

## محاسبه احتمالاتی آغاز خوردگی میلگرد با استفاده از روش‌های قابلیت اطمینان

سید عباس حسینی \*

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

### چکیده

خوردگی میلگردها بر اثر نفوذ یون کلر در سازه‌های بتنی مجاور دریا و همچنین پل‌های مناطق برف‌خیز موجب به مخاطره افتادن این سازه‌ها در طی زمان بهره‌برداری می‌گردد؛ بنابراین، در برخی از این سازه‌ها آغاز خوردگی به عنوان یکی از شرایط حدی بهره‌برداری منظور می‌گردد. روش‌های مختلفی برای محاسبه آغاز خوردگی وجود دارد که به دلیل وجود عدم قطعیت‌های فراوان در مدل‌های موجود، زمان محاسبه شده برای آغاز خوردگی با خطاهایی همراه می‌باشد. در این مقاله با استفاده از روش‌های محاسباتی مربوط به ایمنی و نمونه‌برداری مونت کارلو (MC) به ارزیابی احتمال آغاز خوردگی میلگرد در شرایط مختلف پرداخته شده است. به عنوان یک رویکرد جدید بر اساس سطوح عملکردی مختلف سازه، مقادیر احتمال آغاز خوردگی با احتمال رخداد ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد به منظور در نظر گرفتن درجه اهمیت سازه و همچنین ارائه برنامه‌های تعمیر و نگهداری سازه محاسبه گردیده است. کیفیت بتن و همچنین شدت عوامل محیطی به عنوان دیگر پارامترهای اساسی در این بررسی مورد استفاده قرار گرفته است. عدم قطعیت در زمان محاسبه شده برای آغاز خوردگی بر اساس خواص آماری پارامترهای موثر در مدل نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج بدست آمده افزایش کیفیت بتن از طریق کاهش نفوذپذیری، تأثیر بیشتری در افزایش زمان تا اولین بازرسی از سازه بتنی دارد.

واژه‌های کلیدی: زمان آغاز خوردگی میلگرد، قابلیت اطمینان، دوام بتن، نفوذ یون کلر، ارزیابی احتمالاتی.

\* نویسنده مسئول: a.hosseini@yu.ac.ir

## ۱- مقدمه

و همکاران به بررسی اثرات تصادفی پارامترها موثر در شروع خوردگی پرداختند ولی در این محاسبات اثر درجه اهمیت سازه در نظر گرفته نشده است [۷]. ساسوح و لونیز<sup>۶</sup> با استفاده از روش‌های تحلیلی قابلیت اطمینان به محاسبه احتمال آغاز خوردگی پرداخته‌اند ولی درجه اهمیت سازه را در احتمال رخداد خوردگی در نظر نگرفته‌اند و برای همه شرایط، این احتمال را یکسان فرض کرده‌اند [۸].

در این مقاله به عنوان یک رویکرد جدید بر اساس درجه اهمیت سازه سطوح احتمال آغاز خوردگی نیز متغیر فرض گردیده است و بر اساس آن، میانگین زمان آغاز خوردگی و خواص تصادفی آن بدست آمده است. ارائه نتایج بر اساس این فرضیات منجر به ارائه برنامه تعمیر و نگهداری بر اساس درجه اهمیت سازه و درجه شدت اثرات محیطی بر سازه خواهد گردید.

## ۲- زمان آغاز خوردگی

## ۱-۲- مکانیزم پخش

برای خوردگی میلگرد ناشی از نفوذ یون کلر، مرحله مقدماتی به زمانی اطلاق می‌گردد که میزان غلظت یون کلر در اطراف میلگرد به حد بحرانی برسد. مکانیسم نفوذ یون‌های کلر بسته به شرایط محیطی نیز متفاوت می‌باشد. قطعات بتنی که بیشتر عمر خود در محیط مرطوب قرار دارند؛ بیشتر تحت پدیده پخش قرار دارند که این پدیده، انتقال جرم یون‌های آزاد در محلول منافذ از محیط با غلظت بالاتر به محیط با غلظت پایین‌تر می‌باشد. قانون دوم فیک<sup>۷</sup> این پدیده را تشریح می‌کند [۹]:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

در این رابطه  $C(x,t)$  بیانگر غلظت یون‌های کلر در عمق  $x$  و در زمان  $t$  می‌باشد و  $D$  ضریب پخش کلر در بتن است. در حقیقت این رابطه تشریح می‌کند که پدیده پخش موجب تغییر میزان غلظت یون کلر در طی زمان ( $t$ ) و در عمق ( $x$ ) می‌گردد. با حل رابطه (۱) برای شرایط مرزی مختلف، میزان غلظت یون کلر در هر زمان در هر فاصله‌ای از سطح بتن به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

سازه‌های بتنی در طی زمان تحت اثر عوامل محیطی مخربی قرار دارند که این عوامل به مرور بر عملکرد سازه اثر می‌گذارند. توجه به اثر این عوامل برای برآورد میزان هزینه‌های تعمیر و نگهداری و همچنین ارزیابی میزان خطری که عملکرد سازه را تهدید می‌کند مهم می‌باشد. در سازه‌های بتنی مجاور دریا و همچنین در پل‌ها و پارکینگ‌های بتنی در مناطق برف خیز که در فصل زمستان از نمک برای ذوب برف جاده‌ها استفاده می‌شود، به دلیل وجود یون کلر، میلگردها در خطر خوردگی قرار می‌گیرند. خوردگی میلگرد باعث کاهش سطح مقطع میلگرد، کاهش باند بین بتن و میلگرد و توسعه ترک‌های سطحی می‌گردد [۱]. به دلیل رخداد آثار ثانویه ناشی از خوردگی و در برخی دیگر به دلیل زیاد بودن هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری بعد از رخداد خوردگی، از عدم شروع خوردگی به عنوان یک شرط حدی، مخصوصاً در سازه‌های با اهمیت زیاد استفاده می‌گردد [۲]. نفوذ یون کلر در بتن و رسیدن غلظت آن به حد بحرانی در اطراف میلگرد به عنوان یکی از مهمترین عوامل ایجاد خوردگی در سازه‌های بتنی شناخته شده است. به دلیل پیچیده بودن مکانیزم نفوذ یون کلر که ترکیبی از مکانیزم‌های انتقال شامل پخش<sup>۱</sup>، مکش موئینگی<sup>۲</sup>، اثر فشار هیدرواستاتیکی<sup>۳</sup> و غیره می‌باشد عدم قطعیت‌های زیادی در مدل‌های پیش‌بینی کننده آغاز خوردگی وجود دارد [۳]. این عدم قطعیت‌ها علاوه بر مدل، ناشی از عدم قطعیت‌های فیزیکی موجود در پارامترهای محیطی نیز می‌باشند. مهمترین مکانیسم توصیف کننده نفوذ یون کلر، مکانیسم پخش است که بر اساس قانون دوم فیک محاسبه می‌گردد [۴]. مهمترین پارامترهای موجود در این مدل شامل ضریب پخش، ضخامت بتن روی میلگرد، غلظت یون کلر سطحی، اولیه و بحرانی می‌باشد. تحقیقات محدودی در زمینه اثر خواص تصادفی این پارامترها در زمان آغاز خوردگی صورت گرفته است. بمفورث<sup>۴</sup> اثر تغییر خواص تصادفی این پارامترها را در شکل توزیع آماری زمان آغاز خوردگی مورد بررسی قرار داده است [۵]. باهارگاوا<sup>۵</sup> و همکاران اثر خواص تصادفی زمان آغاز خوردگی بر قابلیت اطمینان را مورد توجه قرار داده‌اند [۶]. شایانفر

<sup>5</sup> Bhargava<sup>6</sup> Saassouh & Lounis<sup>7</sup> Fick's 2<sup>nd</sup> law<sup>1</sup> Diffusion<sup>2</sup> Capillary suction<sup>3</sup> hydrostatic head<sup>4</sup> Bamforth

مفید سازه‌های بتنی که یک مدل غیر احتمالاتی می‌باشد تقریباً همین محدوده به کار گرفته می‌شود [۱۴].

$$C(x,t) = C_0 + (C_s - C_0) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \right] \quad (2)$$

در این رابطه،  $C_0$ ، غلظت اولیه یون کلر درون بتن،  $C_s$ ، غلظت یون کلر روی سطح بتن و  $\operatorname{erf}(\cdot)$  تابع خطا می‌باشد. در این رابطه ضریب پخش و بقیه پارامترها در طی زمان ثابت در نظر گرفته شده‌اند. به عنوان معیاری از آغاز خوردگی میلگرد ناشی از نفوذ یون کلر، به محاسبه افزایش غلظت این یون روی میلگرد در طی زمان پرداخته می‌شود و با رسیدن این غلظت به مقدار بحرانی ( $C_{cr}$ ) خوردگی میلگرد آغاز می‌شود. زمان شروع خوردگی میلگرد ( $T_i$ ) با برابر قرار دادن رابطه (۲) با مقدار بحرانی ( $C_{cr}$ ) در روی سطح میلگرد ( $x=a$ ) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$T_i = \frac{a^2}{4D} \left( \operatorname{erf}^{-1} \left( \frac{C_s - C_{cr}}{C_s - C_0} \right) \right)^2 \quad (3)$$

در این رابطه،  $a$ ، ضخامت پوشش سطحی بتن و  $\operatorname{erf}^{-1}$  معکوس تابع خطا می‌باشد.

### ۲-۲- کلر بحرانی

مقدار کلر بحرانی برای آغاز خوردگی میلگرد تحت اثر عوامل مختلفی از قبیل؛ نوع بتن، نسبت آب به سیمان، دما و میزان اکسیژن، قرار دارد. اثر این عوامل باعث شده است که مقادیر بدست آمده برای کلر بحرانی دارای تغییرات نسبتاً زیادی نسبت به هم باشند به طوری که مقادیر گزارش شده در محدوده ۰/۲ درصد تا ۲ درصد مقدار سیمان قرار می‌گیرد [۱۰]. این محدوده حتی تا ۳ درصد مقدار سیمان نیز گزارش شده است [۱۱]. بدلیل غیر همگن بودن بتن، مقدار بحرانی یون کلر برای شروع خوردگی در نقاط مختلف یک سازه نیز می‌تواند متغیر باشد. آیین‌نامه بتن آمریکا مقدار مجاز یون کلر محلول در آب بتن را به مقدار محافظه کارانه ۰/۱۵ درصد مقدار سیمان برای قطعات بتنی که در زمان بهره‌برداری در معرض رطوبت و یون کلر قرار دارند محدود می‌کند [۱۲]. در مدل احتمالاتی طراحی بر اساس دوام اروپا، مقدار بحرانی براساس این تعریف که زمان آغاز خوردگی دارای نشانه‌های تخریب سازه باشد بر اساس مقدار آب به سیمان در محدوده ۰/۵ تا ۰/۹ درصد وزن سیمان تعریف شده است [۱۳]. در مدل ایرانی تخمین عمر

### ۳-۲- ضریب پخش

ضریب پخش، معرف خاصیت نفوذپذیری بتن در برابر یون کلر است. عوامل زیادی بر مقدار این ضریب اثر می‌گذارند که مهمترین آن نسبت آب به سیمان می‌باشد. بیشتر مدل‌های معرفی شده بر اساس نسبت آب به سیمان، مقدار ضریب پخش را ارائه داده‌اند [۱۵]. در این مدل‌ها با افزایش این نسبت، ضریب پخش نیز افزایش می‌یابد. در محاسبه رابطه (۲)، ضریب پخش در طی زمان ثابت در نظر گرفته شده بود اما نتایج تجربی حاکی از افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ یون‌های کلر در طی زمان و در نتیجه کاهش ضریب پخش با گذشت زمان می‌باشد [۱۶].

### ۳-۳- قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان، احتمال عملکرد ایمن سازه بر اساس شرایط حدی تعریف شده برای آن می‌باشد که در واقع قرینه احتمال خرابی یا احتمال عدول سازه از شرایط حدی تعریف شده می‌باشد. اگر مقاومت یا ظرفیت قطعه که ترکیبی از متغیرهای تصادفی موثر است با  $R$  و نیاز یا بارهای وارده به صورت  $S$  نمایش داده شوند در این صورت، تابع شرایط حدی  $g(r,s)$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$g(r,s) = R - S \quad (4)$$

مبنای محاسبه احتمال خرابی به صورت زیر می‌باشد:

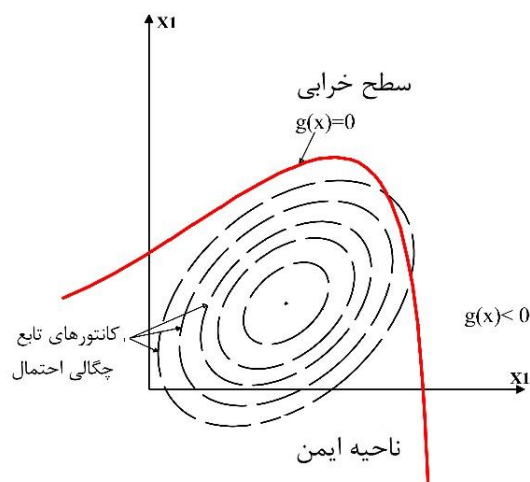
$$P_f = P[g(X) < 0] = \int_{g(x) < 0} f_X(x) \quad (5)$$

در این رابطه،  $X$ ، بردار طراحی است که شامل متغیرهای موثر در طراحی، شامل؛ ابعاد، بارهای وارده، مشخصات مواد می‌باشد که به صورت متغیرهای تصادفی تعریف می‌گردند.  $f_X(x)$  تابع چگالی احتمال متغیرهای پایه و  $g(X)$  تابع شرایط حدی است که بر اساس متغیرهای تصادفی تعریف می‌شود. بازه  $g(X) \leq 0$  معرف فضایی است که مقادیر متغیرهای پایه تابع شرایط حدی را ارضا نمی‌کنند، بنابراین مقدار این انتگرال بر روی این فضا بیانگر احتمال خرابی خواهد بود. در شکل ۱ فضای متغیرهای تصادفی و تابع شرایط حدی برای دو متغیر تصادفی نشان داده شده است.

با استفاده از رویکرد قابلیت اطمینان، اگر میزان کلر بحرانی به عنوان حد مقاومت و میزان کلر در روی سطح میلگرد به عنوان اثر خارجی (بار) در نظر گرفته شود، می توان تابع شرایط حدی را به صورت زیر تعریف کرد:

$$g(C_s, D, C_{cr}, C_0, a) = C_{cr} - C(c, t) = C_{cr} - \left\{ C_0 + (C_s - C_0) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{a}{\sqrt{4Dt}} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

با استفاده از رابطه بالا و روش های قابلیت اطمینان می توان میزان احتمال آغاز خوردگی میلگرد در هر زمان مشخص را بدست آورد.



شکل ۱- فضای متغیرهای تصادفی و تابع شرایط حدی

#### ۴- مدل سازی و نتایج

به منظور محاسبه احتمال ایجاد خوردگی در میلگرد در شرایط محیطی مختلف از رابطه (۳) استفاده می شود. برای داده های ورودی از مقادیر حدود بالا و پایین گزارش شده در منابع مختلف به صورت نشان داده شده در جدول ۱ استفاده می شود. در این جدول همچنین برای پوشش میلگرد از مقادیر حداقل آیین نامه ACI برای شرایط محیطی مختلف استفاده گردیده است.

یکی از مهمترین روش ها برای محاسبه احتمال عدول از شرایط حدی، روش های نمونه برداری تصادفی است. شناخته شده ترین و قوی ترین روش شبیه سازی تصادفی، روش مونت کارلو (MC) می باشد که احتمال خرابی را بر اساس یک میانگین گیری آماری از نمونه های تولید شده از توابع چگالی احتمال پارامترها بدست می آورد [۱۷].

جدول ۱- مقادیر پارامترهای ورودی مدل تصادفی پخش

متغیر	واحد	میانگین	ضریب تغییرات	توزیع آماری
کلر بحرانی ( $C_{cr}$ )	$\text{Kg/m}^3$	۰/۸ و ۱/۰	۰/۱	لوگ نرمال
ضریب پخش ( $D_0$ )	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	۱ و ۳ و ۵	۰/۳۵	لوگ نرمال
کلر سطحی ( $C_s$ )	$\text{Kg/m}^3$	۲/۵ و ۵ و ۸	۰/۱۰	لوگ نرمال
پوشش بتن (c)	cm	۵	۰/۱۵	نرمال

خوردگی که بیانگر میزان عدم قطعیت در نتایج بدست آمده می باشد در محدوده ۰/۴۸ تا ۰/۵۲ در نوسان است که این مقدار بیانگر میانگین ۵۰ درصد عدم قطعیت در زمان آغاز خوردگی محاسبه شده می باشد.

محاسبه احتمال آغاز خوردگی در هر زمان موجب می شود بر اساس میزان ریسک موجود، به ارزیابی و اقدامات پیش گیرانه اقدام نمود. بسته به درجه اهمیت سازه، شرایط حدی متفاوتی را می توان برای آن تعریف کرد که این شرایط حدی می تواند متأثر از شرایط محیطی نیز باشد. به عنوان یک شرط حدی که در رابطه (۶) تعریف گردید شروع خوردگی به عنوان یک حالت بحرانی در سازه

با استفاده از مقادیر جدول ۱، ابتدا زمان آغاز خوردگی برای شرایط مختلف محاسبه می گردد. برای محاسبه خواص آماری زمان بدست آمده، از روش مونت کارلو استفاده می گردد در این تحقیق از  $10^6$  نمونه تصادفی برای محاسبه زمان آغاز خوردگی استفاده شده است. زمان آغاز خوردگی و مقدار ضریب تغییرات آن که از تقسیم انحراف استاندارد نتایج بر مقدار میانگین بدست آمده است در جدول ۲ آورده شده است. از جدول ۲ مشخص است که با افزایش میزان کلر سطحی و ضریب پخش، میانگین زمان آغاز خوردگی کاهش پیدا می کند و افزایش غلظت کلر بحرانی موجب به تاخیر افتادن آغاز خوردگی می گردد. ضریب تغییرات زمان

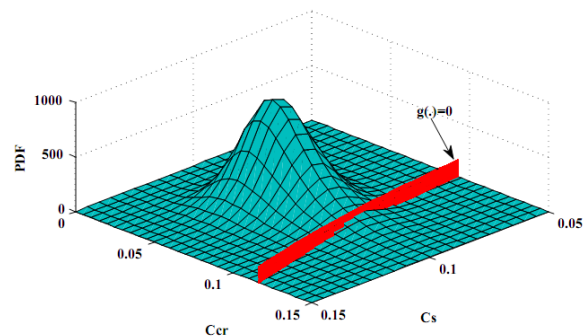
<sup>1</sup> Monte Carlo

مقدار کلر سطحی کمتر از ۲/۵ کیلوگرم بر مترمکعب باشد تحت عنوان شرایط محیطی ملایم نامگذاری می‌گردد و شرایطی که مقدار کلر سطحی بین ۲/۵ تا ۵ و ۵ تا ۸ کیلوگرم بر مترمکعب باشد، به ترتیب تحت عنوان شرایط محیطی متوسط و شدید تعریف می‌گردد. کیفیت بتن از نظر شاخص‌های دوام را نیز بر اساس میزان نفوذپذیری در برابر یون کلر به سه دسته زیاد، متوسط و کم تقسیم‌بندی می‌کنیم که درجه زیاد بیانگر نفوذپذیری بالای بتن می‌باشد. شایان توجه است که این نوع درجه بندی کیفی بتن تنها برای مواقعی کاربرد دارد که عامل مهاجم اصلی اثرگذار بر بتن، نفوذ یون کلر باشد. هرچند به صورت تقریبی می‌توان نفوذپذیری بتن را به صورت غیر مستقیم به کیفیت بتن ارتباط داد.

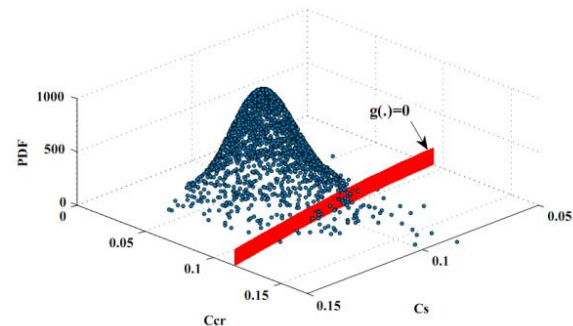
جدول ۲- مقدار میانگین و انحراف استاندارد زمان آغاز خوردگی برای شرایط مختلف

انحراف استاندارد	میانگین زمان آغاز خوردگی (سال)	کلر سطحی ( $C_s$ )	ضریب پخش ( $D_0$ )	کلر بحرانی ( $C_{cr}$ )
۰/۵۲	۴۷/۵۶	۲/۵		
۰/۴۹	۲۳/۳۳	۵/۰	۱	
۰/۴۸	۱۶/۹۴	۸/۰		
۰/۵۲	۱۵/۸۵	۲/۵		
۰/۴۸	۷/۷۷	۵/۰	۳	۰/۸
۰/۴۸	۵/۶۴	۸/۰		
۰/۵۲	۹/۵	۲/۵		
۰/۴۸	۴/۶۶	۵/۰	۵	
۰/۴۸	۳/۳۸	۸/۰		
۰/۵۲	۶۷/۹	۲/۵		
۰/۴۹	۲۸/۱۵	۵/۰	۱	
۰/۴۸	۱۹/۵۱	۸/۰		
۰/۵۳	۲۲/۶۲	۲/۵		
۰/۴۹	۹/۳۷	۵/۰	۳	۱/۰
۰/۴۸	۶/۴۹	۸/۰		
۰/۵۲	۱۳/۵۶	۲/۵		
۰/۴۹	۵/۶۳	۵/۰	۵	
۰/۴۸	۳/۸۹	۸/۰		

تعریف می‌گردد و بر اساس این شرط حدی می‌توان در هر زمان از عمر سازه با توجه به شرایط محیطی احتمال برقرار نشدن این ضابطه را بررسی نمود. با استفاده از روش نمونه‌برداری تصادفی مونت کارلو و با استفاده از شرایط محیطی تعریف شده در جدول ۱ و استفاده از رابطه (۶) به عنوان تابع شرایط حدی، مقدار احتمال آغاز خوردگی در هر زمان از آغاز ساخت سازه بتنی محاسبه می‌گردد. در شکل ۲ فضای متغیرهای تصادفی کلر سطحی و کلر بحرانی به همراه تابع شرایط حدی در این فضا آورده شده است، در قسمت (ب) این شکل نمونه‌های تولید شده در روش مونت کارلو در این فضا نشان داده شده است که نسبت نمونه‌های قرار گرفته در ناحیه  $g > 0$  به کل نمونه‌ها بیانگر احتمال آغاز خوردگی در زمان مورد نظر می‌باشد. در شکل ۳ نیز همانند شکل ۲ فضای متغیرهای تصادفی و تابع شرایط حدی برای ضریب پخش و پوشش بتن روی میلگرد آورده شده است.

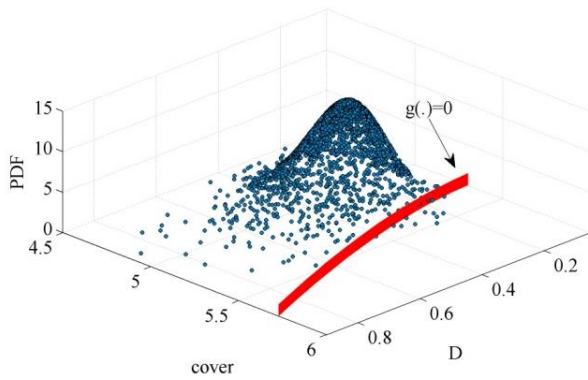


(الف) فضای اصلی

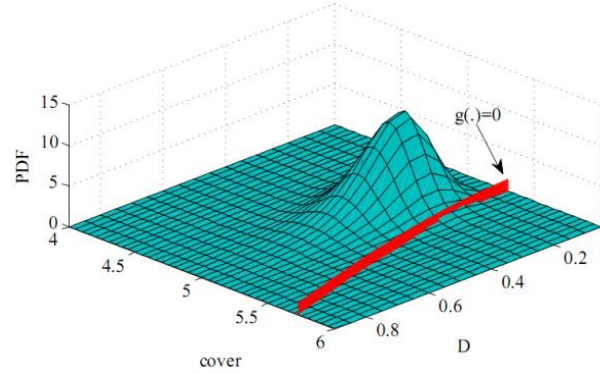


(ب) نمونه‌های تصادفی تولید شده

شکل ۲- فضای متغیرهای تصادفی ( $C_{cr}$  و  $C_s$ ) و تابع شرایط حدی بر مبنای اینکه شرایط قرارگیری سازه به چه صورت می‌باشد، می‌توان بر اساس باندهای بالا و پایین مقدار یون کلر موجود در محیط، یک تقسیم‌بندی کیفی برای شرایط محیطی انجام داد. مقادیر ارائه شده در جدول ۱ برای کلر سطحی بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی دیگر محققان گزارش شده است، بنابراین در صورتی که



(ب) نمونه های تصادفی تولید شده

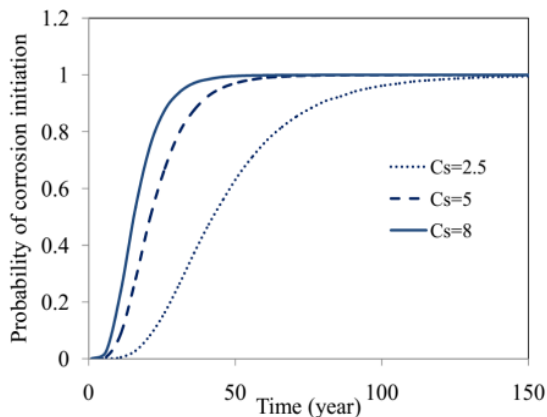
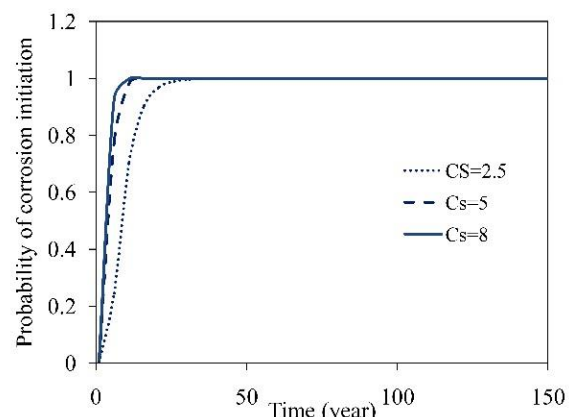
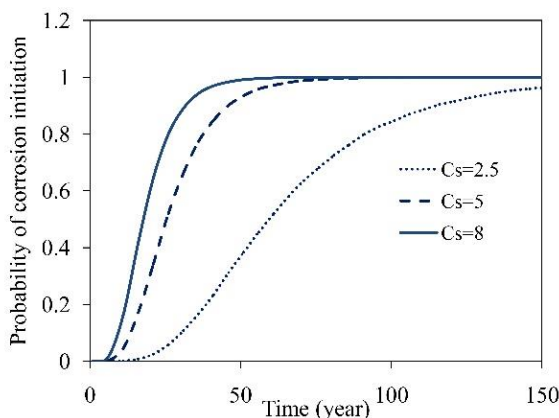
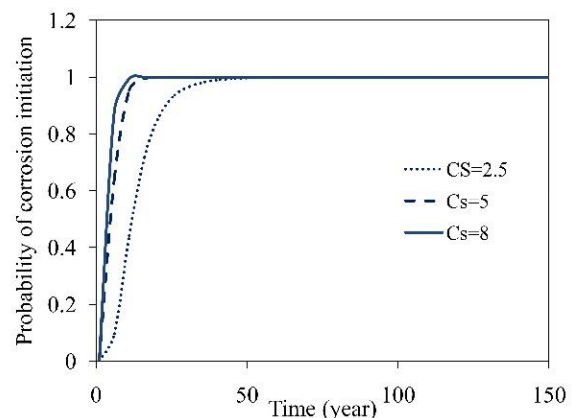


(الف) فضای اصلی

شکل ۳- فضای متغیرهای تصادفی (C و D) و تابع شرایط حد

خوردگی کوچکتری تعریف می‌شود، بر این اساس احتمال آغاز خوردگی با مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد برای سازه‌های با اهمیت زیاد، متوسط و کم اختصاص داده می‌شود. در شکل‌های ۴ و ۵ تابع تجمعی احتمال آغاز خوردگی برای مقادیر مختلف شرایط محیطی و کیفیت بتن نشان داده شده است.

بر اساس تقسیم بندی‌های انجام شده، برای اینکه برای هر شرایط محیطی و برای هر کیفیت بتنی بتوان بسته به درجه اهمیت سازه، برنامه‌های بازرسی و احیانا تعمیر و نگهداری تعریف کرد، احتمال‌های مختلفی برای شروع خوردگی تعریف می‌کنیم. مبنای این احتمال دهی بدین صورت است که برای سازه‌های با اهمیت بیشتر، مقدار احتمال آغاز

(ب)  $D_0=1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (الف)  $D_0=5.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ شکل ۴- تابع تجمعی احتمال برای کلر بحرانی برابر با  $0.8 \text{ kg/m}^3$ (ب)  $D_0=1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (الف)  $D_0=5.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ شکل ۵- تابع تجمعی احتمال برای کلر بحرانی برابر با  $1.0 \text{ kg/m}^3$

بر اساس این نمودارها می توان بر مبنای احتمال مورد نظر، بازه زمانی را که سازه حداکثر تا آن زمان باید مورد تعمیر و نگهداری قرار گیرد محاسبه نمود. مقادیر این سالها بر اساس تقسیم بندی های کیفی بیان شده در قبل، در جداول ۳ و ۴ آورده شده است. بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل های ۴ و ۵ مشخص است که با افزایش غلظت کلر سطحی که بیانگر شرایط محیطی است، تابع

جدول ۳- زمان (سال) انجام اولین بازرسی برای کاهش خطر خوردگی برای سطوح عملکردی و شرایط مختلف محیطی ( $C_{Cr} = 0.80 \text{ kg/m}^3$ )

شرایط محیطی		ملازم			متوسط			شدید	
درجه اهمیت سازه		کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط
زیاد		۱۱/۷۲	۸/۴۳	۶/۰۶	۵/۷۱	۴/۲۰	۳/۰۹	۴/۱۴	۳/۰۵
متوسط	نفوذ پذیری بتن	۱۹/۵۶	۱۴/۰۶	۱۰/۱۱	۹/۵۲	۷/۰۰	۵/۱۵	۶/۹۱	۵/۰۸
کم		۵۸/۶۹	۴۲/۲۰	۳۰/۳۴	۲۸/۷۷	۲۱/۰۴	۱۵/۳۹	۲۰/۷۶	۱۵/۲۷

جدول ۴- زمان (سال) انجام اولین بازرسی برای کاهش خطر خوردگی برای سطوح عملکردی و شرایط مختلف محیطی ( $C_{Cr} = 1.0 \text{ kg/m}^3$ )

شرایط محیطی		ملازم			متوسط			شدید	
درجه اهمیت سازه		کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط
زیاد		۱۶/۷۳	۱۲/۰۳	۸/۶۵	۶/۹۱	۵/۰۶	۳/۷۰	۴/۷۷	۳/۵۱
متوسط	نفوذ پذیری بتن	۲۷/۸۸	۲۰/۱۶	۱۴/۵۸	۱۱/۵۱	۸/۴۱	۶/۱۵	۷/۹۵	۵/۸۵
کم		۸۳/۳۰	۵۹/۸۹	۴۳/۰۶	۳۴/۵۶	۱۵/۲۸	۱۸/۴۹	۲۳/۹۱	۱۷/۵۹

### ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش زمان اولین بازرسی از سازه بتنی بر مبنای احتمال آغاز خوردگی میلگرد ناشی از نفوذ یون کلر مورد بررسی قرار گرفت و با فرض سناریوهای مختلف، این زمان محاسبه گردید. نتایج حاصل از این تحقیق می تواند به عنوان یک جدول از پیش تعیین شده جهت ارائه برنامه های بازرسی و احیانا تعمیر و نگهداری سازه های بتنی که در معرض یون کلر قرار دارند بر اساس درجه اهمیت آنها مورد استفاده قرار گیرد و به عنوان یک پیشنهاد برای استفاده در آیین نامه های مربوط به دوام بتن مورد استفاده قرار گیرد. به طور کلی نتایج کمی زیر از تحقیق حاضر بدست آمده است:

۱- بر اساس بدترین سناریوی ممکن یعنی قرار گیری بتن با نفوذ پذیری بالا در شرایط محیطی شدید، زمان انجام بازرسی اساسی برای سازه های مهم، ۲/۲۴ سال بعد از ساخت بدست آمده است که می تواند به عنوان پیشنهاد برای سازه ای بتنی واقع شده در حاشیه خلیج فارس مورد استفاده قرار گیرد.

همانطور که از این دو جدول مشخص است، نتایج حاصله به مقدار کلر بحرانی حساس می باشد به طوریکه با افزایش این حد، زمان آغاز خوردگی به تاخیر می افتد. می توان از زمان آغاز خوردگی بدست آمده بر اساس غلظت کلر بحرانی کمتر، به عنوان معیار آستانه شروع تعمیر و نگهداری استفاده کرد. به عنوان نمونه برای یک سازه با درجه اهمیت متوسط (یعنی فرض احتمال آغاز خوردگی ۵۰ درصد) وقتی نتایج آزمایش بتن بیانگر کیفیت متوسط بتن باشد (نفوذ پذیری متوسط) زمان انجام بازرسی یا انجام اقدامات برای مقابله با خوردگی میلگرد در صورت قرارگیری سازه در شرایط محیطی ملازم، متوسط و شدید به ترتیب ۱۴، ۷ و ۵ سال می باشد. بنابراین نگرانی از بابت شروع خوردگی میلگرد با در نظر گرفتن میزان عدم قطعیت موجود تا ۱۴ سال اول عمر برای این سازه در شرایط محیطی ملازم وجود نخواهد داشت. از نتایج این جداول مشخص است که با افزایش کیفیت بتن از طریق کاهش نفوذ پذیری آن می توان تأثیر به مراتب بیشتری در به تأخیر انداختن شروع خوردگی بدست آورد.

- [10]. Collepardi, M., Marcialis, A., Turriziani, R., "Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concretes", in: Journal of American Ceramic Society, vol. 55, nr. 10 (October), pp. 534-535, 1972.
- [11]. Yu, H., Chiang, K. K., Yang, L. "Threshold chloride level and characteristics of reinforcement corrosion initiation in simulated concrete pore solutions", Construction and Building Materials, Vol. 26, pp. 723-729, 2012.
- [12]. Amey, S.L., Johnson, D.A., Miltenberger, M.A., Farzam, H., "Predicting the service life of concrete marine structures: an environmental methodology", ACI Structural Journal 95 (2), 205-214, 1998.
- [13]. ACI(2011): "ACI Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-11) ", American Concrete Institute, Farmington Hills .
- [14]. CUR, DuraCrete – Statistical Quantification of the Variables in the Limit State Functions (R9), Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, Gouda, 2000.
- [15]. R. Alizadeh, P. Ghods, M. Chini, M. Hoseini & M. Shekarchi, "Durability based design of RC structures in Persian Gulf region using DuraPGulf model", Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting – Alexander (eds.)Taylor & Francis Group, London, 2006
- [16]. Lin, S.H., "Chloride diffusion in a porous concrete slab", Corrosion 46 (12),964-967, 1990.
- [17]. Gaal, G.C.M. "Maintenance and Repair – Probability of Corrosion (report 25.5-01-26) ", Delft University of Technology, Delft, 2001.
- [18]. Wndy, T. C. K. and Yan, Y. L., "Sampling from complicated and unknown distributions: Monte Carlo and Markov Chain Monte Carlo methods for redistricting",Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Vol. 506, pp. 170-178, 2018.

- ۲-در میان فرضیات در نظر گرفته شده، نفوذپذیری بتن تأثیر بیشتری در به تأخیر انداختن زمان اولین بازرسی دارد به طوریکه با کاهش نفوذپذیری، زمان اولین بازرسی پنج برابر می‌شود و برای وضعیتی مانند شرایط محیطی شدید، این زمان از ۲/۲۴ سال به ۱۱/۲۳ سال افزایش یافته است.
- ۳- کاهش غلظت یون کلر بر روی سطح بتن می‌تواند موجب به تأخیر افتادن زمان آغاز خوردگی گردد به طوریکه برای انواع سازه‌های فرض شده در این تحقیق، زمان اولین بازرسی را تا ۲/۵ برابر می‌تواند به تأخیر بیندازد.

## ۶- مراجع

- [1]. Yung, L.F., Chen, Z., Gao, Q. and Ju, w.j., "Compensation length of two-dimensional chloride diffusion in concrete using a boundary element model",Acta Mech, Vol. 224, pp. 123-137, 2013.
- [2]. Seify Asghshahr, M. R. and Rahai, A. R., "Pushover Analysis of Reinforced Concrete Bridges under Chloride-Induced Corrosion", Amirkabir J. Civil Eng., 50(1), pp. 27-30, 2018. (in Persian)
- [3]. Li, K., " Durability design of concrete structures: phenomena, modeling, and practice ", John Wiley & Sons, Inc., Singapore, 2017.
- [4]. Li, Y., Vrouwenvelder, T., Wijnants, G.H. and Walraven, J., "Spatial variability of concrete deterioration and repair strategies",Structural Concrete, Vol. 5(3), pp. 121- 130, 2004.
- [5]. Bastidas A.E., Chateaneuf, A., and Schoefs F.A., "A comprehensive probabilistic model of chloride ingress in unsaturated concrete", Engineering Structures, Vol. 33, pp. 720-730, 2010.
- [6]. Bamforth, P.B., "The derivation of input data for modeling chloride ingress from eight year UK coastal exposure trials", Magazine of Concrete Research, Vol. 23, pp. 87-96, 1999.
- [7]. Bhargava, K., Mori, Y. and Ghosh, A.K., "Time-dependent reliability of corrosion-affected RC beams. Part 3: Effect of corrosion initiation time and its variability on time-dependent failure probability", Nuclear Engineering and Design, Vol. 241, pp. 1395-1402, 2011.
- [8]. Saassouh, B. anf Lounis, Z. "Probabilistic modeling of chloride-induced corrosion in concrete structures using first- and second-order reliability methods", Cement & Concrete Composites, Vol. 34, pp. 1082-1093, 2012.
- [9]. Shayanfar, M. A., Ghanooni-bagha, M. and Asgarani, S., "Influence of effective parameters variations on chloride corrosion initiation",Modares Civil Engineering Journal, Vol.17, No.3, pp. 69-76, 2017.



## Probabilistic Calculation of the Corrosion Initiation of Steel Reinforcement Using Reliability Methods

Seyed Abbas Hosseini \*

Assistant Professor, Faculty of Technology and Mining, Yasouj University, Choram, Iran

### Abstract

Reinforcement corrosion due to chloride ingress into the reinforced concrete (RC) structures adjacent to the sea and bridge in the snow-prone areas caused compromising the operation of these RC structures over time. Thereby in some of these structures, corrosion initiation is used for operational limit-state. There are so many methods for calculation of corrosion initiation time. There are many uncertainties in these models and because of that some errors made in calculated corrosion initiation time. In this paper using structural safety calculations and Monte Carlo sampling method (MC), the probability of corrosion initiation is calculated. As a new approach, corrosion initiation time is calculated based on the level of structural performances with the probability of 25,50 and 75 percent for the occurrence of corrosion initiation. Concrete quality, as well as the severity of environmental factors, were used as other basic parameters in this study. The uncertainty in the calculated time to corrosion initiation is also evaluated based on the statistical properties of the effective parameters in the model. Based on the results obtained, increasing the quality of concrete by reducing permeability has a greater effect on increasing the time for the first inspection of concrete structures.

**Keywords:** Corrosion initiation time, Reliability, Concrete durability, Chloride ingress, Probabilistic assessment.

---

\* Corresponding Author: a.hosseini@yu.ac.ir

