

# Effect of Reinforcement Diameter and Clear Cover Regulations on the Crack Initiation Models Due to Rebar Corrosion

**Seyed Abbas Hosseini**

Assistant Professor, Faculty of Technology and Mining, Yasouj University, Choram, Iran.  
[a.hosseini@yu.ac.ir](mailto:a.hosseini@yu.ac.ir)

## **Abstract**

Reinforcement corrosion is one of the most important factors in reducing the strength and destruction of concrete structures during the lifetime of the structure. Various service life prediction models based on laboratory experiments or numerical analysis are used to predict the behavior of concrete structures in aggressive environments. Models that predict the time to cover cracking induced by corrosion are among the most important service life model in concrete structures. These models have some errors due to the influence of environmental factors and also the existence of uncertainties in the concrete properties. In this study, the effect of environmental conditions that are usually applied in regulations by increasing the thickness of the concrete cover was investigated on existing models. In addition to the concrete cover, the effect of other environmental parameters such as corrosion intensity was also investigated. The effect of uncertainty is applied by applying coefficients of variation to the parameters. The results show the effect of uncertainty of the amount of corrosion current density on the average value of crack initiation time so that by increasing the coefficient of variation of this variable, the predicted time for the occurrence of crack increases. This overestimated time is not conservative. The results also revealed that if the maximum ratio of concrete cover to rebar diameter ( $c/D$ ) is selected in any environmental conditions, the crack initiation time can be delayed approximately 4.3 times.

**Keywords:** Reinforcement Corrosion, Crack, Crack Initiation Time, Environmental Condition

---

Hosseini, S. Effect of Reinforcement Diameter and Clear cover Regulations on the Crack Initiation Models Due to Rebar Corrosion. Journal of Concrete Structures and Materials, 2021; 6(2): 101-116.

<http://doi.org/10.30478/jcsm.2022.323535.1246>

2538-5828/ © 2021 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

# اثر قطر میلگرد و ضوابط ضخامت پوشش بتنی بر مدل‌های رخداده ترک ناشی از خوردگی میلگرد

دریافت مقاله: ۱۴۰۰-۱۰-۲۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰-۱۲-۰۱

سید عباس حسینی

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

[a.hosseini@yu.ac.ir](mailto:a.hosseini@yu.ac.ir)

## چکیده

خوردگی میلگردها یکی از مهمترین عوامل کاهش مقاومت و انهدام سازه‌های بتنی در طی زمان بهره‌برداری از سازه می‌باشد. برای پیش‌بینی رفتار سازه‌های بتنی که در محیط‌های خورنده قرار دارند از مدل‌های مختلف عمر که مبتنی بر تجربیات آزمایشگاهی و یا تحلیل‌های عددی هستند استفاده می‌شود. از مهمترین مدل‌های مورد نظر در سازه‌های بتنی، مدل‌هایی هستند که زمان رخداد ترک‌ها در قطعه بتنی را به واسطه خوردگی میلگرد ارائه می‌دهند. این مدل‌ها، به دلیل تأثیر عوامل محیطی و همچنین وجود عدم قطعیت‌های فراوان در رفتار بتن دارای خطاهایی می‌باشند. یکی از الزامات مبحث نهم مقررات ملی ساختمان برای در نظر گرفتن شرایط محیطی، اعمال حداقل ضخامت پوشش بتن روی میلگردها است. در این پژوهش، اثر ضخامت پوشش بتنی روی میلگردها، قطر میلگردها و همچنین اثر شدت خوردگی میلگرد از طریق اعمال مقادیر مختلف چگالی جریان خوردگی بر نتایج بدست آمده از مهمترین مدل‌های موجود برای پیش‌بینی رخداد ترک بررسی شده است. اثر عدم قطعیت از طریق اعمال ضرایب تغییرات در پارامترها اعمال شده است. نتایج بیانگر اثر عدم قطعیت مقدار چگالی جریان خوردگی در مقدار میانگین زمان آغاز ترک خوردگی است به طوری که با افزایش ضریب تغییرات این متغیر، زمان پیش‌بینی شده برای رخداد ترک در جهت عدم اطمینان افزایش پیدا می‌کند. نتایج همچنین نشان داد در صورت انتخاب بیشینه نسبت پوشش بتن به قطر میلگرد در هر شرایط محیطی می‌توان زمان رخداد ترک را تقریباً تا چهار برابر به تأخیر انداخت. کلمات کلیدی: خوردگی میلگرد، ترک، زمان رخداد ترک، شرایط محیطی.

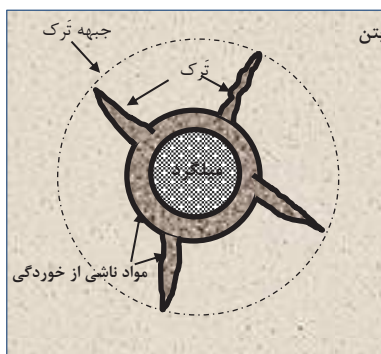
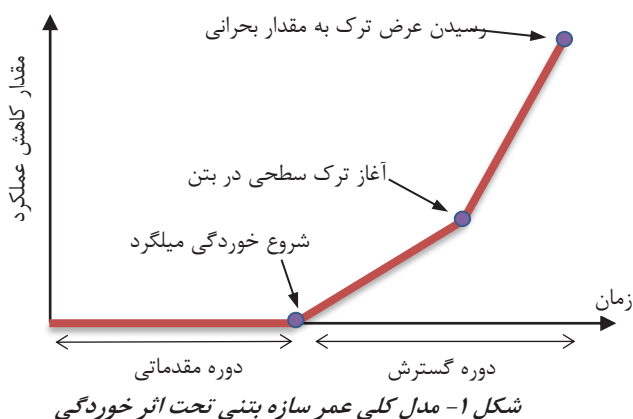
خوردگی میلگردها یکی از مهمترین مسائل مرتبط با دوام سازه‌های بتنی است که در کشورهای توسعه یافته، بخش اعظمی از هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری سازه‌های بتنی صرف عواقب ناشی از خوردگی می‌گردد [۱]. خوردگی میلگرد موجب کاهش سطح مقطع میلگرد، کاهش چسبندگی بین بتن و میلگرد و همچنین کاهش سطح مقطع بتن به دلیل گسترش ترک‌ها خواهد شد [۲]. در میان اثرات مخرب خوردگی، رخداد ترک‌های سطحی در بتن می‌تواند تأثیرات مخرب بیشتری بر دوام سازه بتنی داشته باشد؛ چرا که وجود ترک‌ها می‌تواند مسیر نفوذ عوامل مخرب محیطی را افزایش داده و موجب سرعت بخشیدن به دیگر اثرات شود [۳]. در شرایط اولیه، بتن به دلیل دارا بودن محیط قلیایی ( $pH \approx 13$ ) به عنوان یک محافظ در برابر خوردگی میلگرد عمل می‌کند ولی این لایه محافظ تحت اثر عوامل مهاجمی از قبیل نفوذ یون کلراید و کربناته شدن در معرض خطر قرار می‌گیرد [۴]. مدل‌های مختلفی برای بیان تغییرات عملکردی سازه بتن مسلح در شرایطی که در محیط‌های خورنده قرار دارد ارائه شده است که این مدل‌ها همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، به صورت کلی دوره عمر را به دو نیمه که شامل مرحله مقدماتی و مرحله گسترش خوردگی می‌باشد تقسیم بندی می‌کنند [۵]. در طی دوره مقدماتی که از زمان ساخت سازه شروع می‌شود، سازه به مرور زمان در معرض عوامل مهاجم قرار گرفته و در انتهای این دوره، به دلیل اثر این عوامل، خوردگی آغاز می‌گردد. یکی از مهمترین زمان‌ها، زمان آغاز ترک‌های ناشی از خوردگی است. خوردگی میلگرد منجر به تولید موادی می‌گردد که از نظر حجمی بین ۲ تا ۷ برابر حجم مواد مصرف شده می‌باشد؛ از اینرو این اضافه حجم باعث ایجاد فشار به سمت اطراف میلگرد و به وجود آمدن کشش حلقوی در اطراف میلگرد و در نهایت ایجاد ترک به صورت نشان داده شده در شکل ۲ می‌گردد. محاسبه زمان رخدادهای مرتبط با مدل عمر برای ارائه برنامه‌های تعمیر و نگهداری از اهمیت زیادی برخوردار است. مدل‌های تجربی، تحلیلی و عددی مختلفی برای پیش‌بینی زمان ترک خوردگی میلگرد ارائه شده است [۴، ۶-۱۳]. در اکثر مدل‌های تجربی، قطر میلگرد ( $D$ )، ضخامت پوشش بتنی روی میلگرد ( $c$ ) و شدت جریان خوردگی ( $i_{cor}$ ) سه پارامتر موثر گزارش شده‌اند. همچنین تحقیقات قبلی، نسبت پوشش بتن روی میلگردها به قطر میلگرد ( $c/D$ ) را به عنوان عامل تأثیرگذار در پیش‌بینی رخداد ترک گزارش کرده‌اند [۱۱، ۱۴]. برای ارائه مدل‌های تجربی از روش‌های تسریع خوردگی استفاده شده و همچنین مشاهده ترک‌های با عرض  $0.5/1$  میلی‌متر معمولاً به عنوان معیاری از شروع ترک خوردگی در نظر گرفته شده است [۱۵].

آندراده و همکاران با انجام خوردگی تسریع شده ناشی از یون کلراید گزارش کردند که بدون توجه به شدت چگالی جریان خوردگی، نخستین ترک‌ها وقتی اتفاق می‌افتند که خوردگی موجب کاهش ۲۰ میکرومتر از قطر میلگرد گردد [۶]. تحقیقات رودریگز و همکاران منجر به ارائه مدلی شد که در آیین نامه دوام اروپا مورد استفاده قرار گرفت و طبق نتایج گزارش شده کیفیت بتن و نسبت پوشش بتن به قطر میلگردها در تعیین زمان رخداد ترک مؤثر بوده‌اند [۱۶، ۱۷]. وبستر با جمع‌آوری نتایج آزمایشگاهی بسیاری از محققین دیگر، یک مدل تجربی ساده و مبتنی بر حداقل ضخامت خورده شده میلگرد که برای شروع ترک خوردگی لازم است، ارائه داد [۱۲].

با بررسی نتایج مدل‌های پیشین مشاهده می‌گردد که حتی برای شرایط یکسان، مقادیر ارائه شده برای پیش‌بینی رخداد ترک بسیار متفاوت می‌باشند. به دلیل وجود عدم قطعیت‌های فراوان و همچنین خطاهای اندازه‌گیری، اکتفا به نتایج صرفاً یک مدل در جهت اطمینان نمی‌باشد. اگر در تعیین زمان رخداد ترک، نتایج چند مدل با هم در نظر گرفته شوند می‌توان زمان رخداد ترک را به صورت یک متغیر تصادفی با میانگین و انحراف استاندارد بدست آمده از چندین مدل در نظر گرفت.

با توجه به اینکه آیین‌نامه‌ها به عنوان یکی از الزامات مرتبط با دوام، حداقل ضخامت بتن روی میلگردها را بر اساس شرایط محیطی تعیین می‌کنند، در این پژوهش بر اساس این مقادیر و همچنین قطر میلگردهای مرسوم در

سازه‌های بتن مسلح به ارزیابی مدل‌های موجود پرداخته شده است. شدت جریان خوردگی به همراه عدم قطعیت‌های آن از طریق اعمال ضریب تغییرات نیز در این بررسی در نظر گرفته شده است. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، پارامترهای موثر به صورت متغیر تصادفی با تابع چگالی مربوطه در نظر گرفته شده‌اند و برای تعیین زمان رخداد ترک در هر مدل از روش نمونه‌برداری تصادفی مونت کارلو استفاده شده است. با رویکرد در نظر گرفته شده در این تحقیق برای حالت‌های مختلف استفاده از میلگردها و حداقل ضخامت پوشش بتن روی آنها زمان رخداد ترک به همراه انحراف استاندارد بدست آمده در تحلیل ارائه گردیده است.



شکل ۲- ایجاد خوردگی در میلگرد و توسعه ترک‌ها ناشی از حجم زیاد مواد تولید شده در خوردگی

## ۲- تحلیل مدل‌های تجربی پیش‌بینی رخداد ترک

مدل‌های تجربی پیش‌بینی رخداد ترک ناشی از خوردگی عملاً بر اساس درونیابی نتایج آزمایشگاهی بدست آمده‌اند. در جدول ۱ تعدادی از پرکاربردترین مدل‌های تجربی برای پیش‌بینی زمان رخداد ترک،  $T_{cr}$  (بر حسب سال) ارائه شده است. پارامترهای موجود در این جدول عبارتند از:  $i_{cor}$  چگالی جریان خوردگی بر حسب میکروآمپر بر سانتیمتر مربع،  $c$  پوشش بتن روی میلگردها بر حسب میلیمتر،  $D$  قطر میلگردها بر حسب میلیمتر،  $f_c$  مقاومت کششی بتن بر حسب مگاپاسکال،  $L$  طول خورده شده میلگرد بر حسب میلیمتر. مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، دسته‌بندی‌های مختلفی برای شرایط محیطی از نظر وجود عوامل مهاجم محیطی ارائه کرده است. بر اساس این دسته‌بندی حداقل ضخامت پوشش بتن روی میلگردها ارائه شده است. بر مبنای شرایط ایجاد خوردگی در میلگرد ناشی از یون‌های کلراید (غیر از آب شور دریا)، محیط به چهار دسته که بیانگر میزان خطر از کم تا بسیار زیاد است تقسیم بندی شده است. در جدول ۲ این تقسیم بندی به همراه حداقل

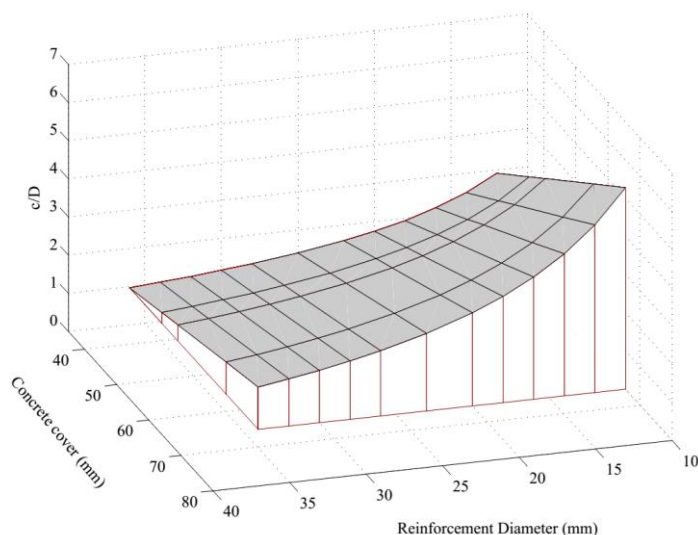
ضخامت پوشش بتن روی میلگردها آورده شده است. با در نظر گرفتن قطر میلگردهای آجدار مورد استفاده در سازه‌های بتن مسلح از ۱۰ تا ۳۶ میلیمتر، کلیه حالت‌های قابل اتفاق از نظر نسبت پوشش به قطر میلگرد ( $c/D$ ) را می‌توان به صورت شکل ۳ نشان داد. با در نظر گرفتن مقادیر حداقل پوشش برای تیرها بر اساس شکل ۴ مشخص است که حداقل نسبت  $c/D$  با افزایش قطر می‌گردد کمتر می‌شود که بر اساس روابط موجود در جدول ۱ این امر می‌تواند باعث ترک خوردگی زود هنگام در پوشش بتن شود. از طرف دیگر، انتخاب نادرست قطر میلگرد می‌تواند رخداد ترک در یک محیط با شدت عوامل مهاجم را نسبت به محیط با شرایط بدتر را تسریع کند، این موضوع در ادامه از طریق محاسبه زمان آغاز ترک خوردگی طبق روابط جدول ۱ ارزیابی شده است.

جدول ۱- مدل‌های تجربی پیش‌بینی رخداد ترک ناشی از خوردگی میلگرد (نفوذ یون کلراید)

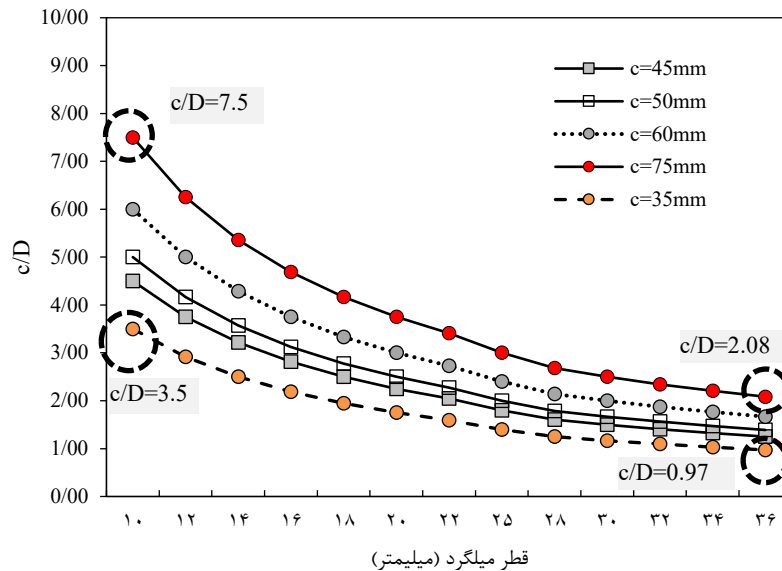
شماره مدل	زمان رخداد ترک، $T_{cr}$	منبع
M1	$[83.8+7.4(c/D)-22.6f_i] \times 10^{-3} / 0.0116i_{cor}$	[18]
M2	$[7.53+9.32(c/D)] \times 10^{-3} / 0.0116i_{cor}$	[6]
M3	$1.25c \times 10^{-3} / 0.0116i_{cor}$	[12]
M4	$[0.011(c/D) \times (c/L+1)^{2.0}] / 0.0116i_{cor}$	[13]

جدول ۲- حداقل پوشش بتنی اجزای مختلف سازه ( $mm$ ) بر اساس شرایط مختلف از نظر اثر خوردگی ناشی از یون کلراید

توصیف و رده شرایط	رطوبت متوسط	مرطوب، به ندرت	تماس مستقیم با خاک	چرخه های تر و خشک شدن (XCD4)
	(XCD1)	خشک (XCD2)	دارای کلراید (XCD2)	شدن (XCD4)
تیر و ستون	۴۵	۵۰	۵۰	۶۰
دالها، تیر فرعی، تیرچه	۳۵	۴۰	۴۰	۵۰
شالوده ها	۵۰	۶۰	۶۰	۷۵



شکل ۳- مقادیر قابل رخداد برای نسبت  $c/D$



شکل ۴- مقادیر قابل رخدادهای نسبت  $c/D$  بر مبنای حداقل پوشش بتنی روی میلگردها طبق آیین‌نامه و قطر میلگردها

## ۲-۲- روش مونت کارلو

روش مونت کارلو (MC) یکی از روش‌های بسیار قدرتمند در تولید و تحلیل متغیرهای تصادفی می‌باشد. بر اساس این روش، برای هر متغیر تصادفی با استفاده از تابع چگالی احتمال آن متغیر به تعداد دلخواه مقادیر تصادفی تولید گردیده و در محاسبه روابطی که متغیر در آن مؤثر است استفاده می‌گردد. بنابراین برای استفاده از روش مونت کارلو باید تابع چگالی احتمال متغیر مشخص باشد. برای تولید متغیر تصادفی در روش مونت کارلو معمولاً از روش انتقال معکوس استفاده می‌گردد. در این روش یک متغیر تصادفی کمکی ( $u_i$ ) که دارای توزیع یکنواخت بین مقادیر صفر و یک ( $0 \leq u_i \leq 1$ ) می‌باشد انتخاب شده و سپس با استفاده از تولیدکننده‌های اعداد تصادفی، برای این متغیر کمکی اعداد بین صفر و یک تولید می‌شود. با علم به اینکه تابع جمع‌ی احتمال هر متغیر مقداری بین صفر تا یک دارد با استفاده از روش انتقال معکوس مقدار متغیر تصادفی  $x$  به ازای هر متغیر تصادفی  $u_i$  تولید شده در مرحله قبل به صورت زیر بدست می‌آید:

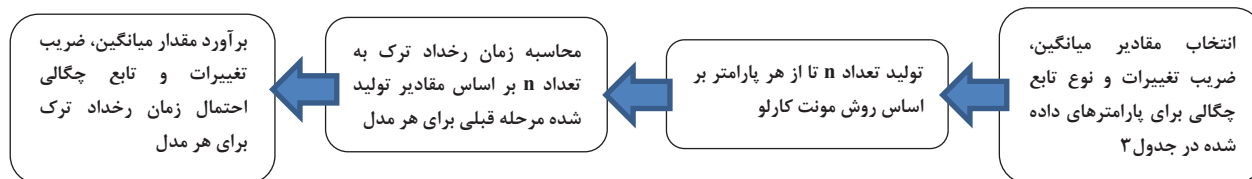
$$F_X(x_i) = u_i \rightarrow x_i = F_X^{-1}(u_i) \quad (1)$$

در این رابطه،  $F_X(x)$  تابع جمع‌ی احتمال متغیر  $x$  و  $F_X^{-1}$  تابع معکوس جمع‌ی احتمال می‌باشد. در تولید متغیرهای تصادفی موجود در یک رابطه باید به احتمال وجود وابستگی بین متغیرها توجه گردد.

## ۲-۳- نتایج زمان رخداد ترک

برای محاسبه زمان رخداد ترک با استفاده از مدل‌های ارائه شده در جدول ۱، پارامترهای مؤثر در مدل‌ها به صورت متغیر تصادفی در نظر گرفته می‌شوند. برای ضخامت پوشش بتنی از مقادیر میانگین ارائه شده در جدول ۲ استفاده شده است. در جدول ۳ مقادیر انحراف استاندارد و همچنین توابع چگالی در نظر گرفته شده برای متغیرها آورده شده است (۱۹، ۲۰). همانطور که از این جدول مشخص است برای چگالی جریان خوردگی سه مقدار ۱، ۳ و ۵ میکروآمپر بر سانتیمتر مربع در نظر گرفته شده است که به نوعی معرف محیط‌های با شدت خوردگی کم تا بسیار زیاد می‌باشد [۲۱]. برای محاسبه  $T_{cr}$  از چهار مقدار نسبت  $c/D$  نشان داده شده در شکل ۴ که به نوعی باندهای بالا و پایین مقادیر این نسبت می‌باشند استفاده شده است. با استفاده از روش نمونه‌برداری تصادفی مونت کارلو بر

مبنای خواص تصادفی پارامترها که در جدول ۳ نشان داده شده است تعداد ۱۰۰۰۰ نمونه تصادفی از هر متغیر تولید شده و زمان‌های رخداد ترک بر اساس مدل‌های ارائه شده در جدول ۲ محاسبه گردید. مقدار میانگین و همچنین ضریب تغییرات زمان رخداد ترک برای هر مدل محاسبه گردید. فرآیند انجام تحلیل در شکل ۵ نشان داده شده است. در شکل‌های ۶ تا ۹ مقدار میانگین و همچنین ضریب تغییرات زمان رخداد ترک برای هر مدل نشان داده شده است. از نرم افزار متلب برای انجام محاسبات استفاده شده است. زمان‌های ارائه شده بیانگر میانگین زمان ترک خوردگی بعد از آغاز خوردگی می‌باشد.



شکل ۵- فرآیند محاسبه زمان رخداد ترک

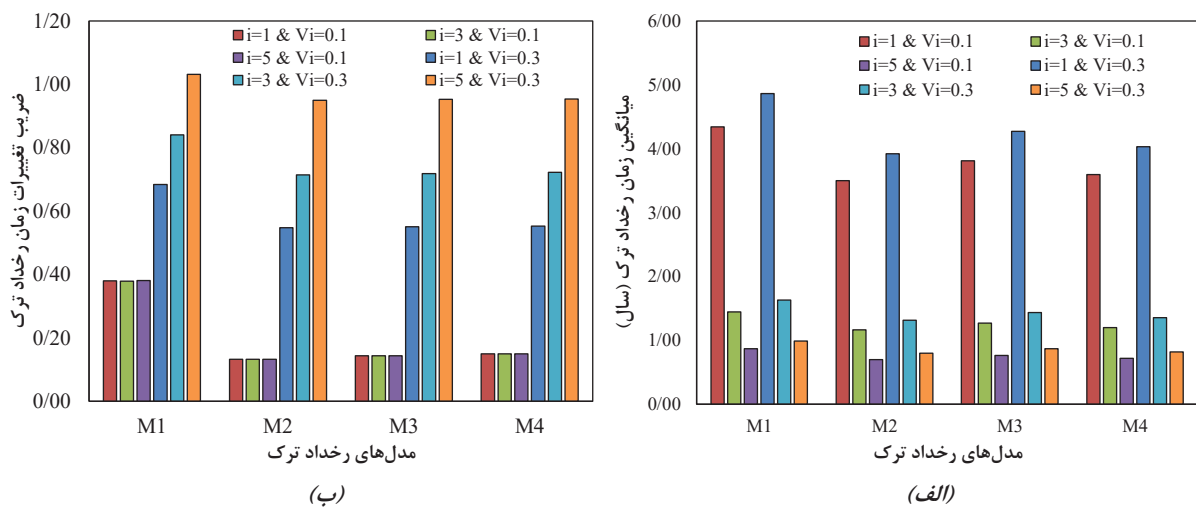
جدول ۳- خواص تصادفی پارامترهای موثر در مدل‌های پیش بینی کننده ترک

متغیر	میانگین	ضریب تغییرات	تابع چگالی احتمال (PDF)
قطر میلگرد، $D$ (mm)	۳۶ ، ۱۰	۰/۰۲	لوگ نرمال
ضخامت پوشش بتن روی میلگرد، $c$ (mm)	۷۵ ، ۳۵	۰/۱	نرمال
مقاومت فشاری بتن، $f_c$ (MPa)	۳۰	۰/۱۵	نرمال
چگالی جریان خوردگی، $i_{cor}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	۵ ، ۳ ، ۱	۰/۳ ، ۰/۱	نرمال

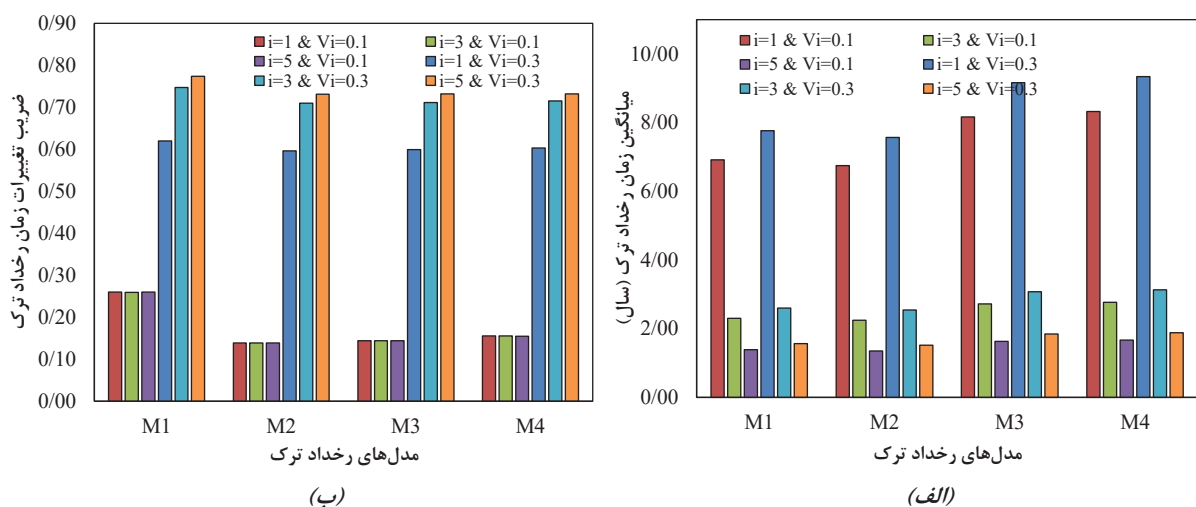
در شکل ۷ برای بزرگترین مقدار نسبت  $c/D$  مقادیر زمان رخداد ترک به همراه ضریب تغییرات آن ارائه شده است. بر اساس نتایج این شکل مشخص است که برای چگالی جریان خوردگی کم (یک میکروآمپر بر سانتیمتر مربع)،  $T_{cr}$  بین ۶/۹ تا ۹/۴ سال بدست آمده است. این زمان برای چگالی جریان خوردگی ۳ و ۵ میکروآمپر بر سانتیمتر مربع به ترتیب بین ۲/۳ تا ۱۳/۱ سال و ۱/۴ تا ۱/۹ سال بدست آمده است. برای کمترین مقدار  $c/D$  که در شکل ۷ نشان داده شده است مقادیر زمان آغاز ترک خوردگی برای چگالی‌های جریان ۱، ۳ و ۵ به ترتیب بین ۱/۰ تا ۴/۳ ، ۰/۳ تا ۱/۴ و ۰/۲ تا ۰/۹ سال بدست آمده است. از نتایج مشخص است که زمان آغاز ترک خوردگی بدست آمده از مدل شماره ۳ از همه مدل‌های دیگر بزرگتر است و اختلاف این مدل وقتی قطر میلگرد بزرگتر می‌شود، به دلیل وابستگی سایر مدل‌ها به قطر میلگرد، بیشتر می‌شود. نکته قابل توجه، اثرگذاری مقدار ضریب تغییرات چگالی جریان خوردگی بر مقدار میانگین زمان آغاز ترک خوردگی است که با افزایش ضریب تغییرات از ۰/۱ به ۰/۳ مشاهده می‌شود که میانگین زمان رخداد ترک در همه مدل‌ها افزایش یافته است. از شکل‌های ۶ تا ۹ همچنین مشخص است که ضریب تغییرات زمان آغاز ترک خوردگی برای حالتی که ضریب تغییرات چگالی جریان خوردگی ۰/۱ می‌باشد با افزایش میانگین چگالی جریان خوردگی ثابت باقی مانده است ولی برای حالتی که چگالی جریان خوردگی ۰/۳ است، ضریب تغییرات زمان آغاز ترک خوردگی با افزایش میانگین چگالی جریان خوردگی بیشتر شده است. دلیل این امر در واقع به خاطر اثرگذاری شکل تابع چگالی احتمال در نظر گرفته شده برای چگالی جریان خوردگی (تابع نرمال) مرتبط می‌باشد. برای مدل‌های شماره ۲، ۳ و ۴ مقدار ضریب تغییرات زمان رخداد ترک وقتی که ضریب تغییرات چگالی جریان خوردگی برابر با ۰/۱ می‌باشد بین ۰/۱۲ تا ۰/۱۶ قرار دارد و مقدار نسبت  $c/D$  تاثیری در این ضریب نداشته است. هرگونه عدم تاثیر خواص تصادفی متغیرهای ورودی یک رابطه بر ضریب تغییرات نتایج می‌تواند به عنوان یک نقطه قوت برای این روابط در نظر گرفته شود. برای مدل شماره ۱ در این

حالت، به دلیل اثر خواص تصادفی مقاومت کششی بتن به عنوان یک پارامتر تاثیرگذار و برهمکنش آن بر خواص تصادفی نسبت  $c/D$ ، مقدار ضریب تغییرات زمان رخداد ترک تحت تاثیر نسبت  $c/D$  قرار گرفته است و با افزایش مقدار  $c/D$  ضریب تغییرات کاهش یافته است.

از نتایج همچنین مشخص است که در مدل شماره ۱ به دلیل اثرگذاری عدم قطعیت ناشی از مقاومت فشاری، مقادیر بدست آمده برای ضریب تغییرات زمان آغاز ترک خوردگی بزرگتر از سایر مدل‌ها بوده است. اثر افزایش ضریب تغییرات چگالی جریان خوردگی از  $0/1$  به  $0/3$  در افزایش عدم قطعیت زمان رخداد ترک زیاد بوده است به طوری که طبق قسمت (ب) شکل‌های ۶ تا ۹ موجب افزایش چندین برابری در مقدار ضریب تغییرات زمان رخداد ترک شده است. در شکل ۱۰ توابع چگالی احتمال بدست آمده برای زمان رخداد ترک نشان داده شده است. این توابع بر اساس نتایج خروجی هر مدل در روش مونت کارلو بدست آمده‌اند. از این شکل می‌توان اثر افزایش ضریب تغییرات چگالی جریان خوردگی در افزایش انحراف استاندارد زمان رخداد ترک را مشاهده کرد که موجب عریض‌تر شدن تابع چگالی احتمال شده است.

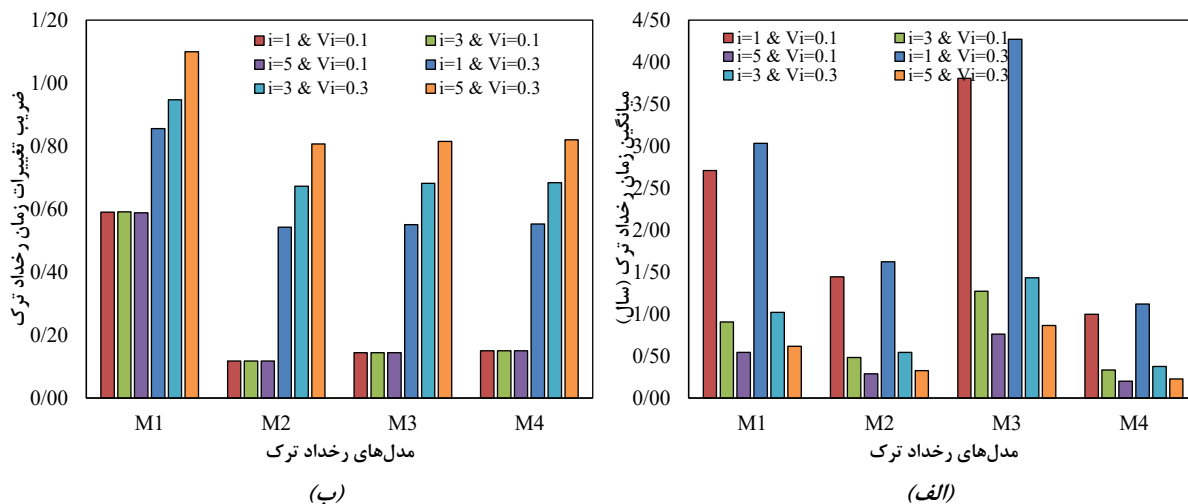


شکل ۶- مقادیر بدست آمده برای  $c/D=3.5$ ، (الف) میانگین زمان رخداد ترک، (ب) ضریب تغییرات زمان رخداد ترک

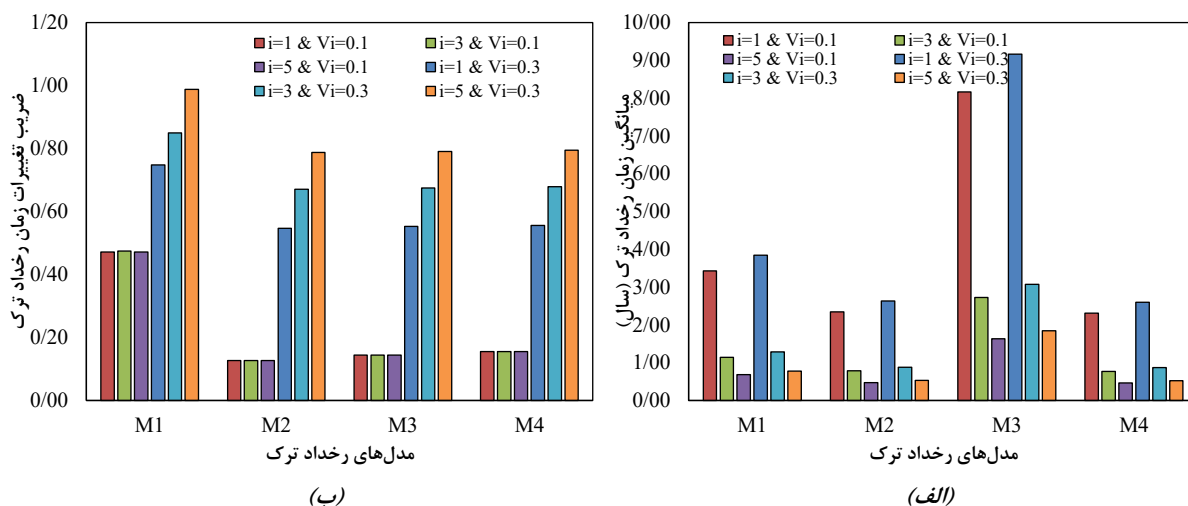


شکل ۷- مقادیر بدست آمده برای  $c/D=7.5$ ، (الف) میانگین زمان رخداد ترک، (ب) ضریب تغییرات زمان رخداد ترک



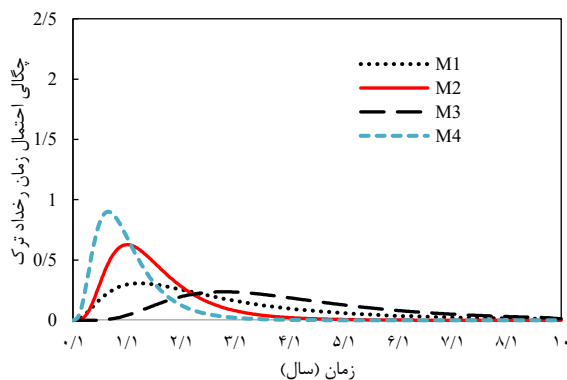


شکل ۸- مقادیر بدست آمده برای  $c/D=0.97$ . (الف) میانگین زمان رخداد ترک، (ب) ضریب تغییرات زمان رخداد ترک

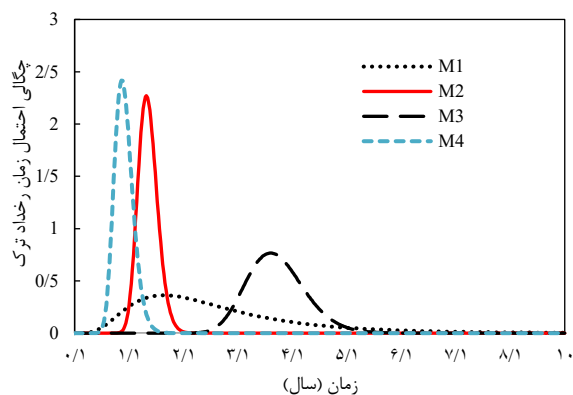


شکل ۹- مقادیر بدست آمده برای  $c/D=2.08$ . (الف) میانگین زمان رخداد ترک، (ب) ضریب تغییرات زمان رخداد ترک

مقدار میانگین زمان رخداد ترک‌های بدست آمده از مدل‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. از این مقادیر می‌توان به عنوان معیاری برای ارائه برنامه‌های تعمیر و نگهداری برای سه حالت نشان داده شده استفاده کرد. برای انتخاب مقادیر برای ارائه برنامه بازرسی‌های دوره‌ای می‌توان به عنوان یک پیشنهاد، بازه بین کمترین و بیشترین مقدار را به عنوان بازه احتمال رخداد ترک در نظر گرفت. در هر صورت چنین ارزیابی نیازمند اطلاعات دیگری از قبیل پیش بینی مقدار چگالی جریان خوردگی است. در این شکل اثر عدم قطعیت چگالی جریان خوردگی در تغییر میانگین زمان رخداد ترک مشهود است. اثرگذاری به صورت بزرگتر شدن زمان رخداد ترک می‌باشد که در جهت عدم اطمینان است.

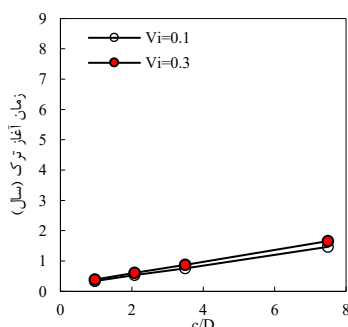


(الف)

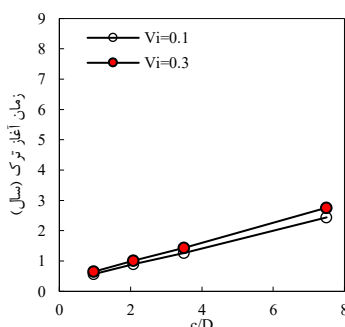


(الف)

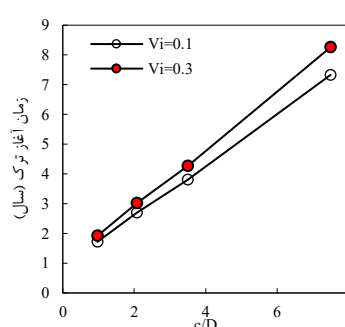
شکل ۱۰- توابع چگالی احتمال زمان رخداد ترک بدست آمده از مدل‌ها ( $icor=1, c/D=0.97$ ) (الف)  $Vi=0.1$ ، (ب)  $Vi=0.3$



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱۱- میانگین زمان رخداد ترک بدست آمده از مدل‌ها بر اساس نسبت  $c/D$  (الف)  $icor=1$ ، (ب)  $icor=3$ ، (ج)  $icor=5$

از نتایج بدست آمده در شکل ۱۱ مشخص است که در هر کدام از وضعیت‌های محیطی در صورت انتخاب بیشینه نسبت  $c/D$  در مقایسه با حالت کمینه  $c/D$  زمان رخداد ترک  $4/30$  برابر خواهد شد. به عنوان نمونه در بخش الف شکل ۱۱ زمان رخداد ترک برای  $c/D$  برابر با  $0/97$  برابر با  $1/92$  سال بدست آمده است و این زمان برای نسبت  $c/D$  برابر با  $7/5$  برابر با  $8/26$  سال بدست آمده است که تایید کننده نسبت فوق است.

### ۳- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر پارامترهای موثر در مدل‌های پیش‌بینی کننده رخداد ترک ناشی از خوردگی میلگرد مورد بررسی قرار گرفت و شرایط محیطی تعریف شده توسط مبحث نهم مقررات ملی ساختمان از نظر شدت یون کلراید در محیط با در نظر گرفتن مقادیر متفاوت پوشش بتنی روی میلگردها در مدل‌سازی اعمال گردید. پارامترها به صورت متغیر تصادفی در نظر گرفته شدند و در مجموع نتایج کلی زیر حاصل گردید:

۱- در همه محیط‌های دسته بندی شده در آیین نامه، احتمال رخداد ترک وجود دارد. هرچند زمان رخداد ترک در محیط با شرایط سخت‌تر (XCD4) به دلیل غلظت یون کلراید باید نسبت به محیط ملایم‌تر (XCD1) زودتر اتفاق بیفتد ولی نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که در صورتیکه نسبت پوشش بتن به قطر میلگرد ( $c/D$ ) به صورت مناسب انتخاب نگردد، در محیط ملایم رخداد ترک زودتر اتفاق خواهد افتاد.

۲- افزایش عدم قطعیت در چگالی جریان خوردگی که از طریق ضریب تغییرات در نظر گرفته شده است موجب تغییر در مقدار میانگین زمان رخداد ترک پیش‌بینی شده از مدل‌ها می‌گردد و این تغییر چون باعث بزرگتر شدن زمان پیش‌بینی شده می‌شود، در جهت عدم اطمینان می‌باشد.

۳- با انتخاب نسبت پوشش به قطر میلگرد بیشینه می‌توان زمان آغاز ترک خوردگی پوشش بتن را تقریباً تا چهار برابر به تأخیر انداخت.

1. Zhang, X., et al., *Effects of initial defects within mortar cover on corrosion of steel and cracking of cover using X-ray computed tomography*. *Construction and Building Materials*, 2019. 223: p. 265-277.
2. Guzmán, S. and J.C. Gálvez, *Modelling of concrete cover cracking due to non-uniform corrosion of reinforcing steel*. *Construction and Building Materials*, 2017. 155: p. 1063-1071.
3. Liang, Y. and L. Wang, *Prediction of corrosion-induced cracking of concrete cover: A critical review for thick-walled cylinder models*. *Ocean Engineering*, 2020. 213: p. 107688.
4. Qiao, D., et al., *Crack patterns of concrete with a single rebar subjected to non-uniform and localized corrosion*. *Construction and Building Materials*, 2016. 116: p. 366-377.
5. Otieno, M., J. Ikotun, and Y. Ballim, *Experimental investigations on the influence of cover depth and concrete quality on time to cover cracking due to carbonation-induced corrosion of steel in RC structures in an urban, inland environment*. *Construction and Building Materials*, 2019. 198: p. 172-181.
6. Andrade, C., C. Alonso, and F. Molina, *Cover cracking as a function of bar corrosion: Part I- Experimental test*. *Materials and structures*, 1993. 26(8): p. 453-464.
7. Zhong, J., P. Gardoni, and D. Rosowsky, *Stiffness degradation and time to cracking of cover concrete in reinforced concrete structures subject to corrosion*. *Journal of engineering mechanics*, 2010. 136(2): p. 209-219.
8. Vidal, T., A. Castel, and R. François, *Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete*. *Cement and concrete research*, 2004. 34(1): p. 165-174.
9. Bazant, Z.P., *Physical model for steel corrosion in concrete sea structures-theory*. *ASCE J Struct Div*, 1979. 105(6): p. 1137-1153.
10. Sanz, B., J. Planas, and J. Sancho, *A closer look to the mechanical behavior of the oxide layer in concrete reinforcement corrosion*. *International Journal of Solids and Structures*, 2015. 62: p. 256-268.
11. Rodriguez, J., et al., *12 CORROSION OF REINFORCEMENT AND SERVICE LIFE OF CONCRETE STRUCTURES*. *Durability of Building Materials & Components 7 vol. 1*, 2018: p. 117.
12. Webster, M.P., *The assessment of corrosion-damaged concrete structures*. 2000, University of Birmingham.
13. Torres-Acosta, A.A. and A.A. Sagues, *Concrete cracking by localized steel corrosion--Geometric effects*. *Materials Journal*, 2004. 101(6): p. 501-507.
14. Zhao, X., et al., *Research on corrosion detection for steel reinforced concrete structures using the fiber optical white light interferometer sensing technique*. *Smart materials and structures*, 2013. 22(6): p. 065014.
15. Jamali, A., et al., *Modeling of corrosion-induced concrete cover cracking: A critical analysis*. *Construction and Building Materials*, 2013. 42: p. 225-237.
16. DuraCrete, *Modeling of degradation*. 1998: BRITE-EURAM-project BE95-1347/R4-5.
17. Rodriguez, J., et al., *Assessing structural conditions of concrete structures with corroded reinforcement*. *Concrete Repair, Rehabilitation and Protection (Edited by RK Dhir and MR Jones)*, E & FN Spon, London, 1996: p. 65-78.
18. Rodriguez, J., L. Ortega, and J. Casal. *Corrosion of reinforcing bars and service life of reinforced concrete structures: corrosion and bond deterioration*. in *International conference on concrete across borders*, Odense, Denmark. 1994.
19. Nowak, A.S. and K.R. Collins, *Reliability of structures*. 2012: CRC Press.
20. Ellingwood, B.R. and Y. Mori, *Probabilistic methods for condition assessment and life prediction of concrete structures in nuclear power plants*. *Nuclear engineering and design*, 1993. 142(2-3): p. 155-166.
21. Bhargava, K., Y. Mori, and A. Ghosh, *Time-dependent reliability of corrosion-affected RC beams— Part 1: Estimation of time-dependent strengths and associated variability*. *Nuclear Engineering and Design*, 2011. 241(5): p. 1371-1384.