

The effect of environmental classification and prescriptive requirements of concrete code on the expansion of crack width caused by rebar corrosion

Seyed Abbas Hosseini^{1*}

1- Assistant professor, Faculty of Technology and Mining, Yasouj University, Choram, Iran

ABSTRACT

The design codes prescribe the durability criteria by providing criteria such as the minimum thickness of the concrete clear cover, and the minimum permissible compressive strength. In the initial phase, these rules delay the effect of destructive factors, but with the initiation of rebar corrosion, these prescribed rules can have different effects on the propagation of destructive factors. One of the consequences of the rebar's corrosion is the creation of cracks in the concrete cover. With increasing the width of the cracks during the propagation of corrosion, the effects of external aggressive factors increase. In this research, using the most important existing experimental models for predicting crack width, the effect of prescriptive criteria on crack width has been investigated. For this purpose, the prescriptive rules of the concrete design code were considered as the initial condition of the structure according to the environmental condition of the reinforced concrete structure. The investigated models were selected based on chloride-induced corrosion. The important influencing parameters in the models were considered as random variables and the crack width was obtained as a random variable based on the existing models. The impact of rebar diameter selection in the environmental conditions defined in the design code on the crack width has been calculated. The calculation of the crack width was done using the Monte Carlo sampling method and the average of the experimental models and the coefficient of variation were calculated by considering the correlation between the models. The results have shown that the use of rebars with a smaller diameter reduces the crack width by 90%. Also, if the rebar corrosion begins and a certain period of time has passed since its beginning, the safety level of a certain structure is not the same due to the large difference in the width of the cracks.

ARTICLE INFO

Receive Date: 01 February 2023

Revise Date: 30 March 2023

Accept Date: 24 April 2023

Keywords:

Reinforcement corrosion

Chloride ion

Crack width

Reinforced concrete

Concrete durability

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.383329.3024>

*Corresponding author: Seyed Abbas Hosseini

Email address: a.hosseini@yu.ac.ir

اثر طبقه بندی محیطی و ضوابط تجویزی آیین نامه بر گسترش عرض ترک ناشی از

خوردگی میلگرد

سید عباس حسینی*

۱- استادیار، دانشکده صنعت و معدن، دانشگاه یاسوج، چرام، ایران

چکیده

آیین نامه‌های طراحی با ارائه ضوابطی مانند حداقل ضخامت پوشش بتن روی میلگرد، حداقل مقاومت فشاری مجاز و محدود کردن نسبت آب به سیمان، ضوابط مربوط به دوام را تجویز می‌کنند. این ضوابط در فاز اولیه موجب به تاخیر افتادن اثر عوامل مخرب محیطی می‌شود ولی با آغاز خوردگی میلگرد این ضوابط تجویزی می‌تواند اثرات متفاوتی را در نحوه گسترش عوامل مخرب داشته باشند. یکی از عواقب ناشی از خوردگی میلگردها، ایجاد ترک در پوسته بتن می‌باشد که با افزایش عرض این ترک‌ها در طی دوره گسترش خوردگی، آثار عامل زیان‌آور خارجی بیشتر می‌گردد. در این پژوهش با استفاده از مهمترین مدل‌های تجربی موجود برای پیش‌بینی عرض ترک، به بررسی اثر تدابیر تجویزی آیین نامه بر مقادیر عرض ترک پرداخته شده است. بدین منظور، ضوابط تجویزی آیین نامه با توجه به وضعیت محیطی سازه بتن مسلح به عنوان شرایط اولیه سازه در نظر گرفته شده است. مدل‌های مورد بررسی بر مبنای خوردگی ایجاد شده بر اثر نفوذ یون کلر انتخاب شده‌اند. مهمترین پارامترهای تاثیر گذار در مدل‌ها به صورت متغیر تصادفی در نظر گرفته شده‌اند و مقدار عرض ترک به صورت یک متغیر تصادفی بر اساس مدل‌های موجود بدست آمده است. تاثیر انتخاب قطر میلگرد در شرایط محیطی تعریف شده در آیین نامه بر عرض ترک محاسبه شده است. محاسبات عرض ترک با استفاده از روش نمونه‌برداری مونت کارلو انجام گرفته و میانگین مدل‌های تجربی به همراه ضریب تغییرات آن با در نظر گرفتن همبستگی بین مدل‌ها انجام گرفته است. نتایج نشان داده است که استفاده از میلگردهای با قطر کمتر موجب کاهش عرض ترک تا ۹۰ درصد می‌شود. همچنین در صورت آغاز خوردگی میلگرد، در یک زمان معین، سطح ایمنی یک سازه مشخص در شرایط محیطی مختلف به دلیل تفاوت زیاد عرض ترک در آنها همسان نیست.

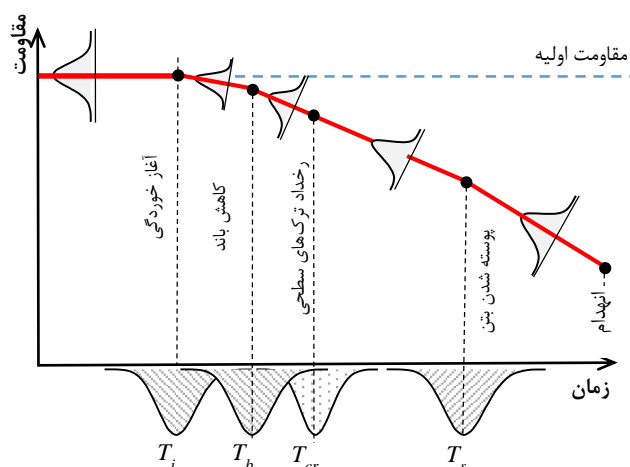
کلمات کلیدی: خوردگی میلگرد، یون کلراید، عرض ترک، بتن مسلح، دوام بتن.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/jsce.2023.383329.3024	۱۴۰۲/۱۰/۳۰	۱۴۰۲/۰۲/۰۴	۱۴۰۲/۰۲/۰۴	۱۴۰۲/۰۱/۱۰	۱۴۰۱/۱۱/۱۲
10.22065/jsce.2023.383329.3024	سید عباس حسینی a.hosseini@yu.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

سازه‌های بتن مسلح در طی دوره بهره‌برداری در معرض عوامل مخرب محیطی قرار گرفته و دچار کاهش عملکرد می‌گردند [۱]. محیط قلیایی بتن ($pH=13$) تامین کننده سپر حفاظتی میلگردهای فولادی در برابر خوردگی است. علی‌رغم این سپر حفاظتی، طبق برآوردهای محققین، خوردگی میلگرد به عنوان مهمترین عامل زوال ناشی از دوام سازه‌های بتنی شناخته می‌شود [۲]. خوردگی باعث کاهش سطح مقطع میلگردها، کاهش چسبندگی بین بتن و میلگرد و همچنین ایجاد ترک و در نهایت کاهش سطح مقطع بتن می‌شود. تغییرات ایجاد شده، موجب به مخاطره افتادن عملکرد سازه بتن مسلح گردیده و هم بر شرایط حدی بهره‌برداری و هم بر شرایط حدی نهایی در نظر گرفته شده برای سازه اثر گذار خواهد بود [۳، ۴].

دوره عمر سازه‌های بتنی به صورت کلی به دو بخش تقسیم می‌شود؛ بخش اول تحت عنوان دوره مقدماتی یا اولیه از زمان ساخت سازه شروع می‌شود و تا زمان ایجاد اولین اثرات کاهنده محیطی ادامه پیدا می‌کند. دوره دوم که به عنوان دوره گسترش شناخته می‌شود تا زمان رسیدن سازه به زوال نهایی (بر مبنای عدول از شرایط حدی تعریف شده) ادامه پیدا می‌کند. به دلیل وجود عدم قطعیت‌های فراوان در مصالح و ابعاد سازه بتنی و همچنین متغیر بودن شرایط محیطی، مدل عمر عموماً به صورت مدل احتمالاتی تعریف می‌شود [۵، ۶]. در این شکل ۱، مدل عمر یک قطعه بتن مسلح بر مبنای رخدادهای ناشی از خوردگی میلگرد به صورت شماتیک نشان داده شده است. در این مدل، رویدادهای ناشی از خوردگی میلگرد که شامل زمان آغاز خوردگی (T_i)، زمان رخداد ترک‌های سطحی (T_{cr})، زمان کاهش چسبندگی بین بتن و میلگرد (T_b) و زمان پوسته شدن بتن (T_s) می‌باشد، به صورت یک متغیر تصادفی با تابع چگالی متناظر با آن رخداد نشان داده شده است. مقدار مقاومت در هر لحظه نیز به صورت یک متغیر تصادفی در نظر گرفته شده است. برای محاسبه زمان رخدادهای نشان داده شده در شکل ۱ تحقیقات زیادی انجام شده است [۷-۱۰]. در این شکل همچنین زمان رخداد کاهش چسبندگی می‌تواند بعد از وقوع ترک‌های سطحی باشد.



شکل ۱: مدل شماتیک عمر سازه بتن مسلح تحت اثر خوردگی میلگرد [۷-۱۰].

یکی از مهمترین ارزیابی‌ها در مدل عمر، برآورد عرض ترک در طی دوره گسترش خوردگی است. به دلیل اینکه وجود ترک باعث افزایش نفوذپذیری سطح بتن و افزایش اثرات محیطی می‌شود؛ برآورد عرض ترک و کنترل آن از اهمیت زیادی برخوردار است. تحقیقات زیادی برای محاسبه عرض ترک در بتن انجام شده و بر این اساس مدل‌های تجربی و همچنین عددی زیادی ارائه شده است [۱۱-۱۳]. برخی از این مدل‌ها که مبتنی بر تجارب آزمایشگاهی بوده‌اند مورد قبول برخی استانداردها و آیین‌نامه‌های مربوط به سازه‌های بتن مسلح قرار گرفته‌اند [۱۴]. یکی از مهمترین اولویت‌ها در ارائه مدل‌های تجربی، ساده و کاربردی بودن مدل‌ها و در عین حال، قابل اندازه‌گیری بودن

پارامترهای ورودی مدل بوده است. در اکثر مدل‌های تجربی مربوط به عرض ترک، نرخ خوردگی، قطر میلگرد و همچنین ضخامت و یا فاصله‌ی بین میلگردها پارامترهای تاثیرگذار در روابط مدل بوده‌اند.

نرخ خوردگی در واقع بیانگر مقدار کاهش سطح مقطع میلگرد می‌باشد که با توجه به شدت عوامل محیطی می‌تواند موجب شدت گسترش عرض ترک گردد. رودریگز و همکاران با انجام آزمایش خوردگی تسریع شده بر روی نمونه‌های مختلف، مدلی برای پیش‌بینی عرض ترک ارائه نمودند که مبتنی بر عمق نفوذ خوردگی در سطح مقطع میلگرد بوده است [۱۱]. در مدل رودریگز و همکاران بر اساس اینکه خوردگی یکنواخت باشد یا حفره‌ای، میلگردها در بالای مقطع قرار گرفته باشند یا در پایین مقطع، پارامترهای مدل تغییر می‌کند. آلونسو و همکاران نیز مدلی برای تخمین عرض ترک بر اساس عمق نفوذ خوردگی در میلگرد ارائه کردند که مبتنی بر آزمایشات خوردگی میلگرد در آزمایشگاه بود [۱۲].

ویدال و همکاران برای ارزیابی دقیق‌تر تخمین عرض ترک، نمونه‌ها را در شرایط بار بهره برداری قرار دادند و همچنین از طریق ایجاد چرخه‌های تر و خشک شدن با استفاده از آب دریا، شرایط واقعی‌تری برای نمونه‌ها ایجاد کردند [۱۳]. بر اساس آزمایشات صورت گرفته ویدال و همکاران، رابطه‌ی عرض ترک بر مبنای سطح مقطع خورده شده میلگردها ارائه گردید. تحقیقات بعدی نشان داد که مدل ارائه شده توسط ویدال و همکاران برای خوردگی غیریکنواخت پاسخ‌های مناسبی ارائه می‌دهد ولی برای خوردگی یکنواخت، مقادیر تخمین زده شده بیش از حد محافظه کارانه است [۱۵، ۱۶]. زانگ و همکاران با تغییراتی در مدل ویدال، عرض ترک را بر مبنای میانگین خوردگی میلگرد در طول خورده شده ارائه کردند تا برای شرایط خوردگی یکنواخت نیز کارآمدتر شود [۱۵]. با توجه به اینکه در نمونه‌های عملی، ضخامت بتن روی میلگردها و همچنین قطر میلگردها به عنوان عوامل بسیار تاثیرگذار در عرض ترک معرفی شده بود، خان و همکاران به اصلاح مدل زانگ با وارد کردن این دو پارامتر (به صورت مستقیم) اقدام کردند [۱۷]. لویز کالوا و همکاران نحوه گسترش ترک و همچنین نحوه اثر عرض ترک بر گسترش خوردگی را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۸]. این محققان نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر بادی که دارای میلگرد به قطر ۱۶ میلیمتر و کاور بتنی ۲۵ و ۴۵ میلیمتر بودند را تحت اثر خوردگی قرار دادند و طبق نتایج بدست آمده، ضخامت کاور بزرگتر دارای اثرات بیشتری در گسترش مقدار خوردگی بعد از ایجاد ترک بوده است. به منظور ارزیابی شرایط آغاز ترک ناشی از خوردگی میلگرد، زانگ و سو تیرهای بتنی دارای میلگرد به قطر ۱۶ میلیمتر با پوشش بتنی ۱۰ میلیمتر را تحت اثر خوردگی تسریع شده قرار دادند و اثر فشار ایجاد شده در اطراف میلگرد بر اثر مواد ناشی از خوردگی بر مقدار عرض ترک را ارزیابی کردند [۱۹]. لی و یانگ با انجام تحلیل‌های عددی گزارش کردند که نرخ خوردگی که از طریق پارامتر چگالی جریان خوردگی بیان می‌شود به تنهایی می‌تواند برای رصد زمان رخداد و همچنین تخمین عرض ترک در طی دوران گسترش خوردگی برای قطعات بتنی با هر ضخامت کآوری مورد استفاده قرار گیرد [۲۰]. در حال حاضر در آیین‌نامه‌ها برای ارزیابی عرض ترک ناشی از خوردگی میلگرد، مدل مشخصی توصیه نشده است. تنها در آیین‌نامه دوام اروپا (Duracrete) استفاده از مدل رودریگز پیشنهاد شده است.

در آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌های بتن مسلح، الزامات مربوط به دوام معمولاً به صورت تجویزی ارائه شده است که انتظار می‌رود با رعایت آنها، عملکرد سازه در طی دوره عمر بهبود یابد. مبنای الزامات مربوط به دوام بر اساس عدم شروع خوردگی میلگرد در طی عمر بهره برداری از سازه می‌باشد. مهمترین ضوابط تجویزی آیین‌نامه برای شرایطی که سازه در معرض نفوذ یون‌های کلراید قرار می‌گیرد شامل ارائه حداقل ضخامت پوشش بتن روی میلگردها، محدود کردن حداقل مقاومت فشاری بتن و محدود کردن حداکثر نسبت آب به سیمان است [۲۱]. پارامترهای مؤثر در این ضوابط، در دوره بعدی مدل عمر یعنی دوره گسترش خوردگی می‌توانند در نتایج مدل‌های موجود تاثیرگذار باشند؛ به عنوان نمونه با توجه به اینکه در طراحی سازه‌های بتنی معمولاً از همین مقادیر حداقل برای پوشش بتن روی میلگردها استفاده می‌شود؛ می‌توان با داشتن این مقادیر، عرض ترک در طی دوره گسترش خوردگی و حین بهره‌برداری از سازه را ارزیابی کرد. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در پارامترها، این مقادیر به صورت متغیر تصادفی در نظر گرفته شده و به تبع آن مقادیر عرض ترک به صورت یک متغیر تصادفی دارای میانگین و ضریب تغییرات بدست می‌آید.

۲-۱- اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

الزامات تجویزی آیین‌نامه‌ها معمولاً بر اساس مشاهدات تجربی می‌باشند؛ بنابراین با افزایش اطلاعات و ارائه مدل‌های تجربی جدیدتر، لزوم بررسی و بازنگری آنها افزایش می‌یابد. در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، الزامات مربوط به قرارگیری بتن در محیط‌های مخرب به صورت تجویزی ارائه شده است؛ از اینرو لزوم بازنگری و بررسی این ضوابط در طی زمان‌های مختلف ضرورت می‌یابد. ضوابط ارائه شده در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان بر این اساس ارائه شده‌اند که مانع از شروع خوردگی میلگرد در طی دوره بهره‌برداری از سازه گردد و هیچ‌گونه توضیحی در رابطه با اینکه در صورت شروع خوردگی، رفتار سازه ساخته شده بر اساس این ضوابط چگونه خواهد بود وجود ندارد. مهمترین سوال این پژوهش این است که در صورت وقوع خوردگی، نحوه گسترش عرض ترک در شرایط محیطی مختلف چگونه خواهد بود و رعایت ضوابط تجویزی چه اثری بر مقدار عرض ترک دارد. طبق آخرین اطلاعات مولفین، تاکنون تحقیقی درباره اثر استفاده از ضوابط تجویزی آیین‌نامه بر گسترش عرض ترک انجان نگرفته است. در این پژوهش با استفاده از مقادیر حداقل پوشش بتن، حداکثر نسبت آب به سیمان و حداقل مقاومت فشاری بتن که در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان به عنوان ضوابط تجویزی توصیه شده است به همراه قطر میلگردهای کاربردی در سازه‌های بتن مسلح با استفاده از مهمترین مدل‌های موجود، مقادیر عرض ترک در طی دوره گسترش خوردگی محاسبه شده است. از حداقل مقاومت فشاری و همچنین نسبت آب به سیمان تجویزی آیین‌نامه برای تعریف مقادیر ورودی برخی پارامترها مانند چگالی جریان خوردگی اولیه استفاده شده است [۲۵]. پارامترها به صورت متغیر تصادفی با تابع چگالی احتمال مشخص تعریف گردیده‌اند و از طریق نمونه‌برداری تصادفی مونت کارلو مقادیر عرض ترک و خواص تصادفی آن محاسبه گردیده است. در نهایت برای هر کدام از شرایط محیطی تعریف شده در آیین‌نامه یک محدوده بالا و پایین برای تخمین عرض ترک ارائه شده است.

۲-۲ مدل‌های پیش‌بینی کننده عرض ترک

دوره گسترش عرض ترک بخشی از دوره گسترش خوردگی می‌باشد (قسمت هاشور خورده شکل ۱)؛ بنابراین به عنوان یک پیش‌نیاز برای ارزیابی عرض ترک، ابتدا باید خوردگی میلگرد آغاز گردد و همچنین معیارهای لازم برای شروع ترک خوردگی اتفاق افتاده باشد. به صورت کلی، زمان آغاز ترک ناشی از خوردگی (T_{cr}) به مقدار بحرانی خوردگی میلگرد و نرخ خوردگی (چگالی جریان خوردگی) وابسته است [۲۲]:

$$T_{cr} \propto W_{cr} / i_{corr} \quad (1)$$

در این رابطه، W_{cr} مقدار بحرانی خوردگی میلگرد برای شروع ترک (گرم بر میلی‌متر مربع سطح میلگرد)، i_{corr} چگالی جریان خوردگی (میکروآمپر بر سانتیمتر مربع) است. برای محاسبه‌ی این زمان و با در نظر گرفتن پارامترهای تاثیرگذار در W_{cr} و i_{corr} روابط تجربی و تحلیلی زیادی ارائه شده است. در روابط مربوط به محاسبه عرض ترک، آستانه‌ی ترک خوردگی مقطع معمولاً بر اساس عمق بحرانی نفوذ خوردگی در میلگرد، x_0 و یا مقدار بحرانی سطح خورده شده میلگرد، ΔA_{s0} تعریف شده است. در جدول ۱ برخی از مهمترین مدل‌های موجود که در این تحقیق استفاده شده، آورده شده است.

جدول ۱: اسامی مقاطع اعضای تخصیص یافته سازه مورد بررسی

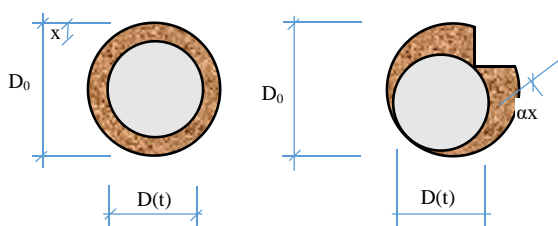
شماره مدل	رابطه عرض ترک	مرجع
۱	$w(t) = \beta(x(t) - x_0) + 0.05$	[۱۱]
۲	$w(t) = 0.0575(\Delta A_s(t) - \Delta A_{s,0})$	[۱۳]
۳	$w(t) = 0.1916\Delta A_m(t) + 0.164$	[۱۵]
۴	$w(t) = 0.1916\Delta A_m(t) \frac{D}{c} + 0.164$	[۱۷]
۵	$w(t) = \Delta D(t) \frac{(\alpha - 1)\pi D}{(\frac{D}{2} + 1)c}$	[۲۷]

اولین مدل ارائه شده در جدول ۱، مدل رودریگز و همکاران است که در آن، ضریب β برای در نظر گرفتن موقعیت میلگرد در مقطع می‌باشد: برای میلگردهای بالای مقطع مقدار آن برابر با ۰/۰۱ و برای میلگردهای پایین مقطع برابر با ۰/۰۱۲۵ است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، $x(t)$ بیانگر عمق خورده شده میلگرد (کاهش شعاع میلگرد در خوردگی یکنواخت) و x_0 نیز عمق خورده شده بحرانی میلگرد است که موجب شروع ترک خوردگی در پوشش بتن می‌شود. مقدار x_0 به نسبت ضخامت پوشش بتن به قطر میلگرد (c/D) و مقاومت کششی بتن بستگی دارد [۲۲]. بر اساس پیشنهاد آیین نامه دوام اروپا مقدار x_0 (میکرومتر) به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$x_0 = 83.8 + 7.4c / D - 22.6f_{c,sp} \quad (2)$$

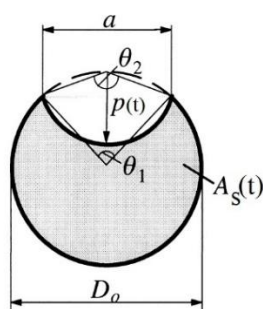
در این رابطه، c و D به ترتیب ضخامت پوشش بتن و قطر اولیه میلگرد و $f_{c,sp}$ مقاومت کششی بتن (مگاپاسکال) می‌باشد.

مقدار عمق خورده شده میلگرد به نوع خوردگی و همچنین چگالی جریان خوردگی (i_{corr}) وابسته است [۲۳، ۲۴]. در شکل ۲ وضعیت میلگرد برای دو نوع خوردگی یکنواخت و غیریکنواخت نشان داده شده است. در حالت یکنواخت، ضخامت خورده شده میلگرد در همه جهات مقطع یکسان است و در خوردگی غیریکنواخت (نقطه‌ای) معمولاً محدوده خورده شده در یک سمت مقطع متمرکز می‌شود. برای در نظر گرفتن مقدار کاهش قطر میلگرد در انواع خوردگی‌ها از ضریب α استفاده می‌شود. در شکل ۲، α ضریب نوع خوردگی می‌باشد که برای خوردگی یکنواخت برابر با ۱ و برای خوردگی غیر یکنواخت بین ۴ تا ۸ متغیر می‌باشد. خوردگی ناشی از یون کلر به صورت نقطه‌ای می‌باشد [۲۳، ۲۵].



شکل ۲: سطح خورده شده و باقیمانده میلگرد در خوردگی یکنواخت و غیریکنواخت

در شکل ۳ وضعیت سطح مقطع یک میلگرد تحت اثر خوردگی ناشی از نفوذ یون کلر نشان داده شده است [۲۶].



شکل ۳: وضعیت سطح مقطع میلگرد در خوردگی ناشی از نفوذ یون کلر

بر اساس قانون فارادی، چگالی جریان خوردگی برابر با یک میکرو آمپر بر سانتیمتر مربع ($\mu A/cm^2$) متناسب با مقدار عمق خورده شده به اندازه 0.0116 میکرومتر در یک سال ($\mu m/year$) است. بر اساس این تعریف، نرخ خوردگی که بیانگر مقدار نفوذ به ازای هر مقدار چگالی جریان خوردگی ثابت در طی یک سال است به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RC = 0.0116i_{corr} \quad (3)$$

با توجه به اینکه مقدار چگالی جریان خوردگی در طی دوره گسترش خوردگی متغیر می‌باشد، مقدار x نشان داده شده در شکل ۲ که معرف عمق خورده شده میلگرد در طی زمان است را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$x(t) = 0.0116 \int_{T_i}^T i_{corr}(t) dt \quad (4)$$

در این رابطه، T_i زمان آغاز خوردگی می‌باشد.

با داشتن نرخ خوردگی، می‌توان میزان عمق خورده شده میلگرد (کاهش شعاع) در زمان t در خوردگی یکنواخت یعنی $x(t)$ و همچنین کاهش شعاع و قطر در خوردگی غیر یکنواخت یعنی $p(t) = ax(t)$ را محاسبه کرد.

با توجه به شکل ۳ می‌توان سطح مقطع باقیمانده میلگرد، $A_s(t)$ را در حالت خوردگی غیر یکنواخت بر اساس مقدار کاهش شعاع یا عمق خورده شده $p(t)$ به صورت زیر محاسبه کرد [۲۶]:

$$A_s(t) = \begin{cases} \frac{\pi D_0^2}{4} - A_1 - A_2, & p(t) \leq \frac{\sqrt{2}}{2} D_0 \\ A_1 - A_2, & \frac{\sqrt{2}}{2} D_0 \leq p(t) \leq D_0 \end{cases} \quad (5)$$

پارامترهای این رابطه به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$A_1 = \frac{1}{2} \left[\theta_1 \left(\frac{D_0}{2} \right)^2 - a \left| \frac{D_0}{2} - \frac{p(t)^2}{D_0} \right| \right] \quad (6)$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \left[\theta_2 p(t)^2 - a \frac{p(t)^2}{D_0} \right] \quad (7)$$

$$a = 2p(t) \sqrt{1 - \left(\frac{p(t)}{D_0}\right)^2} \quad (8)$$

$$\theta_1 = 2 \arcsin\left(\frac{2a}{D_0}\right), \quad \theta_2 = 2 \arcsin\left(\frac{a}{p(t)}\right) \quad (9)$$

۳- چگالی جریان خوردگی

برای چگالی جریان خوردگی چه در شروع بهره‌برداری و چه در طی عمر سازه به دلیل اثرات محیطی مبتنی بر کیفیت بتن، دما، مقدار اکسیژن، مقدار رطوبت، میزان کلراید موجود در بتن و ضخامت پوشش بتن روی میلگرد، مدل‌های مختلفی ارائه شده است. برتولونی و همکاران گزارش کردند که چگالی جریان خوردگی با نسبت آب به سیمان و همچنین ضخامت بتن پوشش میلگردها رابطه‌ی مستقیم دارد [۲۸]. و استیوارت چگالی جریان خوردگی در شروع خوردگی میلگرد در بتن را بر مبنای نسبت آب به سیمان (w/c) و ضخامت پوشش بتنی میلگرد (میلیمتر) به صورت زیر ارائه کرده‌اند [۲۹]:

$$i_{corr,1} = \frac{37.8(1-w/c)^{-1.64}}{d_c} \quad (10)$$

در این رابطه، $i_{corr,1}$ چگالی جریان خوردگی اولیه یا مرجع (میکروآمپر بر سانتیمتر مربع) و dc ضخامت پوشش بتنی روی میلگردها (میلیمتر) می‌باشد. چگالی جریان خوردگی در طی زمان کاهش می‌یابد و به صورت رابطه زیر ارائه شده است [۲۹]:

$$i_{corr}(t) = 0.85i_{corr,1}t^{-0.29} \quad (11)$$

این رابطه برای شرایط با رطوبت نسبی ۷۵ درصد ارائه شده است. بر اساس مبحث نهم مقررات ملی ساختمان شرایط محیطی (غیر دریایی) از نظر وجود یون کلر به چهار دسته تقسیم می‌شود [۲۱]. در جدول ۲ این دسته بندی به همراه شرایط رطوبت محیطی ارائه شده است. در این دسته بندی XCD1 بیانگر محیط با خطر کمتر و XCD4 بیانگر محیط با خطر حملات ناشی از یون کلراید بیشتر می‌باشد.

جدول ۲: دسته بندی شرایط محیطی دارای یون کلر طبق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان (غیر از شرایط دریایی)

شرایط محیطی	وضعیت رطوبت
XCD1	متوسط
XCD2	مرطوب، به ندرت خشک
XCD3	تماس مستقیم با خاک و مرطوب
XCD4	چرخه‌های تر و خشک شدن

همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است، مقدار رطوبت در شرایط محیطی مختلف به صورت کیفی بیان شده است. برای در نظر گرفتن اثر مقدار رطوبت بر چگالی جریان خوردگی می‌توان از یک ضریب کمکی استفاده کرد و مقدار آن را بر اساس نتایج سایر محققان درباره اثر مقدار رطوبت بر چگالی جریان خوردگی تعریف کرد. بالافاس و بورگون گزارش کرده‌اند که در محدوده رطوبت ۷۰ تا ۹۰ درصد چگالی جریان خوردگی حداکثر می‌باشد و در خارج از این محدوده چگالی جریان خوردگی به سرعت کاهش می‌یابد [۳۰]:

$$f_{mc} = e^{-6000(mc-0.75)^6} \quad (12)$$

در این رابطه، f_{mc} ضریب اثر رطوبت، mc مقدار رطوبت تقسیم بر ۱۰۰ می‌باشد. با اعمال این رابطه در رابطه‌ی (۱۱) اثر رطوبت بر تغییرات چگالی جریان خوردگی اعمال می‌شود:

$$i_{corr,mc}(t) = 0.85 f_{mc} i_{corr,1} t^{-0.29} \quad (13-الف)$$

$$i_{corr,mc} = f_{mc} i_{corr} \quad (13-ب)$$

در رابطه‌ی (۱۳-الف) با فرض متغیر بودن چگالی جریان خوردگی و در رابطه‌ی (۱۳-ب) با فرض محافظه کارانه‌ی ثابت بودن چگالی جریان خوردگی، اثر رطوبت در نظر گرفته شده است.

در صورت ثابت فرض کردن چگالی جریان خوردگی در طی زمان گسترش خوردگی با مقدار $i_{corr,mc}$ بر اساس رابطه‌ی (۴)، عمق خورده شده شعاع میلگرد به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$x(t) = 0.0116 \times i_{corr,mc} \times (t - T_i) \quad (14)$$

در صورت در نظر گرفتن تغییرات چگالی جریان خوردگی و استفاده از رابطه‌ی (۱۳-الف) برای چگالی جریان خوردگی، رابطه‌ی (۴) به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$x(t) = 0.0116 f_{mc} \int_{T_i}^t (0.85 i_{corr,1} t^{-0.29}) dt = 0.0139 i_{corr,1} \times f_{mc} \times (t^{0.71} - T_i^{0.71}) \quad (15)$$

دومین مدل جدول ۲ توسط ویدال ارائه شده است. در این مدل، مقدار کاهش در سطح مقطع برای شروع ترک خوردگی میلگرد و $\Delta A_s(t)$ مقدار سطح خورده شده میلگرد در زمان t است. بر اساس شکل ۲ قطر میلگرد در زمان t بر اساس عمق نفوذ $x(t)$ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$D(t) = D_0 - \alpha x(t) \quad (16)$$

در این رابطه، همانطور که قبلاً بیان شد، α معرف نوع خوردگی می‌باشد بنابراین، مقدار مساحت خورده شده را می‌توان به صورت زیر بدست آورد:

$$\Delta A_s(t) = \frac{\pi D_0^2}{4} - A_s(t) \quad (17)$$

مقدار $A_s(t)$ با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد.

مدل‌های شماره ۳ و ۴ به ترتیب توسط زانگ و همکاران و خان و همکاران ارائه شده است. در این دو مدل، ΔA_{sm} بیانگر میانگین سطح مقطع خورده شده میلگرد در طول خورده شده میلگرد است. مدل شماره ۵ توسط تافت کریستینسن ارائه شده و در آن $\Delta D(t)$ بیانگر قطر باقیمانده میلگرد در زمان t می‌باشد.

روابط ارائه شده در جدول ۲ در واقع وقتی کاربرد پیدا می‌کنند که مقدار عمق خورده شده به حد آستانه x_0 برسد؛ بنابراین ابتدا باید زمان رسیدن عمق خورده شده به مقدار x_0 محاسبه گردد. با برابر قرار دادن روابط (۲) و (۱۵) زمان رخداد ترک را می‌توان به صورت زیر ارزیابی کرد:

$$x(t) = x_0 \Rightarrow T_{cr} = 0.71 \sqrt{\frac{x_0}{0.0139 f_{mc} i_{corr,1}}} + T_i^{0.71} \quad (18)$$

در این رابطه، T_{cr} زمان آغاز ترک خوردگی بر حسب سال می باشد.

۴- مدل سازی و تحلیل

۴-۱- فرضیات و پارامترهای ورودی

پارامترهای در نظر گرفته شده برای ارزیابی عرض ترک در دوره گسترش خوردگی، شامل قطر میلگرد، ضخامت پوشش بتن، مقاومت فشاری، ضریب اثر رطوبت، ضریب نوع خوردگی و چگالی جریان خوردگی می باشد. خواص تصادفی این پارامترها از طریق مقدار ضریب تغییرات و تابع چگالی احتمال در نظر گرفته شده است. خواص آماری پارامترها در جدول ۳ نشان داده شده است. برای ضخامت پوشش بتن روی میلگردها، رویکردهای متفاوتی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت ارائه شده است که در این تحقیق بر اساس پیشنهاد رودریگز و همچنین آیین نامه دوام اروپا از ضریب تغییرات ۰/۳ به همراه تابع لوگ نرمال برای چگالی احتمال استفاده شده است [۳۱]. برای قطر میلگرد ضریب تغییرات ۰/۰۲ با تابع چگالی احتمال لوگ نرمال استفاده شده است [۳۲]. برای چگالی جریان خوردگی، خواص تصادفی بر اساس مقادیر ورودی به رابطه (۱۰) در جدول ۴ ارائه شده است. ضریب تغییرات چگالی جریان خوردگی در محدوده ۰/۱ تا ۰/۳ متغیر فرض شده است و تابع چگالی احتمال نرمال برای این متغیر در نظر گرفته شده است [۲۶]. مقاومت فشاری نیز با تابع چگالی احتمال نرمال و ضریب تغییرات ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است [۲۶]. ضریب نوع خوردگی α نیز بر اساس آیین نامه دوام اروپا دارای توزیع نرمال با میانگین ۹/۲۸ و انحراف استاندارد ۴/۰۴ می باشد [۳۱].

جدول ۳: ضوابط دوام برای شرایط محیطی دارای یون کلراید، مقادیر چگالی جریان خوردگی مرجع و ضریب رطوبت متناظر با هر شرایط محیطی

شرایط محیطی	ضخامت حدافل ضخامت بتن روی میلگرد (mm)	مقاومت حدافل فشاری بتن (MPa)	حداکثر w/c	میانگین چگالی جریان خوردگی اولیه، $i_{corr,1}$ ($\mu A/cm^2$)	درصد رطوبت پیشنهادی	ضریب مقدار f_{mc} رطوبت
XCD1	۴۵	۳۰	۰/۵۰	۲/۸۵	۵۰	۰/۲۳
XCD2	۵۰	۳۵	۰/۴۵	۲/۱۹	۹۵	۰/۶۸
XCD3	۶۰	۳۵	۰/۴۵	۱/۸۳	۹۰	۰/۹۳
XCD4	۷۵	۳۵	۰/۴۰	۱/۲۷	۷۵	۱

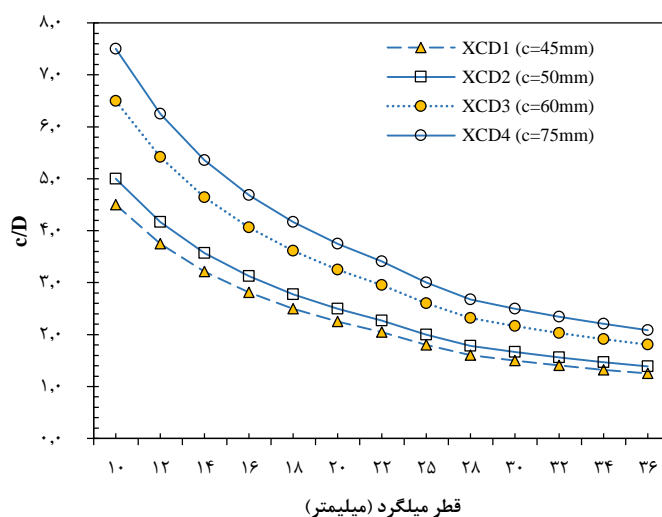
برای در نظر گرفتن خواص تصادفی پارامترها از روش نمونه برداری تصادفی مونت کارلو استفاده شده است؛ به عنوان مثال برای محاسبه میانگین و ضریب تغییرات چگالی جریان خوردگی اولیه، ۱۰۰۰۰ نمونه تصادفی از پارامترهای ضخامت بتن (c)، قطر میلگرد (D) و مقاومت فشاری بتن (f_c) بر مبنای تابع چگالی احتمال فرض شده برای آنها تولید شد و سپس رابطه (۱۰) بر اساس این مقادیر ارزیابی گردید و میانگین نتایج حاصله بدست آمد.

نتایج بدست آمده برای $i_{corr,1}$ در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که از این جدول مشخص است در صورت شروع خوردگی میلگرد به واسطه نفوذ یون کلراید، محیط XCD1 دارای چگالی جریان خوردگی اولیه بزرگتری است که این مقدار به دلیل اثرگذاری ضوابط تجویزی آیین نامه می باشد. هرچه شرایط محیطی از نظر یون کلراید بحرانی تر شود، مقدار چگالی جریان خوردگی اولیه کمتر شده است. با سیاست در نظر گرفته شده در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، سعی شده است که نرخ خوردگی در محیطهای شدیدتر، کمتر شود. البته زیاد بودن چگالی جریان خوردگی اولیه در شرایط محیطی کم خطر XCD1 نیز می تواند بر عملکرد سازه اثرات خطرناکی داشته باشد. بهترین تابع چگالی احتمال برای $i_{corr,1}$ بر اساس داده های تولید شده، تابع لوگ نرمال بوده است.

جدول ۴: خواص تصادفی پارامترهای موثر در مدل

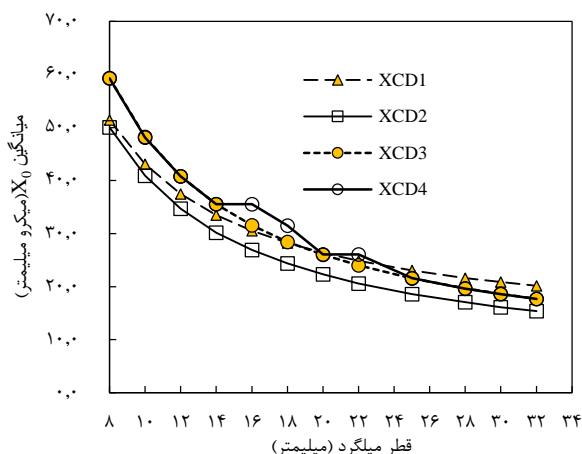
پارامتر	میانگین	ضریب تغییرات	تابع چگالی
کاور بتن، c (mm)	جدول ۳	۰/۳	لوگ نرمال
قطر میلگرد، D (mm)	۸ تا ۳۶	۰/۰۲	لوگ نرمال
چگالی جریان خوردگی، $i_{corr,1}$	جدول ۳	۰/۳	لوگ نرمال
مقاومت فشاری بتن (MPa)	جدول ۳	۰/۱۵	نرمال
ضریب نوع خوردگی، α	۹/۲۸	۰/۴۳	نرمال
ضریب مقدار رطوبت، f_{mc}	جدول ۳	۰/۱۲ و ۰/۲۰	نرمال

قطر میلگردهای مورد استفاده در سازه بتن مسلح معمولاً در محدوده قطرهای ۸ تا ۳۶ میلیمتر قرار دارد، با توجه به اینکه در برخی مدل‌های رخداد ترک و همچنین مدل‌های پیش‌بینی کننده عرض ترک، نسبت ضخامت کاور به قطر میلگرد (D/c) و یا معکوس آن (c/D) تاثیرگذار است، با استفاده از حداقل ضخامت ارائه شده در جدول ۳ و محدوده قطرهای بین ۸ تا ۳۶ میلیمتر، کلیه حالت‌های محتمل برای نسبت c/D در شکل ۴ ترسیم شده است.

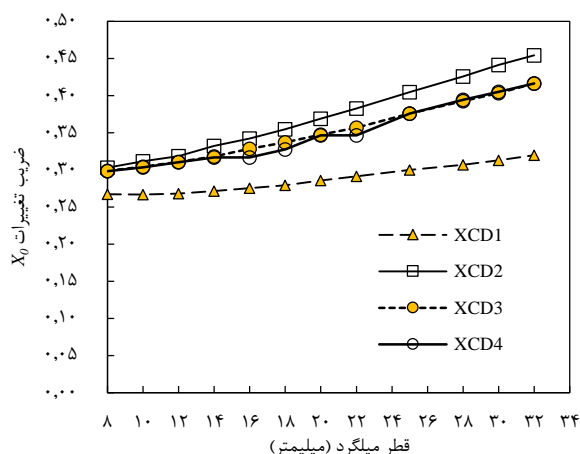
شکل ۴: حالت‌های محتمل برای نسبت c/D برای شرایط محیطی دارای یون کلراید

۲-۴- نتایج حداقل عمق خوردگی برای شروع ترک

با به کار بردن رابطه‌ی (۲) با مقادیر حداقل ضخامت پوشش بتنی روی میلگردها (جدول ۲) و همچنین قطر میلگردهای بین ۸ تا ۳۶ میلیمتر، عمق بحرانی خورده شده میلگرد برای شروع ترک خوردگی بدست می‌آید که مقدار میانگین و ضریب تغییرات آن برای شرایط محیطی مختلف و میلگردهای مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که از قسمت (الف) شکل ۵ مشخص است، براساس رابطه‌ی (۲) با ثابت بودن ضخامت پوشش بتن روی میلگردها، با افزایش قطر میلگردها، مقدار x_0 کاهش یافته است به طوری که به عنوان نمونه در شرایط محیطی XCD4 مقدار x_0 دارای مقدار بیشینه ۶۰ میکرومتر برای میلگرد به قطر ۸ میلیمتر و مقدار کمینه ۱۷/۷ میکرومتر برای میلگرد به قطر ۳۲ میلیمتر بدست آمده است. به دلیل اثر شرایط تجویزی آیین نامه، مقدار عمق بحرانی خورده شده میلگرد برای شروع ترک در محیط XCD2 برای همه قطرهای میلگرد از سه محیط دیگر کمتر بدست آمده است. به عنوان نمونه برای میلگرد به قطر ۲۰ میلیمتر، در محیط XCD2 وقتی عمق خورده شده میلگرد به ۲۲/۳ میکرومتر برسد، ترک خوردگی در پوسته‌ی بتن شروع خواهد شد؛ درحالی‌که این مقدار برای شرایط محیطی شدیدتر XCD4 برابر با ۲۶/۱ میکرومتر می‌باشد.



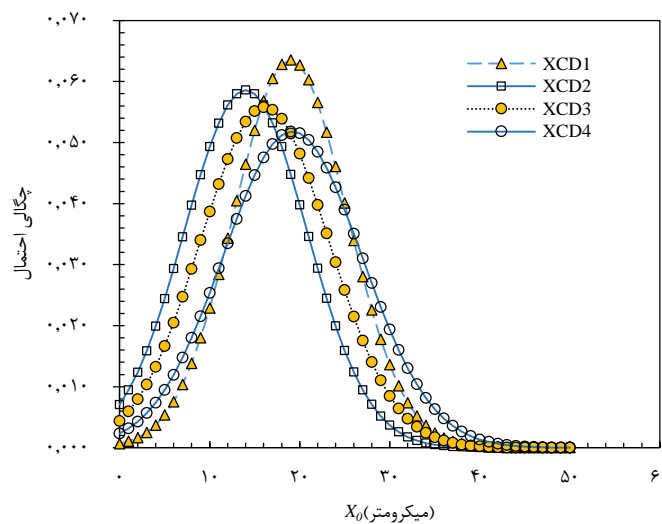
(ب)



(الف)

شکل ۵: میانگین و ضریب تغییرات عمق بحرانی خورده شده میلگرد (x_0) برای شروع خوردگی برای قطر و شرایط محیطی مختلف دارای یون کلراید

در شکل ۵- (ب)، ضریب تغییرات x_0 نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است مقدار ضریب تغییرات برای همه محیطها با افزایش قطر میلگرد افزایش یافته است و در محیط XCD1 کمترین پراکندگی برای x_0 بدست آمده است. مقدار ضریب تغییرات در محیط XCD1 در محدوده ۰/۲۷ تا ۰/۳۲ بدست آمده است در حالیکه این مقدار در محیطهای دیگر تا ۰/۴۵ برای میلگردهای با قطر بزرگ نیز رسیده است. برای استفاده از پارامتر x_0 در تحلیل‌های بعد نیاز به تعیین تابع چگالی احتمال این متغیر است که با استفاده از روش کمینه کردن مربعات خطا، بهترین تابع چگالی احتمال برآزنده شده به این پارامتر، تابع نرمال بدست آمده است. در شکل ۶ توابع چگالی احتمال برآزنده شده برای مقدار x_0 در شرایط محیطی مختلف برای میلگرد به قطر ۳۲ میلیمتر نشان داده شده است.

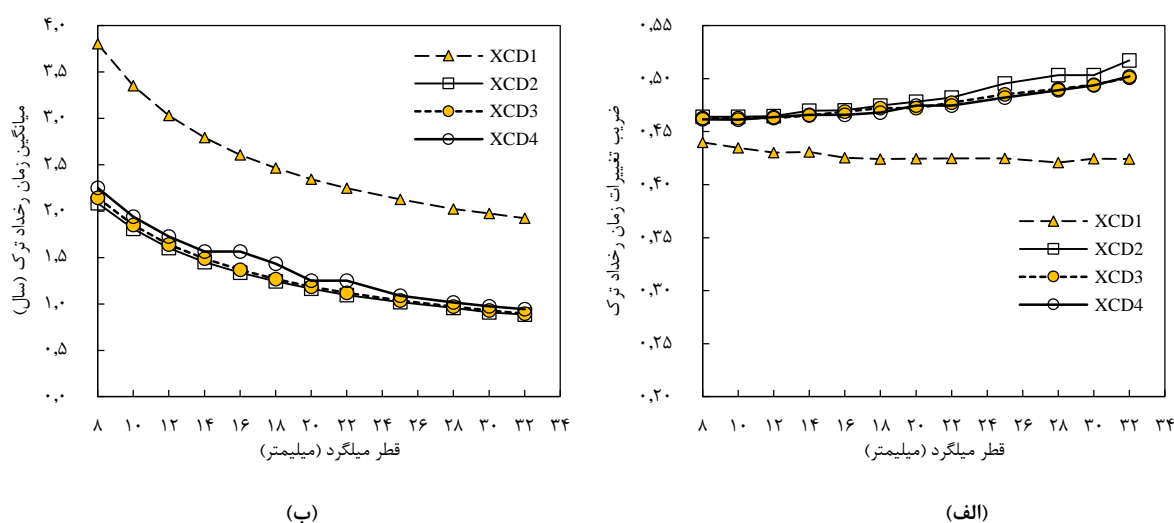


شکل ۶: توابع چگالی احتمال x_0 برای میلگرد به قطر ۳۲ میلیمتر در شرایط مختلف محیطی

۳-۴- نتایج زمان رخداد ترک

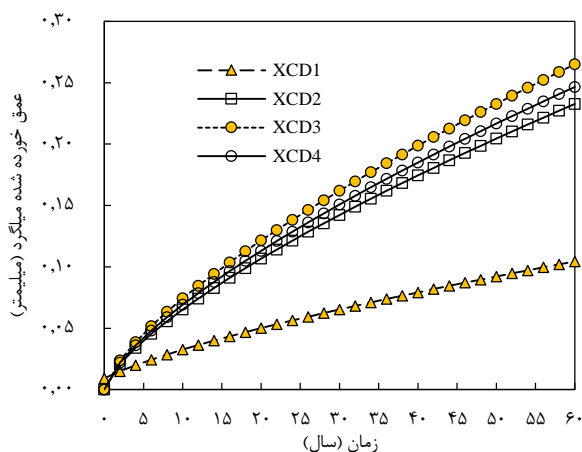
زمان رخداد ترک (بعد از شروع خوردگی) با استفاده از مقادیر بدست آمده برای میانگین و ضریب تغییرات x_0 در بخش قبل و رابطه‌ی (۱۸) محاسبه شده است. مقادیر بدست آمده برای میانگین زمان رخداد ترک و ضریب تغییرات آن به ترتیب در شکل ۷ نشان داده

شده است. از نتایج مشخص است که بجز برای محیط کم خطر XCD1، زمان رخداد ترک خوردگی برای محیط‌های دیگر تقریباً مشابه همدیگر هستند. برای محیط XCD1 مشاهده می‌شود که زمان رخداد ترک به صورت قابل توجهی بزرگتر از دیگر محیط‌ها بدست آمده است؛ دلیل این امر علی‌رغم بزرگتر بوده مقدار $i_{corr,1}$ برای این محیط، اثرگذاری ضریب رطوبت f_{mc} در رابطه‌ی (۱۸) می‌باشد که موجب به تاخیر افتادن آغاز ترک خوردگی پوشش بتن در این محیط گردیده است. از نتایج مشخص است که در نمونه‌هایی که از میلگرد با قطر کمتر استفاده شده است، زمان رخداد ترک به تاخیر افتاده است به عنوان نمونه در محیط XCD4 زمان رخداد ترک در صورت استفاده از میلگرد به قطر ۸ میلی‌متر ۲/۲۵ سال بعد از شروع خوردگی اتفاق افتاده است درحالی‌که در صورت استفاده از میلگرد به قطر ۳۲ میلی‌متر این زمان به ۰/۹۵ سال کاهش یافته است.



شکل ۷: میانگین و ضریب تغییرات زمان رخداد اولین ترک برای شرایط محیطی مختلف بر اساس قطر میلگرد

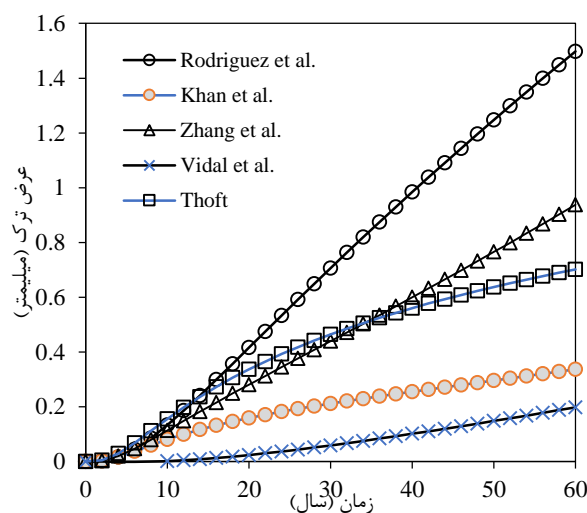
در شکل ۸ میزان کاهش در شعاع میلگرد بدون اثر ضریب نوع خوردگی نشان داده شده است. این مقادیر با استفاده از رابطه‌ی (۱۵) محاسبه گردیده است. مقادیر کاهش در کل ضخامت قطر در صورتیکه خوردگی یکنواخت در نظر گرفته شود دو برابر مقادیر ارائه شده در شکل (۹) می‌باشد. ضریب تغییرات این عمق تحت اثر ضریب تغییرات چگالی جریان خوردگی اولیه است و مقدار آن در طی دوره گسترش خوردگی در محدوده ۰/۲ قرار دارد. مقدار عمق نفوذ بستگی به قطر میلگرد ندارد؛ ازاینرو در صورت استفاده از میلگردهای با قطر کوچک به دلیل یکسان بودن عمق خورده شده، کاهش سطح مقطع بیشتری در این نوع میلگردها اتفاق خواهد افتاد.



شکل ۸: عمق خورده شده شعاع میلگرد در طی دوره گسترش خوردگی

۴-۴- نتایج عرض ترک

در ادامه، با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی عرض ترک ارائه شده در جدول ۱، عرض ترک برای چهار نوع محیط تعریف شده در آیین نامه محاسبه گردیده است. برای بررسی میزان تفاوت مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مختلف، در شکل ۹، عرض ترک در شرایط محیطی XCD2 در صورت استفاده از میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر نشان داده شده است.



شکل ۹: مقدار عرض ترک برای شرایط XCD2 برای میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر

همانطور که از شکل ۹ مشخص است، مقادیر بدست آمده توسط مدل‌ها متفاوت می‌باشند و از میان مدل‌های موجود، مدل رودریگز و همکاران که مورد استناد آیین نامه دوام اروپا است مقادیر بزرگتری برای عرض ترک تخمین زده است. با توجه به اینکه مقادیر ارائه شده توسط مدل‌های پیش‌بینی کننده عرض ترک متفاوت هستند، از مقدار میانگین این مدل‌ها برای پیش‌بینی عرض ترک در طی زمان گسترش خوردگی استفاده می‌شود (رابطه‌ی (۱۳)). با در نظر گرفتن رابطه‌ی (۱۳) برای محاسبه عرض ترک، مقدار میانگین و انحراف

استاندارد عرض ترک به صورت روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه خواهد شد. در این روابط، همبستگی مدل‌ها که به دلیل وجود پارامترهای مشترک ایجاد شده است در نظر گرفته شده است.

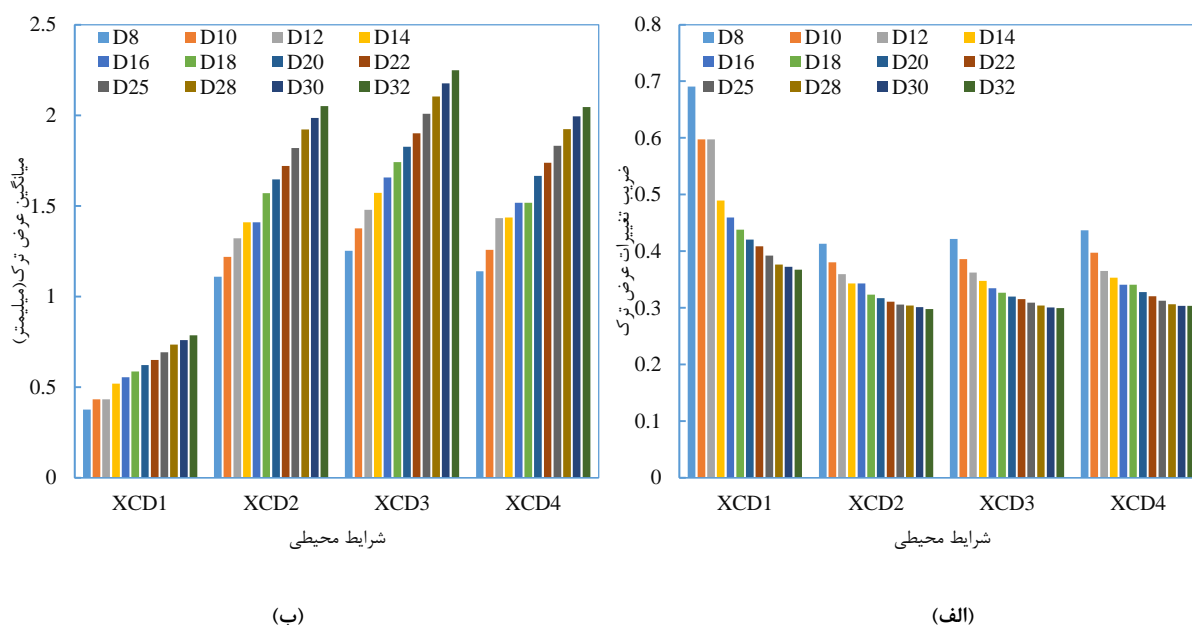
$$w(t) = \frac{\sum_{i=1}^5 w_i(t)}{5} \quad (19)$$

$$\mu_{w(t)} = \frac{\sum_{i=1}^5 \mu_{w_i(t)}}{5} \quad (20)$$

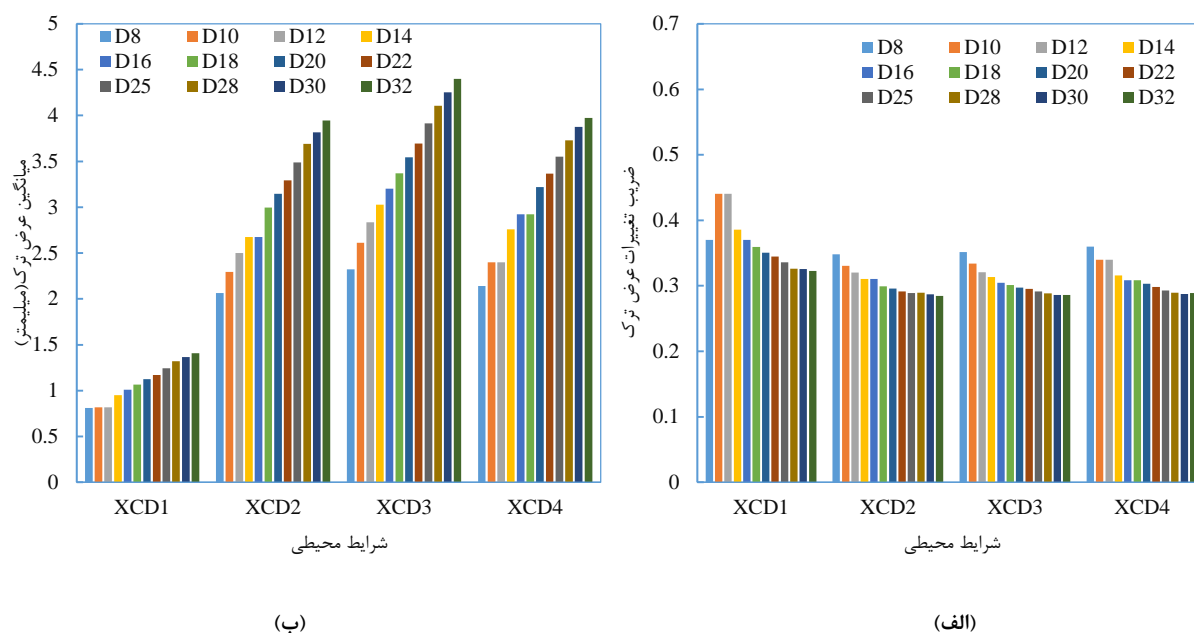
$$\sigma_{w(t)} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^5 \rho_{w_i(t), w_j(t)} \sigma_{w_i(t)} \sigma_{w_j(t)}}{5}} \quad (21)$$

در این روابط، ρ بیانگر ضریب همبستگی مدل‌ها به صورت دو به دو در هر زمان، σ بیانگر انحراف استاندارد عرض ترک در هر زمان و μ بیانگر مقدار میانگین عرض ترک می‌باشد.

براساس روابط (۱۴) و (۱۵) برای شرایط محیطی مختلف مقدار عرض ترک و ضریب تغییرات آن در سال ۳۰ ام و ۶۰ ام بعد از شروع خوردگی محاسبه گردیده و در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. این شکل‌ها بیانگر اثر انتخاب قطر میلگرد در شرایط محیطی مختلف بر مقدار عرض ترک می‌باشند. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص است که در همه شرایط محیطی، با افزایش قطر میلگرد، مقدار عرض ترک افزایش یافته است. بعد از گذشت ۳۰ سال از شروع خوردگی، در شرایط محیطی کم خطر (XCD1)، عرض ترک در محدوده ۰/۳۷ تا ۰/۷۵ میلی‌متر برای میلگردهای با قطر ۸ تا ۳۲ میلی‌متر قرار گرفته است. مشاهده می‌شود که بر اساس فرضیات در نظر گرفته شده بر اساس توضیحات آیین نامه، مقادیر عرض ترک در محیط سوم (XCD3) بیشتر از محیط پر مخاطره تر چهارم (XCD4) می‌باشد. محدوده عرض ترک بعد از گذشت ۳۰ سال در محیط سوم در محدوده ۱/۲۵ تا ۲/۲۴ میلی‌متر قرار دارد در حالیکه این محدوده برای XCD4 در محدوده ۱/۱۴ تا ۲/۰۴ میلی‌متر قرار گرفته است.



شکل ۱۰: میانگین و ضریب تغییرات عرض ترک در شرایط محیطی مختلف بعد از ۳۰ سال خوردگی



شکل ۱۱: میانگین و ضریب تغییرات عرض ترک در شرایط محیطی مختلف بعد از ۶۰ سال خوردگی

بعد از گذشت ۶۰ سال از آغاز خوردگی، عرض ترک برای چهار محیط به ترتیب در محدوده ۰/۸۱-۱/۴۱ میلیمتر، ۲/۰۶-۳/۹۵ میلیمتر، ۲/۳۲-۴/۴۰ میلیمتر و ۲/۱۴-۳/۹۷ میلیمتر قرار گرفته است. محدوده‌های بدست آمده عرض ترک برای قطر میلگردها نشان می‌دهد که عرض ترک در صورت استفاده از میلگرد با قطر بزرگتر (۳۲ میلیمتر) به جای به میلگرد با قطر کوچکتر (۸ میلیمتر) افزایش خواهد یافت و نسبت این افزایش برای محیط‌های XCD1 تا XCD2 به ترتیب برابر با ۱/۷۴، ۱/۹۱، ۱/۹۰ و ۱/۸۵ خواهد بود.

با توجه به قسمت‌های (ب) شکل‌های ۱۰ و ۱۱، مقدار ضریب تغییرات عرض ترک در همه محیط‌ها تقریباً مشابه هم می‌باشد و با افزایش قطر میلگرد مقداری کاهش در ضریب تغییرات مشاهده شده است. ضریب تغییرات در محدوده ۰/۳ تا ۰/۴ متغیر است و هرچه مقدار میانگین عرض ترک کوچکتر بوده است مقدار ضریب تغییرات بزرگتری از نتایج حاصل شده است.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، با در نظر گرفتن ضوابط تجویزی آیین‌نامه برای شرایط محیطی دارای خطر خوردگی میلگرد ناشی از یون کلراید (غیر از محیط دریایی) به عنوان شرایط اولیه سازه، عرض ترک برای حالت‌های مختلف قطر میلگرد محاسبه گردید و با در نظر گرفتن خواص تصادفی پارامترهای موثر در مدل‌ها نتایج زیر بدست آمده است:

۱- در نظر گرفتن ضریب رطوبت در روابط مربوط به توسعه خوردگی میلگرد دارای اثر زیادی در نتایج بدست آمده برای عرض ترک بوده است. با توجه به اینکه وضعیت رطوبت و موجود بودن اکسیژن دو پارامتر موثر برای شروع و همچنین گسترش خوردگی می‌باشد و این دو پارامتر در توضیح شرایط محیطی در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان به صورت کیفی ارائه شده، لازم است که برای ارزیابی دقیق‌تر دوام سازه‌های بتنی به صورت کمی ارائه شود.

۲- با استفاده از میلگردهای با قطر کمتر در همه شرایط محیطی دارای یون کلراید (غیر دریایی) می‌توان گسترش عرض ترک را محدودتر کرد. بر اساس نتایج بدست آمده در این پژوهش، در صورت استفاده از میلگردهای با قطر کوچکتر، عرض ترک تا ۹۰ درصد کمتر از حالت استفاده از میلگردهای با قطر بزرگتر بدست آمده است.

۳- مجموعه ضوابط تجویزی آیین نامه هرچند موجب به تاخیر افتادن شروع خوردگی می گردد ولی در صورت شروع خوردگی به لحاظ عرض ترک نمی توان دقیقاً اثر این ضوابط را مثبت ارزیابی کرد. برهمکنش شرایط محیطی و ضوابط تجویزی موجب شده است که شرایط محیطی سوم از نظر عرض ترک بحرانی تر باشد به طوریکه عرض ترک بعد از ۶۰ سال در این محیط ۱۲ درصد بیشتر از محیط چهارم گردیده است.

۴- بر اساس نتایج بدست آمده مشخص است سطح ایمنی سازه های بتن مسلح در شرایط محیطی مختلف در صورت شروع خوردگی میلگرد یکسان نیست.

مراجع

- [1] Hosseini, S.A. (2019). Probabilistic Calculation of the Corrosion Initiation of steel reinforcement Using Reliability Methods. *Concrete Research*, 12(3), 137-145.
- [2] Qiu, W.-l., Peng, R.-x. and Jiang, M. (2022). Investigation on the prediction of reinforcement corrosion-induced cover time-vary cracking from multi-scale. *Structures*. 43, 1305-1314.
- [3] Hu, J. Y., Zhang, S. S., Chen, E. and Li, W. G. (2022). A review on corrosion detection and protection of existing reinforced concrete (RC) structures. *Construction and Building Materials*, 325, 126718.
- [4] Hosseini, S. A., Shabakhty, N. and Khankahdani, F.A. (2019). Sensitivity analysis of flexural strength of RC beams influenced by reinforcement corrosion. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 72(4), 479-489.
- [5] Zhang, K., Xiao, J. and Zhang, Q. (2021). Time-dependent reliability analysis of recycled aggregate concrete cover cracking induced by reinforcement corrosion. *Journal of building engineering*, 39, 102320.
- [6] Chen, S., Duffield, C., Miramini, S., Nasim Khan Raja, B. and Zhang, L. (2021). Life-cycle modelling of concrete cracking and reinforcement corrosion in concrete bridges: A case study. *Engineering Structures*, 237, 112143.
- [7] Zhang, X., Zuo, G., Memon, S. A., Xing, F. and Sun H. (2019). Effects of initial defects within mortar cover on corrosion of steel and cracking of cover using X-ray computed tomography. *Construction and Building Materials*, 223, 265-277.
- [8] Hájková, H., Smilauer, V., Jendel, L. and Cervenka, J. (2018). Prediction of reinforcement corrosion due to chloride ingress and its effects on serviceability. *Engineering Structures*, 174, 768-777.
- [9] Kearsley, E. P. and Joyce, A. (2014). Effect of corrosion products on bond strength and flexural behaviour of reinforced concrete slabs. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 56(2): 21-29.
- [10] Hosseini, S. A. and Bagheri, M. (2022). Concrete beam life model based on shear strength under different states of chloride ion penetration. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(8), 9-9.
- [11] Rodriguez, J., Ortega, L. M., Casal, J. and Diez, J.M. (2018). Corrosion of reinforcement and service life of concrete structures. *Durability of Building Materials and Components*, 7, 117-126.
- [12] Alonso, C., Andrade, C., Rodriguez, J. and Diez, J.M. (1998). Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion. *Materials and structures*, 31, 435-441.
- [13] Vidal, T., Castel, A. and François, R. (2004). Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete. *Cement and concrete research*, 34(1), 165-174.
- [14] DuraCrete, (1998). *Modeling of degradation: BRITE-EURAM-project BE95-1347/R4-5*, The European Union-Brite EuRam.
- [15] Zhang, R., Castel, A. and François, R. (2010). Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of RC beam during chloride-induced corrosion process. *Cement and Concrete Research*, 40(3), 415-425.
- [16] Hosseini, S. A., Shabakhty, N. and Mahini, S.S. (2015). Correlation between chloride-induced corrosion initiation and time to cover cracking in RC structures. *Structural Engineering and Mechanics*, 56(2), 257-273.
- [17] Khan, I., François, R. and Castel, A. (2014). Prediction of reinforcement corrosion using corrosion induced cracks width in corroded reinforced concrete beams. *Cement and concrete research*, 56, 84-96.
- [18] Lopez-Calvo, H. Z., Montes-Garcia, P., Jimenez-Quero, V. G., Gomez-Barranco, H., Bremer, T. W. and Thomas, M. D. A. (2018). Influence of crack width, cover depth and concrete quality on corrosion of steel in HPC containing corrosion inhibiting admixtures and fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 88, 200-210.
- [19] Zhang, Y. and Su, R. K. L. (2020). Experimental investigation of the process of corrosion-caused cover cracking. *Construction and Building Materials*, 253, 119166.
- [20] Li, C. Q. and Yang, S. T. (2020). Prediction of Concrete Crack Width under Combined Reinforcement Corrosion and Applied Load. *Journal of Engineering Mechanics*, 137(11), 722-731.

- [21] Iranian National Building Code, Part 9th. (2021). *Design and Construction of concrete buildings*, Tehran: Ministry of Roads & Urban Development
- [22] Jamali, A., Angst, U., Adey, B. and Elsener, B. (2013). Modeling of corrosion-induced concrete cover cracking: A critical analysis. *Construction and Building Materials*, 42, 225-237.
- [23] Apostolopoulos, C. A., Demis, S. and Papadakis, V. G. (2013). Chloride-induced corrosion of steel reinforcement–Mechanical performance and pit depth analysis. *Construction and Building Materials*, 38, 139-146.
- [24] Wen, C., Tian, Y., Mai, Z., Hu, J. and Wang, G. (2022). Effect of macropores at the steel-concrete interface on localized corrosion behaviour of steel reinforcement. *Cement and Concrete Composites*, 129, 104510.
- [25] Duprat, F. (2007). Reliability of RC beams under chloride-ingress. *Construction and building materials*, 21(8), 1605-1616.
- [26] Val, D. V., Stewart, M. G. and Melchers, R. E. (1998). *Effect of reinforcement corrosion on reliability of highway bridges*. *Engineering structures*, 20(11), 1010-1019.
- [27] Thoft-Christensen, P. (2004). *Corrosion and cracking of reinforced concrete*. In *Life-cycle performance of deteriorating structures: Assessment, design and management*, ASCE, 26-36.
- [28] Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E. and Polder, R.B. (2013). *Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair*. John Wiley & Sons.
- [29] Vu, K. A. T. and Stewart, M. G. (2005b). Predicting the Likelihood and Extent of Reinforced Concrete Corrosion-Induced Cracking. *Journal of Structural Engineering*, 131(11), 1681-1689.
- [30] Balafas, I. and Burgoyne, C. (2010). Environmental effects on cover cracking due to corrosion. *Cement and Concrete Research*, 40(9), 1429-1440.
- [31] DuraCrete, (2000). *Statistical quantification of the variables in the limit state functions: BRPR-CT95-0132-Project BE95-1347/R9*, The European Union.
- [32] Enright, M. P. and Frangopol, D. M. (1998). Probabilistic analysis of resistance degradation of Reinforced Concrete Bridge beams under corrosion. *Engineering structures*, 20(11), 960-971.