



مدل عمر تیر بتنی بر مبنای مقاومت برشی تحت اثر حالت‌های مختلف نفوذ یون کلراید

سید عباس حسینی^{۱*}، منصور باقری^۲

۱- دانشکده صنعت و معدن، دانشگاه یاسوج، چرام، ایران
۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۵
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۱۱
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲

کلمات کلیدی:

مدل عمر
خوردگی میلگرد
تیر بتنی
زوال برشی
نفوذ یون کلراید

خلاصه: سازه‌های بتنی در طی عمر خود تحت اثر عوامل محیطی دچار کاهش مقاومت و در نهایت زوال زود هنگام می‌شوند. خوردگی میلگردها به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در کاهش عملکرد سازه‌های بتنی شناخته شده است. ارزیابی وضعیت کنونی و همچنین پیش‌بینی عمر مفید باقی‌مانده سازه‌ها برای ارائه برنامه‌های تعمیر و نگهداری از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق با در نظر گرفتن تابع شرایط حدی نهایی مقاومت برشی تیر بتن مسلح، مدل عمر تحت سناریوهای مختلف نفوذ یون کلراید محاسبه گردیده است. کاهش سطح مقطع میلگردهای طولی و عرضی، کاهش سطح مقطع تیر بتنی که به عنوان اثرات جانبی خوردگی میلگرد شناخته می‌شوند در ارزیابی مدل عمر در نظر گرفته شده‌اند. خواص تصادفی پارامترهای مؤثر در مقاومت برشی و همچنین نفوذ یون کلراید برای ارزیابی احتمالاتی مدل عمر نیز در نظر گرفته شده است. در زمان‌های بعد از شروع خوردگی، بر اساس کاهش‌های صورت گرفته در پارامترهای مؤثر بر مقاومت برشی، با استفاده از روش نمونه‌برداری مونت کارلو از هر پارامتر بر اساس خواص تصادفی آن تعداد صد هزار مقدار برای هر متغیر تولید شد. با استفاده از مقادیر تولید شده، مقاومت برشی در هر زمان محاسبه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن اثر پوسته شدن بتن موجب تفاوت زیاد در مقادیر پیش‌بینی شده برای مقاومت برشی تیر بتنی می‌شود به طوری که در حالت بحرانی در نظر گرفتن اثرات پوسته شدن بتن موجب کاهش ۲۰ درصدی مقاومت برشی می‌شود و ارزیابی واقع بینانه‌تری از عمر باقی‌مانده سازه به دست خواهد آمد.

برنامه‌های تعمیر و نگهداری دقیق‌تر برای سازه خواهد شد.

خوردگی میلگردها در سازه‌های بتنی موجب توسعه ترک‌های سطحی، کاهش پیوستگی بتن و میلگرد، کنده شدن پوشش بتنی روی میلگردها و در نهایت به مخاطره افتادن سازه به دلیل کاهش مقاومت عضو می‌گردد. خوردگی میلگرد معمولاً موجب تولید موادی می‌گردد که دارای حجم بیشتری نسبت به مواد مصرف شده در طی فرآیند خوردگی است [۴]. 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. خوردگی به دو دسته یکنواخت و غیریکنواخت (حفره‌ای یا چاله‌ای) تقسیم‌بندی می‌شود. نفوذ یون کلراید معمولاً بیشتر موجب ایجاد خوردگی غیریکنواخت می‌گردد هر چند با گذشت زمان و با به هم پیوستن نقاط خورده شده، میلگرد تقریباً به صورت یکنواخت دچار خوردگی خواهد شد.

برای ارائه مدل عمر سازه‌های بتنی که تحت اثر پدیده خوردگی قرار

۱- مقدمه

عوامل مخرب بیرونی موجب کاهش مقاومت سازه‌های بتنی در طی زمان می‌گردند. طبق برآوردهای موجود، خوردگی میلگردها مهم‌ترین عامل کاهش مقاومت در طی عمر سازه‌های بتن مسلح است. خوردگی میلگردها معمولاً به دلیل کاهش خاصیت قلیایی بتن اطراف میلگرد اتفاق می‌افتد. کربناته شدن و نفوذ یون‌های کلراید مهم‌ترین دلیل آغاز خوردگی میلگرد در سازه‌های بتن مسلح می‌باشد [۱]. به دلیل اثرات مخربی که خوردگی میلگرد در عملکرد تعریف شده سازه‌های بتنی دارد، معمولاً آیین‌نامه‌های طراحی ضوابط سخت گیرانه‌تری برای طراحی سازه‌های بتنی در محیط‌های خورنده و شدید اعمال می‌کنند [۲ و ۳]. به دلیل عدم قطعیت‌های فراوانی که در برآورد اثر عوامل طبیعی بر سازه‌ها وجود دارد، در طی عمر بهره‌برداری باید عملکرد سازه‌ها مورد ارزیابی مداوم قرار گیرد. ارزیابی در طی زمان‌های مشخص موجب اطمینان از شرایط بهره‌برداری سازه و همچنین ارائه

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.hosseini@yu.ac.ir



در تحقیقات پیشین بررسی چندانی بر روی شرایط و جهت‌های نفوذ یون کلراید انجام نگرفته است و اکثر محققان با ایجاد خوردگی‌های تسریع شده، اثر تبعات ناشی از خوردگی بر مقاومت تیرها را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در این پژوهش با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف نحوه نفوذ یون کلراید در تیر بتنی، اثرات خوردگی میلگردها در مقاومت برشی باقی‌مانده محاسبه گردیده است. اثر عدم قطعیت پارامترهای موثر در مقاومت برشی و همچنین خوردگی میلگرد در مقاومت برشی تیر در نظر گرفته شده است.

۲- تئوری و مبانی

۲-۱- خوردگی میلگرد

وقتی سازه بتنی در معرض یون‌های کلراید 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 بیان کننده‌ی نحوه نفوذ یون کلراید به درون بتن می‌باشد. در طی زمان، وقتی غلظت یون‌های کلراید بر روی سطح میلگرد درون بتن به حد آستانه شروع خوردگی برسد، خوردگی میلگرد آغاز می‌شود. غلظت یون کلراید در عمق x در زمان t بعد از شروع نفوذ یون کلراید بر اساس قانون دوم فیک به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۱۸]:

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

در این رابطه، $D_{app,c}$ ضریب انتشار یون کلراید در بتن، erff تابع خطا، C_0 و C_s به ترتیب مقدار کلراید اولیه بتن و مقدار کلراید بر روی سطح قطعه (برحسب درصد وزن سیمان) می‌باشد. وقتی غلظت یون کلراید بر روی سطح میلگرد ($x=a$) به حد آستانه شروع خوردگی C_{cr} برسد ($C_{(x,t)} = C_{cr}$)، خوردگی میلگرد شروع می‌شود که زمان آغاز خوردگی بر اساس رابطه (۱) به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

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

در این رابطه، C_{cr} مقدار غلظت بحرانی کلراید یا آستانه شروع خوردگی

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 [۶ و ۵]. 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 [۸ و ۷]. در این مدل‌ها از اثرات جانبی خوردگی معمولاً صرف نظر شده است. صافحیان و رمضانپور بر اساس تحقیقات تجربی در خلیج فارس یک مدل عمر برای بتن حاوی میکروسیلیس ارائه کردند که تنها اثرات قرارگیری قطعه در ناحیه پاششی و جزر و مدی را در نظر گرفته شده است [۹]. Li و Pang نیز بر اساس تحقیقات طولانی مدت بر نمونه‌های قرار گرفته در آب دریا یک مدل تحلیلی ارائه دادند که برای پیش‌بینی عمر باقی‌مانده با واسطه نفوذ یون کلراید مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰]. Lin و همکاران برای مدل عمر از یک مدل آباکوس که تشریح کننده نحوه نفوذ یون کلراید در بتن بود استفاده کردند [۱۱]. Ozbolt و همکاران با استفاده یک مدل سه بعدی اجزا محدود مدل عمر را بر مبنای توسعه خوردگی ارائه کردند [۱۲]. در برخی از مدل‌های ارائه شده به منظور در نظر گرفتن خواص تصادفی پارامترها از روش‌های احتمالاتی استفاده شده است [۱۳]. Khstri و Sirivivat-nanon یک مدل احتمالاتی برای پیش‌بینی عمر باقی‌مانده سازه‌های بتن مسلح ارائه کردند که با استفاده از تابع خطا، توزیع یون کلراید در مقطع تعیین می‌گردد [۱۴].

در تیرهای بتنی به دلیل شدت نفوذ یون کلراید ممکن است زوال برشی اتفاق افتد. در شاه‌تیرهای پل‌ها که برخی درزهای اجرایی در کناره‌ها قرار دارند به واسطه نفوذ آب نمک در زمستان از این درزها، مخاطرات ایجاد شده در تکیه‌گاه تیرها افزایش خواهد یافت. به دلیل بزرگ بودن نیروی برشی در کناره تیرها احتمال زوال برشی به دلیل کاهش مقاومت ناشی از خوردگی میلگرد افزایش می‌یابد. نظام دوست همکاران با بررسی آزمایشگاهی تیرهای بتنی تحت اثر خوردگی خاموت شکست نمونه‌ها را بیشتر ناشی از کاهش پیوستگی بتن و میلگرد گزارش کردند [۱۵]. Xu و همکاران اثر ترک‌های ناشی از خوردگی خاموت‌ها بر کاهش ظرفیت برشی تیرها را مورد بررسی قرار دادند و اثر ارتفاع مؤثر مقطع را در مود خرابی دارای اهمیت زیاد گزارش کردند [۱۶]. Wang و همکاران با اعمال خوردگی بر روی خاموت‌ها، نتیجه گرفتند که برای ایجاد تاثیرات منفی خوردگی بر مقاومت برشی تیرها، خاموت‌ها حداقل باید ۱۰ درصد دچار خوردگی گردند [۱۷].

در این رابطه، ΔA_{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)، α ضریب نوع خوردگی است که برای در نظر گرفتن نحوه اثر خوردگی متمرکز (چاله‌ای) بر کاهش سطح مقطع میلگرد استفاده می‌شود، این ضریب برای خوردگی یکنواخت برابر با ۲ و برای خوردگی غیریکنواخت بین ۴ تا ۸ تعریف شده است [۲۳].

زمان رخداد اولین ترک‌ها (T_{cr}) در اطراف میلگرد را می‌توان با برابر قرار دادن مقدار کاهش سطح مقطع (رابطه ۳) با مقدار به دست آمده از رابطه (۴) به صورت زیر (رابطه ۵) به دست آورد:

با افزایش محصولات ناشی از خوردگی، عرض ترک‌ها بزرگ‌تر شده و بستگی به فاصله بین میلگردها و همچنین پوشش بتن روی میلگردها و حالت‌های مختلفی از پوسته شدن بتن ممکن است اتفاق بیفتد. Vidal و همکاران رابطه زیر را برای مقدار عرض ترک ناشی از خوردگی میلگرد ارائه کرده‌اند [۲۳]:

$$w(t) = 0.0575(\Delta A_s(t) - \Delta A_{s0}) \quad (6)$$

در این رابطه، $w(t)$ مقدار عرض ترک بر حسب میلی‌متر، $\Delta A_s(t)$ مقدار کاهش سطح مقطع میلگرد خورده شده (mm^2) و ΔA_{s0} از رابطه (۴) قابل محاسبه است.

آیین‌نامه‌ها محدودیت‌های مختلفی را برای حداکثر عرض ترک اعمال کرده‌اند. مبحث نهم مقررات ملی ساختمان حداکثر مجاز عرض ترک برای شرایط محیطی متوسط، شدید و خیلی شدید را به ترتیب ۰/۲۰، ۰/۳۵ و ۰/۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته است [۳]. معیار پوسته شدن بتن بر اساس آیین‌نامه دوام اروپا رسیدن عرض ترک به مقدار ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. بنابراین بر اساس این آیین‌نامه در رابطه (۶) زمان رسیدن عرض ترک به مقدار یک میلی‌متر را می‌توان به عنوان زمان پوسته شدن بتن (T_s) در نظر گرفت.

میلگرد و T_i زمان شروع خوردگی از لحظه‌ی نفوذ یون کلراید در بتن 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 کلراید بیشتر به صورت غیریکنواخت بوده است؛ ولی مدل‌های بسیاری برای پیش‌بینی سطح باقی‌مانده میلگرد با فرض یکنواخت بودن خوردگی، ارائه شده است [۱۹ و ۱۸]. Vu و Stewart رابطه زیر را برای سطح باقی‌مانده میلگرد بعد از گذشت زمان t از شروع خوردگی به صورت زیر ارائه کرده‌اند [۲۰]:

$$A_s(t) = \pi(D_0 - 0.0282i_{cor}(1)t^{0.7})^2 / 4 \quad (3)$$

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

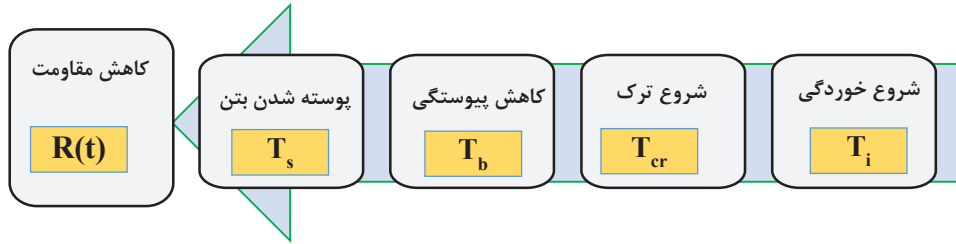
۲-۳- زمان رخداد ترک و زمان پوسته شدن بتن

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 بوده است و یا بر اساس تجارب آزمایشگاهی ارائه شده‌اند [۲۱ و ۲۲].

Vidal و همکاران بر مبنای تجارب آزمایشگاهی، آستانه شروع ترک خوردگی را بر اساس مقدار میلگرد خورده شده به صورت زیر ارائه کرده‌اند [۲۳]:

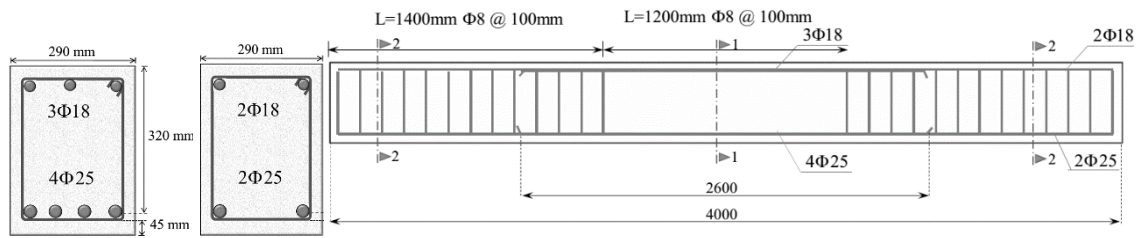
$$\Delta A_{s0} = A_s \left[1 - \left[1 - \frac{\alpha}{D_0} \left(7.53 + 9.32 \frac{c}{D_0} \right) 10^{-3} \right]^2 \right] \quad (4)$$

$$T_{cr} = \left[\frac{-0.0564i_{cor}(1)D_0 + \sqrt{(0.0564i_{cor}(1)D_0)^2 - 3180 \times 10^{-6}i_{cor}(1)^2 D_0^2 \left[1 - \left[1 - \frac{\alpha}{D_0} \left(7.53 + 9.32 \frac{c}{D_0} \right) 10^{-3} \right]^2 \right]}}{-1590 \times 10^{-6}i_{cor}(1)^2} \right]^{0.7} \quad (5)$$



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

Fig. 1. Effect of corrosion consequences on the strength of reinforced concrete structures



شکل ۲. تیر در نظر گرفته شده به همراه مقاطع تیر در نزدیکی تکیه‌گاه و وسط

Fig. 2. Simply supported RC beam with its cross-sections near the support and the middle

توسط بتن و خاموت‌های عرضی می‌باشند که از روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌گردند برای محاسبه مقاومت برشی تامین شده توسط بتن از اثرات بار محوری صرف نظر شده است.

$$v_c(t) = 0.17\lambda\sqrt{f'_c}(b_w(t)d(t)) \quad (۸)$$

$$v_s(t) = A_{sv}(t)f_{yv}\frac{d(t)}{S_n} \quad (۹)$$

در روابط بالا متناسب با سناریوهای در نظر گرفته شده سه متغیر وابسته به زمان می‌باشند: عرض مقطع $b_w(t)$ ، عمق موثر مقطع $d(t)$ و $A_{sv}(t)$ سطح مقطع خاموت‌ها می‌باشد.

برای شرایط محیطی، مقادیر در نظر گرفته شده یون کلراید و خواص بتن در جدول ۱ نشان داده شده است. خواص تصادفی پارامترهای در نظر گرفته شده؛ شامل نوع تابع چگالی احتمال، ضریب تغییرات و همچنین مقدار میانگین برخی از متغیرها از مراجع مختلفی برداشته شده است [۲۷-۲۴]. بر

۳- مدل‌سازی و نتایج

برای بررسی اثرات خوردگی میلگرد بر مقاومت برشی تیرهای بتنی، طبق شکل ۱ مراحل اثرات مختلف نفوذ یون کلراید در سناریوهای اعمالی در نظر گرفته می‌شود. نفوذ یون کلراید به درون مقطع بر اساس رابطه (۱) به صورت یک بعدی در نظر گرفته شده است که این فرض در برخی گوشه‌ها که مقطع از دو سمت تحت اثر نفوذ یون کلراید قرار دارد در بخش کوچکی همراه با مقداری خطا خواهد بود. برای ارزیابی اثرات سناریوهای مختلف نفوذ یون کلراید، تیر نشان داده شده در شکل ۲ در نظر گرفته شده است. نحوه نفوذ یون کلراید درون تیر بتنی به صورت چهار سناریوی نشان داده شده در شکل ۳ فرض شده است. بر اساس این سناریوها نحوه کاهش سطح مقطع بتن مسلح در شکل ۴ نشان داده شده است. مقاومت برشی اسمی تیر، V_n در زمان t از آغاز خوردگی در کنار تکیه‌گاه با استفاده از روابط مبحث نهم مقررات ملی ساختمان به صورت زیر محاسبه گردیده است:

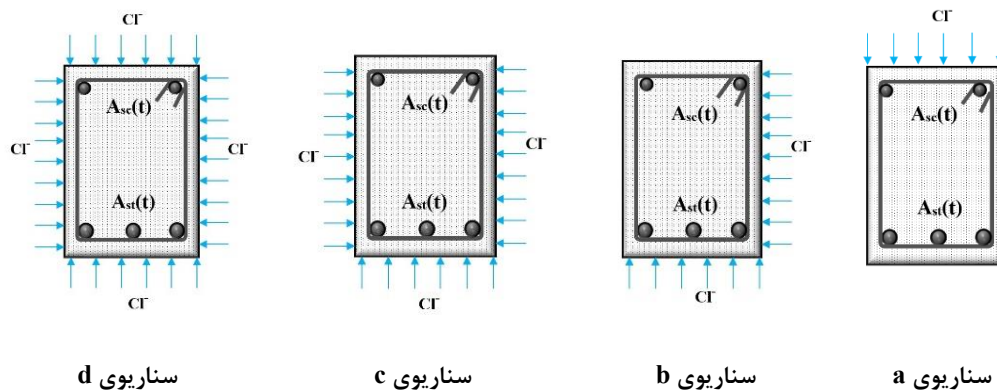
$$v_n(t) = v_s(t) + v_c(t) \quad (۷)$$

در این رابطه $V_c(t)$ و $V_s(t)$ به ترتیب مقاومت‌های برشی تأمین شده

جدول ۱. پارامترهای ورودی مدل‌سازی به همراه خواص آماری

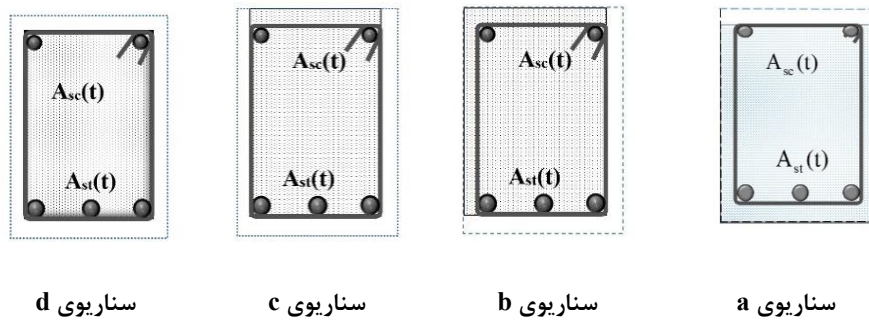
Table 1. Input parameters of the Model with statistical properties

پارامتر	تعریف	میانگین	ضریب تغییرات	تابع چگالی
b_w	عرض مقطع (mm)	۲۹۰	۰/۰۵	نرمال
d	عمق موثر مقطع (mm)	۳۲۰	۰/۰۵	نرمال
D_{st}	قطر میلگرد کششی (mm)	۲۵	۰/۰۲	لوگ نرمال
D_{sc}	قطر میلگرد فشاری (mm)	۱۸	۰/۰۲	لوگ نرمال
D_v	قطر خاموت (mm)	۸	۰/۰۲	لوگ نرمال
f_y	تنش تسلیم میلگردها (MPa)	۴۰۰	۰/۱۰	لوگ نرمال
f_c	مقاومت فشاری بتن (MPa)	۲۵	۰/۱۵	نرمال
S_n	فاصله بین خاموت‌ها (mm)	۱۰۰	۰/۱۰	نرمال
c	پوشش خالص روی میلگردها (mm)	۴۵	۰/۱۰	نرمال
I_{corr}	چگالی جریان خوردگی ($\mu A/cm^2$)	۲	۰/۱۰	نرمال
$D_{app,c}$	ضریب انتشار یون کلراید 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 Δx (kg/m^3)	۵	۰/۱۵	لوگ نرمال
C_{cr}	غلظت بحرانی کلراید (kg/m^3)	۱	۰/۱۵	یکنواخت



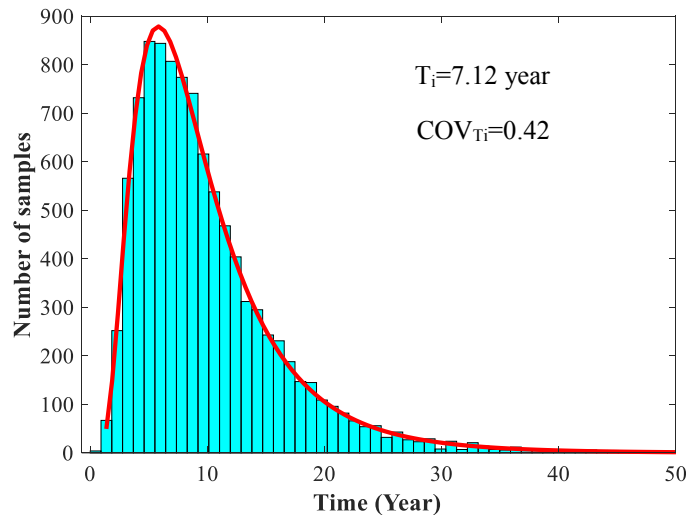
شکل ۳. حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده برای نحوه نفوذ یون کلراید

Fig. 3. Different scenarios for how chloride ions penetrate



شکل ۴. نحوه کاهش سطح مقطع متناسب با حالت‌های مختلف نفوذ یون کلراید

Fig. 4. The reduction in the cross-section according to different states of chloride ion penetration



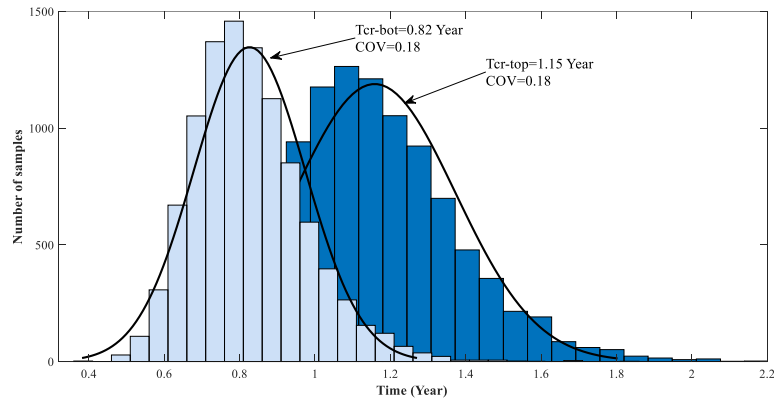
شکل ۵. هیستوگرام زمان آغاز خوردگی (T_i) برای تیر نمونه

Fig. 5. Histogram of corrosion initiation time (T_i) for considered RC beam

تابع توزیع آماری بیان کننده خواص تصادفی زمان آغاز خوردگی، تابع لوگ نرمال به دست آمده است. پارامتر مهم بعدی که باید محاسبه گردد زمان پوسته شده بتن (T_s) می باشد. برای محاسبه این زمان ابتدا زمان شروع ترک خوردگی (T_{cr}) محاسبه می گردد؛ بدین منظور با استفاده از رابطه (۴) مقدار آستانه کاهش در سطح مقطع میلگردهای طولی برای شروع ترک خوردگی محاسبه می گردد. بر اساس رابطه (۴) برای بالای مقطع مقدار ΔA_{s0} برابر با $1/74$ میلی متر مربع و برای پایین مقطع برابر با $1/90$ میلی متر مربع به دست

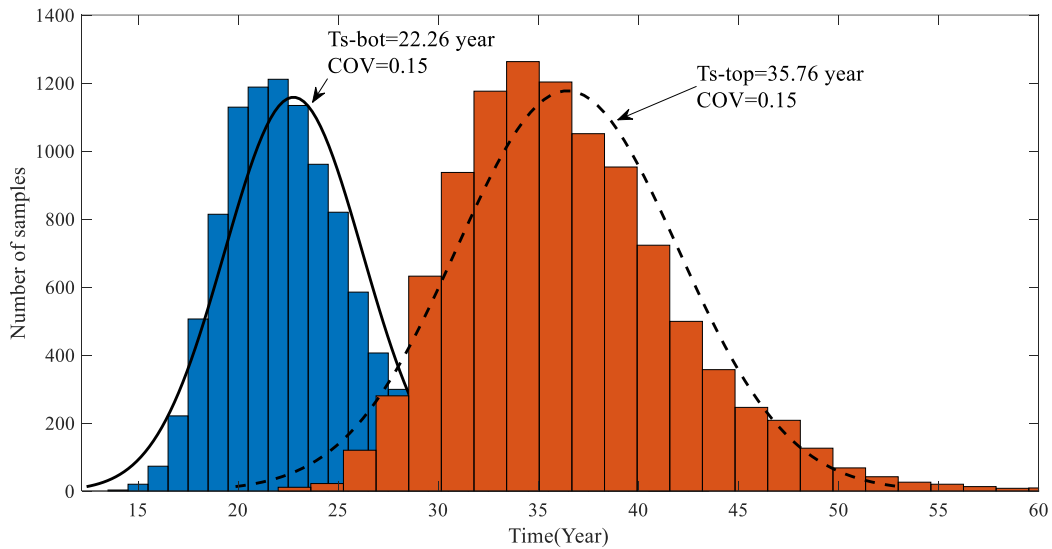
اساس این مقادیر زمان آغاز خوردگی و خواص تصادفی این زمان با استفاده از تولید نمونه‌های تصادفی بر اساس خواص تصادفی نشان داده شده در جدول ۱ و روش مونت کارلو (MC) محاسبه شده است.

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 به دست آمده است که هیستوگرام نمونه‌های تولید شده و خواص تصادفی آن در شکل ۵ نشان داده شده است بر اساس نتایج تولید شده از روش مونت کارلو، بهترین



شکل ۶. تابع چگالی و هیستوگرام زمان شروع ترک‌های ناشی از خوردگی در بالا و پایین مقطع

Fig. 6. Probability Density function and histogram of the cracking initiation time (T_{cr}) at the top and bottom of the section



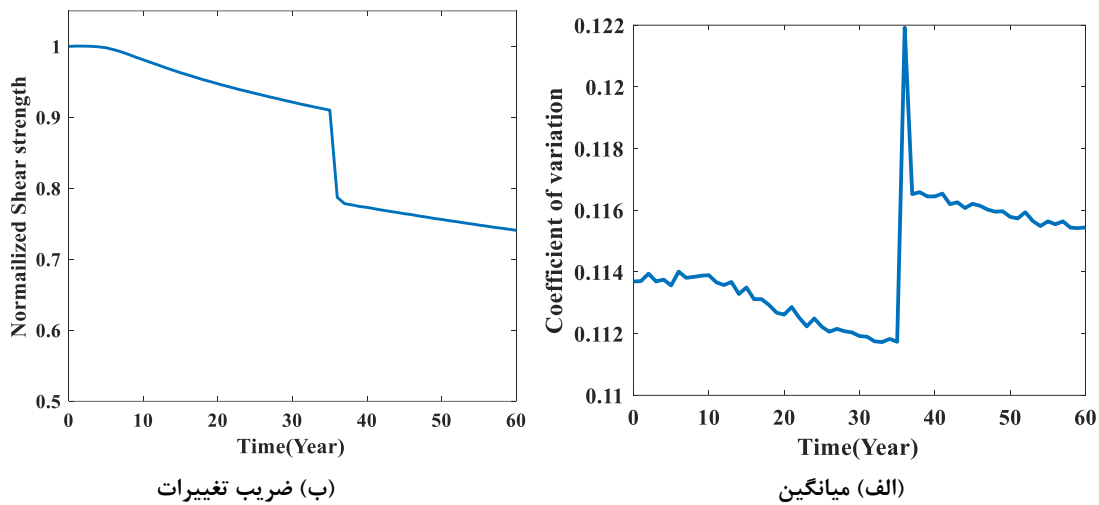
شکل ۷. تابع چگالی و هیستوگرام زمان پوسته شدن ناشی از خوردگی در بالا و پایین مقطع

Fig. 7. Probability Density function and histogram of the cover spalling time (T_{cr}) at the top and bottom of the section

بعد از شروع خوردگی به دست می‌آید. خواص تصادفی این مقادیر در شکل ۷ نشان داده شده است.

با داشتن مقادیر زمان شروع خوردگی، زمان پوسته شدن بتن، مقاومت برشی برای سناریوهای مختلف نشان داده شده در شکل ۳ محاسبه می‌گردد. بدین منظور پارامترهای ورودی مدل مقاومت برشی (روابط (۸) و (۹)) با استفاده از روش مونت کارلو بر اساس مقادیر جدول ۱ در هر زمان تولید شده و مقاومت برشی با جمع مقادیر سهم خاموت‌ها و بتن محاسبه می‌گردد.

می‌آید. زمان آغاز ترک خوردگی را می‌توان مستقیماً با استفاده از رابطه (۵) محاسبه کرد، زمان شروع ترک خوردگی برای بالا و پایین مقطع به ترتیب برابر با ۱/۱۵ سال و ۰/۸۲ سال بعد از شروع خوردگی به دست می‌آید. نمودار هیستوگرام این دو زمان و تابع چگالی احتمال برآزنده شده به این دو زمان در شکل ۶ نشان داده شده است. زمان رخداد پوسته شدن بتن (T_s) با استفاده از رابطه (۶) و برابر قرار دادن این رابطه با مقدار آیین نامه دوام اروپا یعنی یک میلی‌متر برای بالا و پایین مقطع به ترتیب ۳۵/۷۶ سال و ۲۲/۲۶ سال



شکل ۸. تغییرات میانگین مقاومت برشی ($Vr1$) و ضریب تغییرات آن در طی عمر سازه

Fig. 8. Changes in the average of the shear strength ($Vr1$) and its coefficient of variation during the life of the structure

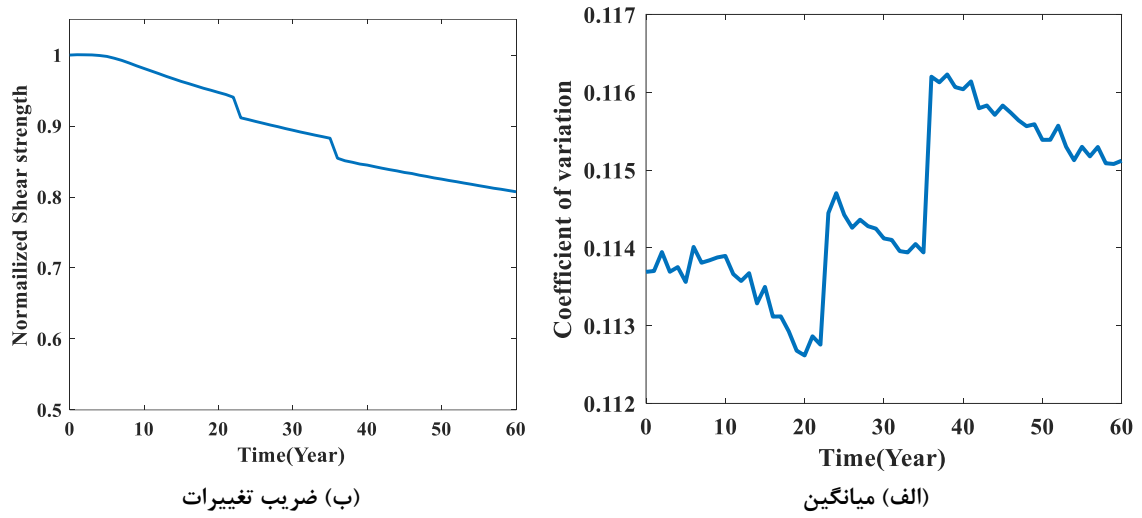
بتن، در محدوده ۰/۱۱ تا ۰/۱۴ قرار دارد. از قسمت (ب) شکل‌های ۸ تا ۱۳ مشخص است که در لحظه پوسته شدن بتن افزایش ناگهانی در ضریب تغییرات مقاومت برشی رخ داده است. دلیل این جهش، تغییر رابطه سهم مقاومت برشی بتن و همچنین کوچک‌تر شدن ناگهانی مقداری میانگین عرض مقطع (b) و عمق موثر مقطع (d) می‌باشد.

برای سناریوی (b)، علاوه بر کاهش عمق موثر مقطع، به دلیل نفوذ یون کلراید از کناره مقطع، در زمان پوسته شدن کناره مقطع افت ناگهانی در مقاومت برشی سهم بتن اتفاق افتاده است. تفاوت نتایج این سناریو با سناریوی (c) این است که در سناریوی (c) عرض مقطع به اندازه دو برابر پوشش بتن کاسته می‌شود در حالی که در سناریوی (b) مقدار این کاهش به اندازه یک برابر ضخامت پوشش روی میلگردها خواهد بود. از این رو با مقایسه نتایج در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشخص است مقدار کاهش در مقاومت برشی سناریوی (b) در لحظه پوسته شدن کناره‌ها برابر با ۳ درصد و برای سناریوی (c) برابر با ۶ درصد می‌باشد. در سناریوهای (b) و (c) همچنین فرض شده است که گوسته شدن کناره به دلیل رسیدن عرض ترک به حد نهایی در پایین مقطع صرفاً موجب پوسته شدن کناره مقطع تا نصف ارتفاع خواهد شد و نیمه بالایی مقطع بعد از رسیدن عرض ترک در بالای مقطع به حد نهایی جدا خواهد شد. دلیل وجود دو افت ناگهانی در نمودار مقاومت برشی نیز همین فرض می‌باشد.

ضریب تغییرات مقاومت از تقسیم انحراف استاندارد بر مقدار میانگین مقاومت برشی به منظور ارزیابی عدم قطعیت در نتایج نیز مورد محاسبه قرار گرفته است. به عنوان مثال برای سناریوی a که تنها کلراید از پایین مقطع نفوذ می‌کند همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است صرفاً پوسته شدن بتن در پایین مقطع در نظر گرفته شده است که بر اساس روابط (۸) و (۹) این سناریو اثری بر مقاومت برشی تأمین شده توسط بتن نخواهد داشت.

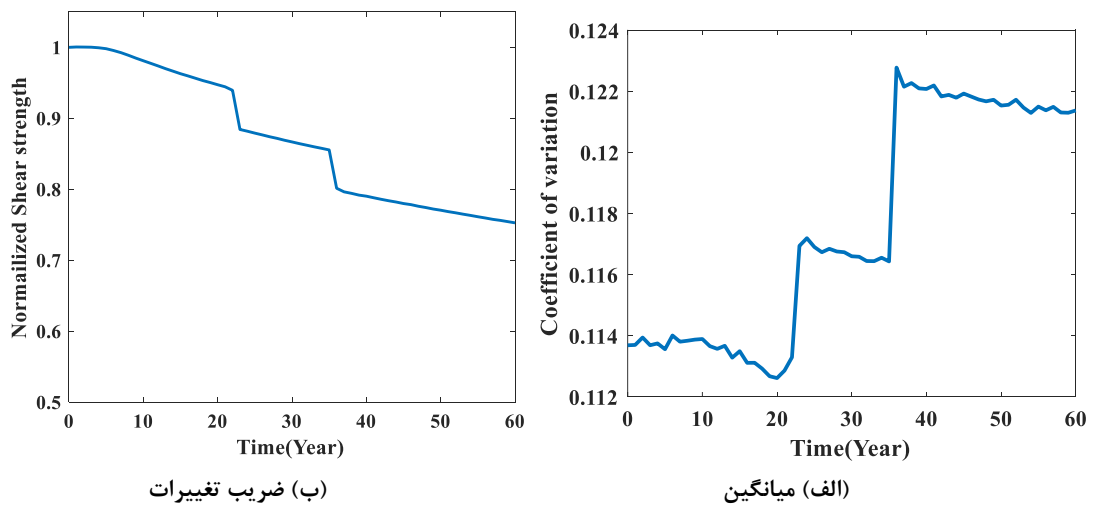
در شکل ۸ برای سناریوی (a) مقادیر مقاومت برشی و عدم قطعیت در طی زمان نشان داده شده است. بر اساس این سناریو بر اثر کاهش سطح مقطع خاموت‌ها، مقاومت برشی با شیب ملایمی متناسب با شدت کاهش سطح مقطع خاموت‌ها کاهش پیدا می‌کند و با پوسته شدن بتن در بالای مقطع، برش سهم بتن (Vc) به دلیل کاهش عمق موثر از d به (d-c)، در لحظه پوسته شدن بتن دچار افت ناگهانی شده است. شدت این افت متناسب با ضخامت پوشش بتن خواهد بود که برای این مثال تقریباً موجب کاهش ۱۳ درصدی در مقاومت برشی شده است. بعد از رویداد پوسته شدن بتن، نرخ کاهش همچنان متناسب با نرخ کاهش سطح مقطع میلگرد خواهد بود. از شکل ۸ مشخص است که بعد از ۶۰ سال عمر سازه، مقاومت به ۰/۷۴ مقدار مقاومت اولیه کاهش یافته است.

ضریب تغییرات مقاومت برشی بر اساس عدم قطعیت پارامترهای ورودی، با در نظر گرفتن جهش‌های ناگهانی در زمان رخداد پوسته شدن



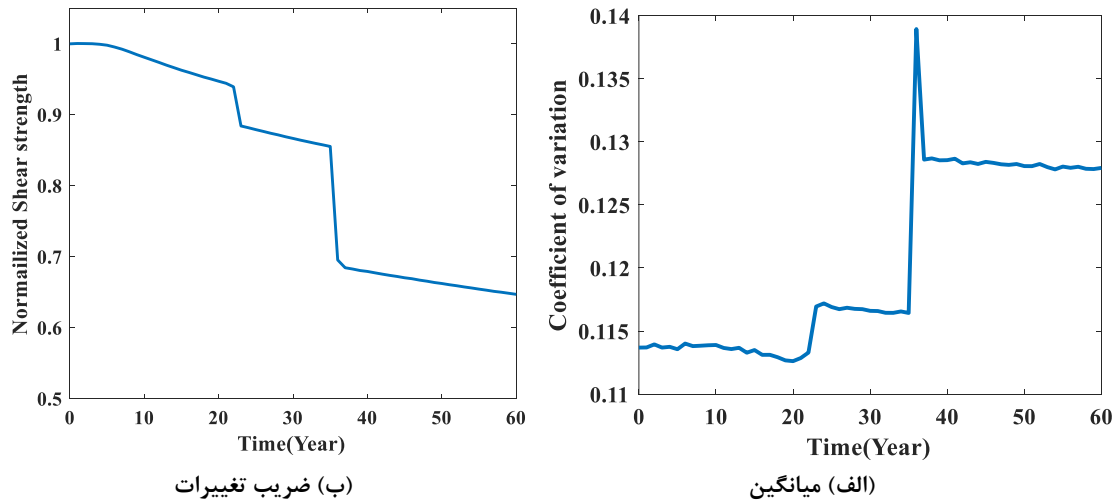
شکل ۹. تغییرات میانگین مقاومت برشی (V_{r2}) و ضریب تغییرات آن در طی عمر سازه

Fig. 9. Changes in the average of the shear strength (V_{r2}) and its coefficient of variation during the life of the structure



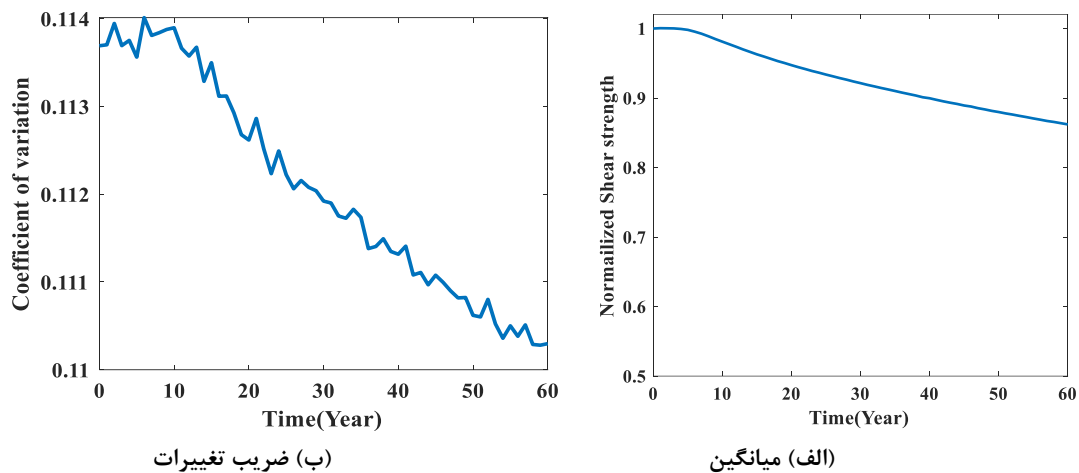
شکل ۱۰. تغییرات میانگین مقاومت برشی (V_{r3}) و ضریب تغییرات آن در طی عمر سازه

Fig. 10. Changes in the average of the shear strength (V_{r3}) and its coefficient of variation during the life of the structure



شکل ۱۱. تغییرات میانگین مقاومت برشی (V_{r4}) و ضریب تغییرات آن در طی عمر سازه

Fig. 11. Changes in the average of the shear strength (V_{r4}) and its coefficient of variation during the life of the structure



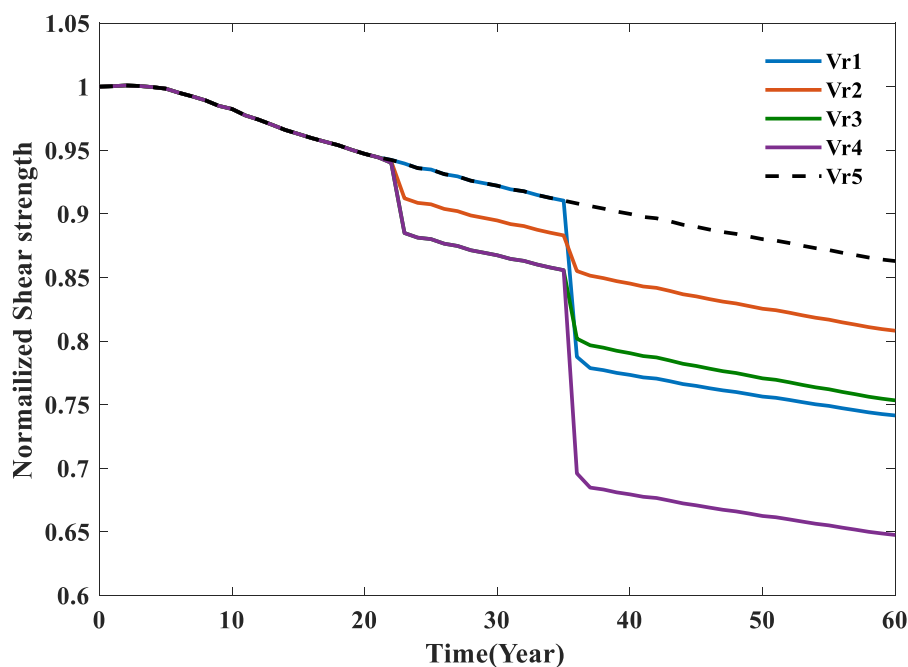
شکل ۱۲. تغییرات میانگین مقاومت برشی (V_{r5}) و ضریب تغییرات آن در طی عمر سازه

Fig. 12. Changes in the average of the shear strength (V_{r5}) and its coefficient of variation during the life of the structure

جهش شدیدتری نسبت به بقیه سناریوها است. اثر این جهش نقطه‌ای موجب افزایش ضریب تغییرات در لحظه پوسته شدن به $0/122$ و $0/14$ در سناریوهای (c) و (b) شده است.

در صورت در نظر نگرفتن کاهش سطح مقطع بتن، کاهش در مقاومت برشی صرفاً ناشی از کاهش در مقطع میلگرد خواهد بود؛ در این صورت مقاومت برشی به صورت نشان داده شده در شکل ۱۲ در طی زمان کاهش می‌یابد. این کاهش بعد از شروع خوردگی تقریباً به صورت خطی در طی

در شکل ۱۱، مقاومت برشی بر اساس سناریوی (d) نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است همانند سناریوی (a)، موقع پوسته شدن بالایی مقطع به دلیل اثرگذاری این رویداد هم در سهم برش‌گیری خاموت‌ها و هم سهم بتن، کاهش بیشتری در مقاومت برشی اتفاق افتاده است. همانطور که از این شکل و شکل ۸ مشخص است، ضریب تغییرات مقاومت برشی در لحظه‌ی پوسته شدن بالایی مقطع در سناریوهای که پوسته شدن بتن موجب کاهش عمق موثر مقطع می‌گردد، دارای یک



شکل ۱۳. نسبت مقاومت برشی به مقاومت اولیه برای سناریوهای مختلف نفوذ یون کلراید

Fig. 13. The ratio of the shear strength at time t to the initial strength for different chloride ion diffusion scenarios

در نظر گرفته شود (VI5)، مقاومت برشی به $0/86$ مقدار اولیه می‌رسد که دارای تفاوت زیادی با مقدار واقعی می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل عمر تیر بتنی با در نظر گرفتن مقاومت برشی به عنوان تابع شرایط حدی مورد ارزیابی قرار گرفت. فرض گردید که تیر بتنی در معرض محیط حاوی یون کلراید قرار گرفته و سناریوهای مختلف نفوذ یون کلراید به همراه اثرات جانبی خوردگی میلگرد از جمله پوسته شدن بتن در نظر گرفته شد و در مجموع نتایج زیر حاصل گردید:

- ۱- در نظر گرفتن اثر پوسته شدن بتن موجب تفاوت زیاد در مقادیر پیش بینی شده برای مقاومت برشی تیر بتنی می‌شود به طوری که در حالت بحرانی در نظر گرفتن اثرات پوسته شدن بتن، ۲۰ درصد مقاومت برشی کمتر می‌شود و ارزیابی واقع بینانه‌تری از عمر باقی‌مانده سازه به دست خواهد آمد.
- ۲- در حالتی که بخش بالایی مقطع بتنی پوسته می‌شود به دلیل اثرگذاری در هر دو رابطه‌ی سهم برشی بتن و خاموت‌ها، مقاومت برشی دچار کاهش بیشتری خواهد شد.

زمان گسترش خوردگی ادامه داشته است. با توجه به روابط مربوط به محاسبه‌ی مقاومت برشی، تنها پارامتر متغیر در طی زمان مقدار $A_{sv}(t)$ می‌باشد؛ بنابراین نحوه تغییر مقاومت برشی نسبت به این متغیر خطی خواهد بود. انتخاب مدل خوردگی خاموت‌ها مستقیماً بر نمودار تغییرات مقاومت برشی در طی زمان اثرگذار خواهد بود. نحوه کاهش منطبق بر مدل عمر ارائه شد توسط موری و الینگوود می‌باشد که بر اساس فرض ثابت بودن نرخ خوردگی در طی زمان ارائه گردیده است [۲۸]. مقدار ضریب تغییرات برای این حالت همانطور که در قسمت (ب) شکل ۱۲ نشان داده شده است در کانال $0/11$ قرار دارد و در طی زمان گسترش خوردگی روند کاهش ناچیزی دارد به طوری که از $0/114$ به حدود تقریبی $0/110$ می‌رسد.

در شکل ۱۳ نتایج به دست آمده برای همه سناریوها به منظور مقایسه نشان داده شده است. در این شکل اثر در نظر گرفتن کاهش سطح مقطع به صورت‌های مختلف کاملاً مشهود است. با در نظر گرفتن بحرانی‌ترین وضعیت که سناریوی (d) می‌باشد مقدار مقاومت برشی برای تیر بتنی که در سال ۷ام خوردگی میلگرد در آن شروع می‌شود بعد از ۶۰ سال به $0/65$ مقدار برش اولیه می‌رسد. اگر مدل عمر بر اساس صرفاً کاهش سطح مقطع میلگرد

منابع

- [1] A. James, E. Bazarchi, A.A. Chiniforush, P.P. Aghdam, M.R. Hosseini, A. Akbarnezhad, I. Martek, F. Ghodoosi, Rebar corrosion detection, protection, and rehabilitation of reinforced concrete structures in coastal environments: A review, *Construction and Building Materials*, 224 (2019) 1026-1039.
- [2] ACI308R-16, Guide to External Curing of Concrete, in, American Concrete Institute Farmington Hills, Mich., 2016.
- [3] O.o.N.B. Regulations, Part 9 of National Regulations: Design and implementation of reinforced concrete buildings, in, Toseeh Iran, Tehran, 2014.
- [4] K. Bhargava, A. Ghosh, Y. Mori, S. Ramanujam, Modeling of time to corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures, *Cement and Concrete Research*, 35(11) (2005) 2203-2218.
- [5] M. Alexander, H. Beushausen, Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures—review and critique, *Cement and Concrete Research*, 122 (2019) 17-29.
- [6] A. Van Beek, G. Gaal, J. Van Noortwijk, J. Bakker, 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, pp. 257-267.
- [7] G. Markeset, M. Kioumars, Need for further development in service life modelling of concrete structures in chloride environment, *Procedia engineering*, 171 (2017) 549-556.
- [8] H.-W. Song, H.-J. Kim, V. Saraswathy, T.-H. Kim, A micro-mechanics based corrosion model for predicting the service life of reinforced concrete structures, *International Journal of Electrochemical Science*, 2 (2007) 341-354.
- [9] M. Safehian, 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*

۳- عدم قطعیت مقاومت برشی در طی زمان تقریباً ثابت باقی می‌ماند فقط در زمان‌های رخداد پوسته شدن بتن مقدار جزئی افزایش یافته و سپس به روند قبلی خود ادامه می‌دهد.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A_s	مساحت میلگرد، mm^2
A_{sv}	مساحت ساق خاموت‌ها، mm^2
b_w	عرض تیر، mm
c	ضخامت پوشش بتن، mm
C_0	مقدار کلراید اولیه بتن، kg/m^3
C_{cr}	مقدار کلراید برای شروع خوردگی، kg/m^3
$C_{s,\Delta x}$	مقدار کلراید در عمق Δx ، kg/m^3
d	عمق موثر تیر، mm
D_0	قطر اولیه میلگرد، mm
$D_{app,c}$	ضریب انتشار یون کلر، cm^2/year
f_c	مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن، MPa
f_{yv}	تنش تسلیم میلگردهای برشی، MPa
$i_{cor(1)}$	چگالی جریان خوردگی اولیه، $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
S_n	فاصله خاموت‌ها، mm
t	زمان، year
T_b	زمان کاهش پیوستگی، year
T_{cr}	زمان رخداد اولین ترک‌ها، year
T_i	زمان آغاز خوردگی میلگرد، year
T_s	زمان پوسته شدن بتن، year
V_c	نیروی برشی سهم بتن، N
V_s	نیروی برشی سهم میلگرد، N
w	عرض ترک، mm
x	فاصله از روی سطح بتن، mm
E	مدول الاستیسیته، N/m^2

علائم یونانی

α	ضریب نوع ترک خوردگی
ρ	چگالی، kg/m^3
φ_c	ضریب کاهش مقاومت بتن
φ_s	ضریب کاهش تنش تسلیم میلگرد
Δx	عمق ناحیه همرفت، mm

- Monitoring of Post – Tensioned Tendons in Contact with Chlorides, *Durability of Building Materials and Components*, 2 (1996) 959–967.
- [20] K.A. Vu, M.G. Stewart, Predicting the likelihood and extent of reinforced concrete corrosion-induced cracking, *Journal of structural engineering*, 131(11) (2005) 1681-1689.
- [21] I. Khan, R. François, A. Castel, Prediction of reinforcement corrosion using corrosion induced cracks width in corroded reinforced concrete beams, *Cement and concrete research*, 56 (2014) 84-96.
- [22] P. Thoft-Christensen, Corrosion and cracking of reinforced concrete, in: *Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures: Assessment, Design and Management*, 2004, pp. 26-36.
- [23] T. Vidal, A. Castel, R. François, Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete, *Cement and concrete research*, 34(1) (2004) 165-174.
- [24] A.S. Nowak, K.R. Collins, *Reliability of structures*, CRC Press, 2012.
- [25] S.A. Hosseini, N. Shabakhty, S.S. Mahini, Correlation between chloride-induced corrosion initiation and time to cover cracking in RC structures, *Struct. Eng. Mech*, 56(2) (2015) 257-273.
- [26] S. Chen, C. Duffield, S. Miramini, B.N.K. Raja, L. Zhang, Life-cycle modelling of concrete cracking and reinforcement corrosion in concrete bridges: A case study, *Engineering Structures*, 237 (2021) 112143.
- [27] K. Bhargava, Y. Mori, A. Ghosh, Time-dependent reliability of corrosion-affected RC beams. Part 3: Effect of corrosion initiation time and its variability on time-dependent failure probability, *Nuclear Engineering and Design*, 241(5) (2011) 1395-1402.
- [28] B.R. Ellingwood, Y. Mori, Probabilistic methods for condition assessment and life prediction of concrete structures in nuclear power plants, *Nuclear engineering and design*, 142(2-3) (1993) 155-166.
- Materials*, 48 (2013) 287-294.
- [10] L. Pang, Q. Li, Service life prediction of RC structures in marine environment using long term chloride ingress data: Comparison between exposure trials and real structure surveys, *Construction and Building Materials*, 113 (2016) 979-987.
- [11] G. Lin, Y. Liu, Z. Xiang, Numerical modeling for predicting service life of reinforced concrete structures exposed to chloride environments, *Cement and concrete composites*, 32(8) (2010) 571-579.
- [12] J. Ožbolt, G. Balabanić, M. Kušter, 3D Numerical modelling of steel corrosion in concrete structures, *Corrosion science*, 53(12) (2011) 4166-4177.
- [13] C. Yang, L. Li, J. Li, Service life of reinforced concrete seawalls suffering from chloride attack: Theoretical modelling and analysis, *Construction and Building Materials*, 263 (2020) 120172.
- [14] R. Khatri, V. Sirivivatnanon, Characteristic service life for concrete exposed to marine environments, *Cement and concrete research*, 34(5) (2004) 745-752.
- [15] Y. Nezamdoost, M. Miri, H. Beheshtinejad, Behavior of reinforced concrete beams with corroded stirrups and tensile rebars, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 50.2(99) (2020) 61-70.
- [16] S. Xu, Z. Zhang, R. Li, B. Qiu, Experimental study on the shear behavior of RC beams with corroded stirrups, *Journal of advanced concrete technology*, 15(4) (2017) 178-189.
- [17] L. Wang, X. Zhang, J. Zhang, Y. Ma, Y. Liu, Effects of stirrup and inclined bar corrosion on shear behavior of RC beams, *construction and Building materials*, 98 (2015) 537-546.
- [18] K. Bhargava, A.K. Ghosh, Y. Mori, S. Ramanujam, Ultimate flexural and shear capacity of concrete beams with corroded reinforcement, *Structural Engineering and Mechanics – An International Journal*, 27(3) (2007) 347–363.
- [19] C. Andrade, J. Sarria, C. Alonso, Corrosion Rate Field

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. F. Sajedi, H. Jalilifar, Investigation of the technical and economic desirability of recycled concretes containing pozzolan, Amirkabir J. Civil Eng., 54(8) (2022) 2995-3008.

DOI: [10.22060/mej.2019.15465.6128](https://doi.org/10.22060/mej.2019.15465.6128)

