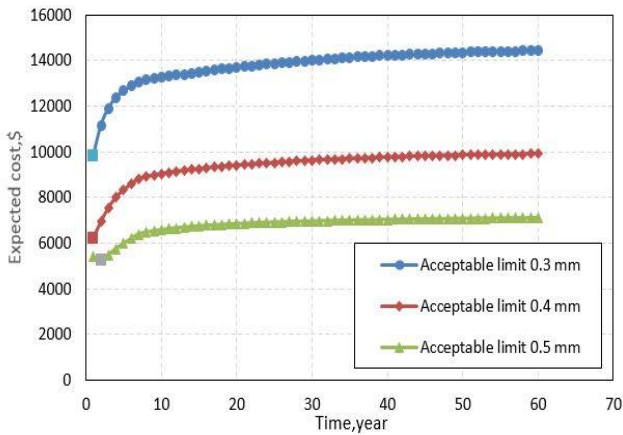
شکل ۱۰. هزینه گسیختگی در طول فاصله زمانی تعمیر برای مقادیر مختلف قطر در حد عرض ترک مجاز 0.4 میلی‌متر

Fig. 10. Cost of failure over repair time for different value of bar diameter for allowable crack width 0.4 mm

بهینه برای تعمیرات نیز کاهش می‌یابد. زیرا سازه در مدت زمان کمتری به گسیختگی می‌رسد و در زمان کمی پس از ساخت، نیاز به تعمیر دارد. همچنین به دلیل افزایش احتمال گسیختگی، هزینه مربوط به آن نیز افزایش می‌یابد.

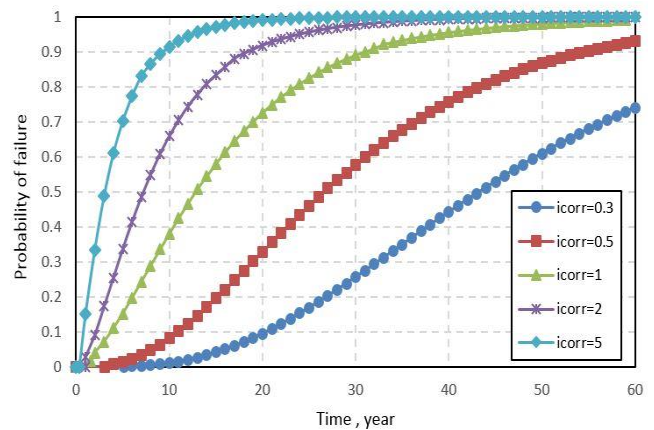
۷-۳- اثر جریان خوردگی بر احتمال وقوع شکست

مقادیر مختلف نرخ خوردگی از 0.3 تا ۵ میکروآمپر بر سانتی متر مربع، متناسب با شدت خوردگی کم تا زیاد، برای بررسی اثرات جریان خوردگی بر عرض ترک و احتمال وقوع شکست انتخاب شده‌اند. نتایج در شکل ۱۱ ارائه شده‌است.



شکل ۱۴. نمودار هزینه گسیختگی در طول زمان تعمیر برای $icorr=5$ برای مقادیر مختلف عرض ترک مجاز $\mu A/cm^2$

Fig. 14. Cost of failure over repair time for $icorr=5$ for different value allowable crack width



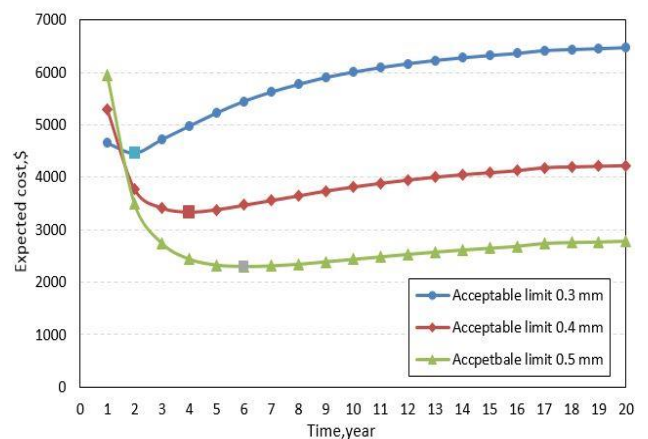
شکل ۱۲. احتمال گسیختگی در عمر سرویس سازه برای مقادیر مختلف نرخ خوردگی در حد مجاز 0.3 میلی متر

Fig. 12. Probability of failure over service life for different value of corrosion penetration rate in allowable limit 0.3 mm

تیرین بازه تعمیر، سال‌های اول عمر سرویس است. در شکل ۱۵ زمان بهینه تعمیر برحسب نرخ خوردگی برای مقادیر مختلف حد مجاز نشان داده شده است. نرخ خوردگی همچنین اثر بسزایی بر زمان بهینه تعمیر دارد. به طور مثال در حالت عرض ترک مجاز برابر با 0.5 میلی متر، زمان بهینه برای $icorr = 0.3 \mu A/cm^2$ 52 سال و برای $icorr=5 \mu A/cm^2$ 1 سال است که تفاوت قابل توجهی است.

۸- نتیجه گیری

عملکرد سازه‌های بتنی در اثر خوردگی و مراحل مختلف فرآیند تخریب این سازه‌ها در این مقاله بررسی شد و مدت زمان هر مرحله و عرض ترک ناشی از خوردگی با استفاده از مدل ارائه شده، محاسبه گردید. این مدل، به طور مستقیم به عوامل تاثیرگذار در خوردگی، مانند نرخ خوردگی، هندسه و مشخصات بتن مرتبط می‌باشد. عرض ترک بتن با نتایج حاصل از آزمایشات مختلف، صحت‌سنجی و به عنوان متغیر تصادفی برای آنالیز قابلیت اعتماد، انتخاب گردید. با استفاده از فرآیند تصادفی گاما، فرآیند تخریب مدل‌سازی شد و احتمال شکست ناشی از ترک، محاسبه گردید. در ادامه پس از محاسبه هزینه چرخه عمر، اثر این پارامترها بر احتمال و هزینه شکست مورد بررسی قرار گرفت. عرض ترک بتن یک شاخص کلیدی در عملکرد بتن است



شکل ۱۳. نمودار هزینه گسیختگی در طول زمان تعمیر برای $icorr=2$ برای مقادیر مختلف عرض ترک مجاز $\mu A/cm^2$

Fig. 13. Cost of failure over repair time for $icorr=2$ for different value allowable crack width

احتمال گسیختگی بیشتر می‌شود و سازه سریع‌تر به احتمال 100 درصد شکست می‌رسد بنابراین هزینه مربوط به آن نیز افزایش می‌یابد. در شکل ۱۳ و ۱۴ هزینه برای سه حد مجاز عرض ترک برابر نیست زیرا پوشش بتن در کمتر از 1 سال ترک می‌خورد و مقادیر مربوط به احتمال گسیختگی مقادیر متفاوتی را شامل می‌شود. زمان بهینه نیز با توجه به آن چه ذکر گردید، با افزایش نرخ خوردگی، کاهش می‌یابد به طوری که برای نرخ خوردگی 5 میکروآمپر بر سانتی متر مربع بهینه

تعمیر تعیین می‌شود. زمان بهینه تعمیر تا حد زیادی به نرخ خوردگی تعمیر، حد مجاز عرض ترک و هزینه نگهداری پیشگیرانه بستگی دارد. با افزایش نرخ خوردگی از ۰/۳ میکروآمپر تا ۵ میکروآمپر، زمان بهینه تعمیر تا ۳۰ سال کاهش می‌یابد که تفاوت قابل ملاحظه‌ای مشاهده می‌شود و نیاز است که در سال‌های اولیه ساخت، با روش‌های مناسب تعمیر و نگهداری، وضعیت سازه را در حد قابل قبول حفظ کرد. با کاهش حد مجاز ترک و کاهش هزینه پیشگیرانه، زمان بهینه تعمیر کاهش می‌یابد. همچنین تعمیرات پیشگیرانه پیش از زمان گسیختگی، برای کاهش خطر گسیختگی ضروری است.

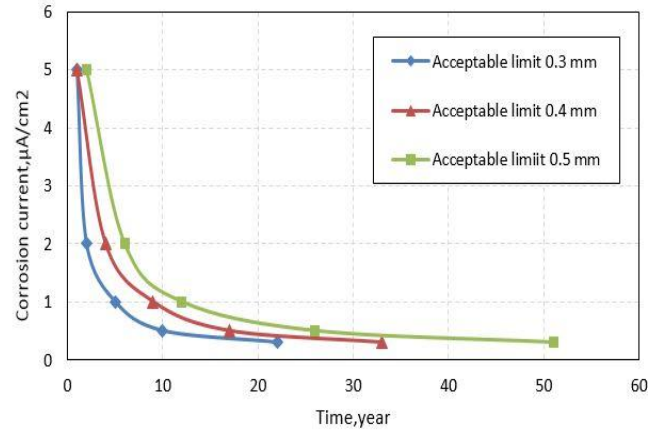
۹- فهرست علائم

علائم انگلیسی

D_b	قطر اولیه میلگرد، m
d_0	ضخامت ناحیه متخل، μm
f_t	مقاومت کششی بتن ترک نخورده، N/m^2
t	زمان خوردگی، year
G_f	انرژی شکست، N/m
i_{corr}	متوسط رخ خوردگی سالانه، A/m^2
M_r	جرم محصولات خوردگی، Kg/m
$\frac{r}{s}$	جابه‌جایی مجاز در حد فاصل بتن و میلگرد، m
R_{cr}	شعاع تشکیل زنگ، m
t_r	ضخامت لایه زنگ، m
t_f/r_0	نرخ نفوذ خوردگی
W_{cr}	عرض ترک نرمال شده بحرانی
W_c	عرض ترک نرمال شده در سطح بتن
W_b	عرض ترک نرمال شده در سطح میلگرد

علائم یونانی

ρ	چگالی، kg/m^3
β	ضریب کاهش سختی کششی
η	تابع شکل
λ	پارامتر مقیاس
σ_w	تنش کششی بتن ترک خورده، N/m^2



شکل ۱۵. زمان تعمیر بهینه بر حسب میانگین نرخ خوردگی سالانه برای مقادیر مختلف حد مجاز عرض ترک

Fig. 15. Optimum repair time as function of mean annual corrosion penetration rate for different value of allowable crack width

که می‌تواند به عنوان متغیر تصادفی در ارزیابی احتمالاتی شکست سازه، انتخاب گردد. نتایج حاصل از آنالیز احتمالاتی مرتبط با ترک نشان می‌دهد که نرخ خوردگی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر زمان ترک خوردگی و عرض ترک ناشی از خوردگی است. با افزایش نرخ خوردگی از ۱ به ۵ میکروآمپر، عرض ترک ۳ برابر می‌شود همچنین احتمال شکست سازه افزایش می‌یابد و سازه در زمان کمتری به زوال می‌رسد. با افزایش قطر میلگرد، عرض ترک و احتمال گسیختگی کاهش می‌یابد که این کاهش در حدود ۲۵ درصد می‌باشد. همچنین مشاهده شد که قطر میلگرد تاثیر بیشتری بر زمان ترک خوردگی دارد. به طوری که با ۲ برابر شدن قطر میلگرد، زمان ترک خوردگی در حدود ۲ سال افزایش می‌یابد.

بررسی مربوط به حدود مجاز ترک نشان داد که احتمال شکست ناشی از ترک، تا حد زیادی به حد مجاز بستگی دارد به صورتی که در حد مجاز کمتر، احتمال گسیختگی سازه، بیشتر است که این امر موجب می‌گردد تمهیدات ویژه‌ای برای سازه‌های دچار خوردگی در نظر گرفته شود.

نتایج حاصل از آنالیز چرخه عمر مبین این امر می‌باشد که با به تعادل رساندن احتمال شکست و هزینه‌های نگهداری، روش بهینه

- reinforcement corrosion using corrosion induced cracks width in corroded reinforced concrete beams, *Cement and concrete research*, 56 (2014) 84-96.
- [11] R. Zhang, A. Castel, R. François, Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of RC beam during chloride-induced corrosion process, *Cement and Concrete Research*, 40(3) (2010) 415-425.
- [12] P.G. Gambarova, G. Rosati, C. Schumm, Bond and splitting: a vexing question, *Special Publication*, 180 (1998) 23-44.
- [13] M.G. Stewart, Q. Suo, Extent of spatially variable corrosion damage as an indicator of strength and time-dependent reliability of RC beams, *Engineering Structures*, 31(1) (2009) 198-207.
- [14] Y. Zhao, J. Yu, W. Jin, Damage analysis and cracking model of reinforced concrete structures with rebar corrosion, *Corrosion Science*, 53(10) (2011) 3388-3397.
- [15] M.G. Stewart, A. Al-Harthy, Pitting corrosion and structural reliability of corroding RC structures: Experimental data and probabilistic analysis, *Reliability engineering & system safety*, 93(3) (2008) 373-382.
- [16] D.-E. Choe, P. Gardoni, D. Rosowsky, Fragility increment functions for deteriorating reinforced concrete bridge columns, *Journal of engineering mechanics*, 136(8) (2010) 969-978.
- [17] H. Narasimhan, M. Chew, Integration of durability with structural design: An optimal life cycle cost based design procedure for reinforced concrete structures, *Construction and Building Materials*, 23(2) (2009) 918-929.
- [18] A. Firouzi, A. Rahai, An integrated ANN-GA for reliability based inspection of concrete bridge decks considering extent of corrosion-induced cracks and life cycle costs, *Scientia Iranica*, 19(4) (2012) 974-981.
- [19] J.M. van Noortwijk, D.M. Frangopol, Two probabilistic life-cycle maintenance models for
- [1] J.P. Broomfield, *Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair*, CRC Press, 2003.
- [2] R. Weyers, Modelling the time-to-cracking in chloride contaminated reinforced concrete structure, *ACI Materials Journal*, 95(6) (1998).
- [3] Z. Chen, Effect of reinforcement corrosion on the serviceability of reinforced concrete structures, Master's thesis, Department of Civil Engineering, University of Dundee, UK, (2004).
- [4] E. pishnamazi, Corrosion economy in Iran considering challenges, statistics and evaluations, In Persian, in: *The Sixth National conference of Corrosion*, Tehran, 1382.
- [5] H.-P. Chen, Residual Flexural Capacity and Performance Assessment of Corroded Reinforced Concrete Beams, *Journal of Structural Engineering*, 144(12) (2018) 04018213.
- [6] S.J. Pantazopoulou, K. Papoulia, Modeling cover-cracking due to reinforcement corrosion in RC structures, *Journal of engineering mechanics*, 127(4) (2001) 342-351.
- [7] J. Zhong, P. Gardoni, D. Rosowsky, Stiffness degradation and time to cracking of cover concrete in reinforced concrete structures subject to corrosion, *Journal of engineering mechanics*, 136(2) (2009) 209-219.
- [8] B.S. Jang, B.H. Oh, Effects of non-uniform corrosion on the cracking and service life of reinforced concrete structures, *Cement and Concrete Research*, 40(9) (2010) 1441-1450.
- [9] A. Torres-Acosta, Accelerated vs. natural corrosion experimental results for remaining life stage forecasting, in: *6th Int. Conf. on Concrete Under Severe Conditions (CONSEC'10)*, eds. P. Castro-Borges, El Moreno, K. Sakai, OE Gjorv, N. Banthia (London, UK: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010), 2010, pp. 35.
- [10] I. Khan, R. François, A. Castel, Prediction of

- procedures, in: BRIDGE MANAGEMENT 4-INSPECTION, MAINTENANCE, ASSESSMENT AND REPAIR, 2000.
- [26] H.-P. Chen, J. Nepal, Stochastic modelling and lifecycle performance assessment of bond strength of corroded reinforcement in concrete, *Structural Engineering and Mechanics*, 54(2) (2015) 319-336.
- [27] J.M. van Noortwijk, A survey of the application of gamma processes in maintenance, *Reliability Engineering & System Safety*, 94(1) (2009) 2-21.
- [28] A.H.-S. Ang, W.H. Tang, Probability concepts in engineering planning and design, vol. 2: Decision, risk, and reliability, JOHN WILEY & SONS, INC., 605 THIRD AVE., NEW YORK, NY 10158, USA, 1984, 608, (1984).
- [29] J.A. Mullard, M.G. Stewart, Life-cycle cost assessment of maintenance strategies for RC structures in chloride environments, *Journal of Bridge Engineering*, 17(2) (2011) 353-362.
- deteriorating civil infrastructures, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 19(4) (2004) 345-359.
- [20] H.-P. Chen, A.M. Alani, Optimized maintenance strategy for concrete structures affected by cracking due to reinforcement corrosion, *ACI Structural Journal*, 110(2) (2013) 229.
- [21] Z.P. Bazant, Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials, Routledge, 2019.
- [22] H.-P. Chen, N. Xiao, Symptom-based reliability analyses and performance assessment of corroded reinforced concrete structures, *Struct. Mech. Eng*, 53(6) (2015) 1183-1200.
- [23] C. MC90, Design of concrete structures. CEB-FIP Model Code 1990, in, Thomas Telford, 1993.
- [24] R. Zhang, A. Castel, R. François, Serviceability limit state criteria based on steel-concrete bond loss for corroded reinforced concrete in chloride environment, *Materials and structures*, 42(10) (2009) 1407.
- [25] P.C. Das, Reliability based bridge management

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Taghipour, M. Dehestani, *Life-Cycle Cost Analysis of Cracking in a Reinforced Concrete Beam under Uniform Chloride Corrosion*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(4) (2021): 1491-1506.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17001.6421](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17001.6421)



