

# بررسی پارامتری خوردگی موضعی آرماتورها برای تیرهای بتن مسلح مطابق تحلیل آماری

بهروز کشته‌گر\*

۱- استادیار دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زابل

\*Bkeshtegar@uoz.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۳/۱۲/۲۳]

تاریخ پذیرش: [۹۴/۰۸/۱۳]

**چکیده-** خوردگی میلگردها در بتن یک فرایند پیچیده بوده که موجب کاهش سطح مقطع فولاد و زوال مقاومت سازه بتن آرمه می‌شود. در این مقاله خواص آماری پارامترهایی مانند ضریب انتشار یون‌های مخرب، نرخ خوردگی و زمان شروع خوردگی برای خوردگی موضعی آرماتور تیرهای بتن آرمه ارزیابی شده است. از توابع توزیع احتمال مختلف مانند گاما، نرمال، لوگ-نرمال، گامبل و وایبول برای برازش پارامترهای خوردگی استفاده شده و بهترین تابع توزیع احتمال پارامترهای خوردگی با استفاده از آماره مربع کا انتخاب شده است. بر اساس تحلیل آماری پارامترهای خوردگی، اثر خصوصیات آماری متغیرهایی مانند مقاومت فشاری بتن، پوشش آرماتورها، مقدار ثابت و مورد انتظار یون مخرب بر زمان شروع خوردگی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو بررسی شده است. در انتها میزان کاهش آرماتورهای وابسته به زمان در تیرهای بتنی برای چهار قطر مختلف میلگرد (شماره‌های ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰) مطالعه شده است. نتایج حاکی از آن است که بیشتر پارامترهای خوردگی از تابع توزیع احتمال لوگ-نرمال پیروی می‌کند و پوشش آرماتورها نقش زیادی در کاهش خوردگی میلگردها دارد. همچنین خواص آماری سطح مقطع خورده شده به قطر و زمان خوردگی وابسته است به طوریکه افزایش زمان و کاهش قطر موجب کاهش بیشتر سطح مقطع آرماتور می‌شود.

**واژگان کلیدی:** تحلیل آماری، شبیه‌سازی مونت کارلو، تیرهای بتن آرمه، خوردگی موضعی آرماتور.

## ۱- مقدمه

سطح مقطع موثر آرماتورها و همچنین تغییرات در مشخصات مکانیکی فولاد است [1]. از این رو در سازه‌هایی که شدت خوردگی در آن‌ها بالا باشد احتمال عدم کارایی سازه در اثر این نوع آسیب وجود دارد.

فولاد به تنهایی یک مصالح ناپایدار است که در طبیعت این مصالح هیداته شده و تبدیل به یک مصالح پایدار می‌شود. یک حالت فعال خوردگی آرماتور زمانی ایجاد می‌شود که میلگردها در معرض یون‌های آزاد کلر قرار گیرند. در چنین حالتی خوردگی فولاد به صورت حفره‌ای است که به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده

بتن مسلح یک مصالح با دوام است در صورتی که، بتن احاطه کننده آرماتور بتواند به لحاظ فیزیکی و شیمیایی از آرماتور محافظت کند. خوردگی آرماتور به واسطه یون‌های مخرب موجب کاهش عمر مفید و سرویس دهی نامناسب سازه‌های بتن آرمه می‌شود. انواع آسیب سازه‌ای و غیرسازه‌ای به واسطه خوردگی حاصل می‌شود که آسیب‌های سازه‌ای به علت کاهش ضریب اطمینان سازه در برابر بارهای وارد شده از اهمیت بیشتری نسبت به آسیب‌های غیرسازه‌ای، برخوردار است. این نوع خرابی‌ها شامل کاهش

خوردگی و پیشروی خوردگی تقسیم می‌شود. Stewart [4] و همچنین Rodriguez [5] بر اساس یک رابطه تجربی، کاهش قطر میلگردها را با استفاده از دو متغیر زمان شروع خوردگی و انتشار خوردگی تخمین زد. کاهش سطح مقطع فولاد به واسطه حفره، به وسیله Stewart و همکاران ارائه شد [6]. Enright و Frangopol متغیرهای زمان شروع خوردگی حفره‌ای را با تابع توزیع لوگ نرمال در تحلیل قابلیت اعتماد تیر بتن مسلح مدل‌سازی نمودند [7]. Darmawan، اثر متغیرهایی مانند: طول میلگرد، نرخ خوردگی و زمان شروع خوردگی را بر عمق خوردگی حفره‌ای به صورت آماری ارزیابی نمودند [8]. ضریب کاهش سطح مقطع آرماتورها با قطر ۸ و ۱۶ و ۲۴ را بر اساس داده‌های آزمایشگاهی به وسیله Stewart، تحلیل آماری شد که وی تابع توزیع گامبل را برای بیان ویژگی‌های آماری ضریب خوردگی (نسبت عمق خوردگی بیشینه به عمق خوردگی میانگین) پیشنهاد نمود [6, 9]. همان‌گونه که مشخص است عمده توجه پژوهشهای انجام شده بر خواص آماری خوردگی حفره‌ای مانند میزان کاهش سطح مقطع به واسطه حفره بر متوسط کاهش سطح مقطع (ضریب خوردگی) [9]، عمق خوردگی بیشینه [8] و نیز زمان شروع خوردگی و نرخ خوردگی با توجه به یک تابع توزیع احتمال مانند لوگ-نرمال [7] است. از طرف دیگر، تحلیل‌های آماری و شناخت از ماهیت آماری متغیرهای تصادفی خوردگی، امکان مدل‌سازی مناسب در تخمین احتمال خرابی تیرهای بتن آرمه تحت خوردگی را فراهم می‌کند از اینرو، این مقاله با توجه به اهداف زیر تدوین شده است:

- ۱- تعیین خواص آماری متغیرهای خوردگی با استفاده از روابط تحلیلی و تجربی
  - ۲- تاثیر خواص مکانیکی بتن و شرایط محیطی بر زمان شروع خوردگی حفره‌ای با توجه به تحلیل آماری
  - ۳- اثر قطر میلگرد بر کاهش سطح مقطع آرماتور تحت خوردگی حفره‌ای با استفاده از تحلیل آماری
- برای رسیدن به اهداف فوق مقاله حاضر در شش بخش تدوین شده است که در بخش دوم، روابط مورد نیاز در

است. در نواحی حفره ایجاد شده، آنود و به ازای یک محیط وسیع تر از سطح میلگرد (کاتود) ایجاد می‌شود. واکنش‌های کاتودی ( $2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ ) و آنودی ( $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ ) به همراه یون کلر و رطوبت موجب خوردگی فولاد می‌شود [1].



شکل (۱) نمایش شماتیک شکل خوردگی حفره ای [۱]

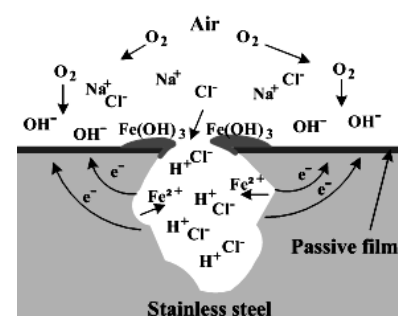


Fig (1) Schematic view of the pitting corrosion [1]

در فرایند خوردگی حفره‌ای، آرماتور به صورت مقطعی خورده شده و هیچ نشانه‌ای از خوردگی مشاهده نمی‌شود و کاهش سطح مقطع و ترد شدگی آرماتور مشاهده می‌شود. واضح‌ترین آسیبی که در اثر خوردگی آرماتور از این نوع خوردگی بر سازه وارد می‌شود کاهش سطح مقطع فولاد است. اساس خوردگی آرماتورها به شرایط محیطی و خواص بتن وابسته است. با گذشت زمان، خوردگی موجب زوال مقاومت سازه می‌شود، به گونه‌ای که بعد از ترک خوردگی و یا از بین رفتن پوشش روی آرماتورها، از عملکرد سازه کاسته می‌شود. Tuutti، نمایان شدن ترک‌هایی به عرض ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌متر در پوشش میلگردها را پایان عمر یک سازه بتن آرمه در معرض خوردگی بیان کرد [2]. به علت پیچیدگی لحاظ کردن عوامل موثر بر پیشروی خوردگی مانند شرایط محیطی و مشخصات بتن، برخی شروع خوردگی را پایان عمر سازه در نظر گرفته‌اند [3] اما پایان عمر یک سازه بتنی زمانی است که ظرفیت باربری آن از نیروی خارجی کمتر و یا مقاومت پیوستگی فولاد و بتن کاهش چشمگیری داشته باشد [3].

مدل‌های ارائه شده برای خوردگی به دو بخش شروع

$$f(x, t) = C_0 [1 - \operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{t} D_c})] \quad (۳)$$

که در آن  $\operatorname{erf}$  تابع خطا و  $C_0$  مقدار ثابت یون مخرب در سطح بتن ( $\text{kg/m}^3$ ) است. مقدار ثابت یون مخرب ( $C_0$ ) عددی بین  $1/2$  تا  $8/2$  است و به طور میانگین در حدود  $3/5$  پیشنهاد شده است [11]. همچنین با ساده سازی رابطه ۳ زمان شروع خوردگی به صورت زیر حاصل می شود:

$$T_0 = \frac{C^2}{4D_c} [\operatorname{erf}^{-1}(1 - \frac{C_{th}}{C_0})]^{-2} \quad (۴)$$

که در آن  $C_{th}$  مقدار مورد انتظار یون مخرب در سطح آرماتور ( $\text{kg/m}^3$ ) که مقدار  $C_{th}$  در محدوده بین  $0/6$  تا  $1/2$  در نظر گرفته می شود [5, 12]. ضخامت پوشش میلگردها ( $\text{mm}$ ) است. ضریب انتشار یون های مخرب ( $D_c$ ) به ویژگی های بتن از قبیل نسبت آب به سیمان ( $w/c$ ) وابسته است که Bhargave و همکارانش، ضریب انتشار را به صورت زیر پیشنهاد کرده اند [13]:

$$D_c = [1.249 - 5.051wc + 8.941wc^2] \times 10^{-8} \quad (۵)$$

با نفوذ یون مخرب و رسیدن به سطح آرماتور، میلگرد تیرهای بتن مسلح به صورت حفره ای یونیزه شده و مقداری از سطح مقطع آن در اثر خوردگی کاهش یابد. کاهش سطح مقطع به واسطه حفره را می توان به صورت رابطه زیر محاسبه نمود [8, 9]:

$$A_{pit}(t) = \begin{cases} A_1 + A_2 & P(t) \leq \frac{D_0}{\sqrt{2}} \\ A_{st} - A_1 + A_2 & \frac{D_0}{\sqrt{2}} < P(t) \leq D_0 \\ A_{st} & P(t) > D_0 \end{cases} \quad (۶)$$

که در آن:

$$P(t) = 0.0116 \cdot i_{corr} \cdot R \cdot T \quad (۷)$$

$$A_{st} = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4}$$

$$A_1 = 0.5 [\theta_1 (\frac{D_0}{2})^2 - b \left| \frac{D_0}{2} - \frac{P(t)}{D_0} \right|]$$

$$A_2 = 0.5 [\theta_2 P(t)^2 - b \frac{P(t)^2}{D_0}]$$

$$b = 2 P(t) \sqrt{1 - (\frac{P(t)}{D_0})^2}, \theta_1 = 2 \arcsin(\frac{b}{D_0}), \theta_2 = 2 \arcsin(\frac{b}{2P(t)})$$

و  $D_0$  قطر اولیه میلگرد ( $\text{mm}$ )،  $i_{corr}$  نرخ خوردگی ( $\mu\text{A/cm}^2$ ) و  $T$  دوره زمانی (سال) که در آن خوردگی اتفاق می افتد و به صورت  $T = t - T_0$  تعریف می گردد که

مراحل شروع و ادامه خوردگی حفره ای به منظور تخمین کاهش سطح مقطع آرماتور، ارائه شده است. در بخش سوم، چگونگی تحلیل آماری متغیرهای خوردگی بیان شده که پارامترهای خوردگی با توجه به روابط تحلیلی و تجربی خوردگی بر اساس شبیه سازی مونت کالو تولید شده و تابع توزیع احتمال متغیرهای خوردگی بر اساس رویه حداکثر درست نمایی برآورد شده است. در بخش چهارم، تحلیل آماری متغیرهای خوردگی و نیز بهترین تابع توزیع احتمال برآورد شده هر متغیر خوردگی ارائه شده است. در بخش پنجم، کاهش سطح مقطع آرماتور خورده شده وابسته به زمان، برای چهار قطر متداول میلگرد شامل شماره های ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰، ارزیابی شده است. در انتها خلاصه ای از نتایج ارائه شده که خواص مکانیکی بتن نسبت به شرایط محیطی نقش تاثیر گذارتری بر زمان شروع خوردگی داشته و همچنین افزایش قطر میلگرد، موجب کاهش سطح مقطع میلگردهای خورده شده وابسته به زمان در تیرهای بتن مسلح می شود.

## ۲- مدل ریاضی خوردگی حفره ای

مدل های مفید پیش بینی عمر مفید یک سازه بتن آرمه شامل هر دو مرحله شروع و پیشروی خوردگی هستند. چرا که برای سازه های جدید مرحله شروع خوردگی و اطمینان از مدت زمان طولانی شروع خوردگی و همچنین برای سازه ای موجود کنترل ادامه خوردگی در مرحله پیشروی از اهمیت بیشتری برخوردار است. زمان شروع خوردگی را بر اساس نفوذ یون مخرب داخل بتن مطابق با معادله انتشار جسم جامد نیمه بینهایت می توان محاسبه نمود [4, 10]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \quad (۲)$$

که در آن،  $f$  تابع نفوذ یون مخرب در فاصله  $x$  از سطح میلگرد در زمان  $t$  (سال) و  $D_c$  ضریب انتشار یون های مخرب ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) است که عددی بین  $10^{-8}$  تا  $10^{-7}$  است و به طور میانگین عددی در حدود  $10^{-8}$  تا  $10^{-7}$  در نظر گرفته می شود [10]. حل همگن معادله فوق به صورت زیر است:

خوردگی محاسبه می‌گردد (۲) برآورد پارامترهای تابع توزیع احتمال که مطابق با روش حداکثر درست‌نمایی برآورد شده است (۳) انتخاب بهترین تابع توزیع احتمال که با استفاده از آزمون فرض مربع کا انتخاب گردیده است.

### ۳-۱- شبیه‌سازی متغیرهای خوردگی

روش شبیه‌سازی مونت کارلو بر اساس خصوصیات آماری یک متغیر تصادفی امکان تولید جامعه آماری آن متغیر تصادفی را فراهم می‌کند. یکی از نقاط کلیدی شبیه‌سازی مونت کارلو، تولید دنباله‌ای از مقادیر تصادفی بین صفر و یک ( $v_i = [0,1]$ ) برای تابع چگالی احتمال تجمعی ( $F_X(x_i)$ ) هر متغیر تصادفی پایه مستقل ( $x_i$ ) می‌باشد؛ پس داریم:

$$(12)$$

$$F_X(x_i) = v_i \Rightarrow x_i = F_X^{-1}(v_i)$$

### ۳-۲- برآورد پارامترهای تابع توزیع احتمال

فرض بر این است که متغیر تصادفی وابسته خوردگی  $X$  دارای تابع چگالی احتمال پیوسته  $f_X(x)$  با پارامترهای مجهول باشد. مقدار بیشینه درست‌نمایی برای تابع توزیع چگالی احتمال  $f_X(x)$  با پارامترهای ( $\theta$ ) برای  $n$  مشاهده به صورت زیر تعریف می‌شود [16]:

$$L(\theta) = f_X(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) = \prod_{i=1}^n f_X(x_i; \theta) \quad (13)$$

پارامترهای تابع توزیع احتمال بایستی به نحوی محاسبه، که موجب بیشینه شدن معادله فوق شود از اینرو،  $[\frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta_1} = 0, \frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta_2} = 0, \dots, \frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta_n} = 0]^T$  به ازای هر پارامتر نامشخص تابع توزیع احتمال یک معادله نوشته شده که حل آن منجر به محاسبه پارامترهای مجهول تابع احتمال می‌گردد [۱۶].

### ۳-۳- انتخاب بهترین تابع توزیع

بهترین تابع توزیع احتمال که پارامترهای آن در مرحله قبل محاسبه شده، با استفاده از آماره مربع کا انتخاب می‌شود. بنابراین ابتدا داده‌های آماری را به تعداد  $K$  دسته تقسیم می‌نماییم [16]:

در آن  $T_0$  زمان شروع خوردگی و  $t$  زمان از ابتدای ساخت سازه (سال) می‌باشد.  $P(t)$  حداکثر عمق حفره به واسطه خوردگی ( $mm$ ) و  $R$  ضریب خوردگی است که به صورت نسبت عمق خوردگی حداکثر به عمق خوردگی میانگین ( $R = P(t) / P_{av}$ )، تعریف می‌گردد [۶]. لذا میزان سطح مقطع میلگرد به صورت رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$A_{st}(t) = A_{st} - A_{pit}(t) \quad (8)$$

$Vu$  و Stewart، یک مدل تخمین نرخ خوردگی توسعه دادند که به عواملی نظیر کیفیت بتن و پوشش میلگردها وابسته است که به صورت زیر است [۱۴].

$$i_{corr}(t) = 0.85 i_{corr}(1) \cdot t^{-0.29} \quad (9)$$

که در آن،  $i_{corr}(1)$  نرخ خوردگی یک ساله بعد از آغاز خوردگی ( $\mu A/cm^2$ ) است که به صورت رابطه زیر پیشنهاد شده است [۱۴]:

$$i_{corr}(1) = \frac{37.8(1-wc)^{-1.64}}{C} \quad (10)$$

رابطه ۱۰ بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی  $Vu$  و Stewart [14] بسط داده شده است. آنها بر اساس نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که کیفیت بتن (نسبت  $w/c$  و پوشش بتن روی آرماتورها، پارامتر تاثیرگذار بر نرخ خوردگی است. رابطه فوق برای مکان‌هایی از آمریکا، اروپا، استرالیا و آسیا با رطوبت نسبی بالای ۷۰ درصد می‌تواند کاربرد داشته باشد.  $C$  ضخامت پوشش روی میلگردها (cm) است. نسبت وزنی آب به سیمان ( $w/c$ )، مطابق رابطه زیر بر حسب مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای بتن ( $f'_{cy}$ ) محاسبه می‌شود [14].

$$wc = \frac{27}{f'_{cy} + 13.5}, \quad f'_{cy} = f'_c + 7.4 \quad (11)$$

که  $f'_c$  مقاومت فشاری بتن ( $MPa$ ) است.

### ۳- انتخاب تابع توزیع متغیرهای خوردگی

هدف این است تا خصوصیات آماری خوردگی از جمله نوع تابع توزیع احتمال و پارامترهای آن را به نحوی مناسب تعیین گردد. لذا این انتخاب شامل سه مرحله است؛ (۱) جامعه آماری داده‌های خوردگی که متغیرهای مستقل با استفاده از روش مونت کارلو تولید داده شده و داده‌های متغیرهای خوردگی بر اساس مدل‌های ارائه شده برای

## ۴-۱- خواص آماری متغیرهای خوردگی

توابع توزیع احتمال مختلف برای متغیرهای خوردگی در این بخش مقایسه شده است. تعداد داده‌های شبیه‌سازی شده نسبت به ضریب تغییرات دو متغیر نرخ خوردگی سالیانه و زمان خوردگی در جدول (۲) ارزیابی شده است. مشخص است که به ازای شبیه‌سازی بیشتر از ۵۰۰۰ اختلاف ناچیزی بین ضریب تغییرات دو متغیر مورد بررسی حاصل شده است. این بدان معنا است که با جامعه آماری تولید شده بیشتر از ۵۰۰۰ می‌توان تخمین مناسبی از خواص آماری متغیرهای خوردگی برآورد نمود. پس، با ۱۰۰۰۰ داده‌های شبیه‌سازی شده به کمک رویه مونت کارلو برای متغیرهای با ویژگی‌های آماری مندرج جدول (۱)، پارامترهای توابع توزیع احتمال گاما، گامبل، لوگ-نرمال، وایبول و نرمال با استفاده از رویه حداکثر درست‌نمایی برای متغیرهای ضریب انتشار یون‌های مخرب ( $D_c$ ، معادله ۵)، زمان شروع خوردگی ( $T_0$ ، رابطه ۴) و نرخ خوردگی یک ساله ( $i_{corr}(1)$ ، رابطه ۱۰) تعیین شده و در جدول (۳) ارائه شده است.

بر اساس تست مربع کا بهترین تابع توزیع برای این متغیرها، تابع احتمال لوگ-نرمال نتیجه شده که میانگین و ضریب تغییرات برای متغیر ضریب انتشار یون‌های مخرب به ترتیب برابر با  $53 \text{ mm}^2/\text{year}$  و  $0.349$ ، زمان شروع خوردگی برابر با  $28/86$  سال و  $0.6$  و نیز نرخ خوردگی یک ساله برابر با  $2/12 \text{ } \mu\text{A}/\text{cm}^2$  و  $0.33$  حاصل شده است. Frangopol و Enright [۷] متغیرهای زمان شروع خوردگی حفره‌ای را با تابع لوگ-نرمال مدلسازی نموده که مطابق با تحلیل آماری با ۱۰۰۰۰ شبیه‌سازی و متغیرهای مستقل لوگ-نرمال، میانگین و انحراف معیار زمان شروع خوردگی را به ترتیب در حدود  $24$  و  $12/5$  سال (ضریب تغییرات  $0.52$ ) محاسبه نمودند. مشخص است که تحلیل آماری به شکل مناسب برآورد شده و نتایج مشابه‌ای از تابع توزیع احتمال با مرجع [۷] حاصل شده است. در این مقاله، متغیر ضریب انتشار یون‌های مخرب، به کمک تابع احتمال لوگ-نرمال با میانگین  $55$  و ضریب تغییرات  $0.35$  مدلسازی می‌شود.

$$K = 1 + \log_2(n) \quad (14)$$

که در آن  $n$  تعداد داده‌ها و  $K$  تعداد دسته‌ها است. مقدار آماره مربع کا بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (15)$$

که در آن  $O_i$  و  $E_i$  به ترتیب مقدار فراوانی نسبی دسته  $i$ ام و مقدار تخمین شده از تابع توزیع برآورد شده است.

## ۴- تحلیل آماری متغیرهای خوردگی

مطابق با رابطه ۴ زمان شروع خوردگی به متغیرهای پوشش میلگردها و مقدار مورد انتظار و ثابت یون مخرب و همچنین ضریب انتشار یون‌های مخرب (ضریب انتشار به نسبت آب به سیمان رابطه ۵ وابسته است) وابسته است. از طرفی مطابق با رابطه ۱۱ نسبت آب به سیمان نیز به مقاومت فشاری بتن وابسته است. از اینرو زمان شروع خوردگی به مقاومت مشخصه بتن وابسته است.

مقاومت بتن به وسیله مراجع [6, 14] به کمک تابع احتمال نرمال با میانگین  $25$  تا  $40 \text{ MPa}$  و ضریب تغییراتی بین  $0.15$  تا  $0.18$  مدلسازی شده است. پوشش میلگردها را مراجع [6, 5] با تابع توزیع نرمال و ضریب تغییراتی در حدود  $0.1$  تا  $0.12$  در نظر گرفته‌اند. مقدار ثابت یون مخرب ( $C_0$ ) را Stewart به طور میانگین در حدود  $3/5 \text{ kg/m}^3$  پیشنهاد کرده [6] که این متغیر با تابع توزیع احتمال لوگ-نرمال با ضریب تغییراتی در حدود  $0.5$  تا  $0.7$  در نظر گرفته شده است [6]. مقدار مورد انتظار یون مخرب ( $C_{th}$ ) به وسیله مراجع [5, 11] با تابع توزیع نرمال با میانگین  $\text{kg/m}^3$  و  $0.9$  و ضریب تغییرات  $0.2$  مدلسازی شده است. ویژگی‌های آماری متغیرهای فوق که در شبیه‌سازی مونت کارلو مورد استفاده قرار گرفته، در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) ویژگی‌های آماری متغیرهای خوردگی

| Variable      | Distribution | Mean                  | CoV  |
|---------------|--------------|-----------------------|------|
| $C_{th}$ [11] | Normal       | $0.9 (\text{kg/m}^3)$ | 0.2  |
| $C_0$ [6]     | Lognormal    | $3.5 (\text{kg/m}^3)$ | 0.65 |
| $f'_c$ [14]   | Normal       | 30 (MPa)              | 0.18 |
| C [5]         | Normal       | 50 (mm)               | 0.12 |

Table (1) Statistical properties of corroded variables

جدول (۲) مقایسه تعداد شبیه سازی بر ضریب تغییرات متغیرهای شروع خوردگی ( $T_0$ ) و نرخ خوردگی سالیانه ( $i_{corr}(1)$ )

| Variable                                | Simulation |       |       |       |       |       |       |        |
|-----------------------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                                         | 50         | 100   | 1000  | 5000  | 10000 | 20000 | 50000 | 100000 |
| $T_0(\text{year})$                      | 0.793      | 0.556 | 0.617 | 0.605 | 0.593 | 0.596 | 0.592 | 0.594  |
| $i_{corr}(1) (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$ | 0.503      | 0.379 | 0.356 | 0.323 | 0.334 | 0.336 | 0.341 | 0.337  |

Table (2) Comparing the simulation on the cofecient of variation for initiation time and corrosion rate ( $i_{corr}(1)$ )

جدول (۳) مقایسه توابع توزیع و پارامترهای آن برای متغیرهای خوردگی (ضریب انتشار یون های مخرب ( $D_c$ ), زمان شروع خوردگی ( $T_0$ ) و نرخ خوردگی سالیانه ( $i_{corr}(1)$ ))

| Distribution | Probability function                                                                                          | $D_c$         |                                | $T_0$         |                                | $i_{corr}(1)$ |                               |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|-------------------------------|
|              |                                                                                                               | ( $\chi^2$ )  | Paramters                      | ( $\chi^2$ )  | Paramters                      | ( $\chi^2$ )  | Paramters                     |
| Gamma        | $f_x(x) = [v(vx)^{k-1} / \Gamma(k)] \exp(-vx)$                                                                | 982.17        | $\kappa=8.11$<br>$v=6.54$      | 457.31        | $\kappa=3.46$<br>$v=6.51$      | 1663.8        | $\kappa=9.21$<br>$v=0.23$     |
| Gumbel       | $f_x(x) = \frac{1}{\beta} \exp[-\frac{x-v}{\beta} - \exp(-\frac{x-v}{\beta})]$                                | 431.51        | $\beta=44.63$<br>$v=6.09$      | 1643.4        | $\beta=12.04$<br>$v=14.73$     | 966.6         | $\beta=0.54$<br>$v=1.81$      |
| Lognormal    | $f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right)^2\right]$ | <b>281.04</b> | $\xi=0.309$<br>$\lambda=3.92$  | <b>177.93</b> | $\xi=0.53$<br>$\lambda=2.96$   | <b>459.77</b> | $\xi=0.27$<br>$\lambda=0.71$  |
| Normal       | $f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$       | 1723.8        | $\sigma=18.62$<br>$\mu=53.01$  | 3453.3        | $\sigma=15.44$<br>$\mu=21.68$  | 2685.9        | $\sigma=0.69$<br>$\mu=2.12$   |
| Weibull      | $f_x(x) = \frac{\alpha x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} \exp[-(\frac{x}{\beta})^\alpha]$                           | 2058.2        | $\alpha=3.85$<br>$\beta=58.51$ | 1464.0        | $\alpha=1.68$<br>$\beta=25.46$ | 3742.3        | $\alpha=4.37$<br>$\beta=2.33$ |

Table (3) Probability destibutions and their parameters for corroded variables including threshold chloride concentration ( $D_c$ ), initiation time (T) and corrosion rate ( $i_{corr}(1)$ )

جدول (۴) خصوصیات آماری متغیرهای پایه جهت تحلیل پارامترهای آماری

| Variable     | $f'_c$<br>(MPa) | C<br>(mm)   | $C_{th}$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $C_0$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------|-----------------|-------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Mean         | 25              | 35          | 0.6                              | 1.2                           |
|              | <b>30*</b>      | 40          | <b>0.9</b>                       | <b>3.5</b>                    |
|              | 35              | <b>50</b>   | 1.0                              | 5.5                           |
|              | 40              | 60          | 1.2                              | 8.2                           |
| COV          | 0.08            | 0.06        | 0.10                             | 0.10                          |
|              | <b>0.18</b>     | <b>0.12</b> | <b>0.20</b>                      | <b>0.30</b>                   |
|              | 0.25            | 0.20        | 0.30                             | <b>0.65</b>                   |
|              | 0.35            | 0.30        | 0.40                             | 0.85                          |
| Distribution | Normal          | Lognormal   | Normal                           | Lognormal                     |

\* اعداد ضخیم شده، مقدار مورد استفاده در تحلیل پارامتری است

Table (4) statistical properties of the basic variables for paramtric statistical analysis

## ۲-۴- خواص آماری متغیر شروع خوردگی

تاثیر ویژگی های آماری (میانگین و انحراف معیار) چهار متغیر پایه؛ مقاومت مشخصه بتن، پوشش میلگردها، مقدار ثابت و مقدار مورد انتظار یون های مخرب که ویژگی های آماری آن ها در جدول (۴) درج شده، بر متغیر تصادفی زمان شروع خوردگی ( $T_0$ ، رابطه ۴) به صورت پارامتری بررسی شده است. پارامترهای تابع توزیع لوگ-نرمال مطابق ۱۰۰۰۰ شبیه سازی با استفاده از رویه مونت کارلو (۱۲) برای متغیر  $T_0$  محاسبه شده است.

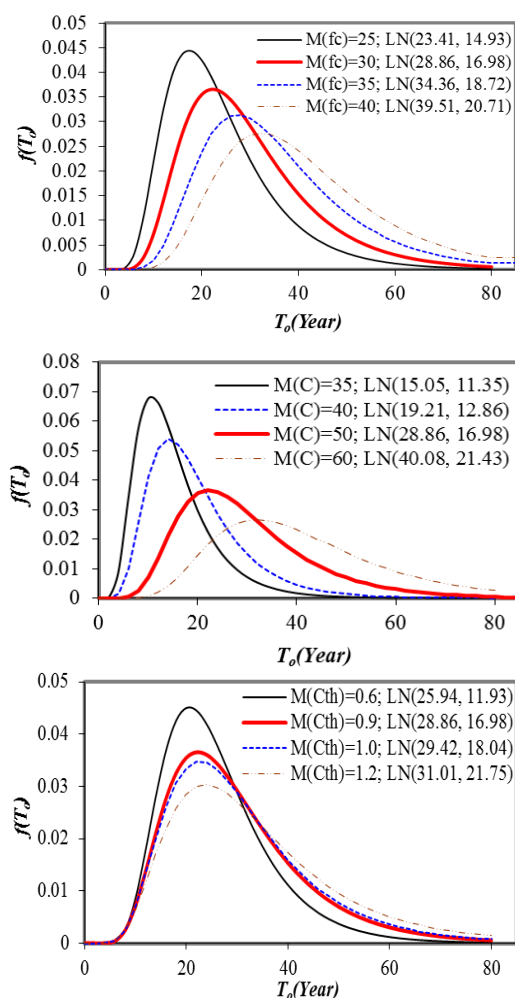
شکل (۲)، تحلیل آماری از تاثیر میانگین چهار متغیر مستقل درج شده در جدول (۳) بر زمان خوردگی نشان داده شده است. مقادیر میانگین متغیرهای تصادفی پایه به صورت (متغیر M) و مقدار میانگین و انحراف معیار داده های متغیر زمان خوردگی به صورت LN ( $\mu, \sigma$ ) که  $\mu$ : میانگین و  $\sigma$ : انحراف معیار) در شکل (۲) نمایش داده شده است. مشخص است که با افزایش مقاومت بتن زمان شروع خوردگی نیز افزایش یافته و انحراف معیار تابع احتمال آن نیز افزوده می شود.

افزایش میانگین پوشش بتن نسبت به سایر متغیرها موجب افزایش بیشتر زمان شروع خوردگی می شود به گونه ای که، با افزایش در حدود ۴۰ درصد پوشش بتن، میانگین زمان شروع خوردگی در حدود ۱۰۰ درصد افزایش یافته که این افزایش به ازای مقدار متناظر افزایش مقاومت بتن، در حدود ۶۰ درصد نتیجه شده است. از اینرو افزایش پوشش میلگرد یک راه حل ارزان و قابل انجام برای افزایش زمان شروع خوردگی نسبت به افزایش مقاومت بتن است. چرا که افزایش در حدود ۱ سانتی متر پوشش میلگرد، میانگین زمان شروع خوردگی را در حدود ۹



(تابع لوگ-نرمال) نسبت به پوشش بتن ( $C$ ) و مقاومت ( $f'_c$ ) آن نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش میانگین مقاومت و پوشش بتن از نرخ خوردگی سالیانه کاسته شده است. با افزایش میانگین مقاومت فشاری در حدود ۶۰ درصد، نرخ میانگین خوردگی در حدود ۴۵ درصد کاهش یافته در حالی که با افزایش در حدود ۶۰ درصدی پوشش میلگردها نرخ خوردگی سالیانه در حدود ۴۳ درصد کاهش یافته است. پس بین تاثیر افزایش مقاومت و پوشش میلگردها بر نرخ خوردگی سالیانه نمی‌توان تمایزی قائل شد چرا که هر دو موجب کاهش تقریباً یکسانی شده‌اند. اگر هزینه‌های ساخت و ساز مد نظر باشد بهترین انتخاب افزایش پوشش میلگردها است. چراکه، علاوه بر محافظ مکانیکی از میلگردها می‌تواند به عنوان محافظ شیمیایی (حائل بین یون‌های مخرب و میلگردها) نیز عمل نماید.

شکل (۲) تاثیر میانگین پارامترهای خوردگی بر تابع چگالی احتمال زمان شروع خوردگی



سال تعدیل می‌بخشد. مشخص است که خواص فیزیکی و مکانیکی بتن بر میانگین زمان شروع خوردگی تاثیر بیشتری نسبت به مورد انتظار و موجود یون مخرب دارد. محدوده ضریب تغییرات برای مقاومت فشاری بین ۰/۵۳ تا ۰/۶۴، پوشش میلگردها بین ۰/۵۳ تا ۰/۷۵، مقدار مورد انتظار و مقدار موجود یون مخرب به ترتیب بین ۰/۴۶ تا ۰/۷۸ و ۰/۳۸ تا ۰/۲۹ نتیجه شده است.

شکل (۳) اثر انحراف معیار متغیرهای خوردگی بر زمان شروع خوردگی مطابق با تحلیل آماری را نشان می‌دهد. مشخص است که بر خلاف میانگین، انحراف معیار متغیرهای پوشش میلگردها و مقاومت بتن تاثیر کمتری بر زمان شروع خوردگی دارند و میانگین و مد زمان شروع خوردگی به ازای انحراف معیار تقریباً یکسان نتیجه شده است. Frangopol و Enright [7] نیز نشان دادند که تغییرات در انحراف معیار خواص مکانیکی و فیزیکی بتن تاثیر چشمگیری بر زمان شروع خوردگی ندارد. متغیر مورد انتظار یون مخرب ( $C_{th}$ ) کمترین تاثیر را بر زمان شروع خوردگی نشان داده است. بیشترین اختلاف نسبی انحراف معیار توابع توزیع احتمال شروع خوردگی به ازای  $C_{th}$  در حدود ۶ درصد و پوشش میلگردها در حدود ۳۵ درصد به دست آمده است. پس، پراکندگی پوشش میلگردها تاثیر بیشتری نسبت به  $C_{th}$  بر پراکندگی زمان شروع خوردگی نشان داده است. بیشترین تاثیر تغییرات انحراف معیار بر زمان شروع خوردگی بر اساس متغیر ثابت یون مخرب ( $C_0$ ) حاصل شده است. به طوریکه با کاهش انحراف معیار  $C_0$  زمان شروع خوردگی افزایش می‌یابد. پس، در محیط‌هایی با پراکندگی بالای شرایط خوردگی، زمان شروع خوردگی کاهش یافته، باید ملاحظات از جمله محافظت مکانیکی و شیمیایی میلگردها صورت بگیرد.

### ۳-۴ تحلیل آماری نرخ خوردگی

مطابق با داده‌های مندرج شده در جدول (۴)، تاثیر خواص فیزیکی بتن (پوشش میلگردها) و مکانیکی بتن (مقاومت بتن) به صورت آماری بر نرخ خوردگی سالیانه ارزیابی شده که در شکل (۴) نتایج حاصل پارامترهای تابع توزیع احتمال نرخ خوردگی

شکل (۴) تاثیر میانگین و انحراف معیار پوشش میلگردها و مقاومت بتن بر تابع احتمال نرخ خوردگی سالیانه

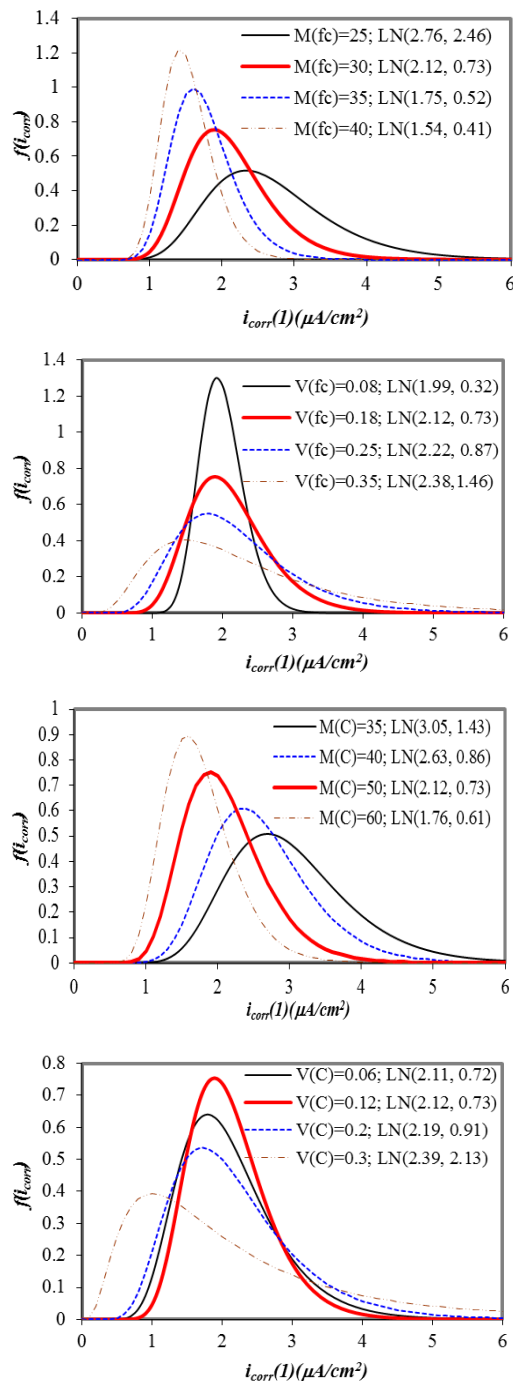


Fig (4) the Effects of mean and COV of cover and compressive concrete strength on probability function of corrosion rate

شکل (۴) نشان می‌دهد که کاهش انحراف معیار مقاومت فشاری بتن موجب کاهش چشمگیر پراکندگی نرخ خوردگی سالیانه شده است. تاثیر انحراف معیار در متغیر مقاومت بتن بیشتر از پوشش میلگردها بر انحراف معیار نرخ خوردگی سالیانه نتیجه شده است.

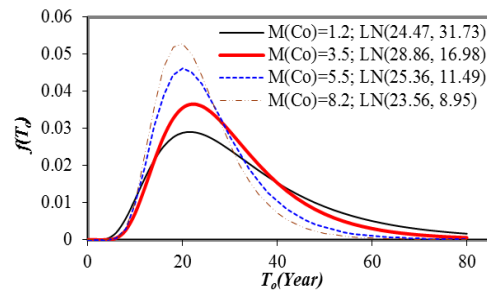


Fig (2) Mean effect of the corroded variables on the probability density function of initiation time

شکل (۳) تاثیر انحراف معیار پارامترهای خوردگی بر تابع چگالی احتمال زمان شروع خوردگی

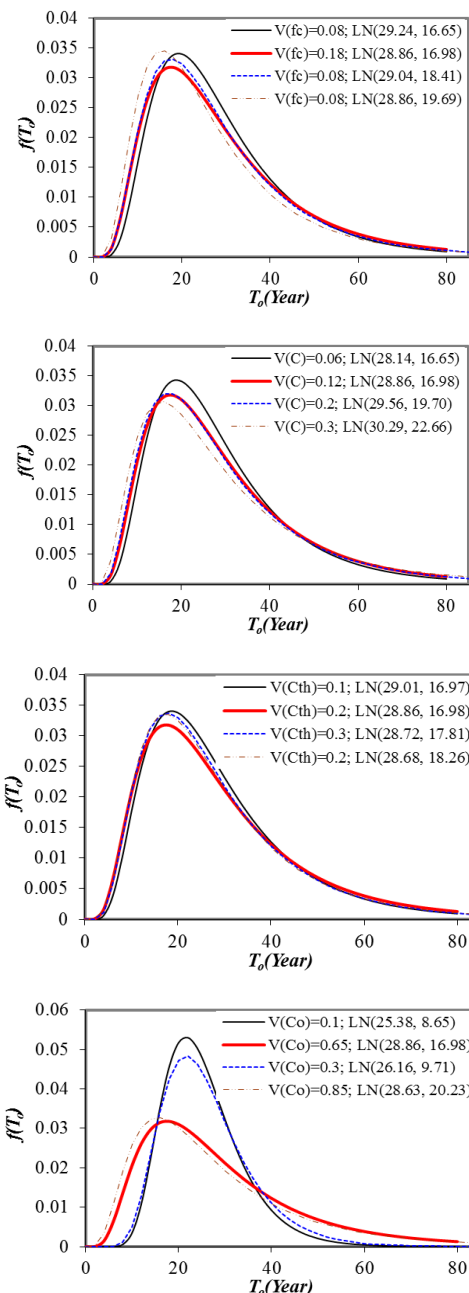


Fig (3) coefficient of variation effect of the corroded variables on the probability density function of initiation time



شکل (۶) تاثیر زمان خوردگی بر نرخ خوردگی برای شرایط مختلف

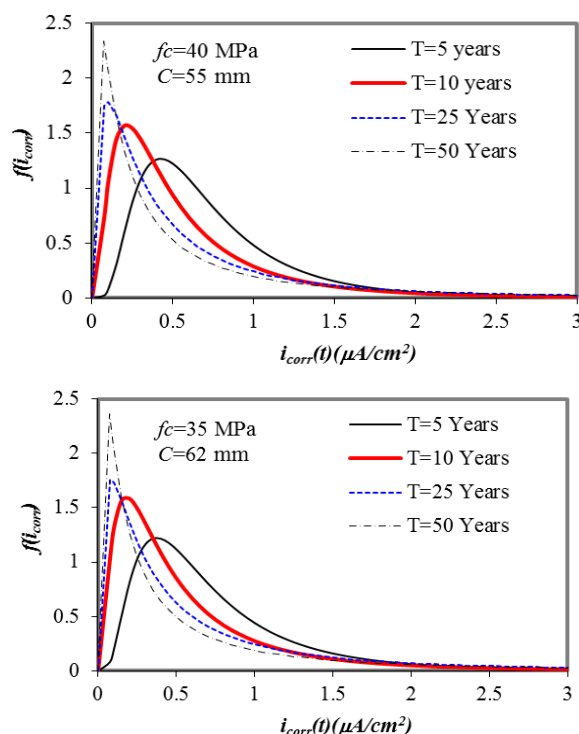


Fig (6) Effects of corroded times on corrosion rate for variuse conditions

## ۵- تاثیر قطر آرماتور در فرایند خوردگی

در این بخش اثر کاهش مساحت چهار قطر میلگردهای متداول (شماره‌های ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰) تحت خوردگی موضعی معادله ۶ مطابق با تحلیل آماری ارزیابی شده است. ویژگی‌های آماری متغیرهای تصادفی که در خوردگی موضعی میلگرد مورد استفاده در جدول (۵) نوشته شده است.

تحلیل احتمالاتی برای این میلگردها با استفاده از ۱۰۰۰۰ داده‌های شبیه‌سازی شده به کمک رویه مونت کارلو صورت پذیرفته است. در شکل (۷)، میزان کاهش سطح مقطع  $(1 - A_p(T)/A_p)$  آرماتورها نسبت به زمان شروع خوردگی ارائه شده است. میزان کاهش سطح مقطع به واسطه خوردگی، با افزایش زمان خوردگی افزایش یافته و کاهش سطح مقطع برای قطرهای کوچکتر بیشتر از قطرهای بزرگتر نتیجه شده است. به طوریکه به ازای قطر ۲۰ میلی‌متر کمترین نرخ کاهش سطح حاصل شده است. رابطه ۶ نشان می‌دهد که سطح مقطع خورده شده به قطر اولیه میلگرد و عمق خوردگی وابسته است. خوردگی وابسته به زمان خوردگی و نیز نرخ خوردگی است. پس، برای قطرهای متفاوت میلگرد در زمان‌های یکسان عمق

در شکل (۵) مقایسه‌ای از مقاومت بتن بر میانگین نرخ خوردگی سالیانه  $(i_{corr}(1))$  با توجه به پوشش میلگردها نشان داده شده است. با افزایش مقاومت و پوشش میلگردها از نرخ خوردگی سالیانه کاسته شده است. به ازای مقاومت بزرگتر از ۴۰ MPa با پوشش بیشتر از ۵۵ میلی‌متر نرخ خوردگی سالیانه به مقدار  $1/4$  ( $\mu A/cm^2$ ) محدود شده که این امر موجب خوردگی پایین میلگرد را در عمر مفید سازه به همراه خواهد داشت. از اینرو، برای محیط‌های خورنده پیشنهاد می‌شود که کمینه پوشش میلگرد و مقاومت بتن به ترتیب به مقدار ۵۵ میلی‌متر و ۴۰ MPa یا ۶۲ میلی‌متر و ۳۵ MPa محدود شود.

اثر مقاومت بتن و پوشش میلگردها در شرایط اول ( $f_c = 40$  MPa و  $C = 55$  mm) و شرایط دوم ( $f_c = 35$  MPa و  $C = 62$  mm) بر نرخ خوردگی در زمان‌های مختلف ارزیابی شده که تابع توزیع احتمال نرخ خوردگی در شکل (۶) نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش دوره موجب کاهش خوردگی نرخ خورگی شده و محدوده بیشینه نرخ خوردگی به ازای شرایط اول و دوم تقریباً مشابه نتیجه شده است (بین ۰/۱ تا ۰/۶). مد نرخ خوردگی در دوره زمانی ۵۰ و ۵ ساله به ترتیب در حدود ۰/۱ و ۰/۶  $\mu A/cm^2$  برای شرایط اول؛ و ۰/۱ و ۰/۵  $\mu A/cm^2$  برای شرایط دوم نتیجه شده است. مشخص است که حالت دوم نسبت به حالت اول پیشنهادی محافظه کارانه‌تر است و در دوره‌های زمانی مشابه مد نرخ خوردگی کمتری را نشان داده است. از اینرو، می‌توان نتیجه گرفت که پوشش میگردها تاثیر بیشتری بر کاهش خوردگی نسبت به مقاومت بتن دارد.

شکل (۵) مقایسه مقاومت بتن بر نرخ خوردگی سالیانه نسبت به پوشش میلگرد

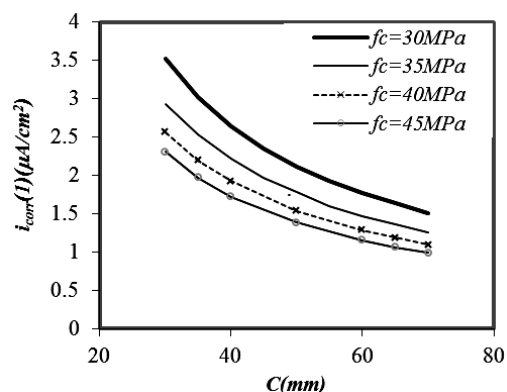


Fig (5) Corrosion rate with respect to cover of bars for different comorasive concrete strengths

شکل (۷) مقایسه نرخ کاهش سطح مقطع میلگردها

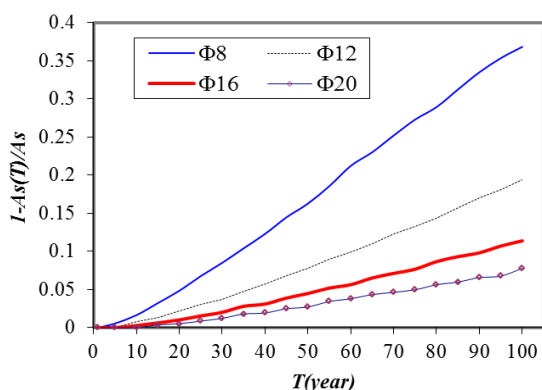


Fig (7) Comparing the reduced rate of cross-section for different bars

شکل (۸) مقایسه ضریب تغییرات سطح مقطع خورده شده میلگردها

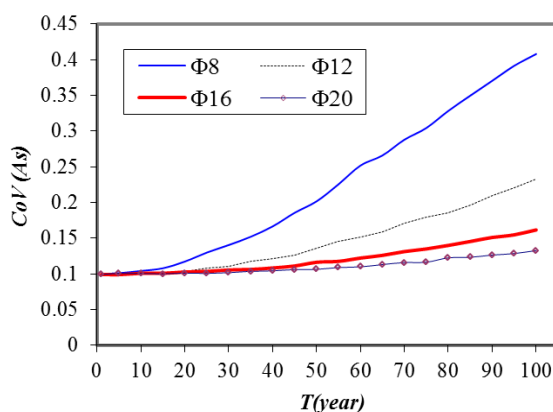


Fig (8) Comparing the COV of corroded cross-section for different bars

## ۶- خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله تحلیل آماری از میلگردها تحت خوردگی با توجه به داده‌های شبیه‌سازی مونت کارلو ارائه شده است. تحلیل آماری به منظور گزینش بهترین تابع توزیع احتمال متغیرهای خوردگی و نیز تعیین پارامترهای توابع توزیع انجام شده که جهت تحلیل قابلیت اعتماد تیرهای بتن مسلح می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. توابع توزیع احتمال گاما، گامبل، نرمال، لوگ نرمال و وایبول در تحلیل آماری خوردگی حفره‌ای بر اساس روابط تحلیلی-تجربی ارزیابی شده که بهترین تابع توزیع احتمال برای ضریب انتشار یون‌های مخرب، زمان شروع خوردگی و نرخ خوردگی، تابع لوگ نرمال انتخاب شده است.

افزایش مقاومت بتن و پوشش میلگردها موجب افزایش بیشتر زمان شروع خوردگی شده و خواص فیزیکی و مکانیکی بتن بر میانگین زمان شروع خوردگی تاثیر بیشتری نسبت به

خوردگی مشابه‌ای محاسبه می‌شود. بنابراین، در زمان خوردگی یکسان مقدار نسبی سطح مقطع خورده شده برای میلگرد کوچکتر بیشتر از میلگرد با سطح مقطع بزرگتر حاصل شده است. قطر میلگرد یک پارامتر تاثیر گذار بر کاهش سطح مقطع خورده شده در خوردگی موضعی است و استفاده از قطرهای بزرگتر می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به قطرهای کوچکتر برای سازه‌های بتن آرمه منجر شود.

جدول (۵) ویژگی‌های آماری متغیرهای تصادفی پایه میلگردها تحت خوردگی

| Variable     | $D_0$<br>(mm) | $i_{corr}(t)$<br>( $\mu A/cm^2$ ) | $T_0$<br>(year) | $R$<br>[9] |
|--------------|---------------|-----------------------------------|-----------------|------------|
| Mean         | 8,12,16,20    | 2.5                               | 30              | 6          |
| COV          | 0.05          | 0.3                               | 0.6             | 0.2        |
| Distribution | Normal        | Lognormal*                        | Lognormal*      | Gumbel     |

\* مطابق با تحلیل آماری مقاله حاضر در نظر گرفته شده است

Table (5) Statistical properties of basic random variables for corroded bars

ضریب تغییرات سطح مقطع میلگردها (نسبت انحراف معیار به میانگین سطح مقطع خورده شده) خورده شده با استفاده از ۱۰۰۰۰ شبیه‌سازی در شکل (۸) نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش زمان خوردگی و کاهش قطر میلگرد، ضریب تغییرات سطح مقطع میلگردهای خورده شده افزایش یافته است. ضریب تغییرات را می‌توان در تحلیل‌های احتمالی مانند تحلیل قابلیت اعتماد یا طراحی بهینه بر مبنای قابلیت اعتماد، برای مدلسازی ویژگی‌های آماری متغیر خوردگی میلگردهای وابسته به زمان استفاده نمود. به گونه‌ای که، محدوده ضریب تغییرات خوردگی سطح مقطع خورده شده برای میلگردهای با قطر کمتر از ۱۲ میلی‌متر در بازه زمانی خوردگی ۱ تا ۱۰۰ سال از در حدود ۰/۴ تا ۰/۲ و برای میلگردهای با قطر بیشتر از ۱۲ میلی‌متر در حدود ۰/۱ تا ۰/۱۵ نتیجه شده که با کاهش قطر میلگرد و نیز افزایش زمان خوردگی به عدد بزرگتر تقریب می‌شود. ضریب تغییرات سطح مقطع خورده شده برای زمان‌های خوردگی کمتر از ۱۰ سال را می‌توان در حدود ۰/۰۸ در تحلیل‌های احتمالاتی در نظر گرفت. ضریب تغییرات سطح مقطع خورده شده میلگردها برای زمان‌های بیشتر از ۲۰ سال از شروع خوردگی وابسته به قطر میلگرد و زمان خوردگی است.

## References

## ۷- مراجع

- [1] Ahmad S. 2003 Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction-A review. Cement and Concrete Composite, 25, 459-471.
- [2] Tuutti K. 1982 Corrosion of steel in concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute, 4(82), 1-159
- [3] Hoffman P. C. & Weyers R. E. 1994 Predicting critical chloride levels in concrete bridge decks. Structural safety and reliability: Proceedings of ICOSSAR'93. Rotterdam, 957-959.
- [4] Stewart M. G. & Rosowsky D. V. 1998 Time-dependent reliability of deteriorating reinforced concrete bridge decks. Structural Safety, 20, 91-109.
- [5] Rodriguez J., Ortega L. M., Casal J. & Diez J. M. 1996 Corrosion of reinforcement and service life of concrete structures. Durab. Build. Mater. Compon, 7(1), 117- 126.
- [6] Stewart M.G. 2004 Spatial variability of pitting corrosion and its influence on structural fragility and reliability of RC beams in flexure. Structural Safety, 26(4), 453-70.
- [7] 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.
- [8] Darmawan, M. S. 2010 Pitting corrosion model for reinforced concrete structures in a chloride environment. Magazine of Concrete Research, 62(2), 91-101.
- [9] Stewart M. G. & Al-Harthy A. 2008 Pitting corrosion and structural reliability of corroding RC structures, experimental data and probabilistic analysis. Reliability Engineering and System Safety, 93(3), 273-382.
- [10] Martin-Perez B, Pantazopoulou S. J. & Thomas M. D. A. 2001 Numerical solution of mass transport equations in concrete structures. Computers and Structures, 79(13), 1251-1264.
- [11] Suzuki, M., Tsutsumi, T. & Irie, M. 1990 Reliability analysis of durability/deterioration indices of reinforced concrete in a marine environment. Corrosion of reinforcement in concrete. Barking U.K:Elsevier Science, 268-277.
- [12] Gonzalez J. A., Andrade C., Alonso C. & Feliu S. 1995 Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement. Cement and Concrete Research, 25(2), 257-264.
- [13] Bhargava K., Mori Y. & Ghosh A. K. 2011 Time-dependent reliability of corrosion-affected RC beams-Part 1: Estimation of time-dependent strengths and associated variability. Nuclear Engineering and Design, 241, 1371-1384.
- [14] Vu K. & Stewart M. G. 2000 Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models. Structural Safety, 22(4), 313-333.
- [15] Dai H. & Wang W. 2009 Application of low-discrepancy sampling method in structural reliability analysis. Structural Safety, 31, 55-6.
- [16] Rohatgi, V. K. & Ehsanes, S. A. K. 2001 Introduction to probability and statistics. Macmillan published Company, New York.

مقدار مورد انتظار و موجود یون مخرب دارد. اما یون‌های مخرب موجب تغییرات بیشتری در انحراف معیار داده‌های زمان شروع خوردگی (پراکندگی داده‌ها) شده است.

تغییرات در انحراف معیار متغیرهای زمان شروع خوردگی مانند مقاومت بتن، پوشش میلگردها و مقدار مورد انتظار یون مخرب تاثیر چندانی بر زمان شروع خوردگی نداشته اما مقادیر تغییرات در انحراف معیار مقدار ثابت یون مخرب اثر تاثیرگذاری بر زمان شروع خوردگی دارد.

افزایش پوشش میلگرد یک راه حل ارزان و قابل اجرا برای محافظت آرماتورها است. بطوریکه، به ازای مقاومت فشاری بتن در حدود ۳۵، ۴۰ و ۴۵ مگا پاسکال می‌توان برای کاهش نرخ خوردگی مقدار پوشش میلگردها را به ترتیب برابر با ۷۰، ۶۰ و ۵۵ میلی‌متر محدود نمود.

برای سازه‌های بتن آرمه موجود در محیط‌های خورنده، پیشنهاد می‌شود که علاوه بر افزایش پوشش میلگردها (بیشتر از ۵۵ mm) مقاومت بتن مصرفی را نیز افزود (بیشتر از ۴۰ MPa)، تا این امر موجب کاهش مناسب نرخ خوردگی و افزایش زمان شروع خوردگی شده که متعاقب آن افزایش عمر مفید سازه را موجب می‌شود.

افزایش قطر میلگرد و دوره خوردگی به ترتیب موجب کاهش و افزایش سطح مقطع میلگرد خورده شده تحت خوردگی حفره‌ای می‌شود. پراکندگی سطح مقطع خورده شده به قطر میلگرد و دوره زمانی وابسته است به طوریکه با افزایش دوره زمانی خوردگی و کاهش قطر میلگرد، میزان پراکندگی سطح مقطع خورده شده میلگردها، افزایش یافته است.

ضریب تغییرات سطح مقطع خورده شده را در تحلیل‌های احتمالاتی برای میلگردهای با قطر کمتر از ۱۲ میلی‌متر در حدود ۰/۲ تا ۰/۴ و برای میلگردهای با قطر بزرگتر از ۱۲ میلی‌متر در حدود ۰/۱ تا ۰/۱۵ می‌توان در نظر گرفته شود.



# Effects of Local Corrosion on Steel Bars of Reinforcement Concrete Beams using Statistical Analysis

B. Keshtegar<sup>1 \*</sup>

1- Assistant Prof., Departement of Civil Engineering., Faculty of Engineering., University of Zabol

\*Bkeshtegar@uoz.ac.ir

## Abstract:

Corrosion of steel bar has a complex process which leads to the reduction of cross section of steel bars and degradation of concrete structures. Corroded steel bars are among the most important issues in durability of concrete in the marine structures. Important effects of corrosion are seen in the damages made by corroded concrete structures including all kinds of structural and non-structural damages. Structural damages are more important because of the reduction of the safety factor of the structure in response to the applied external loads. These failures include reduction of bars' cross-section and changes in the mechanical behavior of steel. Corrosion includes two processes: (1) corrosion initiation and (2) corrosion propagation. The corrosion initiation is related to the time when corrosive ions reach to the surface bars and chemical features are activated. Propagation is related to the time during which the structure loses its capability, subject to the loss of the cross-sectional area of reinforced steel bars, reduction of bond, and crack initiation and propagation. The predicted models of life-service of a reinforced concrete structure should contain two processes of corrosion. In new structures, the initiation time of corrosion and insurance for the whole time of corrosion initiation time is more important. Whereas, controlling the corrosion propagation must be regarded for existing structures.

In this paper, statistical characteristics of the chloride diffusion coefficient, corrosion initiation time and corrosion rate including the best probability distribution function and its parameters are investigated based on Monte Carlo simulation of pitting corrosion data. The distribution function parameters of the corrosion variables i.e. the chloride diffusion coefficient, corrosion initiation time and corrosion rate were calculated using the Maximum likelihood method based on mathematical pitting corroded model. The model contains corrosion initiation and corrosion propagation processes. The probability density functions such as: Gamma, Gumbel, Lognormal, Normal, and Weibull were used in the statistical analyses of corroded pitting parameters. The best probability distribution function was selected using chi-square method. The Lognormal distribution function obtained the best probability function for the threshold chloride concentration, the corrosion initiation time and the corrosion rate. The corrosion initiation time depends on four basic random variables such as: compressive strength of concrete, concrete cover, threshold chloride concentration and surface chloride concentration. Thus, statistical effects of these random variables on corrosion initiation time are parametrically investigated using 10000 Mont Carlo simulations. It is obvious that increasing the concrete resistance leads to an increase in the corrosion initiation time and standard deviation of the density function. The concrete physical and mechanical characteristics are effective variables on the corrosion initiation time but the threshold chloride concentration and the surface chloride concentration are insensitive variables on the mean of corrosion time; however, they lead to significant changes in standard deviation of the corrosion time. Finally, Various bar diameters such as:  $\Phi 8$ ,  $\Phi 12$ ,  $\Phi 16$  and  $\Phi 20$  were investigated in time-dependent area of the corroded steel in concrete beams. Amount of the cover is important variable in corroded cross section of bars. Also, increasing bar diameter and decreasing corrosion period led to a reduction in the rate of the bars' cross section.

**Keywords:** Probabilistic analysis, Mont Carlo simulation, reinforced concrete beams, pitting corrosion