

## اثر حالت‌های مختلف نفوذ یون کلر بر مدل عمر تیر بتنی ناشی از شکست خمشی

سید عباس حسینی \*

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

منصور باقری

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.

سید مهرباب رمضانی

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

### چکیده

ارزیابی مدل عمر سازه‌های بتنی نقش مؤثری در تعیین برنامه‌های تعمیر و نگهداری و همچنین برآورد احتمال خرابی این سازه‌ها دارد. به منظور محاسبه مدل عمر، ابتدا باید عوامل مخرب محیطی و اثرات آنها بر سازه شناسایی شوند. یکی از مهمترین عواملی که بر دوام و مقاومت سازه‌های بتنی اثرگذار است خوردگی میلگردها است که عموماً بر اثر نفوذ یون کلر در بتن ایجاد می‌شود. بر اثر خوردگی میلگرد، از سطح مؤثر میلگردها کاسته شده و به مرور زمان با ایجاد ترک‌هایی در مقطع بتنی از سطح مقطع مؤثر بتن نیز کاسته می‌شود. در این تحقیق با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ذاتی و آماری پارامترهای مؤثر بر خوردگی، برای حالت‌های مختلف نفوذ یون کلر، مدل عمر تیر بتنی مورد ارزیابی قرار گرفته است؛ بدین منظور با در نظر گرفتن یک تیر بتنی، حالت‌های مختلف نفوذ یون کلر به درون مقطع تیر در نظر گرفته می‌شود و بر اساس هر سناریو زمان‌های احتمالاتی آغاز خوردگی میلگردها، ایجاد ترکها و پوسته شدن بتن محاسبه شده و اثر رخداد هر رویداد بر مقاومت خمشی تیر در نظر گرفته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن اثر پوسته شدن بتن موجب تفاوت تا ۲۰ درصد در مقادیر پیش‌بینی شده برای مقاومت خمشی تیر بتنی می‌شود و ارزیابی واقع بینانه‌تری از عمر باقیمانده سازه بدست خواهد آمد. همچنین حالت‌هایی که موجب پوسته شدن مقطع فشاری بتن می‌گردد به دلیل کاهش عمق مؤثر مقطع حالت بحرانی تری در مدل عمر تیر بتنی دارند.

واژه‌های کلیدی: مدل عمر، خوردگی میلگرد، نفوذ یون کلر، تیر بتنی، ارزیابی احتمالاتی.

## ۱- مقدمه

برای ارائه‌ی مدل عمر سازه‌های بتنی که تحت اثر پدیده خوردگی قرار گرفته‌اند، تحقیقات زیادی انجام شده است. این تحقیقات عمدتاً درباره اثرات خوردگی بر مقاومت ساختمان‌های بتنی و تغییر شرایط حدی تعریف شده ساختمان، بوده است [۹، ۱۰]. نحوه کاهش عملکرد ساختمان بر اساس نوع عامل اصلی کاهنده مقاومت متفاوت است. برای اثرات ناشی از خوردگی میلگرد بسیاری از مدل‌ها نحوه کاهش عملکرد را متناسب با کاهش سطح مقطع میلگرد در طی دوران گسترش خوردگی در نظر گرفته‌اند [۱۱، ۱۲]. در این مدل‌ها از اثرات جانبی خوردگی معمولاً صرف‌نظر شده است. صافحیان و رمضانیانپور بر مبنای تحقیقات تجربی در خلیج فارس، یک مدل عمر برای بتن‌های حاوی میکرو سیلیس ارائه کردند که در آن تنها اثرات قرارگیری قطعه در ناحیه‌ی پاششی و جزر و مدی در نظر گرفته شده است [۱۳]. لی و پنگ بر اساس تحقیقات طولانی مدت بر نمونه‌های قرار گرفته در آب دریا یک مدل تحلیلی ارائه دادند که برای پیش‌بینی عمر باقی مانده به دلیل نفوذ یون کلر مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴]. لین و همکاران برای مدل عمر از یک مدل آباکوس که تشریح کننده نحوه‌ی نفوذ یون کلر در بتن بود، استفاده کردند [۱۵]. اُزبولت و همکاران با استفاده از یک مدل سه بعدی اجزا محدود، مدل عمر را بر مبنای توسعه خوردگی، ارائه کردند [۱۶]. در برخی از مدل‌های ارائه شده به منظور در نظر گرفتن خواص تصادفی پارامترها از روش‌های احتمالاتی استفاده شده است [۱۷]. خاطری و سیروانتانون یک مدل احتمالاتی برای پیش‌بینی عمر باقیمانده سازه‌های بتن مسلح ارائه کردند که با استفاده از تابع خطا، توزیع یون کلر در مقطع تعیین می‌گردید [۱۸].

سازه‌ها معمولاً به دو دلیل عمده در معرض یون کلر قرار می‌گیرند؛ یا به دلیل قرار گرفتن در نواحی سواحل و یا مناطق نزدیک به آن و یا به دلیل استفاده از نمک برای زدودن یخ در فصل زمستان. بسته به موقعیت قرارگیری عضو سازه‌ای، نحوه و همچنین شدت کلر سطحی بر وجوه مختلف عضو سازه‌ای می‌تواند متفاوت باشد؛ به عنوان نمونه در شاتیر پل‌ها که درزهای اجرایی در کناره‌ها قرار دارند، به واسطه‌ی نفوذ آب نمک از این درزها، به ویژه در زمستان، مخاطرات ایجاد شده در کناره‌های تیر افزایش خواهد یافت. اینکه چه طولی از تیر و یا اینکه کدام وجه مقطع در معرض یون کلر قرار بگیرد می‌تواند بر رفتار نهایی سازه تاثیر گذار باشد؛ به عنوان نمونه،

عوامل محیطی در طی زمان بر سازه‌ها اثر گذاشته و موجب به مخاطره افتادن عملکرد سازه می‌گردند. اگر سازه‌ها برای شرایط محیطی مورد نظر طراحی نشده باشند تحت اثر این عوامل دچار مشکلات ناشی از برآورده نشدن الزامات دوام و مقاومت خواهند شد. آیین‌نامه‌های طراحی معمولاً اثر این خرابی‌های تدریجی ناشی از عوامل محیطی را به دو دوره اصلی تقسیم بندی می‌کنند که شامل دوره مقدماتی و دوره گسترش می‌باشد [۱]. در مدل عمر، دوره مقدماتی از زمان ساخت سازه شروع شده و تا زمان آغاز فرایندهای کاهنده مقاومت ادامه می‌یابد و دوره گسترش نیز از زمان شروع اثر عوامل محیطی بر مقاومت سازه تا زمان تخریب آن را شامل می‌شود [۲]. در بسیاری از سازه‌های مهم، مرز بین این دو دوره به عنوان یکی از شرایط حدی در طراحی سازه در نظر گرفته می‌شود تا هیچگاه اثرات کاهش عوامل محیطی در سازه رخ ندهد [۳].

محاسبه‌ی مدل عمر در واقع با شناخت عوامل محیطی و ارزیابی وضع موجود سازه شروع می‌شود و با برون یابی این آثار، عملکرد سازه در طی زمان‌های بعدی تخمین زده می‌شود؛ بنابراین اولین قدم شناخت عوامل محیطی و اثرات آنها بر سازه می‌باشد.

طبق برآوردهای موجود، خوردگی میلگردها، مهمترین عامل کاهش مقاومت در طی عمر سازه‌های بتن مسلح است [۴]. دو عامل مهم کربناته شدن و نفوذ یون کلر مهمترین دلیل آغاز خوردگی میلگرد در سازه‌های بتن مسلح می‌باشد [۵]. این دو عامل عموماً به دلیل کاهش خاصیت قلیایی بتن اطراف میلگرد، موجب آغاز خوردگی می‌شوند. به دلیل اثرات مخربی که خوردگی میلگرد بر سازه‌های بتنی دارد، معمولاً آیین‌نامه‌های طراحی ضوابط سختگیرانه‌تری برای طراحی سازه‌های بتنی در محیط‌های خورنده و شدید اعمال می‌کنند [۶، ۷]. توسعه ترک‌ها، کاهش پیوستگی بتن و میلگرد، کنده شدن پوشش بتنی روی میلگردها و در نهایت به مخاطره افتادن سازه به دلیل کاهش مقاومت عضو، از جمله‌ی مهمترین عواقب خوردگی میلگرد می‌باشند. خوردگی میلگرد معمولاً موجب تولید موادی می‌گردد که دارای حجم بیشتری نسبت به مواد مصرف شده در طی فرایند خوردگی است [۸]. افزایش حجم در اطراف میلگرد موجب ایجاد نیروهای کششی در اطراف میلگرد و ترک خوردگی بتن پوششی می‌شود. با ایجاد ترک‌های سطحی و گسترش آنها به مرور تأثیرات خوردگی در عضو سازه‌ای بیشتر می‌گردد.

در این رابطه،  $C_{cr}$  مقدار غلظت بحرانی کلر یا آستانه شروع خوردگی میلگرد و  $a$  ضخامت پوشش بتن روی میلگرد می‌باشد.

### ۲-۲- کاهش سطح مقطع میلگرد

با شروع خوردگی میلگرد، از سطح مقطع میلگرد کاسته می‌شود، هر چند خوردگی میلگرد ناشی از نفوذ یون کلر بیشتر به صورت غیر یکنواخت بوده است؛ ولی مدل‌های بسیاری برای پیش‌بینی سطح باقیمانده میلگرد با فرض یکنواخت بودن خوردگی، ارائه شده است [۲۰، ۲۱]. وا و استیوارت رابطه‌ی زیر را برای سطح باقیمانده میلگرد بعد از گذشت زمان  $t$  از شروع خوردگی به صورت زیر ارائه کرده‌اند [۲۲]:

$$A_s(t) = \pi \left( D_0 - 0.0282 i_{cor}(I) t \right)^2 / 4 \quad (3)$$

در این رابطه،  $A_s(t)$  سطح باقیمانده میلگرد،  $i_{cor}(I)$  چگالی جریان خوردگی اولیه،  $D_0$  قطر اولیه میلگرد می‌باشد.

### ۳-۲- زمان رخداد ترک و زمان پوسته شدن بتن

با افزایش خوردگی میلگرد و افزایش حجم ناشی از مواد تولید شده در خوردگی، فشار ایجاد شده در اطراف میلگرد موجب ایجاد ترک و گسترش آن بین میلگردها و به سمت سطح بیرون قطعه می‌گردد. برای ارزیابی عرض ترک ناشی از خوردگی، روابط متعددی ارائه شده است؛ این روابط یا مبتنی بر تحلیل‌های عددی و یا بر اساس تجارب آزمایشگاهی ارائه شده‌اند [۲۳، ۲۴]. ویدال و همکاران بر مبنای تجارب آزمایشگاهی، آستانه شروع ترک خوردگی را بر اساس مقدار میلگرد خورده شده به صورت زیر ارائه کرده‌اند [۲۵]:

$$\Delta A_{s0} = A_s \left[ 1 - \left[ 1 - \frac{\alpha}{D_0} \left( 7.53 + 9.32 \frac{c}{D_0} \right) 10^{-3} \right]^2 \right] \quad (4)$$

در این رابطه،  $\Delta A_{s0}$  مقداری از میلگرد که برای شروع ترک در اطراف میلگرد باید دچار خوردگی شود ( $mm^2$ )،  $c$  ضخامت پوشش بتن روی میلگرد ( $mm$ )،  $D_0$  قطر اولیه میلگرد ( $mm$ )،  $\alpha$  ضریب نوع خوردگی که برای خوردگی یکنواخت برابر با ۲ و برای خوردگی غیر یکنواخت (حفره‌ای) بین ۴ تا ۸ تعریف شده است.

با گسترش خوردگی و افزایش تولید مواد ناشی از آن، عرض ترک‌ها بزرگتر شده و بستگی به فاصله بین میلگردها و همچنین پوشش بتن روی میلگردها حالت‌های مختلفی از پوسته شدن بتن

اگر در نقاط حداکثر لنگر خمشی یا حداکثر نیروی برشی، تیرها در معرض عوامل کاهنده قرار بگیرند این امر می‌تواند باعث ایجاد مخاطرات بیشتری برای سازه گردد [۱۹]. در ارتباط با نفوذ یون کلر، میلگردهایی که در وجه در معرض کلر قرار گرفته مقطع می‌باشند زودتر دچار خوردگی گردیده و باعث تغییر در عملکرد سازه می‌گردد. برای در نظر گرفتن اثر تفاوت غلظت کلر سطحی بر اضلاع مختلف مقطع، در این تحقیق، حالت‌های مختلفی از نفوذ یون کلر در مقطع تیر بتنی در نظر گرفته شده است. در این پژوهش با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف نحوه‌ی نفوذ یون کلر در تیر بتنی، اثرات خوردگی میلگردها در مقاومت باقیمانده خمشی، محاسبه گردیده است. اثر عدم قطعیت پارامترهای مؤثر در مقاومت خمشی نیز در نظر گرفته شده است.

## ۲- تئوری و مبانی

### ۱-۲- خوردگی میلگرد

وقتی سازه‌ی بتنی در معرض یون‌های کلر قرار می‌گیرد، به دلیل تفاوت غلظت محیط بیرون و درون بتن، یون‌ها عمدتاً از طریق مکانیزم پخش به درون قطعه نفوذ می‌کنند. مکانیزم پخش از طریق قانون دوم فیک بیان‌کننده‌ی نحوه نفوذ یون کلر به درون بتن می‌باشد. در طی زمان، وقتی غلظت یون‌های کلر بر روی سطح میلگرد درون بتن به حد آستانه شروع خوردگی برسد، خوردگی میلگرد آغاز می‌شود. مبحث نهم مقررات ملی ساختمان رابطه‌ی زیر را برای محاسبه غلظت یون کلر در عمق  $x$  در زمان  $t$  بعد از شروع نفوذ یون کلر ارائه کرده است [۷]:

$$C_{(x,t)} = C_0 + (C_{s,\Delta x} - C_0) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x - \Delta x}{2\sqrt{D_{app,c}t}} \right) \right] \quad (1)$$

در این رابطه،  $\Delta x$  عمق ناحیه همرفت،  $D_{app,c}$  ضریب انتشار یون کلر در بتن،  $\operatorname{erf}$  تابع خطا،  $C_0$  و  $C_{s,\Delta x}$  به ترتیب مقدار کلراید اولیه بتن و مقدار کلراید در عمق  $\Delta x$  بر حسب درصد وزن سیمان می‌باشد. وقتی غلظت یون کلر بر روی سطح میلگرد ( $x=a$ ) به حد آستانه شروع خوردگی برسد ( $C=C_{cr}$ ) خوردگی میلگرد شروع می‌شود که زمان آغاز خوردگی ( $T_i$ ) به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$T_i = \frac{(a - \Delta x)^2}{4D_{app,c}} \left[ \operatorname{erf}^{-1} \left( \frac{C_{s,\Delta x} - C_{cr}}{C_{s,\Delta x} - C_0} \right) \right]^2 \quad (2)$$

مقاومت خمشی تیر  $M_r(t)$  تحت تاثیر کاهش سطح مقطع میلگرد و همچنین کاهش سطح مقطع فشاری بتن در طی زمان گسترش خوردگی دچار تغییر می گردد. اگر به صورت رابطه (۶)، سهم بتن و میلگردهای مقطع در مقاومت خمشی به ترتیب با  $M_{rc}(t)$  و  $M_{rs}(t)$  نشان داده شود، اثرات خوردگی بر هر دو مقدار تاثیر گذار خواهد بود.

$$M_r(t) = M_{rc}(t) + M_{rs}(t) \quad (6)$$

در این رابطه،  $M_{rc}(t)$  و  $M_{rs}(t)$  به ترتیب مقاومت های خمشی تأمین شده توسط بتن و میلگردهای مقطع می باشند. در روابط مربوط به مقاومت خمشی متناسب با سناریوهای در نظر گرفته شده متغیرهای سطح مقطع میلگردهای کششی  $A_s(t)$ ، سطح مقطع میلگردهای فشاری  $A'_s(t)$ ، عرض مقطع  $b_w(t)$ ، عمق مؤثر مقطع  $d(t)$ ، ارتفاع بلوک تنش مستطیلی  $a(t)$  و عمق مؤثر میلگردهای فشاری  $d'(t)$  در طی دوره گسترش خوردگی می توانند تغییر کنند. در جدول ۱ مقادیر پارامترهای مؤثر در مدل به همراه خواص آماری آنها نشان داده شده است. ضرایب تغییرات در نظر گرفته شده، بر اساس میزان دقت در برآورد مقدار میانگین پارامتر مورد نظر و بر اساس تحقیقات قبلی دیگر محققان انتخاب شده است [۸، ۲۶].

برای شرایط محیطی، مقادیر در نظر گرفته شده یون کلر و خواص بتن در جدول ۱ نشان داده شده است. بر اساس این مقادیر زمان آغاز خوردگی و خواص تصادفی این زمان با استفاده از تولید نمونه های تصادفی بر اساس خواص تصادفی نشان داده شده در جدول ۱ و روش مونت کارلو (MC) محاسبه شده است.

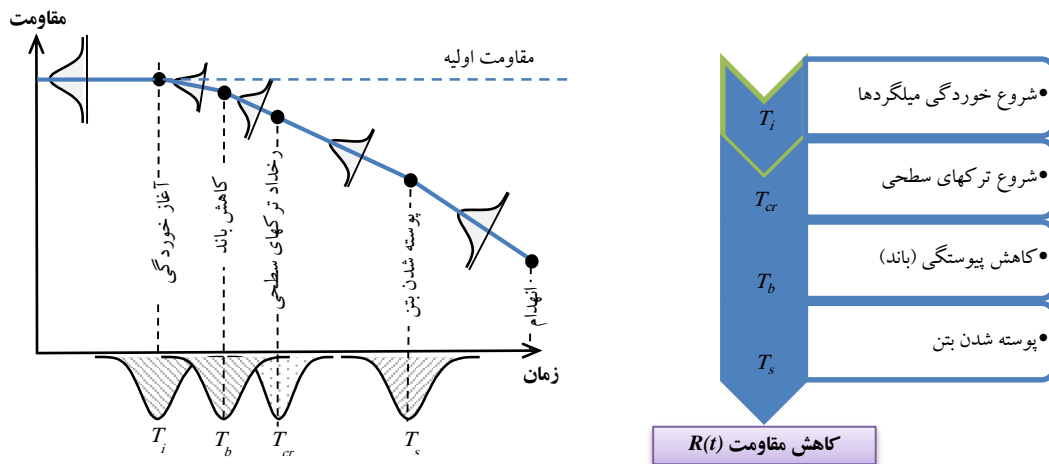
ممکن است اتفاق بیفتد. خان و همکاران رابطه ی زیر را برای مقدار عرض ترک ناشی از خوردگی میلگرد ارائه کرده اند [۲۳]:

$$W(t) = 0.1916 \Delta A_{sm}(t) D/c + 0.164 \quad (5)$$

در این رابطه،  $W(t)$  مقدار عرض ترک بر حسب میلیمتر،  $\Delta A_{sm}(t)$  میانگین کاهش سطح مقطع میلگرد بر حسب میلیمتر و  $D/c$  نسبت قطر میلگرد به ضخامت پوشش بتن روی میلگرد است. آیین نامه ها، محدودیت های مختلفی را برای حداکثر عرض ترک اعمال کرده اند. مبحث نهم مقررات ملی ساختمان حداکثر مجاز عرض ترک برای شرایط محیطی متوسط، شدید و خیلی شدید را به ترتیب ۰/۳۵، ۰/۲۰ و ۰/۱۰ میلیمتر در نظر گرفته است [۷]. معیار پوسته شدن بتن بر اساس آیین نامه دوام اروپا رسیدن عرض ترک به مقدار ۱ میلیمتر در نظر گرفته شده است؛ بنابراین بر اساس این آیین نامه، در رابطه (۵) زمان رسیدن عرض ترک به مقدار یک میلیمتر را می توان به عنوان زمان پوسته شدن بتن ( $T_s$ ) در نظر گرفت.

### ۳- مدل سازی و نتایج

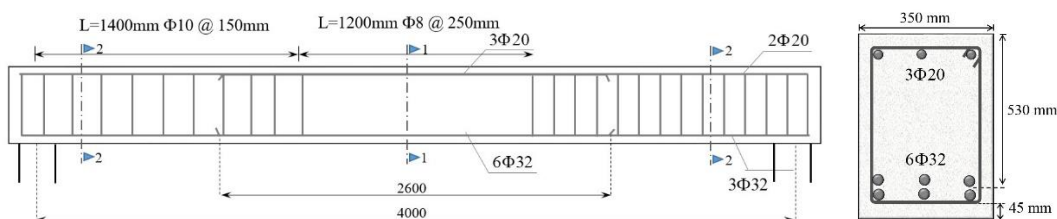
برای بررسی اثرات خوردگی میلگرد بر مقاومت خمشی تیرهای بتنی، مطابق شکل ۱ مراحل اثرات مختلف نفوذ یون کلر در سناریوهای اعمالی در نظر گرفته می شود. برای ارزیابی اثرات سناریوهای مختلف نفوذ یون کلر، تیر نشان داده شده در شکل ۲ در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ حالت های مختلف نفوذ یون کلر درون تیر بتنی نشان داده شده است. در این شکل همچون نحوه کاهش سطح مقطع بتن که ناشی از جدا شدن پوسته بتن بر اثر خوردگی میلگرد می باشد نیز نشان داده شده است.



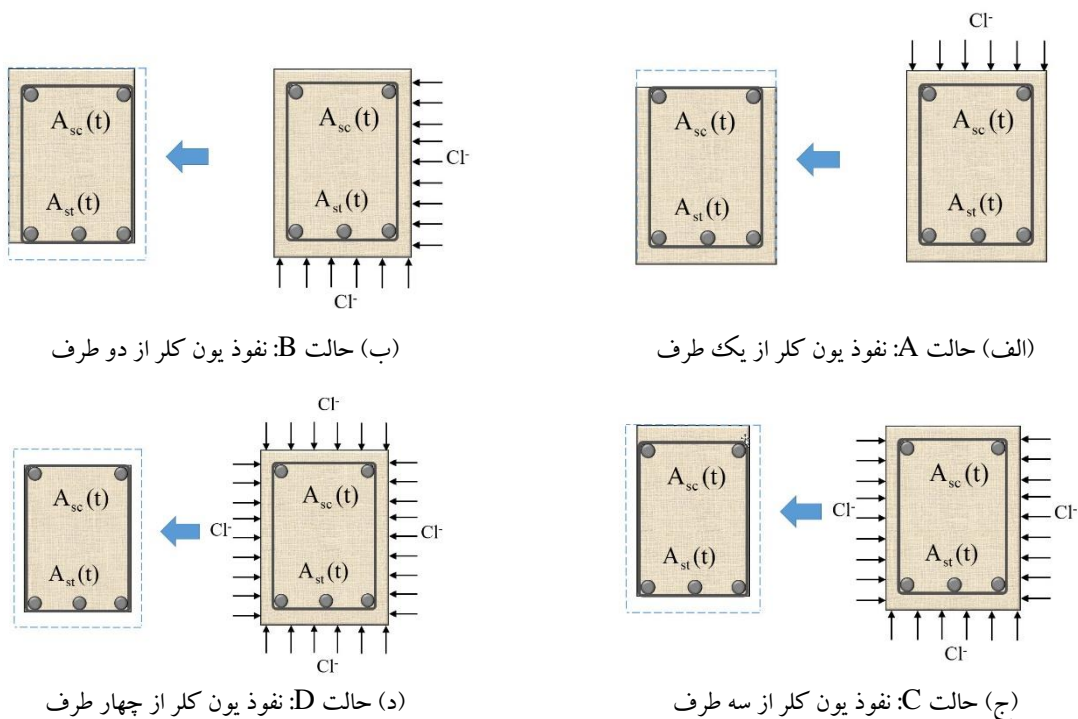
شکل ۱- اثر رخدادهای ناشی از خوردگی بر مقاومت سازه بتن مسلح

جدول ۱- پارامترهای ورودی مدل‌سازی به همراه خواص آماری

پارامتر	تعریف	میانگین	ضریب تغییرات	تابع چگالی
$b_w$	عرض مقطع (mm)	۳۵۰	۰/۰۵	نرمال
$d$	عمق مؤثر مقطع (mm)	۵۳۰	۰/۰۵	نرمال
$D_{st}$	قطر میلگرد کششی (mm)	۳۲	۰/۰۲	لوگ نرمال
$D_{sc}$	قطر میلگرد فشاری (mm)	۲۰	۰/۰۲	لوگ نرمال
$f_y$	تنش تسلیم میلگردها (MPa)	۴۰۰	۰/۱۰	لوگ نرمال
$f_c$	مقاومت فشاری بتن (MPa)	۳۰	۰/۱۵	نرمال
$c$	پوشش خالص روی میلگردها (mm)	۴۵	۰/۱۰	نرمال
$I_{corr}$	چگالی جریان خوردگی ( $\mu A/cm^2$ )	۳	۰/۱۰	نرمال
$D_{app,c}$	ضریب انتشار یون کلر در بتن ( $cm^2/year$ )	۰/۹۴۶	۰/۳۵	لوگ نرمال
$C_0$	مقدار کلراید اولیه بتن ( $kg/m^3$ )	۰/۱۰	۰/۱۵	لوگ نرمال
$C_{s,\Delta x}$	مقدار کلراید در عمق $\Delta x$ ( $kg/m^3$ )	۵	۰/۱۵	لوگ نرمال
$C_{cr}$	غلظت بحرانی کلر ( $kg/m^3$ )	۱	۰/۱۵	یکنواخت



شکل ۲- تیر در نظر گرفته شده به همراه مقطع تیر در وسط



(الف) حالت A: نفوذ یون کلر از یک طرف

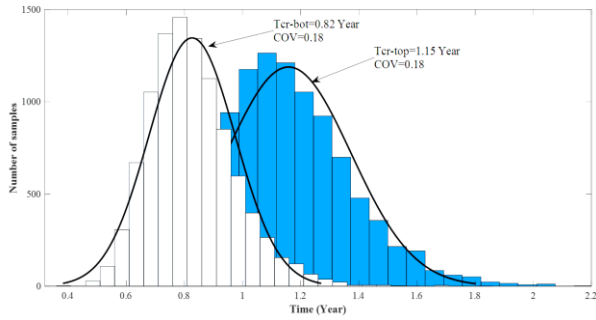
(ب) حالت B: نفوذ یون کلر از دو طرف

(ج) حالت C: نفوذ یون کلر از سه طرف

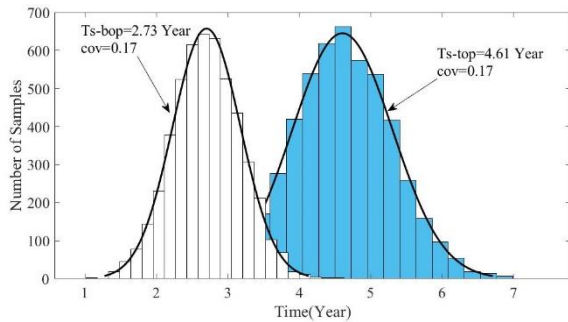
(د) حالت D: نفوذ یون کلر از چهار طرف

شکل ۳- حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده برای نحوه نفوذ یون کلر و کاهش سطح مقطع ناشی از آن

مقاومت خمشی برای سناریوهای مختلف نشان داده شده در شکل ۳ محاسبه می‌گردد. ضریب تغییرات مقاومت، از تقسیم انحراف استاندارد بر مقدار میانگین مقاومت برشی مورد محاسبه قرار گرفته است. از این پارامتر به منظور ارزیابی عدم قطعیت در نتایج استفاده گردیده است.



شکل ۵- تابع چگالی و هیستوگرام زمان شروع ترک های ناشی از خوردگی در بالا و پایین مقطع

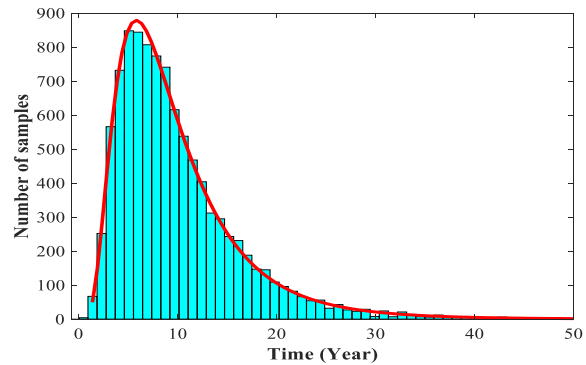


شکل ۶- تابع چگالی و هیستوگرام زمان پسته شدن ناشی از خوردگی در بالا و پایین مقطع

در شکل ۷ مقادیر نسبت مقاومت خمشی به مقاومت اولیه در طی زمان برای حالت‌های مختلف نفوذ یون کلر نشان داده شده است. همانطور که مشخص است بیشترین کاهش مقاومت مربوط به حالت  $D$  می‌باشد که در طی ۱۰۰ سال مقاومت خمشی به ۸۰ درصد مقاومت اولیه کاهش یافته است. کاهش بیشتر مقاومت در این حالت به این دلیل بوده است با پوسته شدن بتن در این حالت (قسمت (د) شکل ۳) دو پارامتر مقطع که در محاسبه مقاومت خمشی مؤثر هستند دچار کاهش می‌گردند. همانطور که از شکل ۳ مشخص است سناریوی در نظر گرفته شده برای این حالت موجب کاهش عمق مؤثر از  $d$  به  $(d-c)$  و همچنین کاهش عرض مؤثر مقطع در محدوده فشاری از  $b$  به  $b-2c$  می‌گردد.

بعد از حالت  $D$  بیشترین کاهش مربوط به حالت  $A$  بوده است که در این سناریو نیز کاهش عمق مؤثر مقطع، عامل تاثیر گذار در

به توجه به ضخامت پوشش در نظر گرفته شده و همچنین شرایط اولیه محیطی، زمان آغاز خوردگی برابر با  $7/12$  سال بعد از ساخت بدست آمده است که هیستوگرام نمونه‌های تولید شده و خواص تصادفی آن در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج تولید شده از روش مونت کارلو، بهترین تابع توزیع آماری بیان کننده خواص تصادفی زمان آغاز خوردگی، تابع لوگ نرمال بدست آمده است. پارامتر مهم بعدی که باید محاسبه گردد زمان پوسته شده بتن ( $T_s$ ) می‌باشد. برای محاسبه این زمان ابتدا زمان شروع ترک خوردگی ( $T_{cr}$ ) محاسبه می‌گردد؛ بدین منظور با استفاده از رابطه‌ی (۴) مقدار آستانه‌ی کاهش در سطح مقطع میلگردهای طولی برای شروع ترک خوردگی محاسبه می‌گردد. بر اساس رابطه‌ی (۴) برای بالای مقطع مقدار  $\Delta A_{s0}$  برابر با  $1/74$  میلیمتر مربع و برای پایین مقطع برابر با  $1/90$  میلیمتر مربع بدست می‌آید.



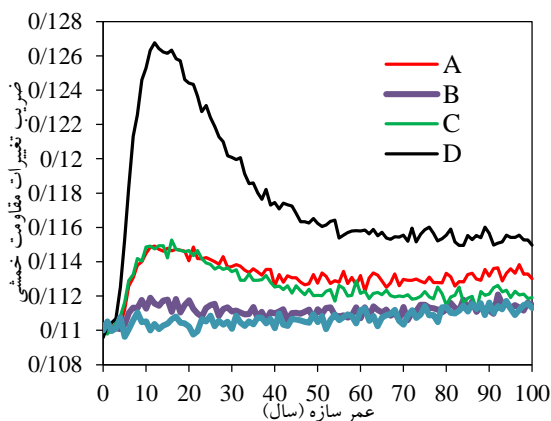
شکل ۴- هیستوگرام زمان آغاز خوردگی ( $T_i$ ) برای تیر نمونه

زمان رخداد اولین ترک‌ها ( $T_{cr}$ ) در اطراف میلگرد را می‌توان با برابر قرار دادن مقدار کاهش سطح مقطع (رابطه‌ی (۳)) با مقدار بدست آمده از رابطه‌ی (۴) بدست آورد. زمان شروع ترک خوردگی برای بالا و پایین مقطع به ترتیب برابر با  $1/15$  سال و  $0/82$  سال بعد از شروع خوردگی بدست می‌آید. نمودار هیستوگرام این دو زمان و تابع چگالی احتمال برآزنده شده به این دو زمان در شکل ۵ نشان داده شده است. زمان رخداد پوسته شدن بتن ( $T_s$ ) با استفاده از رابطه‌ی (۵) و برابر قرار دادن این رابطه با مقدار آیین نامه دوام اروپا یعنی یک میلیمتر برای بالا و پایین مقطع به ترتیب  $4/76$  سال و  $2/72$  سال بعد از شروع خوردگی بدست می‌آید. خواص تصادفی این مقادیر در شکل ۶ نشان داده شده است.

با داشتن مقادیر زمان شروع خوردگی، زمان پوسته شدن بتن،

میلگردهای کششی مقطع تیر بتنی، مقدار مقاومت خمشی نهایی را بر اساس آزمایش بدست آورده‌اند [۲۸]. بر اساس رابطه ۳ و همچنین مقادیر ارائه شده در جدول ۱، بعد از گذشت ۱۰۰ سال درصد خوردگی میلگردها تقریباً برابر با ۱۳ درصد می‌باشد که بر اساس شکل ۷ برای حالتی که صرفاً پایین مقطع پوسته گردد در پایان ۱۰۰ سال موجب کاهش ۱۴ درصدی مقاومت خمشی گردیده است. در نتایج ارائه شده توسط هاریش و همکاران برای حالت نزدیک به ۱۴ درصد خوردگی، مقادیر کاهش مقاومت خمشی در محدوده ۹ تا ۱۷ درصد قرار دارد که به مقدار تئوری بدست آمده نزدیک می‌باشد.

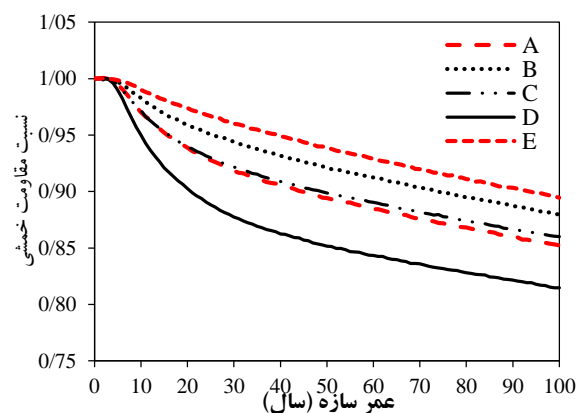
عدم قطعیت مقاومت خمشی از طریق محاسبه ضریب تغییرات در طی دوره گسترش خوردگی مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقادیر این ضریب تغییرات که از تقسیم میانگین مقاومت خمشی در هر زمان به انحراف استاندارد مقاومت خمشی بدست آمده است در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است ضریب تغییرات مقاومت خمشی تقریباً در محدوده ۰/۱۱ قرار دارد. از شکل ۸ مشخص است که برای حالت D در محدوده زمانی رخداد پوسته شدن یک تغییر در مقدار ضریب تغییرات مشاهده می‌گردد که به دلیل اثر عدم قطعیت موجود در زمان‌های پوسته شدن بالا و کناره‌های مقطع می‌باشد و در طی زمان‌های بعدی ضریب تغییرات این حالت مجدداً به محدوده ۰/۱۱ وارد گردیده است. مقدار عدم قطعیت بدست آمده و تغییرات آن منطبق بر نتایج دیگر محققان می‌باشد [۲۱].



شکل ۸- ضریب تغییرات مقاومت خمشی

برای بررسی نحوه اثرگذاری پوسته شدن بر تغییر مود شکست مقاطع، در ادامه وضعیت کرنش‌ها و همچنین نحوه تغییرات ارتفاع

مقاومت خمشی سهم بتن بوده است. برای حالت‌های B و C که تنها کناره‌های مقطع جدا می‌شوند میزان نسبت مقاومت خمشی بعد از ۱۰۰ سال به ترتیب برابر با ۰/۸۶ و ۰/۸۸ بدست آمده است که کمتر از حالت‌های با کاهش عمق مؤثر می‌باشند. در شکل ۸ یک سناریوی دیگر که تنها شامل کاهش سطح مقطع میلگرد می‌باشد نیز تحت عنوان حالت E در نظر گرفته شده است. همانطور که مشخص است به دلیل عدم پوسته شدن بتن، کمترین کاهش مقاومت خمشی مربوط به این حالت است که دارای مقدار ۰/۹ می‌باشد که بیانگر اثر تنها کاهش سطح مقطع میلگردها در کاهش مقاومت خمشی است.

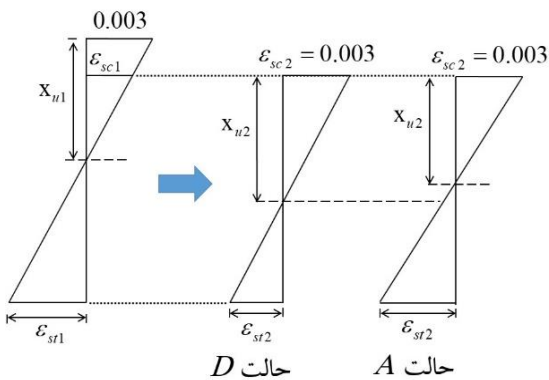


شکل ۷- نسبت مقاومت خمشی برای سناریوهای مختلف خوردگی

در مجموع از شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که حالت‌هایی که موجب کاهش عمق مؤثر مقطع بتنی می‌گردند موجب کاهش بیشتری در مقاومت خمشی خواهند شد. ژائو و همکاران نیز کاهش بیشتر برای حالت‌های پوسته شدگی بالای مقطع را گزارش کرده‌اند [۲۷]. رودریگز و همکاران با ایجاد خوردگی در میلگردهای فشاری و کششی و انجام آزمایش تحت بارگذاری نهایی گزارش کرده‌اند که مقادیر تئوری مقاومت خمشی با در نظر گرفتن پوسته شدن کامل بتن به عنوان یک حد پایین مقاومت خمشی، در هر صورت مقادیر محافظه کارانه‌ای برای ظرفیت باربری خمشی تیر بدست می‌دهند [۱۹]. این محققین همچنین گزارش کرده‌اند که اگر مقاومت خمشی صرفاً با در نظر گرفتن کاهش سطح مقطع میلگرد محاسبه شود این مقدار به عنوان یک حد بالای مقاومت خمشی، در هیچ حالتی بیانگر مقاومت خمشی باقیمانده در حالت نهایی نخواهد بود.

هاریش و همکاران با ایجاد درصدهای مختلف خوردگی در

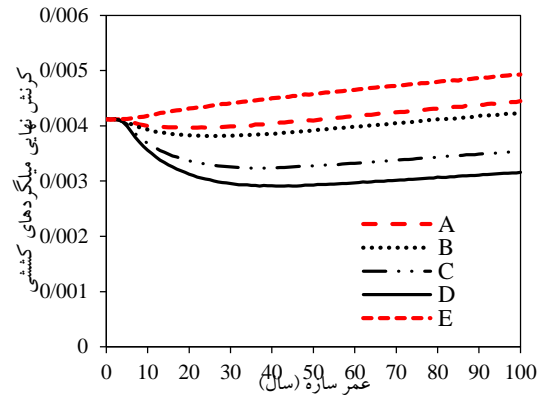
مقطع مثال در نظر گرفته شده، به گونه‌ای طراحی گردیده است که در لحظه نهایی هم میلگردهایی فشاری و هم میلگردهای کششی جاری شده باشند به طوری که کرنش در حالت نهایی و قبل از آغاز خوردگی در میلگردهای کششی و فشاری به ترتیب برابر با  $0/004$  و  $0/002$  بوده است. برای حالت‌های  $A, D$  با پوسته شدن بتن در بالای مقطع، میلگردهای فشاری همراستای دورترین تار فشاری بتن می‌گردند و همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است مقدار کرنش بعد از پوسته شدن بتن به مقدار کرنش نهایی بتن یعنی  $0/003$  رسیده است. برای این دو حالت مقدار کرنش نهایی در میلگردهای کششی بعد از پوسته شدن وضعیت‌های متفاوتی داشته‌اند به طوری که برای حالت  $D$  کرنش در میلگردهای کششی تا  $25$  درصد کاهش یافته و از  $0/004$  به  $0/003$  رسیده است ولی همچنان در حالت نهایی میلگردهای کششی دارای کرنشی بیشتر از کرنش جاری شدگی هستند. برای حالت  $A$  کاهش محسوسی در کرنش میلگردهای کششی اتفاق نیفتاده است. برای حالت  $D$  ارتفاع تار خنثی در لحظه‌ی پوسته شدن افزایش یافته است تا سازگاری برای ایجاد کرنش نهایی  $0/003$  در میلگردهای فشاری به وجود بیاید ولی برای حالت  $A$  مشاهده می‌گردد که ارتفاع تار خنثی دچار کاهش شده است. در شکل ۱۲ وضعیت مقادیر کرنش‌ها و همچنین ارتفاع تار خنثی برای حالت‌های  $A$  و  $D$  طوری که سازگاری تغییرات را نشان دهد ارائه گردیده است.



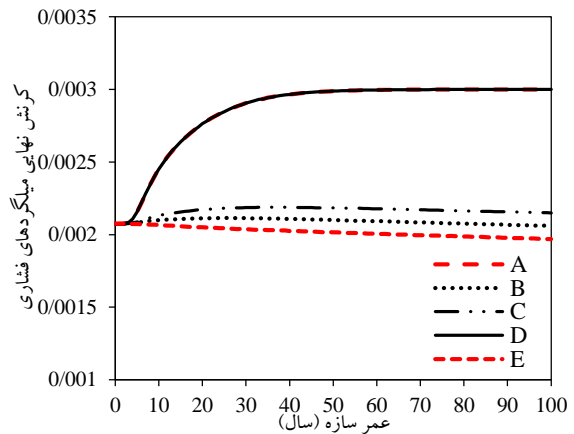
شکل ۱۲- نحوه اثر پوسته شدن بالای مقطع بر تغییرات ارتفاع تار خنثی و کرنش نهایی میلگردهای فشاری و کششی

افزایش ارتفاع تار خنثی و تبدیل بخشی از مقطع که قبلاً تحت اثر کشش بوده و دارای ترکهای کششی می‌باشد به مقطع فشاری می‌تواند بر رفتار سازه تاثیر گذار باشد. بدون در نظر گرفتن کاهش سطح مقطع بتنی (وضعیت  $E$ )، مشاهده می‌گردد که کرنش نهایی

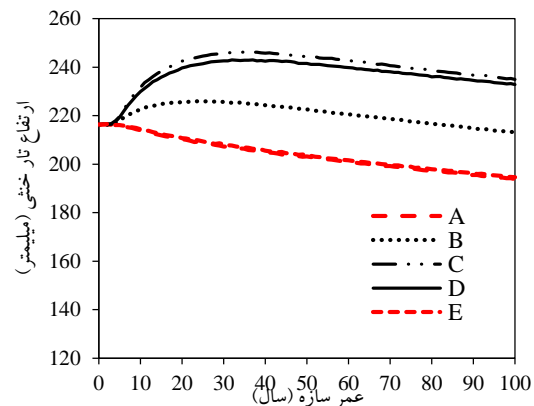
تار خنثی در طی زمان گسترش خوردگی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل‌های ۹ و ۱۰ مقدار کرنش در میلگردهای کششی و فشاری مقطع در حالت نهایی نشان داده شده است. تغییرات ارتفاع تار خنثی مقطع نیز در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۹- تغییرات کرنش نهایی در میلگردهای کششی برای سناریوهای مختلف خوردگی



شکل ۱۰- تغییرات کرنش نهایی در میلگردهای فشاری برای سناریوهای مختلف خوردگی



شکل ۱۱- تغییرات ارتفاع تار خنثی برای سناریوهای مختلف خوردگی



- spatial variability. Heron, 52 (4), 2007.
- [2] Hosseini, S.A., Probabilistic Calculation of the Corrosion Initiation of steel reinforcement Using Reliability Methods. Concrete Research, 2019. 12(3): p. 137-145.
- [3] Chen, S., et al., Life-cycle modelling of concrete cracking and reinforcement corrosion in concrete bridges: A case study. Engineering Structures, 2021. 237: p. 112143.
- [4] Zhang, L., et al., Corrosion rate models of reinforcement in modified coral aggregate concrete. Construction and Building Materials, 2021. 288: p. 123099.
- [5] James, A., et al., Rebar corrosion detection, protection, and rehabilitation of reinforced concrete structures in coastal environments: A review. Construction and Building Materials, 2019. 224: p. 1026-1039.
- [6] ACI308R-16, Guide to External Curing of Concrete. 2016, American Concrete Institute Farmington Hills, Mich.
- [7] Regulations, O.o.N.B., Part 9 of National Regulations: Design and implementation of reinforced concrete buildings. 2014, Toseeh Iran: Tehran.
- [8] Bhargava, K., et al., Modeling of time to corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures. Cement and Concrete Research, 2005. 35(11): p. 2203-2218.
- [9] Alexander, M. and H. Beushausen, Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures—review and critique. Cement and Concrete Research, 2019. 122: p. 17-29.
- [10] Van Beek, A., et al. Validation model for service life prediction of concrete structures. in 2nd International RILEM workshop on life prediction and aging management of concrete structures, Paris, France. 2003.
- [11] Marqueset, G. and M. Kioumars, Need for further development in service life modelling of concrete structures in chloride environment. Procedia engineering, 2017. 171: p. 549-556.
- [12] Song, H.-W., et al., A micro-mechanics based corrosion model for predicting the service life of reinforced concrete structures. International Journal of Electrochemical Science, 2007. 2: p. 341-354.
- [13] Safedian, M. and A.A. Ramezani-pour, Assessment of service life models for determination of chloride penetration into silica fume concrete in the severe marine environmental condition. Construction and Building Materials, 2013. 48: p. 287-294.
- [14] Pang, L. and Q. Li, Service life prediction of RC structures in marine environment using long term chloride ingress data: Comparison between

میلگردهای کششی در طی دوره گسترش خوردگی افزایش می‌یابد و برعکس کرنش در میلگردهای فشاری کاهش می‌یابد و به زیر حد جاری شدگی می‌رسد؛ بنابراین برای این حالت از شکل پذیری مقطع کاسته می‌شود.

از شکل ۱۱ مشخص است که بعد از پوسته شدن مقطع بتنی در طی زمان، ارتفاع تار خنثی برای همه حالت‌ها با نرخ یکسانی در حال کاهش می‌باشد. مالموبلا و همکاران برای تیر بتنی با تکیه گاه ساده، با ایجاد خوردگی در میلگردهای کششی وسط دهانه برای حالتی که تیر تنها تحت اثر ۳۰ درصد بار نهایی خود قرار داشت مشاهده کردند که در طی دوره گسترش خوردگی ارتفاع تار خنثی حتی تا ۵۰ درصد دچار کاهش گردیده است [۲۹].

#### ۴- نتایج

در این پژوهش برای حالت‌های مختلف نفوذ یون کلر در یک مقطع بتنی، نحوه کاهش مقاومت خمشی در طی دوره گسترش خوردگی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج زیر به صورت کلی حاصل گردید:

- در نظر گرفتن اثر پوسته شدن بتن در محاسبات ظرفیت باقیمانده تیر بتنی، موجب ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از ظرفیت خمشی تیر می‌گردد. در نظر نگرفتن پوسته شدن پوشش بتنی روی میلگردهای مقطع تیر بتنی موجب برآورد مقاومت خمشی باقیمانده تا ۲۰ درصد بیشتر از مقاومت واقعی می‌گردد.

- عدم قطعیت مقاومت خمشی که از طریق ضریب تغییرات اندازه‌گیری شده است، در بازه زمانی نزدیک به رخداد پوسته شدن مقطع، دچار افزایش می‌شود و مقدار این افزایش برای حالتی که پوسته شدن شامل همه ضلع‌های مقطع می‌گردد تا ۱۵ درصد بیشتر از زمان‌های قبل و بعد از رخداد پوسته شدن می‌باشد.

- خوردگی میلگردهای مقطع موجب تغییر شکل‌پذیری مقطع و همچنین تغییر مود شکست سازه می‌گردد. برای مقاطع تیری که در حالت نهایی، میلگردهای فشاری در حالت جاری شدگی قرار ندارند با جدا شدن پوشش بتنی روی میلگردهای فشاری، کرنش در این میلگردها بیشتر از حالت بدون خوردگی خواهد بود.

#### ۵- مراجع

- [1] Ying, L. and A. Vrouwenvelder, Service life prediction and repair of concrete structures with

- Structural Engineering, 2020. 146(6): p. 04020098.
- [28] Hariche, L., et al., Effects of reinforcement configuration and sustained load on the behaviour of reinforced concrete beams affected by reinforcing steel corrosion. *Cement and Concrete Composites*, 2012. 34(10): p. 1202-1209.
- [29] Malumbela, G., P. Moyo, and M. Alexander, Structural behaviour of beams under simultaneous load and steel corrosion, in *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*. 2008, CRC Press. p. 271-272.
- exposure trials and real structure surveys. *Construction and Building Materials*, 2016. 113: p. 979-987.
- [15] Lin, G., Y. Liu, and Z. Xiang, Numerical modeling for predicting service life of reinforced concrete structures exposed to chloride environments. *Cement and concrete composites*, 2010. 32(8): p. 571-579.
- [16] Ožbolt, J., G. Balabanić, and M. Kušter, 3D Numerical modelling of steel corrosion in concrete structures. *Corrosion science*, 2011. 53(12): p. 4166-4177.
- [17] Yang, C., L. Li, and J. Li, Service life of reinforced concrete seawalls suffering from chloride attack: Theoretical modelling and analysis. *Construction and Building Materials*, 2020. 263: p. 120172.
- [18] Khatri, R. and V. Sirivivatnanon, Characteristic service life for concrete exposed to marine environments. *Cement and concrete research*, 2004. 34(5): p. 745-752.
- [19] Rodriguez, J., L. Ortega, and J. Casal, Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement. *Construction and building materials*, 1997. 11(4): p. 239-248.
- [20] Andrade, C., J. Sarria, and C. Alonso, Corrosion Rate Field Monitoring of Post – Tensioned Tendons in Contact with Chlorides. *Durability of Building Materials and Components*, 1996. 2: p. 959–967.
- [21] Bhargava, K., et al., Ultimate flexural and shear capacity of concrete beams with corroded reinforcement. *Structural Engineering and Mechanics*, 2007. 27(3): p. 347-363.
- [22] Vu, K.A. and M.G. Stewart, Predicting the likelihood and extent of reinforced concrete corrosion-induced cracking. *Journal of structural engineering*, 2005. 131(11): p. 1681-1689.
- [23] Khan, I., R. François, and A. Castel, Prediction of reinforcement corrosion using corrosion induced cracks width in corroded reinforced concrete beams. *Cement and concrete research*, 2014. 56: p. 84-96.
- [24] Thoft-Christensen, P., Corrosion and cracking of reinforced concrete, in *Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures: Assessment, Design and Management*. 2004. p. 26-36.
- [25] 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.
- [26] Nowak, A.S. and K.R. Collins, *Reliability of structures*. 2012: CRC Press.
- [27] Zhao, Y., Y. Wang, and J. Dong, Experimental Study and Analytical Model of Concrete Cover Spalling Induced by Steel Corrosion. *Journal of*

## Effect of Different States of Chloride Ion Penetration in Concrete on The Life Model Due to Flexural Failure

Seyed Abbas Hosseini \*

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

Mansour Bagheri

Department of Civil Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

Sayyed Mehrab Ramezani

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

### Abstract

Evaluation of the life model of concrete structures has an effective role in determining maintenance programs as well as estimating the probability of failure of these structures. To evaluate the life model, environmental aggressive factors and their effects on the structure must first be identified. One of the most important factors that affect the durability and strength of concrete structures is the corrosion of rebars, which is generally caused by the penetration of chloride ions in concrete. Due to the corrosion of the rebar, the effective surface of the rebars is reduced and over time, by creating cracks in the concrete section, the effective concrete cross-section is also reduced. In this study, considering the inherent and statistical uncertainties of the parameters affecting corrosion, for different states of chloride ion penetration, the concrete beam life model has been evaluated. For this purpose, considering a concrete beam, different scenarios of chloride ion penetration from different directions of the beam cross-section is considered, and based on each scenario, the corrosion initiation time of rebars, cracks, and scaling of concrete are calculated and the effect of each event on The flexural strength of the beam is evaluated. The results show that considering the effect of concrete scaling causes a difference of up to 20% in the predicted values for the flexural strength of concrete beams and a more realistic assessment of the remaining life of the structure will be obtained. Also, the states that cause the compressive cross-section of the concrete to peel are more critical in the concrete beam life model due to the reduction of the effective depth.

**Keywords:** Life model, Reinforcement corrosion, chloride ingress, reinforced concrete beam, Probabilistic assessment.

---

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

