

# مطالعه رفتار لرزه ای قاب بتن آرمه در معرض حمله کلرایدی با رویکرد احتمالاتی در بستر زمان

سحر رضایی<sup>۱</sup>، مسعود خلیقی<sup>۲</sup>، جمیل بهرامی<sup>۳</sup>، زانیار میرزایی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۳. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۴. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

\*m.khalighi@uok.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۰

## چکیده

حمله کلرایدی یکی از مخرب‌ترین پدیده‌هایی است که در سازه‌های بتنی آثار نامطلوبی بر بتن و فولاد به جای می‌گذارد. خوردگی میلگردها از یک سو و آسیب بتن از سوی دیگر می‌تواند بطور چشمگیری منجر به کاهش ظرفیت لرزه‌ای سازه‌های بتنی در بستر زمان شود. با توجه به این موضوع، مدلسازی زوال مقاطع بتن آرمه پیش از انجام تحلیل‌های غیرخطی به منظور ارزیابی رفتار لرزه‌ای آنها ضرورت دارد. در این راستا نشریه ۳۶۰ توصیه می‌نماید که برای در نظر گرفتن آثار خوردگی مقاطع بتن آرمه، روابط ممان-انحناء مورد استفاده در تعریف مفاصل پلاستیک به کمک یک عدد ثابت تحت عنوان ضریب آگاهی اصلاح شود. با توجه به وابستگی فرایند زوال سازه‌های بتنی تحت حملات شیمیایی به زمان و همچنین وجود عدم قطعیت‌های مختلف در مدل‌سازی این پدیده، به نظر می‌رسد که لحاظ نمودن آثار خوردگی تنها با یک ضریب ثابت کافی نبوده و باید پژوهش‌های بیشتری در این خصوص انجام شود. در این راستا در مقاله حاضر رفتار لرزه‌ای یک قاب خمشی بتن آرمه در عمر مفید ۵۰ ساله تحت حمله کلرایدی بر وجوه خارجی ستون‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور در ابتدا انتشار کلراید با توجه به قانون فایک مدل‌سازی و سپس میزان آسیب در میلگردها و بتن به کمک نرم افزار متلب محاسبه شد. به منظور افزایش دقت مدل‌سازی، از یک چهارچوب احتمالاتی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها استفاده شد. در گام بعد، منحنی‌های ممان-انحناء مقاطع با استفاده از نتایج مدل‌سازی زوال استخراج شد و با روابط توصیه شده در نشریه ۳۶۰ مقایسه شد. در پایان رفتار لرزه‌ای قاب خمشی مذکور به کمک تحلیل غیرخطی استاتیکی (پوش آور) در دو حالت استفاده از نتایج ممان-انحناء بدست آمده از پژوهش حاضر و نشریه ۳۶۰ مورد مطالعه قرار گرفت.

**واژگان کلیدی:** حمله کلرایدی، مونت کارلو، تحلیل پوش آور، روابط ممان-انحناء، ضریب آگاهی، نشریه ۳۶۰.

## ۱- مقدمه

لرزه‌ای سازه‌های بتنی موجود در مناطق ساحلی دریا است. عموماً

خوردگی ناشی از کلراید از موضوعات مهم در بررسی رفتار این ماده شیمیایی می‌تواند به صورت معلق در هوا و یا مستقیماً

اصلاح شده برای ارزیابی ظرفیت خمشی المان‌های بتن مسلح تحت خوردگی معرفی نمودند [25].

با وجود مطالعات انجام شده و نتایج ارزشمند بدست آمده در این زمینه، نشریه ۳۶۰ برای در نظر گرفتن آثار زوال ناشی از حملات شیمیایی پیشنهاد می‌کند که روابط ممان-انحنای مورد استفاده در تحلیل‌های غیر خطی تنها توسط یک ضریب ثابت به نام ضریب آگاهی اصلاح شود [26]. از آنجایی که در روش مذکور هیچ یک از عوامل زمان، عمر سازه و عدم قطعیت‌های مختلف به طور مستقیم در نظر گرفته نمی‌شود، ضرورت دارد که کارایی توصیه مذکور مورد مطالعه و بررسی بیشتری قرار گیرد. هدف از انجام این پژوهش بررسی کارایی روش نشریه ۳۶۰ در لحاظ نمودن آثار خوردگی کلرایدی بر عملکرد لرزه‌ای قاب خمشی بتن آرمه است. بدین منظور در مقاله حاضر عملکرد لرزه‌ای یک قاب خمشی بتنی در بستر عمر ۵۰ ساله و با توجه به حمله کلرایدی و آسیب‌های ناشی از آن مورد مطالعه قرار گرفت. برای افزایش دقت نتایج، محاسبات در قالب یک روش احتمالاتی صورت پذیرفت به این معنی که پارامترهای مختلف از قبیل مشخصات هندسی و مکانیکی بتن و فولاد و مشخصات مربوط به انتشار کلراید بصورت متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شدند. در این راستا روش آماری مونت کارلو برای شبیه سازی احتمالاتی پارامترهای مذکور بکار گرفته شد. تکنیک مونت کارلو یکی از شناخته شده‌ترین روش‌ها در زمینه مدل سازی آماری است [27]. در این مقاله نیز با بهره‌مندی از تکنیک مذکور و با ایجاد صد هزار نمونه تصادفی، انتشار کلراید در ستون‌های قاب بر پایه قانون فایک مدل سازی شد و آسیب‌های ناشی از خوردگی اعم از کاهش سطح مقطع میلگردها، کاهش شکل پذیری فولاد مصرفی و کاهش مقاومت بتن برای ستون‌های بتنی محاسبه شد. نتایج حاصل از مدل سازی زوال در استخراج نمودارهای تنش- کرنش مصالح و همچنین نمودارهای ممان-انحناء مقاطع در عمر مفید ۵۰ ساله سازه مورد استفاده قرار گرفت و از این نتایج در تعریف مفاصل پلاستیک و تحلیل غیرخطی سازه استفاده شد. در این پژوهش منحنی‌های لنگر-انحناء مقاطع ستون‌ها در بازه‌های زمانی ۱۰ ساله محاسبه و با توصیه نشریه ۳۶۰ در این خصوص مقایسه شد. در مرحله بعد قاب خمشی مذکور در نرم

توسط آب دریا بر سازه اثر نماید. حمله کلرایدی باعث ایجاد آسیب در بتن و فولاد شده و در نهایت منجر به نابودی تدریجی سازه‌های مذکور می‌شود [1-3].

در سالهای اخیر مطالعات وسیعی در حوزه بررسی آثار نامطلوب حملات شدید محیطی بر عملکرد سیستم‌های سازه‌ای تحت بارهای بهره‌برداری و بارهای ناگهانی مانند زلزله، انفجار و غیره صورت پذیرفته است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که آثار منفی این حملات بر سازه‌های بتن مسلح اعم از خوردگی میلگردها و آسیب بتن در گذر زمان حائز اهمیت بوده و باید به عنوان یک فاکتور مهم در بررسی عملکرد لرزه‌ای آنها به ویژه در مناطق لرزه خیز مورد توجه واقع شود. گونزالز و همکاران با انجام مطالعات آزمایشگاهی ثابت نمودند که مهم ترین اثر خوردگی در سازه‌های بتن مسلح، کاهش سطح مقطع میلگردها است [4]. المسلم در پژوهشی نشان داد که پدیده خوردگی موجب کاهش شکل پذیری میلگردها و شکست ترد عضو سازه‌ای می‌شود [5]. ویدال و همکاران زوال بتن بر اثر انتشار ترک را بر اثر خوردگی مطالعه نمودند [6]. بارگاو و همکاران نشان دادند که فرآیند خوردگی بر مقاومت پیوند بتن و فولاد تاثیر گذار است [7]. به دلیل گستردگی این مبحث، مرور کامل پژوهش‌های انجام شده در زمینه خوردگی سازه‌های بتنی ناشی از حملات شیمیایی محیطی در نوشتار حاضر نمی‌گنجد. خوانندگان برای مطالعه بیشتر می‌توانند مراجع [8-19] را نیز ملاحظه نمایند. همچنین، تحقیقات ارزشمندی در زمینه خوردگی سازه‌های بتن مسلح توسط پژوهشگران ایرانی انجام شده که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. خوردگی و آثار آن بر باربری و عملکرد لرزه‌ای ستون‌های بتن آرمه توسط شایان فر و قانونی بقا مورد مطالعه قرار گرفت [20-21]. صدری نژاد و همکاران، تقویت اعضای بتن آرمه در معرض خوردگی را به کمک الیاف هیبریدی مورد بررسی قرار دادند [22]. مطالعه‌ای توسط فیروزی و همکاران در خصوص پیش‌بینی عمر مفید ستون‌های بتن مسلح در معرض خوردگی انجام گرفت [23]. تاثیر استفاده از ورقه‌های GFRP بر عملکرد سازه‌ای ستون‌های بتن مسلح خورده شده توسط کریم پور و فرهنگي مورد ارزیابی واقع شد [24]. اکبریان و همکاران یک مدل وابسته به زمان

$$D_{app,c}(t) = D_{RCM} \left(\frac{t_{28}}{t}\right)^a \quad (3)$$

در این رابطه  $D_{RCM}$  ضریب انتشار سریع کلراید،  $t_{28}$  زمانی معادل ۲۸ روز یا به عبارتی ۰/۰۷۶۷ سال و  $a$  ضریب سالخوردگی می‌باشد. شرح کاملتر پارامترهای بکار رفته در روابط فوق را می‌توان در مرجع [31] یافت.

### ۲-۲- خوردگی میلگردها

یکی از مهم‌ترین آثار منفی خوردگی در سازه‌های بتنی، کاهش سطح مقطع میلگردها است. با فرض خوردگی یکنواخت، قطر میلگرد در هر لحظه از زمان بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود [32-33]:

$$\Phi(t) = \Phi_0 - 2P_X(t) = [1 - \delta(t)]\Phi_0 \quad (4)$$

در این رابطه  $P_X(t)$  تابع نفوذ خوردگی،  $\Phi_0$  قطر میلگرد سالم و  $\delta(t)$  شاخص نفوذ خوردگی است. این شاخص بدون بعد و در بازه [۰,۱] قرار دارد و از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta(t) = \frac{2P_X(t)}{\Phi_0} \quad (5)$$

$$P_X(t) = \int_{t_i}^t r_{corr} dt \quad (6)$$

$$t_i = \frac{(C - \Delta x)^2}{4D_C} \left[ \operatorname{erf}^{-1} \left( \frac{C_{S,\Delta x} - C_{crit}}{C_{S,\Delta x} - C_0} \right) \right]^2 \quad (7)$$

در این روابط،  $t_i$  زمان شروع خوردگی،  $r_{corr}$  نرخ خوردگی،  $C_{crit}$  آستانه بحرانی غلظت کلراید و  $D_C \cong D_{RCM}$  است. بر اساس مطالعات انجام شده می‌توان برای سازه‌های بتنی در معرض حملات شدید محیطی یک رابطه خطی بین نرخ خوردگی  $r_{corr}$  در بازه [۰,۲۰۰]  $\frac{\mu m}{year}$  و غلظت کلراید  $C$  در بازه [۰,۳] فرض نمود [30,34].

### ۳-۲- کاهش شکل پذیری میلگردها

فرآیند خوردگی علاوه بر کاهش سطح مقطع میلگردها موجب کاهش شکل پذیری آنها نیز می‌شود. این موضوع احتمال شکست ترد در سازه بتن‌آرمه را به دنبال خواهد داشت [35-36]. کاهش شکل پذیری میلگردها با توجه به میزان آسیب سطح مقطع میلگردها مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌شود [37-38]:

$$\varepsilon_{su}(t) = \begin{cases} \varepsilon_{su0} & 0 \leq \delta_s \leq 0.016 \\ 0.1521 \cdot \delta_s^{-0.4583} \varepsilon_{su0} & 0.016 \leq \delta_s \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

افزار SAP2000 مدل‌سازی و با اعمال یک بار جانبی متناسب با مود اول تحت تحلیل غیرخطی استاتیکی (پوش آور) قرار گرفت. در این بخش نیز نتایج حاصل از این تحلیل بر اساس نتایج عددی حاصل از مدل سازی زوال با نتایج مبتنی بر توصیه‌های نشریه ۳۶۰ مقایسه و پیشنهاداتی در این زمینه ارائه شد.

### ۲- مدل سازی زوال ناشی از انتشار کلراید

در این بخش مدل‌سازی زوال ناشی از انتشار کلراید در عضو بتنی بطور خلاصه مرور می‌شود. در مقاله حاضر، خوردگی میلگردها، کاهش شکل‌پذیری آنها و زوال بتن به عنوان آسیب‌های ناشی از پدیده مذکور در نظر گرفته شدند. چگونگی محاسبه این پارامترها بر اساس میزان انتشار کلراید در عضو بتن مسلح در ادامه تشریح می‌شود.

### ۲-۱- فرآیند انتشار کلراید

میزان انتشار کلراید در یک عضو بتن مسلح را می‌توان بر اساس قانون فایک مطابق با معادله دیفرانسیل زیر تشریح نمود [28-29]:

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

در رابطه فوق  $D$  ضریب متوسط انتشار،  $C = C(x, t)$  غلظت ماده شیمیایی در نقطه  $x$  و زمان  $t$ ،  $\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla$  و  $\nabla C$  گرادیان  $C(x, t)$  می‌باشد. معادله (۱) را می‌توان برای انتشار کلراید در محیط‌های ۲ و ۳ بعدی نیز تعمیم داد. با این حال، تیتی و همکاران نشان دادند که شکل یک بعدی قانون فایک برای مدل‌سازی انتشار کلراید در اعضای بتن آرمه از دقت مناسبی برخوردار است [30]. با انتگرال‌گیری از شکل یک بعدی معادله (۱)، مقدار غلظت حدی کلراید در عمق  $c$  (پوشش بتن) در زمان  $t$  که باعث شروع خوردگی می‌شود مطابق با رابطه زیر خواهد بود [31]:

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

در این رابطه،  $\operatorname{erf}$  تابع خطای گوس،  $C(x = c, t)$  غلظت کلراید در عمق  $c$  (پوشش بتن) در زمان  $t$ ،  $C_0$  غلظت اولیه کلراید در خمیر سیمان،  $\Delta x$  عمق ناحیه انتقال،  $C_{S,\Delta x}$  مقدار کلراید در عمق  $\Delta x$  است.  $D_{app,c}$  نیز ضریب انتشار ظاهری کلراید است که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\delta_{s0} = 1 - \left[ 1 - \frac{1}{\Phi_0} \left( 7.53 + 9.32 \frac{c}{\Phi_0} \right) \times 10^{-3} \right]^2 \quad (14)$$

در رابطه فوق  $\Phi_0$  قطر میلگرد سالم و  $c$  ضخامت پوشش بتن است.

### ۳- استخراج نمودار ممان-انحناء مقطع زوال یافته و ایده آل سازی آن

یکی از مراحل مهم در انجام تحلیل غیرخطی سازه‌ها، تعریف مفاصل پلاستیک در اعضا است. مفاصل پلاستیک در مقاطع خمشی عموماً توسط روابط ممان-انحناء تعریف می‌شوند. در مقاله حاضر برای تعیین منحنی‌های ممان-انحناء در مقاطع زوال یافته بتن مسلح، از سازگاری کرنش‌ها، معادلات تعادل نیرو و لنگر در مقطع و روابط تنش-کرنش مصالح استفاده شد [39]. بدین منظور به ازای هر مقدار مشخص انحناء، یک محل برای محور خنثی در مقطع حدس زده می‌شود. سپس مقادیر کرنش‌ها در بتن و فولاد با فرض تغییرات خطی در مقطع محاسبه می‌شود. در گام بعد مقادیر تنش‌ها در هر نقطه از مقطع به کمک روابط تنش-کرنش تعیین می‌شود. سپس معادله تعادل بین نیروی فشاری محوری وارد بر ستون و برآیند تنش‌های قائم فولاد و بتن نوشته می‌شود. در صورت عدم برقراری تعادل، محل محور خنثی باید تغییر یابد. این پروسه آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا شرط تعادل نیروهای محوری مقطع اکتان شود. در نهایت مقدار لنگر داخلی مقطع متناظر با انحناء در نظر گرفته شده بر اساس محل نهایی محور خنثی محاسبه می‌شود. این فرایند با در نظر گرفتن مقادیر مختلف انحناء در مقطع تکرار می‌شود تا نمودار ممان-انحناء بطور کامل ترسیم شود. لازم به ذکر است که در فرایند تعیین نمودارهای ممان-انحناء فرض می‌شود که هیچ لغزشی بین میلگرد و بتن وجود ندارد و یک ناحیه مشخص از سطح مقطع بطور یکنواخت در معرض خوردگی ناشی از حمله کلرایدی قرار دارد.

نمودار ممان-انحناء حاصل از تحلیل مقطع، پیش از استفاده در تحلیل غیرخطی سازه مورد نظر باید خطی سازی شود تا بتوان در تعریف مفاصل پلاستیک اعضا از نقاط کلیدی آن، شامل لنگر و انحنای مانند ترک خوردگی، تسلیم و گسیختگی مقطع استفاده نمود. در این مقاله منحنی لنگر-انحناء ستون‌ها مطابق شکل (۱) با یک مدل سه خطی ایده‌آل سازی شد.

در این رابطه  $\varepsilon_{su}(t)$  کرنش نهایی فولاد در هر لحظه از زمان و  $\varepsilon_{su0}$  کرنش نهایی فولاد در حالت سالم و  $\delta_s$  میزان آسیب سطح مقطع میلگردها است. با فرض خوردگی یکنواخت، مقدار  $\delta_s$  بر اساس شاخص نفوذ خوردگی  $\delta(t)$  به شرح زیر بیان می‌شود:

$$\delta_s = \delta(t)(2 - \delta(t)) \quad (9)$$

در این رابطه  $\delta_s$  یک تابع بدون بعد است که در بازه  $[0, 1]$  قرار دارد.

### ۲-۴- کاهش مقاومت فشاری بتن

فرآیند اکسیداسیون میلگردها در طول عمر سازه‌های بتنی می‌تواند موجب انتشار ترک‌های طولی و لایه لایه شدن پوشش بتن در اعضای این نوع سازه‌ها شود که کاهش مقاومت فشاری بتن را به دنبال دارد. در سال ۱۹۸۶ وکیو و همکاران برای محاسبه میزان کاهش مقاومت بتن مسلح ناشی از خوردگی میلگردهای طولی، مدل زیر را ارائه نمودند [35]:

$$f_c(t) = [1 - \delta_c(t)]f_{c0} \quad (10)$$

$$\delta_c(t) = 1 - \frac{1}{1 + k \left[ \frac{\varepsilon_L(t)}{\varepsilon_{c0}} \right]} \quad (11)$$

در روابط فوق  $f_{c0}$  مقاومت فشاری بتن سالم،  $\delta_c$  شاخص آسیب بتن،  $k$  ضریب ثابتی است که مرتبط با قطر میلگرد است. این ضریب برای میلگردهای آجدار با قطر متوسط از مرجع [35] برابر با  $0.1$  بدست می‌آید.  $\varepsilon_{c0}$  بیشترین کرنش فشاری بتن و  $\varepsilon_L(t)$  کرنش عرضی در هر لحظه از زمان است که توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_L(t) = \frac{n_{bars} \cdot w}{b_i} \quad (12)$$

در این رابطه  $b_i$  عرض سطح مقطع سالم،  $n_{bars}$  تعداد میلگردها و  $w$  متوسط میزان بازشدگی ترک برای هر میلگرد است. مدل‌های متعددی در خصوص میزان خوردگی و ترک خوردگی پوشش بتن پیشنهاد شده است. یکی از این مدل‌های تجربی که توسط ویدال و همکاران ارائه شده به شرح زیر است [6]:

$$w = k_w (\delta_s - \delta_{s0}) A_{s0} \quad (13)$$

در رابطه اخیر  $k_w$  مقداری برابر با  $0.0575 \text{ mm}^{-1}$ ،  $\delta_s$  تابع آسیب از رابطه ۹،  $A_{s0}$  سطح مقطع اولیه یک میلگرد و  $\delta_{s0}$  مقدار آسیب لازم در فولاد برای شروع ترک خوردگی است. این پارامتر برای خوردگی یکنواخت از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

رابطه لنگر-انحناء الاستوپلاستیک کامل استفاده شد، به شکلی که شیب قسمت خطی برابر با  $0.3EI_g$  می باشد.

در ادامه این بخش به معرفی روابط تنش-کرنش بکار رفته در تحلیل مقاطع بتن مسلح زوال یافته پرداخته می شود. شکل (۲) نمودارهای مربوط به رفتار مصالح بتن و فولاد را نشان می دهد.

منظور معرفی بتن مطابق شکل (۲-الف) در قسمت فشاری از قانون ساینز<sup>۱</sup> و در قسمت کششی از یک مدل الاستوپلاستیک کامل استفاده شد [34]:

$$\sigma_c(t) = \begin{cases} \frac{k_c \eta_c - \eta_c^2}{1 + (k_c - 2) \eta_c} f_c(t) & 0 \geq \varepsilon > \varepsilon_{cu} \\ 0 & \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (15)$$

$$\sigma^* = E_0 \varepsilon_{c0} \quad k_c = \frac{\sigma^*}{f_c(t)} \quad \eta_c = \frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_{c0}} \quad (16)$$

$$\sigma_c(t) = \begin{cases} E_0 \varepsilon & 0 \leq \varepsilon < \frac{f_{ct}}{E_0} \\ f_{ct} & \varepsilon \geq \frac{f_{ct}}{E_0} \end{cases} \quad (17)$$

شکل ۲. روابط تنش-کرنش مصالح: الف) بتن ب) فولاد [34]

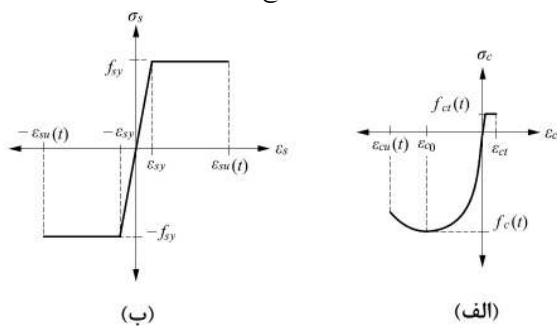


Fig. 2. Stress-strain relationships of materials: (a) Concrete (b) Steel [34]

در روابط فوق  $f_c(t)$  مقاومت فشاری بتن،  $f_{ct}$  مقاومت کششی بتن،  $E_0$  مدول اولیه،  $\varepsilon_{c0}$  کرنش در بیشترین فشار،  $\varepsilon_{cu}$  کرنش نهایی در فشار و  $\varepsilon_{ct}$  و  $\varepsilon_{su}(t)$  کرنش نهایی در کشش است.

به منظور معرفی فولاد میگرددها مطابق شکل (۲-ب) از یک مدل الاستوپلاستیک کامل در قسمت فشاری و کششی استفاده شد [34]:

$$\sigma_s(t) = \begin{cases} E_0 \varepsilon & |\varepsilon| < |\varepsilon_{sy}| \\ f_{sy} & |\varepsilon| > |\varepsilon_{su}(t)| \end{cases} \quad (18)$$

در روابط فوق  $f_{sy}$  تنش تسلیم فولاد،  $E_0$  مدول اولیه،  $\varepsilon_{sy}$  کرنش تسلیم و  $\varepsilon_{su}(t)$  کرنش نهایی فولاد می باشد.

شکل ۱. خطی سازی منحنی های لنگر-انحناء

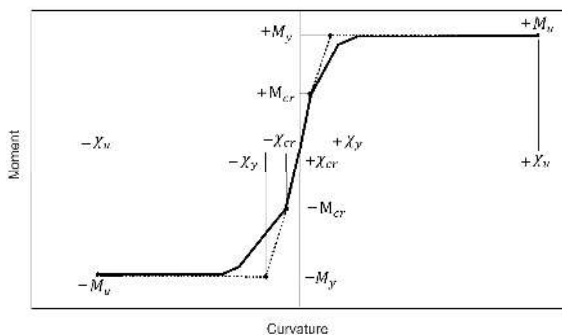


Fig. 1. Linearization of the moment-curvature curves

این مدل شامل سه بخش ناحیه الاستیک قبل از ترک خوردگی، ناحیه گسترش ترک تا قبل از تسلیم و ناحیه تسلیم فولاد تا گسیختگی نهایی می باشد. در این مدل  $M_{cr}$  و  $\chi_{cr}$  لنگر و انحنای نظیر ترک خوردگی مقطع،  $M_y$  و  $\chi_y$  لنگر و انحنای نقطه تسلیم مقطع،  $M_u$  و  $\chi_u$  لنگر و انحنای نهایی می باشند. به منظور ایده آل سازی منحنی لنگر-انحناء باید در ابتدا مقدار لنگرهای ترک خوردگی، تسلیم و نهایی از مرحله قبل مشخص شود. در روندهای سعی و خطا که قبلاً توضیح داده شد، معیار تشخیص لنگر ترک خوردگی  $M_{cr}$ ، رسیدن دورترین تار کششی بتن به کرنش ترک خوردگی بتن، معیار تشخیص لنگر تسلیم  $M_y$ ، رسیدن کرنش دورترین آرماتورهای کششی به کرنش تسلیم فولاد و معیار تشخیص لنگر نهایی  $M_u$ ، رسیدن دورترین فشاری بتن به کرنش نهایی بتن و یا رسیدن کرنش دورترین میلگرد کششی به کرنش نهایی فولاد است. پس از تعیین مقادیر سه لنگر مذکور، باید محل انحنای متناظر با آنها روی محور افقی نمودار مشخص شود. محل انحنای ترک خوردگی روی نمودار، متناظر با مقدار انحنای ترک خوردگی است که از روندهای سعی و خطا تعیین می شود. محل انحنای تسلیم برابر با بعد افقی نقطه تقاطع خط مماس بر منحنی لنگر-انحناء بعد از نقطه ترک خوردگی و خط افقی متناظر با لنگر تسلیم است. چگونگی تعیین این مقدار در شکل (۱) نشان داده شده است. محل انحنای نهایی نیز متناظر با نقطه ای خواهد بود که در آن مصالح فولاد یا بتن به کرنش نهایی خود رسیده باشند.

به منظور تعریف مفاصل پلاستیک در نواحی انتهایی تیرها نیز از

## ۴- مدل سازی احتمالاتی

در این مقاله به دلیل وجود عدم قطعیت در مشخصات هندسی و مکانیکی مصالح و پارامترهای مرتبط با پدیده انتشار کلراید، از یک چهارچوب احتمالاتی مبتنی بر روش شبیه سازی مونت کارلو استفاده شد. پارامترهای تصادفی مورد استفاده در مدل سازی زوال مطابق با جدول (۱) در نظر گرفته شدند. این جدول نوع توزیع احتمالاتی، مقدار میانگین و انحراف معیار در نظر گرفته شده برای پارامترهای مربوط به انتشار کلراید در عضو بتنی را بر اساس کد شماره ۳۴ نشریه 'fib' و ویژگی های آماری مربوط به مشخصات هندسی و مکانیکی مصالح را بر اساس پژوهش انجام شده توسط بیوندینی و همکاران نشان می دهد [31, 34]. لازم به ذکر است که کد شماره ۳۴ نشریه 'fib' به طراحی عمر سرویس سازه های بتن مسلح با تمرکز ویژه بر آثار نامطلوب زوال بر آنها می پردازد. یکی از اهداف این نشریه شناسایی و معرفی مدل های مختلف مرتبط با دوام و زوال سازه های بتن مسلح و ارائه رویکردهای طراحی مبتنی بر عملکرد است. یکی از ویژگی های مهم نشریه مذکور نگرش آماری به پدیده زوال در سازه های بتن مسلح است.

جدول ۱. توزیع احتمالاتی، میانگین و انحراف معیار مشخصات هندسی و مکانیکی مصالح و پارامترهای مرتبط با پدیده انتشار کلراید [31, 34] \*قسمتی از توزیع ها با مقادیر غیر منفی # [کران بالا, کران پایین]

Random Variable	Distribution	Mean	Standard deviation
$f_c$ [MPa]	Lognormal	35	5
$f_{sy}$ [MPa]	Lognormal	430	30
$\phi$ [mm]	Normal*	22	2.2
$c$ [mm]	Normal*	40	8
$D_{RCM}$ [m <sup>2</sup> /s]	Normal*	$15.8 \times 10^{-12}$	$3.16 \times 10^{-12}$
$a$ [-]	Beta [0;1]#	0.3	0.12
$C_{s,\Delta x}$ [wt.%/cem]	Normal*	3	0.9
$C_{crit}$ [wt.%/cem]	Beta [0.2;2]#	0.6	0.15

\*Truncated distributions with non-negative outcomes

# [Lower bound; Upper bound]

**Table 1.** Probabilistic distribution, mean and standard deviation of geometric and mechanical properties of materials and parameters related to chloride diffusion [31, 34]

در مقاله حاضر، تعداد نمونه ها برای انجام شبیه سازی مونت کارلو بر اساس تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف نسبت به تعداد نمونه تصادفی انتخاب شد. برای این منظور نتایج مربوط به تحلیل زوال مقطع بر اساس تعداد مختلفی از داده های تصادفی محاسبه شد. بر اساس بررسی نتایج، مشخص شد که با در نظر گرفتن تعداد ۱۰۰۰۰۰ نمونه تصادفی، روند برآورد پارامترها همگرا می شود. به عبارت دیگر با افزایش تعداد نمونه ها بیش از عدد مذکور تغییر محسوسی در نتایج مشاهده نمی شود به همین دلیل عدد ۱۰۰۰۰۰ برای تعداد داده های تصادفی تولید شده در روش مونت کارلو بکار گرفته شد. پس از تولید نمونه های تصادفی برای هر یک از پارامترهای مذکور، مقادیر میانگین و انحراف از معیار شاخص های آسیب مقطع زوال یافته شامل، میزان تغییر قطر میلگردها، کرنش نهایی فولاد و مقاومت فشاری بتن در بازه های زمانی ۱۰ ساله محاسبه شد.

## ۵- مطالعه موردی: قاب خمشی بتن مسلح

هدف از این مقاله، بررسی عملکرد لرزه ای یک قاب خمشی بتن آرمه تحت اثر پدیده خوردگی ناشی از کلراید در طول عمر مفید سازه با استفاده از تئوری های موجود و مقایسه با توصیه های نشریه ۳۶۰ هست. بدین منظور ابتدا پدیده زوال در قاب مذکور بر اساس روش ذکر شده در بخش های پیشین مدل سازی شد. از این نتایج در تعیین روابط لنگر-انحناء مقاطع آسیب دیده بهره برداری شد و در گام بعد، پس از تعریف مفاصل پلاستیک و انجام تحلیل پوش آور، رفتار لرزه ای قاب مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه ابتدا به معرفی مشخصات مساله و سپس به تشریح نتایج پرداخته می شود.

## ۵-۱- مشخصات مدل عددی

مشخصات هندسی و میلگرد گذاری قاب خمشی بتن مسلح مورد مطالعه مطابق با شکل (۳) است.

در کشش  $\epsilon_{ctu} = 2 \frac{f_{ct}}{E_0}$  است. فولاد میلگردها نیز دارای مقاومت تسلیم  $f_{sy} = 430 \text{ Mpa}$ ، مدول الاستیسیته  $E_0 = 206 \text{ Gpa}$  و کرنش نهایی  $\epsilon_{su} = 6\%$  می‌باشد [40]. در مدل‌سازی فرایند انتشار کلراید نیز  $C_0 = 0$  و  $\Delta x = 0$  در نظر گرفته شدند. ضخامت پوشش بتن ۴ سانتی‌متر و عمق ناحیه نفوذ کلراید از لبه‌های نشان داده شده در شکل (۳) برابر با ۱۴ سانتی‌متر بطور یکنواخت در نظر گرفته شد.

### ۵-۲- نتایج حاصل از مدل‌سازی زوال

مدل‌سازی زوال در ستون‌های پایین‌ترین طبقه قاب بر مبنای شبیه‌سازی آماری به کمک کدنویسی در نرم افزار MATLAB انجام شد. شکل (۴) نتایج بدست آمده از این مدل‌سازی را نشان می‌دهد. میزان قطر، آسیب سطح مقطع و شکل‌پذیری میلگردها بر اساس روابط (۲ تا ۹) و مقاومت فشاری بتن ستون‌ها بر اساس روابط (۱۰ تا ۱۴) تعیین شد. از آنجایی که این پارامترها به صورت متغیرهای تصادفی بدست آمده‌اند، پس شکل (۴) مقادیر میانگین و انحراف معیار پارامترهای مذکور را در دوره زمانی ۵۰ ساله با فواصل زمانی ۱۰ ساله نشان می‌دهد. ضمناً این پارامترها در شکل (۴) به مقادیر مربوط به سال  $t=0$  نرمال شده‌اند. محاسبه انحراف معیار متغیرهای مربوطه از این لحاظ حائز اهمیت است که نشان دهنده میزان عدم قطعیت نتایج بدست آمده است. برای امکان بررسی بیشتر، مقادیر عددی آسیب‌های بدست آمده در جدول (۲) نیز نمایش داده شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، حمله کلراید در یک بازه ۵۰ ساله از عمر سازه قطر میلگردهای ستون را از ۲۲ میلی‌متر به مقداری در حدود ۱۵/۹ میلی‌متر کاهش داده است. این کاهش قطر میلگرد مقداری معادل ۲۸ درصد است. خوردگی و کاهش قطر میلگرد از سال ۱۵ ام عمر سازه با سرعت بیشتری رخ داده است.

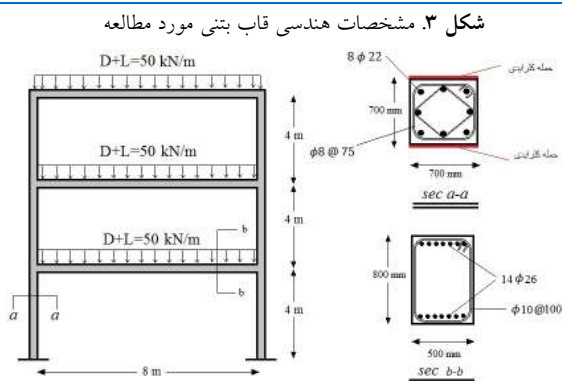


Fig. 3. Geometric properties of the reinforced concrete moment frame

خوردگی کلرایدی اغلب در مناطق ساحلی دریا رخ می‌دهد. در چنین مناطقی وجوه خارجی ساختمان و به ویژه ستون‌های طبقات پایینی احتمال تماس بیشتری با رطوبت دارند. بنابراین اگرچه سناریوهای متنوعی از خرابی و خوردگی را برای یک قاب ساختمانی بتن آرمه می‌توان در نظر گرفت، به نظر می‌رسد که ستون‌های پایین‌ترین طبقه دریک قاب بتن آرمه موجود در مناطق ساحلی دریا، بیشترین احتمال زوال ناشی از حمله کلراید را داشته باشد. به همین دلیل در مقاله حاضر سناریوی خوردگی ستون‌های پایین‌ترین طبقه قاب مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. همچنین از نظر حالت‌های مختلف خوردگی وجوه ستونها، با توجه به اینکه قاب مورد مطالعه دوبعدی بوده و خوردگی دو وجه مقابل بیشترین ضعف را در مقاومت خمشی ستون ایجاد می‌کند، این سناریو خوردگی برای ستون‌های پایین‌ترین طبقه فرض می‌شود.

در این مساله مجموع بار مرده و ۲۰ درصد از بار زنده در هر طبقه معادل  $50 \text{ kN/m}$  در نظر گرفته شد. سایر مشخصات بتن مصرفی شامل وزن مخصوص بتن  $25 \text{ kN/m}^3$ ، مقاومت فشاری  $f_c = 35 \text{ Mpa}$ ، مقاومت کششی  $f_{ct} = 0.25 f_c^{2/3}$  و مدول اولیه  $E_0 = 9500 f_c^{1/3}$  است. همچنین کرنش در بیشینه فشار  $\epsilon_{c0} = 0.22\%$  و کرنش نهایی در فشار  $\epsilon_{cu} = 0.35\%$



شکل ۴. نتایج مدل‌سازی زوال در مقطع ستون بتن آرمه در ۵۰ سال

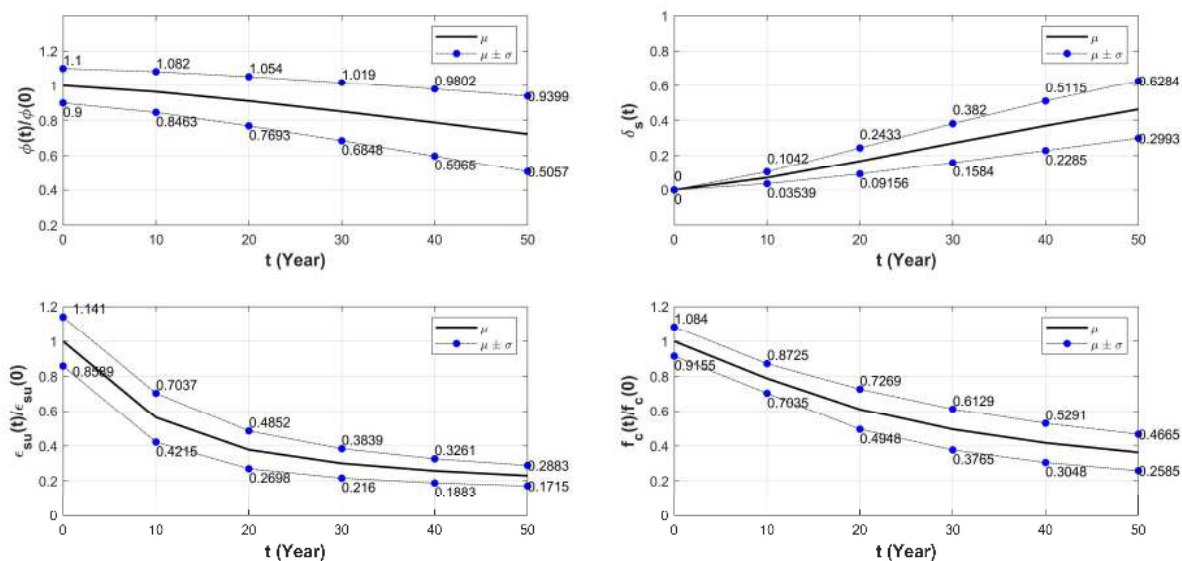


Fig. 4. Deterioration modeling results in reinforced concrete column section in 50 Years

جدول ۲. نتایج مدل‌سازی زوال در مقطع ستون بتن آرمه

Age of the frame [year]	$\phi(t)$ [mm]	$\delta_s$ [-]	$\epsilon_{su}$ [percent]	$f_c$ [MPa]
0	22	0	6	35
10	21.215	0.0697	3.3746	27.59
20	20.054	0.1673	2.2648	21.39
30	18.736	0.2703	1.7978	17.31
40	17.343	0.3702	1.5416	14.59
50	15.900	0.4641	1.3781	12.69

Table 2. Deterioration modeling results in reinforced concrete column section

اهمیت است. از نتایج حاصل از بخش مدل‌سازی زوال می‌توان در بروزرسانی نمودار تنش- کرنش مصالح بتن و فولاد و تعیین نمودار لنگر-انحناء در تحلیل غیرخطی سازه بهره جست که در بخش بعد به این موضوع پرداخته می‌شود.

### ۵-۳- نتایج تحلیل ممان-انحناء مقاطع

نتایج مربوط به تحلیل لنگر-انحنای مقطع ستون زوال یافته در بازه‌های زمانی ۱۰ ساله در شکل (۵) نشان داده شده است. نمودار مربوط به سال t ام، به کمک مقادیر میانگین پارامترهای بدست آمده از تحلیل خوردگی در سال t ام ( $\Phi(t)$ ،  $\epsilon_{su}(t)$ ،  $f_c(t)$ ) از شکل (۴) و انجام روند سعی و خطا مطابق با توضیحات ارائه شده در بخش (۳) بدست می‌آید. نمودارهای نمایش داده شده در شکل مذکور به کمک برنامه نویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB بدست آمده‌اند. لازم به توضیح است که شکل (۵) بیانگر منحنی‌های لنگر-انحناء مربوط به ستون‌های

البته از نمودار مربوط به تغییرات قطر میلگردها می‌توان دریافت که با افزایش سن سازه، مقدار قطر میلگرد با عدم قطعیت بالاتری پیش‌بینی می‌شود. در خصوص اثر حمله کلرایدی بر شکل‌پذیری فولاد نیز کرنش نهایی فولاد از ۶ درصد به مقدار ۱/۳۷ درصد کاهش یافته است. این میزان کاهش شکل‌پذیری، معادل ۷۳ درصد بوده و بیانگر اثر مخرب حمله کلرایدی بر رفتار فولاد می‌باشد. در خصوص اثر نامطلوب حمله کلرایدی بر بتن، نتایج موجود در این بخش نشان می‌دهد که مقاومت بتن مقطع ستون بشدت تحت تاثیر پدیده زوال کاهش یافته و از مقدار ۳۵ مگاپاسکال در سال نخست عمر سازه به مقدار ۱۲/۶۹ مگاپاسکال در سال ۵۰ام رسیده است. این کاهش مقاومت بتن، مقداری معادل ۶۴ درصد است.

با توجه به نتایج بدست آمده در مورد آسیب فولاد و بتن در اثر حملات شیمیایی، می‌توان دریافت که در نظر گرفتن پدیده زوال برای بررسی رفتار لرزه‌ای سازه در بستر زمان بسیار حائز



جدول ۳. نتایج تحلیل لنگر-انحناء مقطع ستون بتن آرمه طبقه همکف در بازه ۵۰ ساله

Age of the frame [year]	$\chi_y$ [1/m]	$\chi_u$ [1/m]	$\chi_u/\chi_y$
0	0.0051	0.1001	19.63
10	0.0051	0.0991	19.43
20	0.0049	0.0901	18.39
30	0.0049	0.0641	13.08
40	0.0048	0.0441	9.19
50	0.0047	0.0420	8.94

Table 3. Results of moment-Curvature Analysis of Ground Floor Reinforced Concrete Column Cross Section in 50 Years

در ادامه مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده از این تحلیل با توصیه نشریه ۳۶۰ در خصوص اصلاح نمودارهای لنگر-انحناء بدست آمده از تحلیل انجام شد. نشریه مذکور در ویرایش سال ۱۳۹۲ در بند ۲-۷-۳-۴ در خصوص محاسبه ظرفیت و تغییر شکل‌های مجاز اعضای بتنی اظهار می‌دارد: در صورتی که در خلال ارزیابی اعضا، خرابی و زوال یافتگی مشاهده شود به شکلی که برای اطلاع از چگونگی رفتار اعضا نیاز به انجام آزمایش‌های اضافی باشد لیکن آزمایش‌ها انجام نگیرد، مقدار ضریب آگاهی  $k$  تعریف شده در بند ۲-۳-۲ را باید برابر با ۰,۷۵ اختیار کرد. (توضیحات مشابهی در بند (6.2.4) آیین نامه ASCE 41-06 به عنوان مرجع اصلی این نشریه نیز ارائه شده است [41]). این ضریب در تحلیل‌های غیر خطی مطابق با بند ۳-۵-۲ نشریه مذکور، برای اصلاح نمودارهای لنگر-انحناء اعضای تغییرشکل-کنترل باید در مقدار حدی انحناء، و برای اعضای نیرو-کنترل در مقدار حدی ممان ضرب شود. نشریه ۳۶۰، معیار تشخیص تغییر شکل-کنترل و یا نیرو-کنترل بودن عضو مورد بررسی را نوع تلاش داخلی و منحنی نیرو-تغییرشکل عضو مورد مطالعه معرفی می‌کند. در قاب خمشی بتن مسلح، تیرها در خمش رفتار تغییر شکل-کنترل دارند. برای ستون‌های این نوع قاب در ترکیب خمش و بار محوری، مقدار بار محوری وارد شده مشخص کننده تغییر شکل-کنترل یا نیرو-کنترل بودن عضو است.

شکل (۶) نتایج تحلیل مقطع ستون زوال یافته را در عمر ۵۰ ساله سازه با پیشنهاد نشریه ۳۶۰ در خصوص اصلاح منحنی لنگر-انحناء مقطع برای ضریب آگاهی ۰,۷۵ در تغییر شکل نشان می‌دهد. در سال نخست ( $t=0$ ) که سازه کاملاً سالم است نمودار لنگر-انحنای پیشنهادی نشریه ۳۶۰ هماهنگی بسیار خوبی با

پایین‌ترین طبقه قاب تحت حمله کلرایدی با حضور نیروی محوری معادل ۶۰۰ کیلونیوتن در فواصل زمانی ۱۰ ساله است. از آنجایی که حمله کلرایدی به صورت کاملاً متقارن در مقطع ستون فرض شده است، کلیه نمودارها برای لنگر مثبت و لنگر منفی کاملاً مشابه بدست آمده‌اند. با گذشت زمان، مقاومت خمشی مقطع بدلیل کاهش سطح مقطع میلگردهای کششی و شکل ۵. نمودارهای لنگر-انحناء مقطع ستون بتن آرمه طبقه همکف در بازه

۵۰ ساله

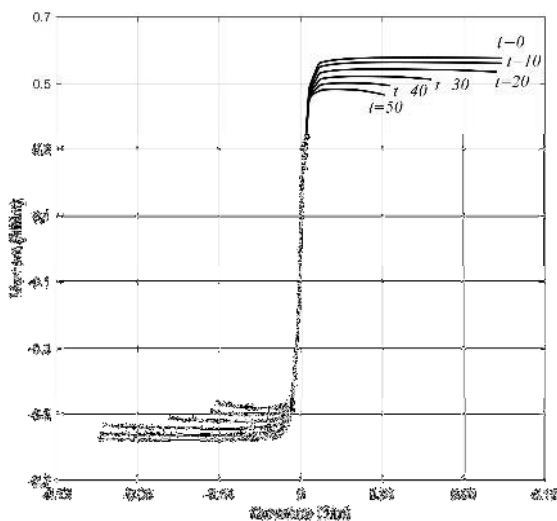


Fig. 5. Moment-Curvature Diagrams of Ground Floor Reinforced Concrete Column Cross Section in 50 Years

کاهش مقاومت فشاری بتن به صورت تدریجی کاهش یافته است. از سوی دیگر، از شکل (۵) مشاهده می‌شود که از سال ۳۰-ام به بعد کاهش چشمگیری در انحنای نهایی مقطع رخ داده است. این کاهش محسوس در انحناء به دلیل کاهش شکل‌پذیری در فولاد است. جدول (۳) مقادیر انحنای تسلیم  $\chi_y$ ، انحنای نهایی  $\chi_u$  و نسبت  $\chi_u/\chi_y$  را برای مقطع ستون زوال یافته در طول ۵۰ سال عمر سازه نشان می‌دهد. مقدار انحنای نهایی در سال ۳۰ ام کاهش ۳۶ درصدی و در سال ۵۰ ام سازه کاهش ۵۸ درصدی داشته است. نکته قابل ملاحظه در اینجا کاهش محسوس شکل‌پذیری مقطع ستون در عمر ۵۰ ساله سازه تحت پدیده زوال است که در تعریف مفاصل پلاستیک در تحلیل غیر خطی سازه از اهمیت بالایی برخوردار است. طبق جدول (۳) این مقدار از ۱۹,۶۳ در سال نخست به ۸,۹۴ در سال ۵۰ ام از عمر سازه رسیده است.

نتایج حاصل از مدل سازی دارد. تا سال ۲۰م پیشنهاد نشریه ۳۶۰ زوال یافته در نظر می گیرد. در خصوص ظرفیت خمشی مقطع مناسب می باشد اما در خصوص انحناء محافظه کارانه است. از سال ۴۰م به بعد می توان مشاهده نمود که رابطه پیشنهادی نشریه ۳۶۰ برای اطمینان نبوده و به بیان دیگر مقدار بیشتری برای شکل پذیری و ظرفیت مقطع شکل ۶. مقایسه نتایج تحلیل لنگر- انحنای مقطع ستون با نتایج حاصل از توصیه نشریه ۳۶۰ برای ضریب آگاهی ۰.۷۵ در تغییر شکل

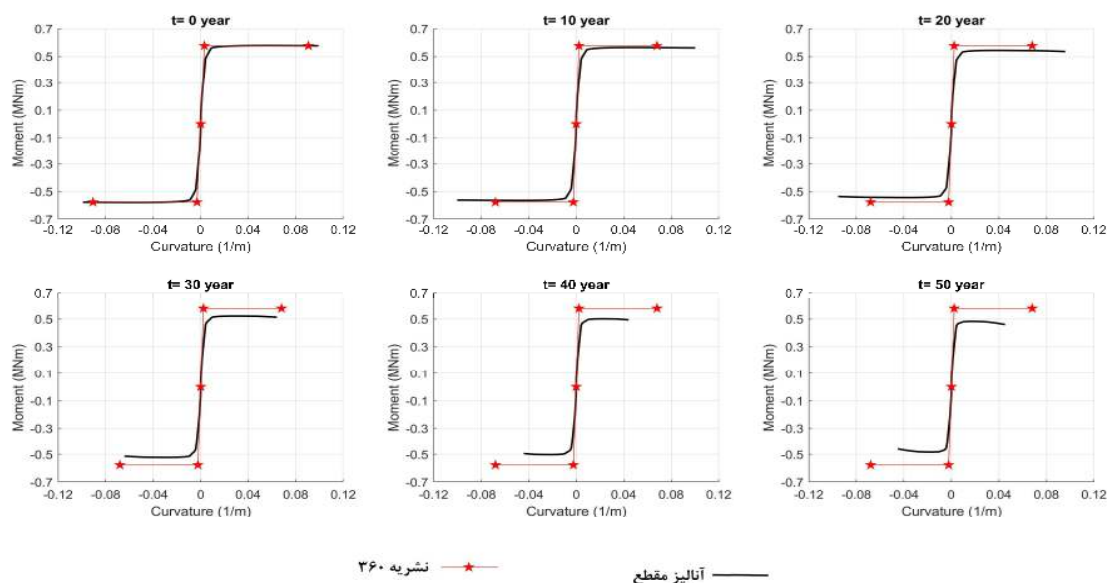


Fig. 6. Comparison of the results of moment-curvature analysis of the cross-section with those corrected by multiplication the 75% in deformation

شکل ۷. مقایسه نتایج تحلیل لنگر- انحنای مقطع ستون با نتایج حاصل از توصیه نشریه ۳۶۰ برای ضریب آگاهی ۰.۷۵ در ممان

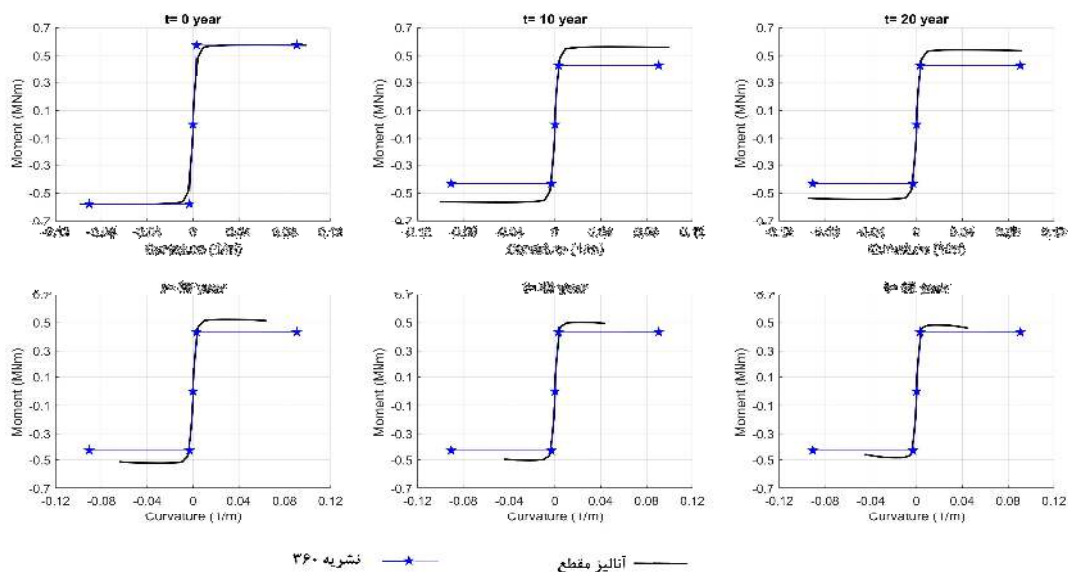


Fig. 7. Comparison of the results of moment-curvature analysis of the cross-section with those corrected by multiplication the 75% in moment.

نمودارهای ممان-انحناء مورد استفاده بطور مناسب و با توجه به رفتار واقعی عضو تصحیح شود.

#### ۴-۵- نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیر خطی

پس از محاسبه آسیب‌های بتن و فولاد و تعیین نمودارهای ممان-انحناء مقاطع زوال یافته، عملکرد لرزه‌ای قاب خمشی تحت بار جانبی متناظر با مود اول، بوسیله تحلیل استاتیکی غیر خطی (پوش آور) مورد بررسی قرار گرفت. در تعریف مفاصل پلاستیک، تیرها و ستون‌های قاب تغییرشکل-کنترل در نظر گرفته شدند. شکل (۸) نتایج بدست آمده از این تحلیل را نشان می‌دهد. در شکل (۸-الف) نمودارهای برش پایه در برابر تغییر مکان تراز بام به عنوان نقطه کنترل به ازای سال‌های مختلف عمر سازه ترسیم شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، از سال ۳۰ام به بعد شکل‌پذیری قاب به دلیل افزایش خوردگی ستون‌های پایینیترین

عضو مورد بررسی در اینجا، مطابق با توصیه نشریه ۳۶۰ تغییرشکل-کنترل است. پس همانگونه که شکل (۷) نیز موید این موضوع است، در ۳۰ سال ابتدایی عمر سازه تحت حمله کلریدی استفاده از ضریب آگاهی ۰/۷۵ در ممان نتیجه مناسبی برای ظرفیت مقطع ارائه نمی‌دهد. با این وجود از سال ۴۰ام به بعد مقدار ممان اصلاح شده طبق توصیه نشریه، مقداری نزدیک به نتایج تئوریک را نشان می‌دهد. به بیان دیگر، به دلیل پدیده زوال، شکل‌پذیری و همچنین ظرفیت محوری مقطع کاهش یافته است و به همین دلیل در دهه‌های ۴۰ و ۵۰ از عمر سازه توصیه نشریه ۳۶۰ برای اعضای نیرو-کنترل، ظرفیت خمشی مناسبتری را برای مقطع زوال یافته پیش‌بینی می‌کند. در این نمونه خاص، استفاده همزمان از ضریب آگاهی ۰/۷۵ در ممان و انحناء می‌تواند جواب‌هایی نزدیک به محاسبات تئوریک را برای دهه‌های ۴۰ و ۵۰ از عمر سازه حاصل نماید. بنابراین، بطور کلی با توجه به این بررسی می‌توان نتیجه گرفت که برای تعریف مفاصل پلاستیک در سال‌های پایانی عمر مقاطع در معرض خوردگی، باید

شکل ۸. نتایج تحلیل پوش آور قاب مورد مطالعه

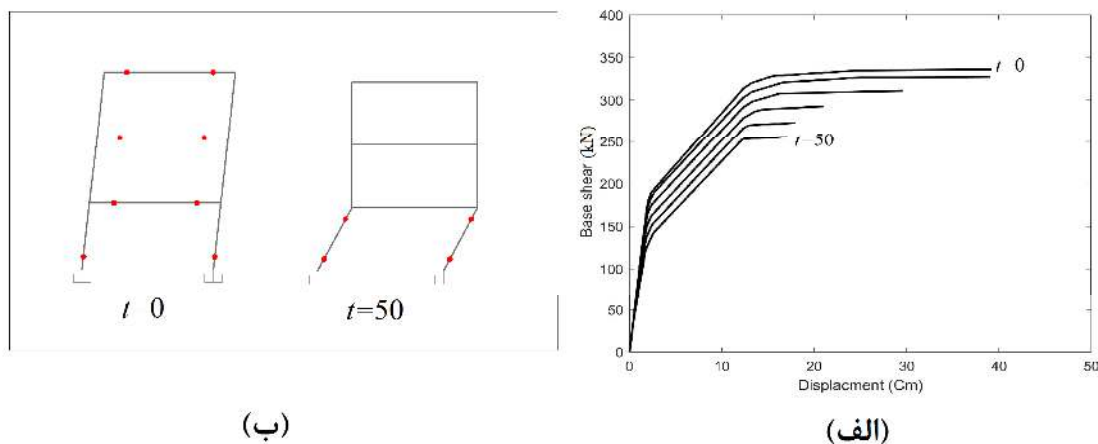


Fig. 8. The Results of push-cover analysis of the frame

نحوه بازتوزیع لنگر در اعضا شده و در نتیجه مکانیزم خرابی را بطور نامطلوبی از شکست تیرها به شکست ناگهانی در ستون‌ها تغییر می‌دهد.

در شکل (۹) نتایج مربوط به تحلیل غیر خطی استاتیکی (پوش آور) قاب مورد مطالعه از روش تئوریک با توصیه‌های نشریه ۳۶۰ در دو حالت اصلاح روابط ممان-انحناء مقطع ستون

طبقه، به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و سازوکار خرابی سازه از حالت شکست نرم به شکست ترد تغییر می‌نماید. به منظور بررسی بیشتر این موضوع، در شکل (۸-ب) سازوکار خرابی قاب در ابتدای عمر آن و در سال ۵۰ام بطور شماتیک ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که خوردگی ستون‌ها به دلیل انتشار کلراید در سال‌های پایانی عمر سازه، باعث تغییر

ها

بهره‌برداری شد و برای افزایش دقت جواب‌ها، برخی پارامترهای مساله به صورت متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شدند و نتایج با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو تعیین شد. از پاسخ‌های بدست آمده در تعیین روابط لنگر-انحناء مقاطع زوال یافته استفاده شد و در نهایت رفتار لرزه‌ای قاب به کمک تحلیل پوش‌آور در عمر مفید ۵۰ ساله مورد بررسی قرار گرفت. منحنی‌های ممان-انحناء و نمودارهای برش پایه-تغییر مکان قاب با توصیه‌های نشریه ۳۶۰ مورد مقایسه قرار گرفت. خلاصه نتایج بدست آمده در این مقاله را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

۱- خوردگی ناشی از آثار محیطی باعث تغییر در رفتار ستون های قاب خمشی بتن مسلح مورد مطالعه در بستر زمان از حالت تغییر شکل-کنترل به نیرو-کنترل شد. همچنین این موضوع باعث تغییر در نوع سازوکار خرابی قاب مورد مطالعه از حالت شکست نرم به شکست ترد شد.

۲- بررسی‌ها نشان داد که برای اصلاح نمودارهای ممان-انحناء ستونهای قاب خمشی بتن آرمه مورد مطالعه با استفاده از ضریب آگاهی نشریه ۳۶۰، توجه به رفتار واقعی عضو سازه‌ای در معرض خوردگی ضرورت دارد. با استفاده از روش بکارگرفته شده در این تحقیق می‌توان بر اساس نتایج مدل‌سازی زوال در مقطع تا حدود زیادی رفتار واقعی مقاطع بتنی تحت اثر حملات کلرایدی را در طول عمر سازه پیش‌بینی نمود.

۳- برای قاب خمشی مورد مطالعه این نتیجه بدست آمد که در نیمه اول عمر سازه استفاده از ضریب آگاهی ۰/۷۵ در انحناء برای اصلاح رفتار مقاطع ستون‌های در معرض خوردگی مناسب است. اما در نیمه دوم عمر سازه بهتر است که روابط لنگر-انحناء با ضریب آگاهی در ممان اصلاح شوند.

۴- در این مقاله اندازه قطر میلگردها، میزان شکل‌پذیری آنها و نیز مقاومت فشاری بتن به عنوان شاخص‌های آسیب ناشی از حملات کلرایدی در نظر گرفته شدند. بر اساس محاسبات آماری انجام شده این نتیجه حاصل شد که محاسبه کاهش در قطر میلگردها با گذر زمان از عدم قطعیت بالاتری نسبت به دو پارامتر دیگر برخوردار است. بنابراین انجام پژوهش‌های بیشتر در خصوص ارائه راهکار مناسب برای برآورد دقیقتر این پارامتر ضرورت دارد.

شکل ۹. مقایسه نتایج تحلیل پوش‌آور قاب مورد مطالعه با توصیه‌های نشریه ۳۶۰

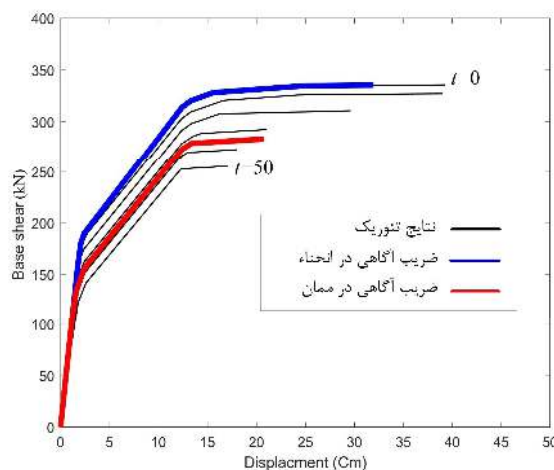


Fig. 9. Comparison of the results of push-over analysis of the frame with the recommendations of Code No. 360

با ضریب آگاهی در لنگر و ضریب آگاهی در حد انحناء مقایسه شده است. همانطور که پیش از این اشاره شد، نشریه مذکور توصیه می‌نماید که منحنی‌های لنگر-انحناء اعضای تغییر-شکل کنترل با ضریب آگاهی در حد شکل‌پذیری اصلاح شود. بر اساس شکل (۹)، ملاحظه می‌شود که از زمان ساخت قاب مورد مطالعه تا نیمه عمر (حدود ۲۵ سال) که شکل‌پذیری بالایی دارد، توصیه نشریه ۳۶۰ با نتایج تئوریک تقریباً همخوانی خوبی دارد. اما در نیمه دوم عمر سازه (از ۲۵ تا ۵۰ سال)، به دلیل کاهش شکل‌پذیری مقطع ستونها تحت پدیده زوال، نتایج تئوریک بیشتر منطبق با توصیه نشریه در خصوص اصلاح با ضریب آگاهی در ممان خواهد بود. بر اساس نتایج بدست آمده از این مقاله، پیشنهاد می‌شود که در تحلیل قاب‌های خمشی که ستونهای آنها تحت زوال ناشی از حمله آثار محیطی هستند، ابتدا یک تحلیل تئوریک انجام گردد و بر اساس قضاوت مهندسی در مورد شکل‌پذیری سازه زوال یافته در خصوص نحوه استفاده از ضریب آگاهی نشریه ۳۶۰ تصمیم‌گیری به عمل آید.

## ۶- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله رفتار لرزه‌ای یک قاب خمشی بتن مسلح در معرض خوردگی ناشی از حمله کلرایدی مورد تجزیه و تحلیل و بررسی قرار گرفت. به منظور مدل‌سازی پدیده خوردگی، از قانون فایک

- prediction of concrete structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 4(5), 399-412.
- [9] Biondini, F., Frangopol, D. (Eds.). 2008. Life-Cycle Civil Engineering: *Proceedings of the International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, IALCCE'08, held in Varenna, Lake Como, Italy on June 11-14, 2008*. CRC Press.
- [10] Estes, A. C., Frangopol, D. M. 2001. Bridge lifetime system reliability under multiple limit states. *Journal of bridge engineering*, 6(6), 523-528.
- [11] Val, D. V., Stewart, M. G., Melchers, R. E. 1998. Effect of reinforcement corrosion on reliability of highway bridges. *Engineering structures*, 20(11), 1010-1019.
- [12] Akiyama, M., Frangopol, D. M., Matsuzaki, H. 2011. Life-cycle reliability of RC bridge piers under seismic and airborne chloride hazards. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40(15), 1671-1687.
- [13] Akiyama, M., Frangopol, D. M., Suzuki, M. 2012. Integration of the effects of airborne chlorides into reliability-based durability design of reinforced concrete structures in a marine environment. *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(2), 125-134.
- [14] Akiyama, M., Matsuzaki, H., Dang, H. T., Suzuki, M. 2012. Reliability-based capacity design for reinforced concrete bridge structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(12), 1096-1107.
- [15] Alipour, A., Shafei, B., Shinozuka, M. S. 2013. Capacity loss evaluation of reinforced concrete bridges located in extreme chloride-laden environments. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(1), 8-27.
- [16] Ghosh, J., Padgett, J.E. 2009. Multi-hazards considerations of seismic and aging threats to bridges. *Proceedings of the SEI/ASCE Structures Congress 2009, Austin, TX, USA, April 30 – May 2*.
- [17] Ghosh, J., Padgett, J. E. 2010. Aging considerations in the development of time-dependent seismic fragility curves. *Journal of Structural Engineering*, 136(12), 1497-1511.
- [18] Biondini, F., Bontempi, F., Frangopol, D. M., Malerba, P. G. 2004. Cellular automata approach to durability analysis of concrete structures in aggressive environments. *Journal of Structural Engineering*, 130(11), 1724-1737.
- در انتها لازم به ذکر است که پژوهش انجام شده با محدودیت‌های مختلفی همراه می‌باشد. در نظر گرفتن مشخصه‌های دیگر تحلیل به عنوان پارامترهای تصادفی، بررسی انواع سناریوهای زوال در اعضای مختلف قاب و خوردگی و جوه مختلف آنها، مطالعه قاب‌های با تعداد طبقات و دهانه‌های متفاوت به صورت دو و سه بعدی از محدودیت‌های این مقاله بوده که در پژوهش‌های آینده می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

## ۷- تشکر و قدردانی

نویسندگان از داوران محترم که نظرات ارزنده آنها باعث بهبود مقاله شده است، کمال تشکر را دارند.

## ۸- مراجع

- [1] Mehrer, H. 2007. *Diffusion in solids: fundamentals, methods, materials, diffusion-controlled processes (Vol. 155)*. Springer Science & Business Media.
- [2] Euro-International Committee for Concrete, Comité euro-international du béton. 1992. *Durable concrete structures: design guide (Vol. 183)*. Thomas Telford.
- [3] Gang, S. H. 2012. Report Card for America's Infrastructure. *Construction Engineering and Management*, 13(6), 63-65.
- [4] 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.
- [5] Almusallam, A. A. 2001. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars. *Construction and building materials*, 15(8), 361-368.
- [6] Vidal, T., Castel, A., François, R. 2004. Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete. *Cement and concrete research*, 34(1), 165-174.
- [7] Bhargava, K., Ghosh, A. K., Mori, Y., Ramanujam, S. 2007. Corrosion-induced bond strength degradation in reinforced concrete—Analytical and empirical models. *Nuclear Engineering and Design*, 237(11), 1140-1157.
- [8] Biondini, F., Frangopol, D. M. 2008. Probabilistic limit analysis and lifetime



- [30] Titi, A., Biondini, F. 2016. On the accuracy of diffusion models for life-cycle assessment of concrete structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(9), 1202-1215.
- [31] fib (International Federation for Structural Concrete). 2006. *Model code for service life design*. Tech. rep. fib bulletin 34.
- [32] Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., Polder, R. B. 2013. *Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair*. John Wiley & Sons.
- [33] Biondini, F., Camnasio, E., Palermo, A. 2014. Lifetime seismic performance of concrete bridges exposed to corrosion. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(7), 880-900.
- [34] Biondini, F., Bontempi, F., Frangopol, D. M., Malerba, P. G. 2006. Probabilistic service life assessment and maintenance planning of concrete structures. *Journal of Structural Engineering*, 132(5), 810-825.
- [35] Coronelli, D., Gambarova, P. 2004. Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: modeling guidelines. *Journal of structural engineering*, 130(8), 1214-1224.
- [36] Stewart, M. G. 2009. Mechanical behavior of pitting corrosion of flexural and shear reinforcement and its effect on structural reliability of corroding RC beams. *Structural safety*, 31(1), 19-30.
- [37] Biondini, F. 2011. Cellular automata simulation of damage processes in concrete structures.
- [38] Biondini, F., Vergani, M. 2012. Damage modeling and nonlinear analysis of concrete bridges under corrosion. In *Sixth international conference of bridge maintenance, safety and management (IABMAS 2012)* (pp. 949-957). CRC Press/Balkema, Taylor and Francis Group.
- [39] Kwak, H. G., Kim, S. P. 2002. Nonlinear analysis of RC beams based on moment-curvature relation. *Computers & structures*, 80(7-8), 615-628.
- [40] CEN-EN 1992-1-1 (2004). *Eurocode 2: design of concrete structures-part 1-1: general rules and rules for buildings*. British Standard Institution, London.
- [41] ASCE. 2007. *Seismic rehabilitation of existing buildings*. American Society of Civil Engineers. Standard ASCE/SEI 41-06.
- [19] Biondini, F., & Frangopol, D. M. 2016. Life-cycle performance of deteriorating structural systems under uncertainty. *Journal of Structural Engineering*, 142(9), F4016001.
- [20] Shayanfar, M. A., Ghanoooni Bagha, M. 2012. A study of corrosion effects of reinforcements on the capacity of bridge piers via the nonlinear finite element method. *Sharif Journal of Civil Engineering*, (3), 59-68. (In Persian)
- [21] Shayanfar, M. A., Savoj, H. R., Ghanoooni-Bagha, M., Khodam, A. 2018. The effects of corrosion on seismic performance of reinforced concrete moment frames. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5(2), 146-159. (In Persian)
- [22] Sadrinejad, I., Ranjbar, M. M., & Madandoust, R. 2018. Influence of hybrid fibers on serviceability of RC beams under loading and steel corrosion. *Construction and Building Materials*, 184, 502-514.
- [23] Firouzi, A., Abdolhosseini, M., & Ayazian, R. 2020. Service life prediction of corrosion-affected reinforced concrete columns based on time-dependent reliability analysis. *Engineering Failure Analysis*, 117, 104944.
- [24] Karimipour, A., & Farhangi, V. 2021. Effect of EBR-and EBROG-GFRP laminate on the structural performance of corroded reinforced concrete columns subjected to a hysteresis load. *Structures*, Vol. 34, pp. 1525-1544.
- [25] Reshvanlou, B. A., Nasserassadi, K., & Ahmadi, J. 2021. Modified Time-Dependent Model for Flexural Capacity Assessment of Corroded RC Elements. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(10), 3897-3910.
- [26] Management and Planning Organization. 2007. *Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings* (Publication No. 360). Islamic Republic of Iran.
- [27] Rahgozar, N., Pouraminian, M., & Rahgozar, N. 2021. Reliability-based seismic assessment of controlled rocking steel cores. *Journal of Building Engineering*, 44, 102623.
- [28] Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Polder, R. B. 2004. *Electrochemical techniques. Corrosion of Steel in Concrete*, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 345-374.
- [29] Glicksman, M. E. 2000. *Diffusion in solids: field theory, solid-state principles, and applications*. New York, 54-56.

# Probabilistic-based investigation of reinforced concrete frame seismic behavior under chloride attack

Sahar rezaie<sup>1</sup>, Masoud Khalighi<sup>2\*</sup>, Jamil Bahrami<sup>3</sup>, Zanyar Mirzaei<sup>4</sup>

- 1- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
- 2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
- 3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
- 4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

\*m.khalighi@uok.ac.ir

## Abstract:

Chloride attack is one of the most destructive phenomena that has an adverse effect on concrete and steel materials in reinforced concrete structures. Corrosion of rebars and damage of concrete can significantly reduce the seismic capacity of these structures over time. Accordingly, it is necessary to model the deterioration of reinforced concrete sections before performing nonlinear analysis to evaluate their seismic behavior. In this regard, Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (code No. 360) recommends that in order to consider the corrosion effects of reinforced concrete sections, the moment-curvature relationships used in the definition of plastic joints are corrected by a fixed number called the knowledge factor. Due to the fact that the deterioration process of concrete structures under chemical attacks is time-dependent and also there are various uncertainties in modeling this phenomenon, it seems that considering the effects of corrosion with only one constant factor, is not enough and in this regard, more research needs to be done. In this regard, in the present paper, the seismic behavior of a reinforced concrete flexural frame with a lifetime of 50 years under chloride attack on the external aspects of the columns was studied. For this purpose, in the first step, chloride diffusion is modeled according to Fick's law and then the measure of damage in rebars and concrete was calculated using MATLAB software. In order to increase the modeling accuracy, a probabilistic framework based on Monte Carlo simulation was used to consider the uncertainties. In the next step, Moment-curvature curves of the sections were extracted using the results of deterioration modeling and were compared with those recommended by code No. 360. After that, the seismic behavior of the flexural frame was studied using static nonlinear analysis (Pushover) based on the moment-curvature results obtained from the present study and the recommendations of Code No. 360. A summary of the results obtained in this study can be expressed as follows: Corrosion due to chemical attacks can change the behavior of reinforced concrete members over time from deformation-control to force-control. For this reason, the type of failure mechanism of these structures changes from ductile to brittle. In correcting the moment-curvature diagrams of reinforced concrete flexural frame columns using the knowledge factor of Code No. 360, it is necessary to pay attention to the actual behavior of the member subject to corrosion. Using the method used in this research, it is possible to predict the actual behavior of concrete sections under the chloride attacks during the lifetime of the structure based on the modeling results of cross-sectional deterioration. For the studied moment frame, it was concluded that in the first half of the structure life, the use of a knowledge factor 0.75 to modify the curvature, is appropriate to correct the behavior of column sections subject to corrosion. But in the second half of the life of the structure, it is better to correct the moment-curvature relationship by applying the knowledge factor to the moment. In this study, the diameter of the rebars, ductility of steel, and the compressive strength of concrete were considered as indicators of damage due to chloride attacks. Based on statistical calculations, it was concluded that the determination of the reduction in diameter of rebars over time has a higher uncertainty than the other two parameters. Therefore, further research is needed to provide a suitable solution to more accurately estimate this parameter.

**Keywords:** Chloride attack, Monte Carlo, Pushover analysis, Moment-curvature relations, Code No. 360, knowledge factor.