

# اثر تغییرات پارامترهای مؤثر بر خوردگی کلریدی بر شروع خوردگی

محسنعلی شایانفر<sup>۱\*</sup>، محمد قانونی بقا<sup>۲</sup>، سعید عسگرانی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
- ۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق
- ۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران-سازه، دانشگاه علم و صنعت

\*shayanfar@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۳/۲۲] تاریخ پذیرش: [۹۵/۰۷/۱۹]

## چکیده

شرایط مهاجم محیط‌های دریایی به علت حمله یون‌های کلرید سبب خوردگی آرماتورها می‌شود که این امر خرابی‌های بسیاری را به دنبال دارد. رایج‌ترین مدل‌های تخمین عمر مفید سازه‌های بتن مسلح تحت بارگذاری کلرید، تنها یک‌زمان قطعی منحصر برای آغاز خوردگی تولید می‌کنند. بر اساس قانون فیک زمان شروع خوردگی تابعی از کلرید سطحی، کلرید بحرانی، ضخامت پوشش بتن و ضریب انتشار پذیری است. در این مقاله، از روش احتمالاتی مونت کارلو برای تخمین عمر مفید سازه برای پیش‌بینی زمان شروع خوردگی استفاده شده و تأثیر تغییرات میانگین هر یک از پارامترهای مؤثر بر وقوع خوردگی، روی زمان شروع خوردگی و میزان تأثیر این ضرایب بر احتمال شروع خوردگی نشان داده شده است.

**واژگان کلیدی:** خوردگی سازه‌های بتن آرمه، خوردگی کلریدی، غلظت کلرید، تحلیل مونت کارلو

## ۱- مقدمه

به‌همین خاطر پژوهش‌های زیادی در خصوص پایایی بتن در شرایط محیطی خلیج فارس انجام شده است. یکی از این مطالعات مربوط به تولید نرم‌افزار تخمین عمر مفید سازه‌های بتن آرمه در شرایط محیطی خلیج فارس و دریای عمان با عنوان DuraPgulf هست (Ghods et al. 2007) [6]. در ساخت مدل‌های تخمین عمر مفید سازه‌های بتنی معمولاً از یک مفهوم مشخص برای تعریف عمر مفید استفاده می‌شود. در سازه‌های بتنی دریایی عمر مفید سازه به دو بخش اصلی، زمان انتشار اولیه تا شروع خوردگی و گسترش در المان بتنی به صورتی که ترک و خرابی در المان نمایان شود، تقسیم‌بندی می‌شود [7]. در سال‌های اخیر تعداد زیادی از سازه‌های بتنی در کشورهای مختلف دنیا و همچنین در ایران در اثر ضعف بتن دچار آسیب‌دیدگی و یا خرابی زودرس شده‌اند. به‌عبارت‌دیگر عمر مفید این سازه‌ها با مقدار پیش‌بینی شده هماهنگی نداشته و بسیار کمتر از آن بوده است.

غفلت از وقوع خوردگی و پیشرفت آن ممکن است سازه‌ها را قبل از پایان دوره طراحی و عمر مفید مقرر خود غیرقابل استفاده نموده و به از دست دادن منابع مالی ساخت‌وساز و تعمیر و نگهداری منجر شود [1, 2]. با توجه به پژوهش‌های، خوردگی به دو شکل اتفاق می‌افتد: کلریدی [3] و کرناسیون [4]. برای سازه‌هایی در محیط‌های خورنده (به عنوان نمونه، مناطق ساحلی، مناطق با زمستان‌های سخت که در آن نمک برای ذوب یخ استفاده می‌شود)، خوردگی آرماتور از طریق نفوذ یون‌های کلرید اتفاق می‌افتد و انتشار یون کلرید عامل اصلی خرابی‌ها و کاهش عمر مفید سازه‌های بتن آرمه هست [3, 4]. خوردگی سطح مقطع و تحمل بار آرماتورها را کاهش، حجم فولاد که باعث خوردگی می‌شود را افزایش، پوشش بتنی را نابود [2] و قدرت پیوستگی بین فولاد و بتن را کاهش می‌دهد [5].

شده است و انتشار (diffusion)، سازوکار اصلی نفوذ کلرید به داخل بتن باشد. رابطه (۱).

$$\frac{\partial C_{th}}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C_{th}}{\partial x^2} \quad (1)$$

که در آن  $C_{th}$  مقدار کلرید آستانه برحسب  $\text{kg/m}^3$ ،  $D$  ضریب انتشار کلرید،  $x$  عمق نفوذ و  $t$  نشانگر زمان است. زمانی که غلظت کلرید سطحی یک مقدار ثابت است و مسئله نفوذپذیری در فضای یک بعدی و عمق مشخص توضیح داده می شود، حل تحلیلی معادله با قرار دادن مقادیر مرزی  $C_{th}(t=0)=0$  و  $C(x=0)=C_0$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$C_{th} = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{app} C_s t}} \right] \quad (2)$$

که در آن  $C_s$  غلظت کلرید سطحی و  $\operatorname{erf}$  تابع خطا هست، با مقادیر داده شده  $C_s$ ،  $D$ ،  $C_{th}$  که بر اساس توزیعشان هست، عمر مفید قابل محاسبه است [10]. مطابق این رابطه، زمان شروع خوردگی در میلگرد به طور عمده تحت تأثیر عواملی چون: ضرایب انتشار، ضخامت پوشش بتن، غلظت کلرید سطحی و غلظت کلرید بحرانی در سطح میلگرد هست.

برای طراحی سازه های بتنی در مورد خوردگی کلرید، تابع حالت حدی رخداد خوردگی به صورت زیر نوشته می شود:

$$g(X, t) = C_{th} - C_s \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{DT}} \right) \quad (3)$$

این تابع را می توان با مجزا سازی  $t$  به صورت زیر بازنویسی کرد [4]:

$$g = t_i - t_{cor} = \frac{d^2}{4D \left[ \operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{C_{th}}{C_s} \right) \right]^2} - t_{cor} \quad (4)$$

چنین متغیرهایی به طور کلی تصادفی هستند، درحالی که صدمات ناشی از خوردگی تا حد زیادی وابسته به عوامل محیطی است.

### ۳- پارامترهای احتمالاتی مسئله خوردگی

ماهیت تولید بتن تصادفی است و از آنجایی که قابلیت اطمینان ابهامات بسیاری در پارامترهای مؤثر شناخته شده در خرابی لایه منفعل آرماتور دارد، در ادامه، به برخی از پارامترهای مربوط به انتشار یون کلرید در بتن و همچنین به

در زمینه دوام بتن در محیط های دریایی کارهای پژوهشی فراوانی انجام شده است. به عنوان نمونه، نمونه های بتنی ساخته شده به وسیله مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن تحت شرایط مختلف در منطقه خلیج فارس بررسی و نتایج آن در سال ۲۰۰۶ منتشر شده است. در پژوهش اخیر، نمونه های ساخته شده در شرایط محیطی واقعی مختلف: در ساحل، ناحیه جزر و مد دریا و کاملاً مغروق در آب دریا در سواحل بندرعباس نگهداری می شدند [8].

برای افزایش عمر مفید سازه ها در بیشتر کشورهای پیشرفته پژوهش های وسیعی با هدف شناخت عوامل مؤثر در خرابی سازه های بتنی و رفع آن ها شروع شد که این پژوهشها منجر به تهیه آیین نامه ها و یا استانداردهایی شده است؛ اما با توجه به موقعیت جغرافیایی و تفاوت شرایط آب و هوایی و مشخصات مصالح هر کشور استفاده از یک آیین نامه خاص در همه کشورها مقدور نیست. همچنین نوع مصالح و سیمان و پوزولان های طبیعی هر کشور الزاماً مورد استفاده کشورهای دیگر نیست، پس پژوهش های دوام بتن باید به طور مداوم در سایر کشورها و با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی و مصالح همان کشورها و به منظور حفظ سرمایه های ملی انجام شود.

در این مقاله، برای مدل سازی نفوذ کلرید و تخمین عمر مفید سازه های بتنی در خلیج فارس، از روش احتمالاتی مونت کارلو استفاده شده است. در مدل سازی به تأثیر تغییرات میانگین ضرایب بر عمر مفید و اینکه بهترین و بهینه ترین راه برای افزایش عمر مفید و کاهش احتمال وقوع خوردگی چیست پرداخته شده است. همچنین با توجه به تفاوت دمایی در بیشتر نقاط مناطق مختلف و اثر این پارامترها، تأثیر دما و طول عمر بر مقدار ضریب انتشار دیده شده است.

## ۲- فرایند وقوع خوردگی و مدل سازی انتقال

### یون کلرید

در سازه های بتنی دریایی عمر مفید سازه به دو بخش اصلی، زمان انتشار اولیه تا شروع خوردگی و گسترش در المان بتنی به صورتی که ترک و خرابی در المان نمایان شود، تقسیم بندی می شود [7, 9].

در این پژوهش فرض بر آن است که بتن کاملاً اشباع

جدول ۲. مقادیر غلظت کلرید سطحی و نوع توزیع [13, 14]

Distribution	SD (wt% con)	Cov (%)	Mean (wt% con)	condition
Normal	0.12	20	0.6	Low
	0.08	10		
Normal	0.16	20	0.8	Moderate
	0.24	30		
Normal	0.2	20	1	Severe
Normal	0.24	20	1.2	Extreme

Table 2. Chloride concentration at surface of concrete [13,14]

## ۳-۳- ضریب انتشار کلرید (D)

نتایج حاصل از مقادیر کاربردی و توزیع حاکم بر ضریب انتشار کلرید در مرجع [14] در جدول زیر خلاصه شده است (w/c به معنی نسبت آب به سیمان در جرم هست).

جدول ۳. مقادیر ضریب انتشار و نوع توزیع [14]

Dist.	SD (mm <sup>2</sup> /year)	cov	Mean (mm <sup>2</sup> /year)	W/C
Normal	7.1	50	14.2	0.4
	16.4			
Normal	20.5	50	41	0.5
	24.6			
Normal	43.2	50	86.4	0.6
Normal	81.35	50	162.7	0.7

Table 3. -diffusion coefficient for various type of concrete [14]

## ۳-۳-۱ اثر سن بتن (t) و تغییر دما (T)

هریک از این دو پارامتر به تنهایی بر روی ضریب انتشار تأثیر به سزایی می گذارند و نمی توان تغییرات آن ها را نادیده گرفت. از این رو در بخش ۵ به طور جداگانه به اصلاح ضریب انتشار و تأثیر سن بتن و تغییرات دما روی ضریب انتشار پرداخته شده است.

## ۳-۴- پوشش بتن (d)

برای بررسی آثار پوشش بتنی از مقادیر ارائه شده در مراجع [13, 14, 16] که در جدول (۴) آورده، استفاده شده و در

برخی از پژوهش های انجام شده پیشین در این زمینه پرداخته شده است.

۳-۱- کلرید آستانه (C<sub>th</sub>)

با توجه به شرایط مختلف قرارگیری و همچنین نوع قطعه بتنی می توان مقادیر زیر در جدول را اختیار کرد.

جدول ۱. مقادیر کلرید آستانه و نوع توزیع

Distribution	SD (wt% con)	cov (%)	Mean (wt% con)	Ref
Normal	0.009	30	0.03	[11,13]
	0.007	10		
Normal	0.021	30	0.07	BS Standard [11]
	0.035	50		
Normal	0.015	30	0.05	[11,12]
Normal	0.027	30	0.09	[11,12]

Table 1. Moment values of chloride threshold

شکل ۱. تخمین مقدار آستانه کلرید [11]

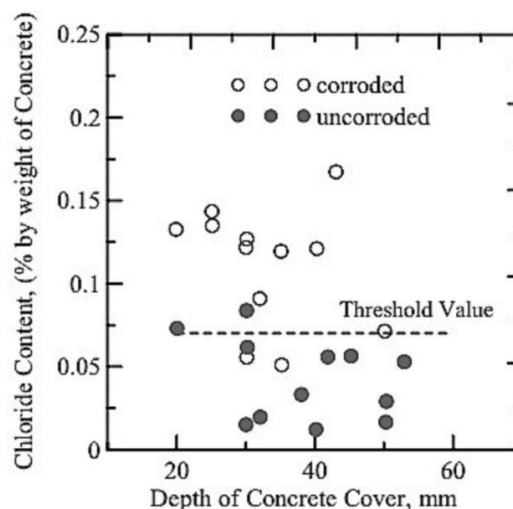


Fig. 1. Estimate the amount of chloride threshold

۳-۲- غلظت کلرید سطحی (C<sub>s</sub>)

بر اساس پژوهش های گذشته، در این شبیه سازی یک توزیع نرمال برای این مقدار اتخاذ شده است [14, 15]. نتایج کاربردی در برخی پژوهش ها به همراه توزیع حاکم بر تراکم کلرید سطحی C<sub>s</sub> در جدول زیر آمده است.

تحلیل به آن‌ها پرداخته شده است.

جدول ۴. مقادیر پوشش بتنی و نوع توزیع

Dist.	SD (mm)	cov (%)	Mean (mm)	Positon
Normal	27.5	50	55	beam-column
Normal	28	40	70	beam-column
	35	50		
	42	60		
Normal	42.5	50	85	Fondation
Normal	50	50	100	Fondation

Table 4. Concrete cover in evaluated structures [13,16]

## ۴- نتایج و بحث‌ها

### ۴-۱- تغییرات میانگین کلرید آستانه ( $C_{th}$ )

با فرض ثابت نگه داشتن مقادیر میانگین و انحراف استاندارد ۳ پارامتر دیگر، کلرید آستانه ۴ مقدار میانگین مختلف ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ را در برمی‌گیرد و با استفاده از نرم‌افزار متلب و همچنین شبیه‌سازی مونت کارلو ۴ نمودار زیر به دست آمد. همان‌گونه که مشاهده می‌کنید با افزایش مقدار کلرید آستانه از مقدار احتمال وقوع خوردگی کاهش و بر عمر مفید سازه می‌افزاید. ضمن اینکه همان‌گونه که در بخش ۳-۱ بیان شد مقدار آن را ۰/۰۷٪ وزنی بتن در نظر می‌گیریم. مقادیر در نظر گرفته شده برای رسم این نمودارها،  $C_{th}(\sigma) = (0.3)$ ،  $C_s(\mu, \sigma) = (0.8, 0.2)$ ،  $D(\mu, \sigma) = (41, 0.5)$ ،  $d(\mu, \sigma) = (70, 0.5)$  است.

کلیه نمودارها از صفر تا ۵۰ سالگی رسم شده‌اند و احتمال وقوع در هر سال معینی، مشخص هست.

شکل ۲. تأثیر تغییرات کلرید آستانه بر احتمال وقوع خوردگی

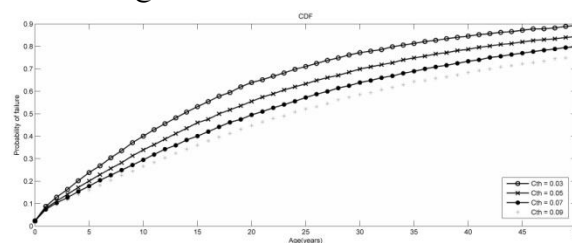


Fig. 2. The effect of change the chloride threshold on probability of corrosion

### ۴-۲- تغییرات میانگین غلظت کلرید سطحی ( $C_s$ )

حرف‌هایی را که برای کلرید آستانه زده شد برای غلظت

کلرید سطحی هم می‌شود گفت. با این تفاوت که در کلرید آستانه، با افزایش مقدار میانگین عمر مفید زیاد شد ولی در غلظت کلرید سطحی با افزایش میانگین کلرید سطحی دستیابی به عمر مفید در سنین پایین‌تری رخ می‌دهد. چیزی که از رابطه (۶) هم پیداست. همان‌گونه که در شکل (۳) پیداست بیشترین عمر مفید در سال ۲۵ با احتمال ۵۰٪ با کلرید سطحی ۰/۶٪ وزنی بتن اتفاق افتاده است. مقادیر در نظر گرفته شده برای رسم این نمودارها به صورت  $C_s(\sigma) = (0.2)$ ،  $C_{th}(\mu, \sigma) = (0.07, 0.3)$ ،  $D(\mu, \sigma) = (41, 0.5)$ ،  $d(\mu, \sigma) = (70, 0.5)$  است.

شکل ۳. تأثیر تغییرات غلظت کلرید سطحی بر احتمال وقوع خوردگی

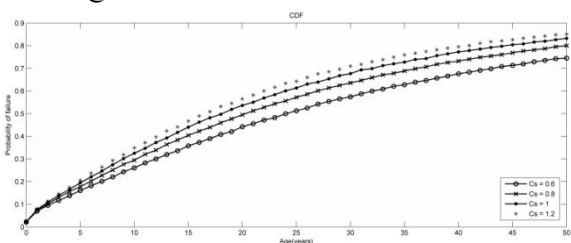


Fig. 3. The effect of change the chloride concentration at surface on probability of corrosion

### ۴-۳- تغییرات میانگین ضریب انتشار کلرید ( $D$ )

با چهار مقدار ضریب انتشار چهار احتمال به دست آمد که نشان دهنده این است که هرچه مقدار ضریب انتشار کمتر باشد، عمر مفید بیشتری خواهیم داشت. پس برای رسیدن به عمر مفید بیشتر با احتمال وقوع کمتر باید نسبت w/c حداقل باشد. مقادیر در نظر گرفته شده برای رسم این نمودارها به صورت  $D(\sigma) = (0.5)$ ،  $C_{th}(\mu, \sigma) = (0.07, 0.3)$ ،  $C_s(\mu, \sigma) = (0.8, 0.2)$ ،  $d(\mu, \sigma) = (70, 0.5)$  است.

شکل ۴. تأثیر ضریب انتشار کلرید بر احتمال وقوع خوردگی

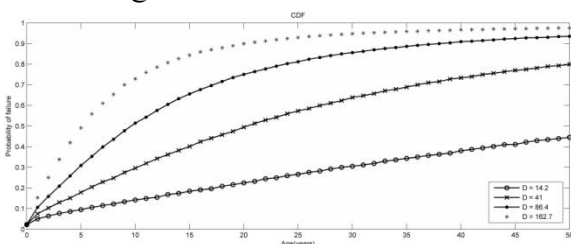


Fig. 4. The effect chloride diffusion coefficient on probability of corrosion

صادق بوده و از آن پس برای جلوگیری از اتخاذ مقادیر غیرواقعی، ضریب انتشار ثابت شده و با مقدار برابر با سن ۲۵ سال تا انتها ثابت می ماند [17, 18].

$$D = D_{ref} * \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^{\alpha} \quad (5)$$

$$D_{ref} = D_{RCM} * \exp\left(b_e * \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}}\right)\right) \quad (6)$$

که در این دو معادله  $D_{RCM}$  نتیجه آزمایش تسریع شده مهاجرت کلرید RCMT برحسب  $\text{mm}^2/\text{years}$ ،  $b_e$  ضریب رگرسیون،  $T_{ref}$  دمای آزمایش RCMT برحسب درجه کلون،  $T_{real}$  دمای محیط قرارگیری بتن، نزدیک ترین ایستگاه هواشناسی برحسب درجه کلون،  $t_{ref}$  سن آزمایش RCMT برحسب سال، است.

#### ۱-۵- تأثیر تغییرات سن سازه روی ضریب انتشار ظاهری (D)

در این بخش با استفاده از مقادیر جدول (۵) و همچنین آنالیز مونت کارلو تأثیر تغییرات سن سازه روی ضریب انتشار محاسبه می شود. دمای آزمایش و همچنین سن آزمایش مقادیر ثابتی هستند و انحراف استاندارد ندارند. همچنین ما در اینجا مقدار دمای محیط را هم ثابت گرفتیم و این مقدار، میانگین دمای شهرهای استان هرمزگان است که نشریه داخلی اداره کل هواشناسی هرمزگان در شماره ۲۲ و در تابستان ۱۳۹۴ به چاپ رسانده است.

جدول ۵. مقداردهی پارامترها برای تعیین ضریب انتشار

Coefficient	Mean	SD	Ref
$T_{ref}(K)$	298	—	[17]
$T_{real}(K)$	307.9125	—	[19]
$b_e$	4800	700	[17]
$D_{RCM}$ ( $\text{mm}^2/\text{years}$ )	37.212	18.606	[18]
$t_{ref}(\text{years})$	0.328	—	[18]
$\alpha$	1.37	0.04	[17]

Table 5 Affected parameters on diffusion coefficient

با توجه به مقادیر ضریب انتشار در جدول (۳) و همچنین کار میدانی انجام شده در مرجع [17] و نزدیک بودن این مقادیر به یکدیگر، می توان فهمید که نتایج هر دو به یک سو و اعدادی مشابه ختم می شود و در هر دو کار انجام شده عمر مفید سازه با تغییرات ضریب انتشار بین ۱ تا ۶ سال هست.

#### ۴-۴- تغییرات میانگین پوشش بتنی (d)

تأثیر تغییرات میانگین پوشش بتنی هم مانند ضریب انتشار کلرید، محسوس است و مطابق انتظار با بیشتر کردن پوشش، مقدار عمر مفید افزایش و احتمال وقوع کاهش می یابد. طبیعتاً بیشترین عمر مفید با کاور ۱۰۰ میلی متر به دست آمد. مقادیر در نظر گرفته شده برای رسم این نمودارها به صورت،  $d(\mu) = (0.5)$ ,  $C_{th}(\mu, \sigma) = (0.07, 0.3)$ ،  $C_s(\mu, \sigma) = (0.8, 0.2)$ ،  $D(\mu, \sigma) = (41, 0.5)$  است.

شکل ۵. تأثیر پوشش بتنی بر احتمال وقوع خوردگی

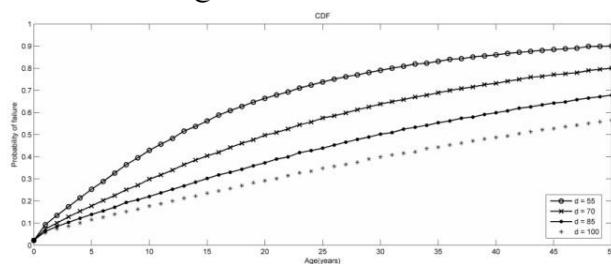


Fig. 5. The effect of change concrete cover on probability of corrosion

با توجه به این نمودارها و همین طورتایج به دست آمده از مرجع [10]، تغییرات زمان های آغاز خوردگی تخمینی در این مرجع با توجه به ثابت بودن ۳ پارامتر دیگر و افزایش پوشش بتنی از ۵ سانتی متر به ۷ و از ۷ به ۱۰ سانتی متر، از ۱/۴ سال تا ۱۳/۶ سال بوده که نتایج این مقاله هم حاکی از کم بودن عمر مفید در احتمال ۱۰٪ (از ۱ سال تا ۵ سال با افزایش پوشش بتنی) هست.

#### ۵- اصلاح ضریب انتشار ظاهری کلرید (D)

صورت کلی رابطه برای تعیین ضریب انتشار ظاهری به صورت معادله های ۵ و ۶ هست و این معادلات تا ۲۵ سال

افزایش پیدا می‌کند. نتیجه اینکه دما تأثیر مستقیمی روی افزایش احتمال وقوع و کاهش سن بتن دارد.

## ۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش به‌طور عمده پیرامون پیش‌بینی طول عمر سازه‌های بتنی مسلح در شرایط دریایی ایران هست. برخی از شبیه‌سازی‌ها بر اساس آزمایش‌های میدانی برای تخمین آغاز خوردگی انجام می‌شود اما در اینجا ماهیت احتمالاتی مدل به سبب ماهیت تصادفی متغیرها مورد توجه و بررسی قرار گرفت. به این منظور از روش مونت‌کارلو استفاده، و تأثیر میانگین ضرایب بر عمر مفید و احتمال وقوع آن بررسی، و دیده شد که تأثیر مقادیر میانگین کاور بتنی و ضریب انتشار ظاهری بیش از کلرید آستانه و کلرید سطحی است که حتی می‌توان گفت اثر تغییرات مقدار میانگین ضریب انتشار از تغییرات مقدار میانگین سه پارامتر دیگر بیشتر است.

با این حساب می‌توانیم به‌جای افزایش بیشتر از مقدار مجاز پوشش، ضریب انتشار را با روش‌هایی که موجود هست از جمله کاهش نسبت آب به سیمان، کاهش داد و به بهینه‌ترین حالت مطلوب از نقطه نظر مقدار پوشش بتن و ضریب انتشار برسیم. همچنین نتایج حکایت از این دارد که سن سازه از حدود ۲۰ تا ۲۵ سالگی به بعد تأثیری بر ضریب انتشار و میزان نفوذ ندارد. استفاده از روش مونت‌کارلو با تعداد گام‌های کافی مطلوب‌تر از روش قطعی است، چراکه زمان پردازش در روش اول کوتاه‌تر است. روش به کار رفته مذکور یک ابزار مناسب برای پیش‌بینی قابل اطمینان از طول عمر سازه‌ها هست. بنابراین هزینه مرمت و بازرسی‌های آتی با استفاده از شبیه‌سازی تقلیل خواهد یافت. همچنین این مدل نیاز به استفاده از حجم وسیع از نمونه را کاهش می‌دهد که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است.

## References

[1] Shayanfar M. A. & Ghanooni-Bagha M. 2010 A Study for Corrosion Effects of Reinforcements on Capacity of Bridge Piers via Nonlinear Finite Element Method. Sharif Journal of Science & Technology Engineering, 28(3), 59-68. (In Persian)

شکل ۶. تأثیر گذر زمان بر ضریب انتشار

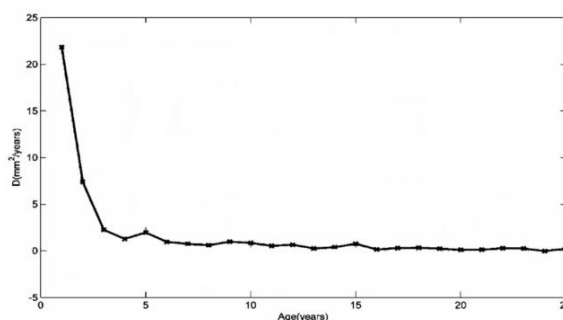


Fig. 6. The effect of time on diffusion coefficient

همان‌گونه که از نمودار بالا پیداست که با گذر زمان، مقدار نفوذ کلرید بر بتن به‌مرور کاهش می‌یابد، در ابتدا با شیبی زیاد و بعد از حدود ۵ سال این شیب کمتر می‌شود تا اینکه تقریباً به شیبی یکنواخت و سرانجام از ۲۰ تا حدود ۲۵ سالگی به خطی صاف و شیب صفر خواهد رسید و حکایت از این دارد که سن سازه از حدود ۲۰ تا ۲۵ سالگی به بعد تأثیری بر ضریب انتشار و میزان نفوذ ندارد که این نتیجه با نتیجه‌ای که در مرجع [17] گرفته شده است همخوانی دارد.

## ۵-۲- تأثیر تغییرات دما روی ضریب انتشار ظاهری (D)

مانند بخش ۵-۱ این بار به‌جای دمای میانگین گفته شده (۳۰۷ درجه کلونین) پنج دمای دیگر هم ارزیابی شد و نتیجه در شکل (۷) آورده شد. همان‌گونه که پیداست با افزایش دما، مقدار ضریب انتشار ظاهری افزایش پیدا کرده است و نفوذ در بتن در محیط‌هایی با دمای زیاد، بیشتر خواهد بود.

شکل ۷. تأثیر دما بر ضریب انتشار

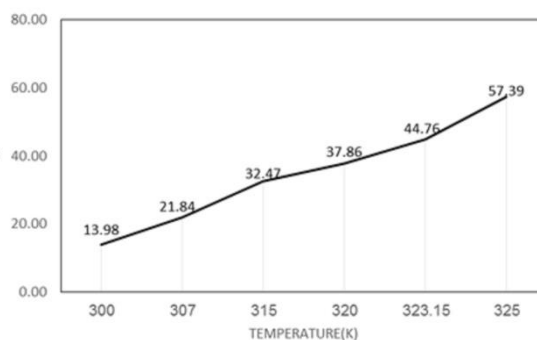


Fig. 7. The effect of temperature on diffusion coefficient

با افزایش دما مقدار ضریب انتشار به‌طور محسوسی

- [12] Enright M. P. & Frangopol D. M. 1998 Probabilistic analysis of resistance degradation of reinforced concrete bridge beams under corrosion. *Engineering structures*, 20(11), 960-971.
- [13] Shayanfar M. A., Barkhordari M. A. & Ghanooi-Bagha M. 2015 Probability calculation of rebars corrosion in reinforced concrete using css algorithms. *Journal of Central South University*, 22(8), 3141-50.
- [14] Nogueira C. G. & Leonel E. D. 2013 Probabilistic models applied to safety assessment of reinforced concrete structures subjected to chloride ingress. *Engineering Failure Analysis*, 31, 76-89.
- [15] Shayanfar M. A., Barkhordari M. A. & Ghanooi-Bagha M. 2015 Estimation of Corrosion Occurrence in RC Structure Using Reliability Based PSO Optimization. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 59(4), 531-543.
- [16] Iran National Building Code 2014 4th edn, Design and Construction of Concrete Structures, No. 9, Housing and Municipal Engineering Ministry, Iran.
- [17] Khazali M., Ansari E. & Gohari A. 2013 Evaluation of SCC compressive strength and permeability by replacing natural pozzolan, artificial and slag. The 5th annual national conference of concrete. (In Persian)
- [18] Rmezanianpour A. A., Jahangiri A., Moodi F. & Ahmadi B. 2012 Evaluate and modify the model estimated useful life for the environmental conditions and materials provided by FIB Gulf. 10<sup>th</sup> International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures. (In Persian)
- [19] Internal Journal of Hormozgan Meteorological Organization 2015, Vol 6, No 22. (In Persian)
- [2] Ghanooi-Bagha M., Shayanfar M. A., Shirzadi-Javid A. A. & Ziaadiny H. 2016 Corrosion-induced reduction in compressive strength of self-compacting concretes containing mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 113, 221-228.
- [3] Broomfield J. P. 2006 Corrosion of steel in concrete: Understanding, investigation and repair. New York: Taylor & Francis e-Library.
- [4] Bertolini L., Elsener B., Pedeferri P. & Polder R. 2004 Corrosion of steel in concrete Weinheim. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA.
- [5] Amleh L. & Mirza M. S. 1999 Corrosion influence on bond between steel and concrete. *ACI Structural Journal*, 96(3), 415-423.
- [6] Ghods P., Alizadeh R., Chini M., Hoseini M., Ghalibafian M. & Shekarchi M. 2007 Durability-based design in the Persian Gulf. *Concrete International-Detroit*, 29(12), 50-55.
- [7] Maage M., Helland S., Poulsen E., Vennesland Ø. & Carlsen J. E. 1996 Service life prediction of existing concrete structures exposed to marine environment. *ACI Materials Journal*, 93(6), 602-608.
- [8] Ramezaniapour A. A., Parhizgar T., Pourkhorshidi A. & Raeesghasemi A. M. 2006 Assessment of Concrete Durability With Different Cement and Pozzolans in Persian Gulf Environment. Technical Report, NO. K434, Building and Housing Research Center, Iran.
- [9] Bentz E. C. 2003 Probabilistic modeling of service life for structures subjected to chlorides. *ACI Materials Journal*, 100 (5), 391-397.
- [10] Moradi-Marani F., Shekarchi M., Dousti A. & Mobasher B. 2009 Investigation of corrosion damage and repair system in a concrete jetty structure. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 24(4), 294-301.
- [11] Standard B. 1999 Structural use of concrete-part 1: code of practice for design and construction.

# [Influence of effective parameters variations on chloride corrosion initiation]

Mohsen Ali Shayanfar<sup>1\*</sup>, Mohammad Ghanooni-bagha<sup>2</sup>, Saeed Asgarani<sup>3</sup>

1- Associate Professor, Centre of Excellence for Fundamental Studies in Structural Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Master of Science in Structural Engineering, School of Civil Engineering., Iran University of Science and Technology

\*shayanfar@iust.ac.ir

## Abstract:

Corrosion of Reinforcement is the most important cause of damage and failure in reinforced concrete structures. Neglecting corrosion occurrence and its progress may take the structures out of use before their due date and can lead to loss of construction and maintenance capitals. Today, more than ever, most of impairments during serviceability of concrete structures are concerned to steel corrosion especially in marine structures and concrete bridges. According to the researches, corrosion happens in two forms: Chloride and Carbonation. Normally, high alkaline property of concrete forms a protective oxide layer on the steel surface. This is called a passive protection. The dioxide existing in the atmosphere or the chloride in the concrete environment along with the moisture and the oxygen can penetrate via the concrete pores and cracks and can reach the rebar surface; then, by reducing concrete alkalinity, they cause rebar corrosion inside the concrete by destroying the protective oxide layer on the steel. In coastal areas, Chloride ion ingress is one of the major problems that affect the durability of reinforced concrete structures such as bridge decks, concrete pavements, and other structures exposed to harsh saline environments. Therefore, durability based design of concrete structures in marine areas has gained great significance in recent decades and various mathematical models for estimating the service life of reinforced concrete have been proposed. In spite of comprehensive researches on the corrosion of reinforced concrete, there are still various controversial concepts. Effect of environmental conditions on durability of concrete structures is one of the most important issues. Hence, regional investigations are necessary for durability-based design and evaluation of the models proposed for service life prediction. The Persian Gulf is one of the most aggressive regions of the world because of elevated temperature and humidity as well as high content of chloride ions in seawater. Corrosion of reinforcement due to chloride ions attack causes enormous damages to structures in severe condition of marine environments. Since each influencing factor in the life time of the structure is subject to random variability and inherent uncertainties, a stochastic approach is utilized to predict the time for initiation of the corrosion. Based on Fick's law, time for corrosion is a function of surface chloride, critical chloride, concrete cover thickness, and diffusion coefficient. The most common models service-life prediction of reinforced concrete structures under load chloride, only produce a limited definite time for the start of corrosion. In this paper monte carlo analysis use for service life prediction of reinforced concrete structures. In process of predict the time of corrosion initiation, it shown the influence of variation of mean for each parameters that affect the occurrence of corrosion that are concrete cover on reinforcement, chloride threshold, amount of chloride concentration on surface and chloride diffusion coefficient of concrete.

**Keywords:** Corrosion of RC Structures, Chloride Concentration, Monte Carlo Analysis