

## Evaluation of Seismic Performance of Low-rise and Mid-rise Existing RC Moment Frames Considering Steel Reinforcement Corrosion

Ali Khodam<sup>1,\*</sup>, Reza Kameli<sup>2</sup>, Mohsenali Shayanfar<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil and Geomatics Engineering, Arak University of Technology

2- Graduate Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology

3- Associate Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology

### ABSTRACT

Corrosion of steel reinforcement in concrete structures is one of the most influencing factors in the loss of durability of reinforced concrete (RC) structures. Neglecting the effects of corrosion has unpleasant consequences and may lead to the failure of structures before their designed life time. Corrosion reduces the cross section of the steel reinforcement, changes the mechanical properties of the steel, decreases the strength of the concrete, and ultimately reduces the capacity and ductility of RC structures. In this study, the effects of corrosion on the moment-curve diagram of structural elements are studied and then compared with the approaches recommended by guidelines such as FEMA-356. To evaluate the effect of steel corrosion on the performance of structures, two RC frames (3-storey and 7-storey) are modeled and two corrosion scenarios are applied to beams and columns of the structures. Then, capacity curves of structures as well as design parameters such as ductility coefficients are obtained by nonlinear static (pushover) analysis of the structures considering the effects of corrosion on moment-curvature diagrams of structural elements. The results show that the coefficient of awareness of 0.75 according to the guidelines such as FEMA-356 can lead to overestimate the structural capacity in highly corrosive environment. It also leads to conservative and uneconomic results in a low corrosive environment. It is observed that the capacities of the 3 and 7-storey structures have been decreased between 19 to 36 percent due to corrosion. Results also show that corrosion reduces the structural capacity between 8 to 28 percent.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 23 August 2020

**Revise Date:** 06 October 2020

**Accept Date:** 19 January 2021

### Keywords:

Steel reinforcement corrosion  
Seismic performance of  
existing structures  
Capacity and ductility of  
existing structures  
Moment-curvature diagram  
Nonlinear static analysis  
(Pushover)

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.245071.2220>

\*Corresponding author: Ali Khodam  
Email address: khoddam@arakut.ac.ir

## بررسی رفتار لرزه ای سازه‌های قاب خمشی بتن آرمه ۳ و ۷ طبقه تحت اثر خوردگی آرماتور

علی خدام<sup>۱\*</sup>، رضا کاملی<sup>۲</sup>، محسنعلی شایانفر<sup>۳</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران و ژئومکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۲- کارشناسی ارشد عمران گرایش زلزله، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

### چکیده

خوردگی آرماتورها مهمترین عامل کاهش دوام سازه‌های بتنی محسوب می‌شود. اغماض از اثرات خوردگی تبعات ناخوشایندی به همراه دارد و میتواند منجر به خرابی سازه پیش از پایان عمر مفید آن شود. خوردگی باعث کاهش سطح مقطع آرماتورها، تغییر مشخصات مکانیکی فولاد، کاهش مقاومت فشاری بتن و در نهایت باعث کاهش ظرفیت و شکل پذیری سازه‌ها می‌شود. در این مطالعه ابتدا اثرات خوردگی بر منحنی لنگر-انحنای اعضای سازه‌ای (تیر و ستون) مطالعه شده و سپس با رویکرد نشریه ۳۶۰ و FEMA-356 مقایسه می‌شود. پس از آن، برای ارزیابی تأثیر خوردگی فولاد بر عملکرد سازه‌های موجود دو سازه قاب خمشی بتن آرمه ۳ و ۷ طبقه بر اساس پلاستیسیت متمرکز مدلسازی شده و دو سناریوی خوردگی به صورت ۱۰٪ و ۲۰٪ کاهش سطح مقطع آرماتور برای اعضای سازه‌ای به منحنی رفتار غیرخطی لنگر-دوران اعمال می‌شود. سپس با تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه‌ها تحت سناریوهای خوردگی مذکور، منحنی ظرفیت سازه و همچنین پارامترهای طراحی اضافه مقاومت ( $\Omega$ ) و ضریب شکل پذیری ( $\mu_p$ ) استخراج می‌شود. با مقایسه منحنی ظرفیت سازه و پارامترهای طراحی تحت سناریوهای مختلف خوردگی به تفاوت عملکرد آن‌ها در اثر خوردگی پی خواهیم برد. نتایج نشان می‌دهد که ضریب آگاهی ۰.۷۵ طبق رویکرد نشریه ۳۶۰ و FEMA-356 جهت در نظر گرفتن خرابی و زوال یافتگی اعضا برای محاسبه منحنی لنگر-انحنای خورده شده، در خوردگی با سناریو ۱۰٪ غیراقتصادی و محافظه کارانه و در خوردگی با سناریو ۲۰٪ غیرایمن است. بنابراین توصیه می‌شود، در صورتی که خوردگی عامل زوال و کاهش ظرفیت سازه باشد، حتما برنامه ریزی برای انجام آزمایشات کافی جهت تعیین رفتار واقعی عضو و سازه فراهم شود. همچنین مشاهده می‌شود که در اثر اعمال سناریوهای مختلف خوردگی، ظرفیت سازه‌های ۳ و ۷ طبقه به میزان ۱۹ الی ۳۶ درصد کاهش یافته است. همچنین کاهش شکل پذیری این سازه‌ها در اثر خوردگی بین ۸ الی ۲۸ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است نتایج به دست آمده صرفاً براساس دو نمونه ساختمان ۳ و ۷ طبقه بتنی به دست آمده که در مدلسازی و تحلیل این سازه‌ها اثرات خوردگی در رفتار تیر و ستون آنها در نظر گرفته شده است.

کلمات کلیدی: خوردگی آرماتور، ارزیابی عملکرد سازه‌های موجود، ظرفیت و شکل پذیری سازه‌های موجود، منحنی لنگر - انحنای قاب خمشی بتن آرمه، تحلیل استاتیکی غیرخطی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.245071.2220">https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.245071.2220</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.245071.2220	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	۱۳۹۹/۱۰/۳۰	۱۳۹۹/۱۰/۳۰	۱۳۹۹/۰۷/۱۵	۱۳۹۹/۰۶/۰۲
				*نویسنده مسئول:		
				علی خدام		
				khoddam@arakut.ac.ir		پست الکترونیکی:

## ۱- مقدمه

امروزه بتن مسلح یکی از پرکاربردترین مصالح در مهندسی عمران است، که به دلایل متعددی ممکن است رفتاری غیر از آنچه که از آن انتظار می‌رود را تحت شرایط متفاوت بارگذاری از خود نشان دهد. یکی از مهمترین دلایل بروز این رفتارها، ایجاد خوردگی در آرماتورهای درون بتن است. اغماض از اثرات ناشی از خوردگی تبعات ناخوشایندی به همراه دارد [۱]. خوردگی آرماتورها مهم‌ترین عامل از بین رفتن دوام سازه بتن مسلح محسوب می‌شود. در نظر نگرفتن دقیق شرایط محیطی خوردنده در طراحی، ممکن است باعث بروز خوردگی در سازه‌های بتن مسلح گردد [۲ و ۳]. مطالعات و بازبینی سازه‌هایی که در مناطق ساحلی و گرم ساخته شده‌اند نشان می‌دهد، تعداد زیادی از سازه‌ها، تحت آسیب عوامل خوردنده و حمله شدید سولفات‌ها هستند. همچنین در مناطق با زمستان‌های سخت که از نمک جهت ذوب یخ استفاده می‌شود، سازه‌های بتن آرمه در معرض نفوذ کلرید قرار داشته و دچار خوردگی می‌شوند [۴ و ۵]. خوردگی آرماتور بتن مسلح باعث کاهش مساحت و ظرفیت باربری آرماتورهای فولادی، افزایش حجم فولاد- به دلیل تشکیل ترکیبات ناشی از خوردگی- که خود باعث ایجاد ترک می‌شود، تخریب پوشش بتنی و همچنین کاهش مقاومت فشاری و مقاومت پیوستگی بین بتن و فولاد می‌گردد [۶]. شایان‌فرو قلعه‌نویی در سال ۲۰۰۷ در مطالعه‌ای به بررسی اثرات خوردگی بر رفتار اعضای بتن مسلح (RC) در شرایط خوردگی پرداخته‌اند. در مطالعه ایشان یک برنامه آزمایشی جامع شامل ۵۸ نمونه بتن مسلح استوانه‌ای تحت سطوح مختلف خوردگی مورد بررسی قرار گرفته است. شایان‌فرو و همکاران با مقایسه بین نمونه‌ها با درصد خوردگی‌های متفاوت، رابطه‌ای برای کاهش پیوستگی و لغزش آرماتورها در بتن بر حسب درصد خوردگی ارائه داده‌اند [۷]. پائولا سیمیونی، با بررسی اثرات خوردگی بر منحنی رفتاری اعضای بتن آرمه، به تحلیل سازه بتنی تحت سناریوهای مختلف خوردگی پرداخته است نتایج تحقیقات ایشان نشان می‌دهد که در طول گذشت زمان با شروع خوردگی ظرفیت و شکل‌پذیری سازه‌ها کاهش می‌یابد [۸]. یالسینر و همکاران با در نظر گرفتن اثرات خوردگی شامل کاهش سطح مقطع آرماتورها، کاهش مقاومت بتن و افزایش جابه‌جایی به دلیل لغزش آرماتورها درون بتن، یک سازه یک درجه آزادی را در زمان‌های ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سال در معرض خوردگی مورد مطالعه تحلیلی قرار دادند. برای درصدهای مختلف خوردگی فوق منحنی لنگر انحنا برای مقطع ستون مستطیلی تحت بار محوری ثابت، به دست آمد. منحنی‌ها شامل ۳ بخش ناحیه الاستیک پیش از ترک خوردگی، ناحیه بین ترک خوردگی و تسلیم و ناحیه پس از تسلیم می‌باشند. مقایسه منحنی‌های لنگر انحنا برای مقادیر مختلف خوردگی نشان می‌دهد با افزایش خوردگی، ظرفیت لنگر مقطع و جذب انرژی آن کاهش یافته و انحنای زیاده‌تر برای مقادیر کمتر لنگر، رخ می‌دهد [۹]. دیزج و همکاران [۱۰] در تحقیقی بیان می‌کنند که در طراحی لرزه‌ای و ارزیابی سازه‌های بتن آرمه در مناطق لرزه‌خیز کم‌انرژی آرماتورها طولی در ناحیه مفصل پلاستیک یک حالت حدی مهم است که نیاز است آن را در نظر گرفت. اگر سازه‌ها در برابر عوامل مهاجم محیطی قرار گیرند در طول عمر آن مصالح دچار خرابی و زوال یافتگی می‌شوند. خوردگی آرماتور از عوامل مهم خرابی سازه‌های بتن آرمه و پلها هستند. در مطالعه ایشان رفتار غیرخطی تنش-کرنش میلگردهای خورده شده با استفاده از آزمایشات تجربی استخراج شده است. تأثیر درصد خوردگی‌های مختلف بر روی رفتار کششی و فشاری میلگردهای مختلف ارائه شده است. نتایج آن نشان می‌دهد که سطح خوردگی حدود ۱۵٪ کاهش جرم تأثیر قابل توجهی روی شکل‌پذیری و تغییر شکل‌های پلاستیک میلگردها در کشش دارد و خوردگی مکانیزم خرابی کم‌انرژی میلگردها در فشار را تغییر می‌دهد. نتایج آزمایش‌های کم‌انرژی نشان می‌دهد که ۱۰٪ کاهش جرم باعث کاهش ۲۰٪ ظرفیت کم‌انرژی میلگردهای خورده شده می‌شود. کاشانی و همکاران [۱۱] نیز در زمینه تأثیر خوردگی بر رفتار کم‌انرژی آرماتورها تحقیقات متعددی انجام داده‌اند ایشان طی مطالعه‌ای یک مدل جدید برای میلگرد خورده شده و خورده نشده ارائه داده‌اند. این مدل کم‌انرژی آرماتورها و زوال در مقاومت فشاری بعد از کم‌انرژی را شبیه‌سازی می‌کند. پارامترهای این مدل برای حالت میلگردهای خورده شده با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی کالیبره شده است. با مطالعه پیشینه تحقیق در مورد خوردگی می‌توان پی برد که عمدتاً مطالعات در راستای تأثیرات منفی خوردگی بر مصالح بتن و فولاد بوده و تأثیرات سازه‌ای خوردگی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین در این مطالعه سعی شده است تا اثرات سازه‌ای خوردگی فولاد بیشتر مورد توجه قرار گیرد. بررسی و مقایسه خوردگی در سطح سازه‌های برای دو سازه کوتاه و متوسط و همچنین محاسبه ظرفیت اعضای سازه‌ای با دو روش مختلف و مقایسه آن‌ها از مباحث جدید در این تحقیق می‌باشد. طبق رویکرد نشریه ۳۶۰ [۱۲]، در ارزیابی اعضای سازه‌ای که در آن‌ها خرابی و زوال یافتگی مشاهده می‌شود و برای اطلاع از چگونگی رفتار این اعضا هیچگونه آزمایشی صورت نگرفته

باشد برای محاسبه ظرفیت و تغییر شکل‌ها می‌بایست ضریب آگاهی برابر ۰,۷۵ در منحنی نیرو - تغییر شکل اعمال شود. همچنین FEMA-356 [۱۳] برای بهسازی سازه‌های در معرض خوردگی پیشنهاد می‌کند که دیاگرام لنگر-دوران مقاطع خسارت ندیده با اعمال ضریب آگاهی ۰,۷۵ در نظر گرفته شود. اعمال یک ضریب آگاهی ثابت جهت در نظر گرفتن خرابی و زوال یافتگی اعضا ممکن است محافظه‌کارانه یا غیرایمن باشد [۱۴]. در این تحقیق ابتدا منحنی لنگر-دوران اعضای سازه‌ای به صورت دقیق محاسبه شده و اثرات منفی خوردگی مانند کاهش سطح مقطع آرماتورها، تغییر مشخصات مکانیکی فولاد و کاهش مقاومت فشاری بتن در منحنی لنگر-دوران اعضای سازه‌ای دیده می‌شود و با رویکرد نشریات فوق مقایسه می‌شود. سپس، دو سناریوی خوردگی به منحنی لنگر-دوران اعضای سازه‌ای قاب خمشی دو ساختمان ۳ و ۷ طبقه اعمال شده و این قاب‌ها تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار می‌گیرند و منحنی ظرفیت سازه تحت سناریوهای مختلف خوردگی استخراج می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که نشریه ۳۶۰ و FEMA-356 بدون توجه به میزان خرابی اعضا یک ضریب آگاهی مشخص برای محاسبه ظرفیت اعضا در نظر می‌گیرند که این می‌تواند منجر به خطا در ارزیابی سازه‌ها شود. همچنین مطالعه موردی دو سازه تحت حالات مختلف خوردگی نشان می‌دهد که ظرفیت و شکل‌پذیری این سازه‌ها در اثر خوردگی کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند.

## ۲- اثرات منفی خوردگی بر اعضای سازه‌ای بتن آرمه

### ۲-۱- تغییر مشخصات مکانیکی فولاد

شکل‌پذیری و تغییر شکل نهایی فولاد، با افزایش خوردگی کاهش می‌یابد و رفتار آن ترد می‌شود [۸]. شایانفر و قلعه‌نویی نیز در رابطه‌ای نشان دادند که کرنش تسلیم آرماتورهای فولادی به درجه خوردگی آن‌ها بستگی دارد، همچنین به قطر آرماتور و ضخامت پوشش بتنی وابسته است [۱۵ و ۱۷]. لی و چو<sup>۱</sup> با آزمایش چندین نمونه آزمایشگاهی مختلف یک مدل برای تعریف رابطه‌ی بین درصد خوردگی آرماتورها و مشخصات مکانیکی فولاد ارائه داده‌اند [۱۶]. رابطه‌ی لی و چو برای محاسبه‌ی درصد کاهش مقاومت تسلیم و مدول الاستیسیته‌ی فولاد بر اساس درصد خوردگی آرماتورها در هر دو نوع خوردگی یکنواخت و سوراخ‌شدگی به ترتیب در رابطه‌ی ۱ و ۲ آمده است.

$$\sigma_{cy} = \left(1 - 1.24 \frac{\Delta_w}{100}\right) \sigma_{sy}, \quad E_{cs} = \left(1 - 0.75 \frac{\Delta_w}{100}\right) E_{ss} \quad [16] \quad (1)$$

$$\sigma_{cy} = \left(1 - 1.98 \frac{\Delta_w}{100}\right) \sigma_{sy}, \quad E_{cs} = \left(1 - 1.15 \frac{\Delta_w}{100}\right) E_{ss} \quad [16] \quad (2)$$

در این رابطه  $\sigma_{cy}$  و  $E_{cs}$  به ترتیب تنش تسلیم و مدول الاستیسیته‌ی آرماتورهای خوردگی‌دیده،  $\sigma_{sy}$  و  $E_{ss}$  به ترتیب تنش تسلیم و مدول الاستیسیته‌ی آرماتورهای بدون خوردگی می‌باشند و  $\Delta_w$  درصد خوردگی آرماتورها است.

### ۲-۲- کاهش سطح مقطع آرماتورها

برحسب نوع خوردگی ایجاد شده در سازه‌های بتن آرمه، روابط مختلفی برای قطر باقیمانده آرماتور پس از خوردگی ارائه شده است. رودریگوئز<sup>۲</sup> و همکاران [۱۷] رابطه ۳ را برای محاسبه قطر باقی‌مانده آرماتور ارائه داده‌اند:

$$\phi_t = \phi_o - \alpha P_x \quad [17] \quad (3)$$

در این رابطه  $\phi_t$  و  $\phi_o$  به ترتیب قطر میلگرد در زمان  $t$  و زمان اولیه است و همچنین ضریب  $\alpha$  مربوط به نوع حمله و خوردگی است که مقدار آن می‌تواند بین ۲ (برای خوردگی یکنواخت) تا ۱۰ (برای خوردگی حفره‌ای) باشد و  $P_x$  عمق میانگین نفوذ خوردگی است. شایانفر و قلعه‌نویی [۱۵ و ۱۷] با انجام آزمایش کشش مستقیم برای نمونه‌های مختلف آزمایشگاهی به همراه خوردگی و با استفاده از روش کمترین مربعات برای هماهنگ سازی با نتایج تجربی، رابطه ۴ را برای محاسبه‌ی مساحت آرماتور خورده شده ارائه داده‌اند:

1 Lee and Cho  
2 Rodriguez

$$\frac{A_s}{A_{s0}} = 1.2 - 0.08 \frac{c}{d} - 0.35 \frac{C_w}{C_u} \quad [15] \quad (4)$$

در رابطه فوق  $A_s$  و  $A_{s0}$  به ترتیب مساحت فولاد در حالت خوردگی و بدون خوردگی،  $c$  پوشش بتن،  $d$  قطر میلگرد،  $C_w$  و  $C_u$  به ترتیب درصد خوردگی و تراز نهایی خوردگی ( $C_u = 9 \frac{c}{d}$ ) می‌باشند.

### ۳-۲- کاهش مقاومت فشاری بتن

عمدتاً کاهش مقاومت فشاری به دلیل کاهش محصور شدگی بتن می‌باشد که در پی خوردگی خاموت‌های برشی بوجود می‌آید. قانونی‌بقا و همکاران [۱۸] در تحقیق خود متوجه شدند که یک رابطه‌ی مستقیم بین کاهش مقاومت فشاری و درجه خوردگی وجود دارد. ایشان رابطه‌ی زیر را برای در نظر گرفتن اثر خوردگی بر مقاومت فشاری بتن ارائه داده‌اند:

$$\lambda = 2.288 C_w - 1.733 \quad [18] \quad (5)$$

در این رابطه  $C_w$  درصد خوردگی آرماتور و  $\lambda$  درصد کاهش مقاومت فشاری بتن می‌باشد.

### ۳- منحنی لنگر - دوران

#### ۳-۱ مقدمه‌ای بر منحنی لنگر - دوران

برای معرفی زوال یافتگی و نواقص اعضای سازه‌ای و سپس ارزیابی عملکرد سازه‌ها می‌بایست از یک مدل غیرخطی استفاده شود که رفتار سازه را تا فروپاشی شبیه‌سازی کند. رفتار غیرخطی اعضای سازه‌ای تیر و ستون که المان‌های اصلی سازه هستند، سبب رفتار غیرخطی سازه می‌شود. نیروهای داخلی المان‌های تیر و ستون معمولاً در مقاطع انتهایی و وسط عضو متمرکز هستند [۱۹]. با توجه به این ویژگی، مدلسازی براساس مدل پلاستیسیتی متمرکز با تعریف مفاصلی با طول صفر به کمک منحنی غیرخطی لنگر - دوران در تحلیل غیرخطی و مقاوم‌سازی سازه‌ها رایج است. استفاده از منحنی رفتار غیرخطی لنگر - انحنا برای بررسی تأثیر خوردگی در رفتار اعضای سازه‌های بتنی به حدود ۲۵ سال قبل برمی‌گردد، که تینگ و نوک<sup>۳</sup> برای تیرهای بتن مسلح استفاده نمودند [۲۰].

#### ۳-۲ مدلسازی و تحلیل غیرخطی با استفاده از منحنی لنگر - دوران

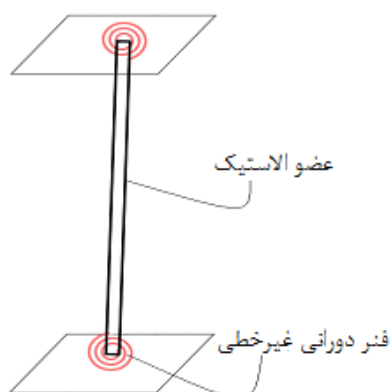
در این مطالعه مدلسازی المان‌های سازه‌ای بر اساس پلاستیسیتی متمرکز با تعریف مفاصلی با طول صفر به کمک پارامترهای لنگر - دوران انجام می‌شود. شکل ۱ نحوه مدلسازی المان‌های سازه‌ای را نشان می‌دهد، همچنین منحنی لنگر - دوران سه خطی و پارامترهای آن در شکل ۲ نمایش داده شده است. پارامترهای منحنی لنگر - دوران سه خطی عبارتند از: سختی موثر، مقاومت خمشی، ظرفیت چرخش پلاستیک، ظرفیت چرخش بعد از تسلیم، سخت شدگی بعد از نقطه‌ی تسلیم و ظرفیت اتلاف انرژی چرخه‌ای، که این پارامترها براساس روابط هسلتون<sup>۴</sup> [۲۱] طبق روابط ۶ تا ۱۷ محاسبه می‌شود و به عنوان ورودی برای مدل ایبارا<sup>۵</sup> [۲۲] در نرم افزار اپنسیس<sup>۶</sup> [۲۳] استفاده می‌شوند. اثرات منفی خوردگی نیز نظیر کاهش مساحت آرماتورها، تغییر مشخصات مکانیکی فولاد و کاهش مقاومت فشاری بتن که در بخش ۲ به آن پرداخته شد، در منحنی لنگر - دوران اعضای سازه‌ای اعمال می‌گردد.

3 Ting and Nowak

4 Haselton

5 Ibarra

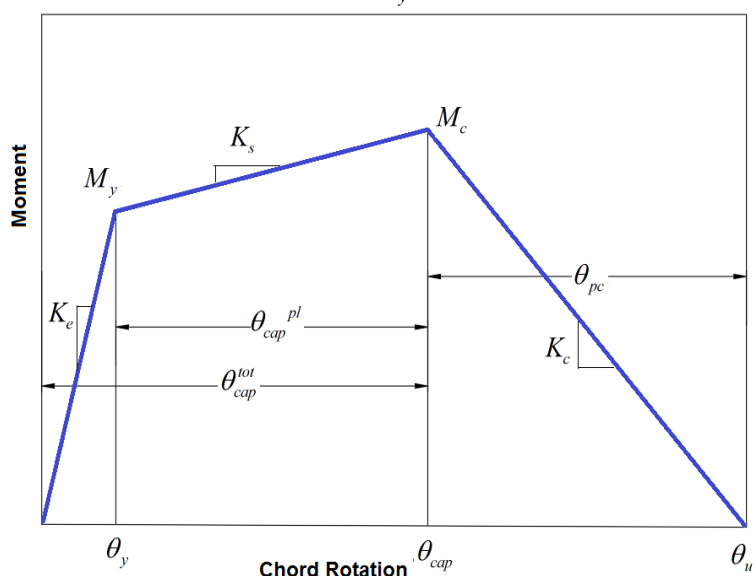
6 OpenSees



شکل ۱: مدل پلاستیسیتیه متمرکز برای مدل‌سازی غیرخطی سازه‌ها شامل یک بخش الاستیک و دو فنر دورانی غیرالاستیک در انتهای عضو [۲۴]

### ۳-۳ پارامترهای منحنی لنگر - دوران براساس روابط هسلتون

منحنی لنگر-دوران به پارامترهای  $\lambda$ ,  $\theta_{pc}$ ,  $\theta_{cap,pl}$ ,  $K_s$ ,  $\frac{M_c}{M_y}$ ,  $\theta_y$ ,  $M_y$  برای کنترل رفتار چرخه‌ای و یکنواخت نیاز دارد.



شکل ۲: مدل رفتار غیرخطی لنگر - دوران توسعه یافته توسط ایبارا و همکاران [۲۲]

هسلتون در سال ۲۰۰۷ بر پایه آزمایشات چرخه‌ای و یکنواخت انجام شده روی ۳۰۶ ستون مستطیلی و ۱۷۷ ستون دایره‌ای که توسط بری و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۰۴ انجام شده است، روابطی را برای محاسبه پارامترهای ذکر شده پیشنهاد داده است. برای هر یک از آزمایش‌ها تاریخچه نیرو، تغییر مکان، هندسه ستون، میزان آرماتور، مودهای شکست و سایر اطلاعات مربوطه گزارش شده است. از میان این اطلاعات، برای بدست آوردن روابط کالیبره شده از اطلاعات مربوط به ۲۲۰ ستون مستطیلی دارای مود شکست خمشی و ۳۵ ستون دارای مود شکست خمشی - برشی استفاده شده است. در ادامه روابط کالیبره شده توسط هسلتون برای پیش‌بینی شش پارامتر مؤثر در مدل ایبارا بیان شده است.

## ۳-۳-۱ سختی مؤثر

رابطه‌ی ساده شده‌ی هسلتون برای سختی مؤثر سکانتی تا نقطه تسلیم به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{EI_y}{EI_g} = -0.065 + 1.05 \left[ \frac{P}{A_g f_c} \right] \quad 0.2 \leq \frac{EI_y}{EI_g} \leq 0.6 \quad [21] \quad (6)$$

در این رابطه  $E$  مدول الاستیسیته بتن،  $I_y$  و  $I_g$  به ترتیب ممان اینرسی مؤثر و کل مقطع،  $P$  نیروی محوری،  $A_g$  مساحت مقطع و  $f_c$  مقاومت فشاری بتن است. این رابطه مقادیر میانگین را با انحراف معیار استاندارد لگاریتمی  $\sigma_{Ln} = 0.36$  ارائه می‌دهد.

۳-۳-۲ مقاومت خمشی ( $M_y$ )

مقاومت خمشی تیر و ستون بتن آرمه طبق مطالعه و رابطه‌ی پیش‌بینی شده پاناجوتکس<sup>۸</sup> و فردیس<sup>۹</sup> [۲۶] عملکرد قابل قبولی دارد. بنابراین از این رابطه برای محاسبه  $M_y$  استفاده می‌شود.

رابطه پیشنهاد شده پاناجوتکس و فردیس برای انحنای تسلیم که براساس ۱۰۰۰ آزمایش روی نمونه‌های مختلف برای محاسبه تغییرشکل‌های اعضای بتن آرمه در تسلیم و شکست ارائه شده است، در رابطه‌ی ۷ و ۸ آمده است. اگر تسلیم مقطع به علت تسلیم در آرماتورهای کششی باشد، انحنای تسلیم از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\phi_y = \frac{f_y}{E_s (1 - k_y) d} \quad [26] \quad (7)$$

در رابطه فوق  $\phi_y$  انحنای تسلیم،  $f_y$  تنش تسلیم آرماتور،  $E_s$  مدول الاستیسیته فولاد،  $d$  عمق مؤثر مقطع و  $k_y$  عمق ناحیه فشاری می‌باشد. اگر تسلیم مقطع به علت غیرخطی شدن زیاد بتن در فشار باشد بطوریکه کرنش دورترین تار فشاری بتن به حد  $\epsilon_c = 1.8 \frac{f_c}{E_c}$  رسیده باشد، انحنای تسلیم از رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود:

$$\phi_y = \frac{\epsilon_c}{k_y d} = \frac{1.8 f_c'}{E_c k_y d} \quad [26] \quad (8)$$

در رابطه فوق عمق ناحیه فشاری  $k_y$  برابر است با:

$$k_y = (n^2 A^2 + 2nB)^{1/2} - nA \quad [26] \quad (9)$$

که در اینجا  $n = \frac{E_s}{E_c}$  است و  $A$  و  $B$  از روابط زیر بدست می‌آیند که به ترتیب برای کنترل تسلیم مقطع بوسیله فولاد کششی و ناحیه فشاری بتن ارائه شده است:

$$A = \rho + \rho' + \rho_v + \frac{N}{b d f_y} \quad , \quad B = \rho + \rho' \delta' + 0.5 \rho_v (1 + \delta') + \frac{N}{b d f_y} \quad [26] \quad (10)$$

$$A = \rho + \rho' + \rho_v - \frac{N}{\epsilon_c E_s b d} = \rho + \rho' + \rho_v - \frac{N}{1.8 n b d f_c} \quad , \quad B = \rho + \rho' \delta' + 0.5 \rho_v (1 + \delta') \quad [26] \quad (11)$$

در روابط فوق  $\rho$ ،  $\rho'$  و  $\rho_v$  به ترتیب درصد آرماتور کششی، فشاری و آرماتورهای جان، که  $\delta' = \frac{d'}{d}$  که  $d'$  فاصله مرکز آرماتورهای فشاری تا دورترین تار فشاری مقطع،  $b$  عرض ناحیه فشاری، و  $N$  نیروی محوری فشاری (با علامت مثبت) می‌باشند. کمترین مقدار  $\phi_y$  بدست آمده از رابطه‌ی ۷ و ۸ به عنوان انحنای تسلیم در نظر گرفته می‌شود و سپس لنگر تسلیم مقطع از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{M_y}{bd^3} = \phi_y \left\{ E_c \frac{k_y^2}{2} (0.5(1 + \delta') - \frac{k_y}{3}) + \frac{E_s}{2} [(1 - k_y)\rho + (k_y - \delta')\rho' + \frac{\rho_v}{6}(1 - \delta')] (1 - \delta') \right\} \quad [26] \quad (12)$$

### ۳-۳-۳ ظرفیت چرخش پلاستیک ( $\theta_{cap,pl}$ )

مطالعات انجام شده بخصوص مطالعات پاناجوتکس و فردیس [۲۶] پارامترهای تأثیرگذار در محاسبه این کمیت را مشخص کرده است که عبارتند از: نسبت نیروی محوری  $v$ ، نسبت محصورشدگی جانبی  $\rho_{sh}$ ، مقاومت بتن  $f_c$  و کمانش آرماتورها  $s_n$ . همچنین مطالعات پاناجوتکس و فردیس نشان می‌دهد که بطور تقریبی یک سوم تغییر شکل نهایی در اثر لغزش آرماتورهای طولی است و برای در نظر گرفتن این اثر شاخص  $a_{sl}$  را معرفی کرد. اگر این شاخص برابر یک در نظر گرفته شود بیانگر احتمال بروز لغزش و اگر صفر در نظر گرفته شود بیانگر عدم احتمال بروز لغزش آرماتورهای طولی است.

رابطه‌ی زیر برای پیش‌بینی ظرفیت چرخش پلاستیک براساس متغیرهایی که تأثیر قابل توجهی دارند پیشنهاد شده است [۲۱]:

$$\theta_{cap,pl} = 0.12(1 + 0.55a_{sl})(0.16)^v(0.02 + 40\rho_{sh})^{0.43}(0.54)^{0.01c_{unit}f_c}(0.66)^{0.1s_n}(2.27)^{10\rho} \quad [21] \quad (13)$$

این رابطه مقدار میانگین را با انحراف معیار استاندارد لگاریتمی  $\sigma_{Ln} = 0.54$  پیش‌بینی می‌کند.

نمونه‌های آزمایش شده برای کالیبره کردن این روابط مربوط به ستون‌هایی با آرماتورهای متقارن می‌باشند. پاناجوتکس و فردیس [۲۶] برای از بین بردن این محدودیت پارامتر زیر را برای اعمال اثر غیرمتقارن بودن آرماتورها ارائه نموده‌اند که برای حذف محدودیت آرماتورهای متقارن در روابط بالا ضرب می‌شود.

$$FardisTerm = \left( \frac{\max(0.01, \frac{\rho' f_y}{f_c})}{\max(0.01, \frac{\rho f_y}{f_c})} \right)^{0.225} \quad [26] \quad (14)$$

### ۳-۳-۴ ظرفیت چرخش بعد از نقطه حداکثر ظرفیت خمشی ( $\theta_{pc}$ )

نسبت نیروی محوری  $v$  و درصد آرماتور جانبی  $\rho_{sh}$  پارامترهای مؤثر در محاسبه ظرفیت چرخش بعد از نقطه حداکثر ظرفیت خمشی  $\theta_{pc}$  هستند. رابطه زیر برای پیش‌بینی  $\theta_{pc}$  با عدم قطعیت  $\sigma_{Ln} = 0.72$  ارائه شده است:

$$\theta_{pc} = 0.76(0.031)^v(0.02 + 40\rho_{sh})^{1.02} \leq 0.1 \quad [21] \quad (15)$$

### ۳-۳-۵ سخت شدگی بعد از تسلیم ( $\frac{M_c}{M_y}$ )

نیروی محوری و مقاومت فشاری بتن کلیدی‌ترین پارامترهای مؤثر در پیش‌بینی سخت شدگی بعد از تسلیم می‌باشند. سخت شدگی بعد از نقطه تسلیم به صورت نسبت حداکثر مقاومت خمشی به مقاومت تسلیم  $\frac{M_c}{M_y}$  بیان می‌شود که از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:



$$M_c/M_y = (1.25)(0.89)^v(0.91)^{0.01c_{unit}f'_c} \quad [21] \quad (16)$$

که در رابطه فوق  $c_{unit}$  برابر با ضریب تبدیل واحد است و در صورتیکه  $f'_c$  بر حسب مگاپاسکال باشد مقدار آن برابر ۱ است. عدم قطعیت پیش‌بینی در این رابطه ۰,۴ می‌باشد.

### ۳-۳-۶ ظرفیت اتلاف انرژی چرخه‌ای ( $\lambda$ )

تعیین ظرفیت اتلاف انرژی چرخه‌ای از موضوعات مهم تحقیقات گذشته بوده است. ظرفیت اتلاف انرژی چرخه‌ای می‌تواند به عنوان شاخصی برای زوال و کاهش مقاومت و سختی مدل مفصل در طول تحلیل غیرخطی بکار گرفته شود. با مشاهدات نتایج تجربی، رابطه زیر برای پیش‌بینی  $\lambda$  ارائه شده است که تأثیرگذارترین پارامتر آن نسبت فاصله خاموت‌ها به عمق مؤثر ستون ( $s/d$ ) می‌باشد.

$$\lambda = (170.7)(0.27)^v(0.1)^{s/d} \quad [21] \quad (17)$$

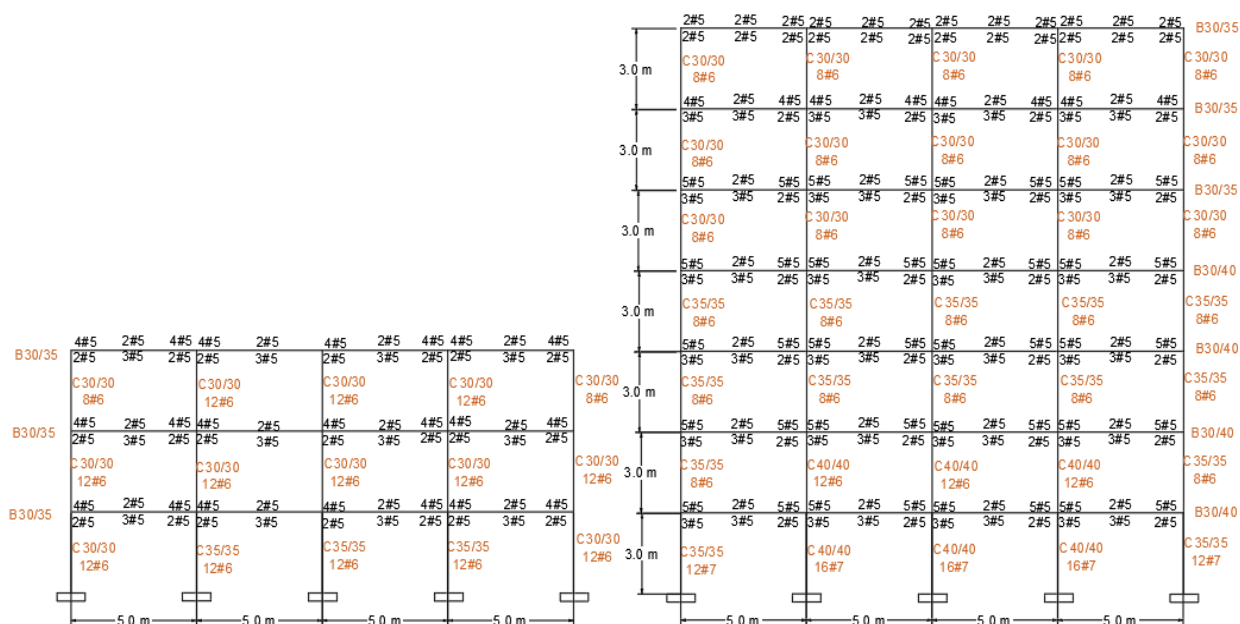
عدم قطعیت رابطه فوق برای پیش‌بینی پارامتر ظرفیت اتلاف انرژی چرخه‌ای  $\sigma_{Ln} = 0.51$  می‌باشد.

## ۴- مطالعه موردی

در این مقاله جهت بررسی اثرات خوردگی بر انواع سازه‌های کوتاه و متوسط دو سازه بتنی ۳ و ۷ طبقه که براساس ASCE7-05 [27] طراحی شده‌اند، مورد مطالعه قرار گرفته است. در مدلسازی و تحلیل لرزه ای سازه‌ها، اثر خوردگی بر رفتار المانهای سازه (نظیر تیرها و ستونها) دیده شده است و کاهش ظرفیت این المانها در در رفتار کلی و ظرفیت سازه نیز در نظر گرفته شده است. بدین منظور در بخش ۲ مقاله اثرات موضعی خوردگی بر پارامترهایی نظیر مشخصات مکانیکی فولاد، کاهش سطح مقطع آرماتورها و نیز کاهش مقاومت فشاری بتن در محاسبه شده است. با استفاده از این پارامترهای به روز شده (تحت اثر خوردگی) در بخش سوم مقاله، رفتار المانهای خورده شده و منحنی لنگر انحنای آنها (تیرها و ستونها) با استفاده از روابط هسلتون محاسبه شده است. در نهایت رفتار المانهای خورده شده و منحنی لنگر انحنای آنها در مدلسازی سازه‌های مورد مطالعه وارد شده و اثر آنها بر روی ظرفیت سازه از طریق روش استاتیکی معادل در نظر گرفته شده است. قاب‌ها به عنوان قاب خمشی متوسط در نظر گرفته شده‌اند ( $R=5$ ). بارهای ثقلی مرده و زنده مطابق ACI318-14 [28] در نظر گرفته شده‌اند. بارهای مرده شامل وزن خود تیرها، ستون‌ها، دال‌ها و دیوارها می‌باشد. ضخامت دال، دیوارهای داخلی و دیوارهای خارجی به ترتیب ۱۵۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر است. مطابق ACI318-14 بار زنده طبقات و بام به ترتیب برابر ۲,۴ و ۰,۹۶ کیلونیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شده است. بتن با وزن مخصوص ۲۲,۵۶ کیلونیوتن بر مترمکعب و مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال و میلگرد با تنش تسلیم ۴۱۴ مگاپاسکال با مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال در این سازه‌ها بکار رفته است. مشخصات کلی سازه‌ها در جدول ۱ آمده است قابل ذکر است که برش پایه طراحی سازه‌ها با توجه به مشخصات آنها و طبق آیین نامه ASCE7-05 محاسبه شده است. گرافیک قاب‌های سازه‌ای مورد مطالعه در شکل ۳ آمده است که این قاب‌ها از مطالعه حسین‌پور و همکاران [29] برگرفته شده است. مدلسازی سازه‌ها در نرم افزار اپنسیس انجام شده است و برای مدلسازی اعضای سازه‌ای از دو المان `elasticBeamColumn` و `zeroLength` در این نرم افزار استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات کلی سازه‌ها

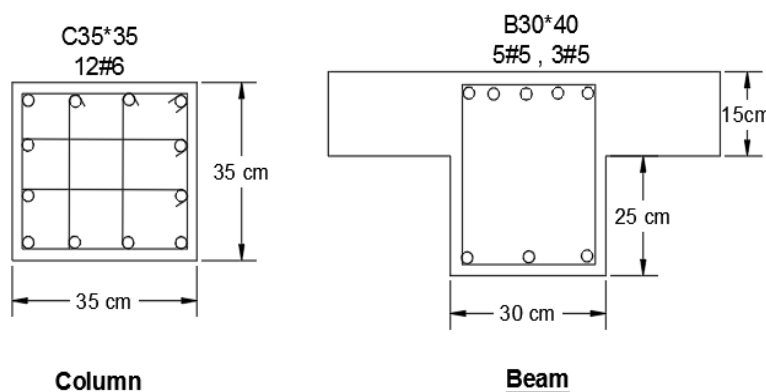
model	T(sec)	W(ton)	$V_{design}$ (KN)	R	$\Omega$
۳ طبقه	۰,۴۹	۸۹,۹۹	۸۸,۲	۵	۳
۷ طبقه	۰,۹۹	۲۳۴	۱۲۷,۶	۵	۳



شکل ۳: سازه ۳ و ۷ طبقه طراحی شده براساس ASCE7-05 [۲۹]

در این مطالعه سه سناریوی خوردگی (دو سناریو با خوردگی یکنواخت آرماتور و یک سناریو بدون خوردگی) به صورت ۰٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ کاهش مساحت آرماتورها در نظر گرفته شده است و آثار منفی دیگر مانند تغییر مشخصات مکانیکی فولاد و کاهش مقاومت فشاری بتن تحت اثر خوردگی طبق روابط ارائه شده در بخش ۲ محاسبه شده است. لازم به ذکر است که خوردگی علاوه بر آرماتورهای طولی در خاموت‌ها نیز در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه روابط ارائه شده توسط هسلتون برای ظرفیت چرخش پلاستیک و ظرفیت چرخش بعد از نقطه حداکثر ظرفیت خمشی دارای پارامتر درصد آرماتور جانبی می‌باشد در سناریوهای خوردگی با کاهش درصد آرماتور جانبی اثر خوردگی خاموت‌ها لحاظ می‌شود علاوه بر آن حذف اثر محصور شدگی در اثر خوردگی خاموت‌ها با کاهش مقاومت فشاری لحاظ می‌شود و از آنجا که پارامتر مقاومت فشاری بتن در روابط کالیبره شده هسلتون برای محاسبه منحنی لنگر-دوران وجود دارد لذا این اثر نیز خودبه‌خود اعمال می‌گردد.

برای مشاهده آثار خوردگی بر منحنی لنگر-دوران اعضای سازه‌ای یک مقطع تیر و یک مقطع ستون که از المان‌های سازه‌ی ۳ و ۷ طبقه هستند، مورد مطالعه قرار گرفته است. مقطع تیر و ستون مورد مطالعه در شکل ۴ دیده می‌شود پارامترهای منحنی لنگر-دوران این مقاطع با اعمال آثار خوردگی به مقطع و با استفاده از روابط هسلتون محاسبه شده است.



شکل ۴: مقطع تیر و ستون مورد مطالعه

جدول ۲: مشخصات مقطع تیر مورد مطالعه

$b(mm)$	$h(mm)$	$d(mm)$	$f_c(MPa)$	$f_y(MPa)$	$A_s(mm^2)$	$A'_s(mm^2)$	$c/d$	Stirrups
۳۰۰	۴۰۰	۳۴۲	۳۰	۴۱۴	۱۰۰۰	۶۰۰	۱.۸۲	$\Phi 10 @ 70mm$

جدول ۳: مشخصات مقطع ستون مورد مطالعه

$b(mm)$	$h(mm)$	$d(mm)$	$f_c(MPa)$	$f_y(MPa)$	$\rho$	$c/d$	Stirrups	Axial load(kN)
۳۵۰	۳۵۰	۲۸۹	۳۰	۴۱۴	٪۳.۸	۱.۸۲	$\Phi 10 @ 150mm$	۳۳۲.۸

لازم به ذکر است که در اینجا اثرات خوردگی بر یک المان تیر و ستون بررسی شده است. اما برای مدلسازی سازه ۳ و ۷ طبقه برای کلیه المان‌های سازه‌ای (تیر و ستون) مشابه مطالعه موردی اثرات خوردگی بر منحنی لنگر-دوران برای همه‌ی اعضا محاسبه شده و به سازه‌های موردنظر اعمال شده است.

## ۵- نتایج و تفاسیر آن

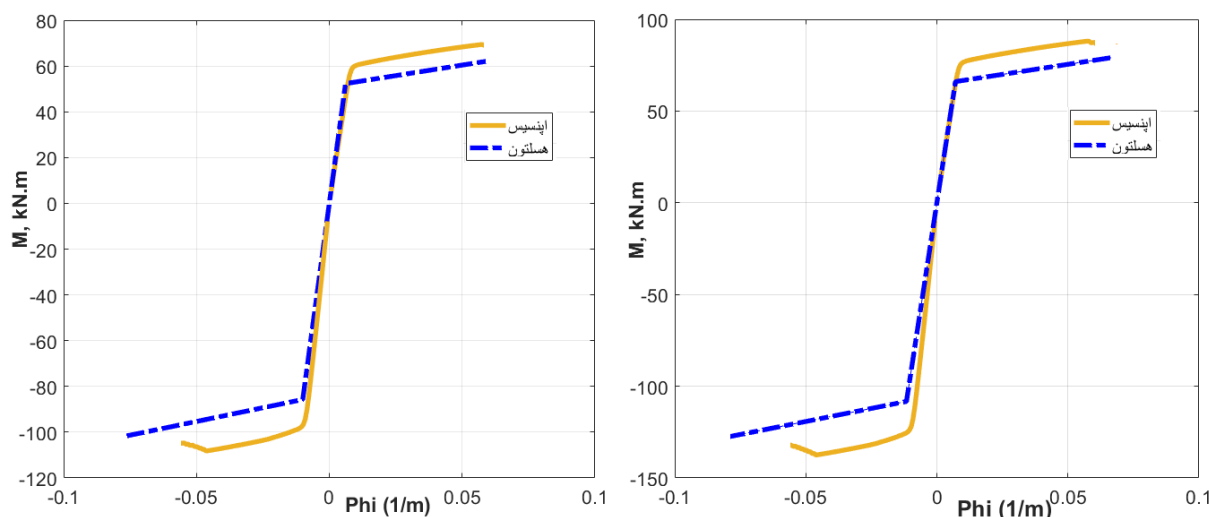
جدول ۴ آثار منفی خوردگی برای سناریوهای مختلف خوردگی در این مطالعه را نشان می‌دهد. آثار منفی خوردگی مانند تغییر مشخصات مکانیکی فولاد و کاهش مقاومت فشاری بتن با توجه به سناریوهای خوردگی که در این مطالعه در نظر گرفته شده (۱۰٪ و ۲۰٪ کاهش سطح مقطع آرماتورها)، محاسبه شده است.

جدول ۴: اثرات منفی خوردگی بر مشخصات مقاطع برای سناریوهای مختلف خوردگی

سناریو خوردگی	درصد کاهش مساحت آرماتور (مطالعه جاری)	درصد کاهش تنش تسلیم فولاد (رابطه ۱)	درصد کاهش سختی الاستیک فولاد (رابطه ۱)	درصد کاهش مقاومت فشاری بتن (رابطه ۵)
۱	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰
۲	٪۱۰	٪۱۲.۴	٪۷.۵	٪۲۱.۱۵
۳	٪۲۰	٪۲۴.۸	٪۱۵	٪۴۴

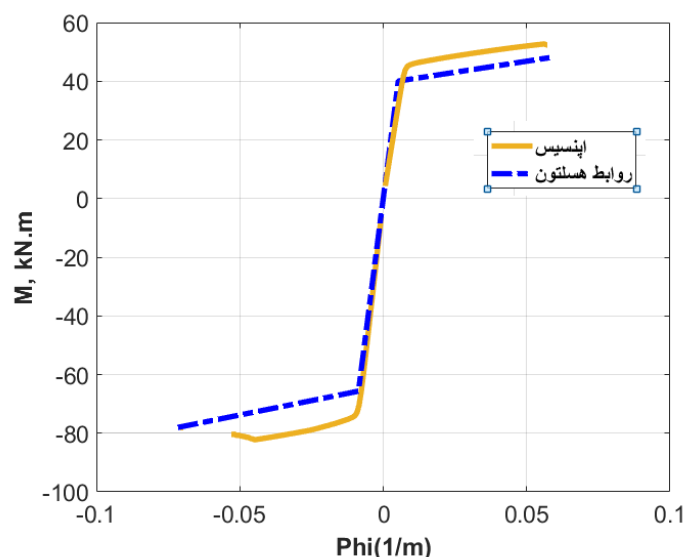
### ۵-۱ منحنی لنگر دوران تیر مورد مطالعه برای سناریوهای مختلف خوردگی

برای رسم منحنی لنگر-دوران تیر مورد مطالعه تحت سناریوهای مختلف خوردگی، پارامترهای این منحنی براساس روابط هسلتون و با اعمال آثار خوردگی محاسبه شده است. اما با توجه به اینکه مجموع روابط ارائه شده توسط هسلتون براساس کالیبره کردن تعدادی نمونه سالم و بدون خوردگی ارائه شده است، برای اینکه بتوانیم از این روابط برای حالت مقطع خورده شده صرفاً با تغییر مشخصات میلگرد و بتن استفاده کنیم نیاز به اعتبارسنجی می‌باشد لذا منحنی لنگر-دوران مقطع تیر مورد مطالعه ابتدا با استفاده از مدلسازی این مقطع با روش فایبر و با استفاده از مصالح Concrete01 برای بتن و Steel02 برای میلگردها در نرم‌افزار اپنسیس استخراج می‌شود و سپس منحنی لنگر-دوران آن با استفاده از روابط هسلتون نیز بدست می‌آید. شکل ۵ منحنی لنگر-دوران تیر مورد مطالعه تحت حالت بدون خوردگی و خوردگی ۱۰٪ و ۲۰٪ با استفاده از دو روش مذکور را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در روش استفاده از روابط هسلتون فقط دو شاخه اول منحنی لنگر-دوران ارائه شده است تا مقایسه بهتری صورت گیرد.



ب) منحنی لنگر-انحنای تیر مورد مطالعه در حالت خوردگی ۱۰٪

الف) منحنی لنگر-انحنای تیر مورد مطالعه در حالت بدون خوردگی

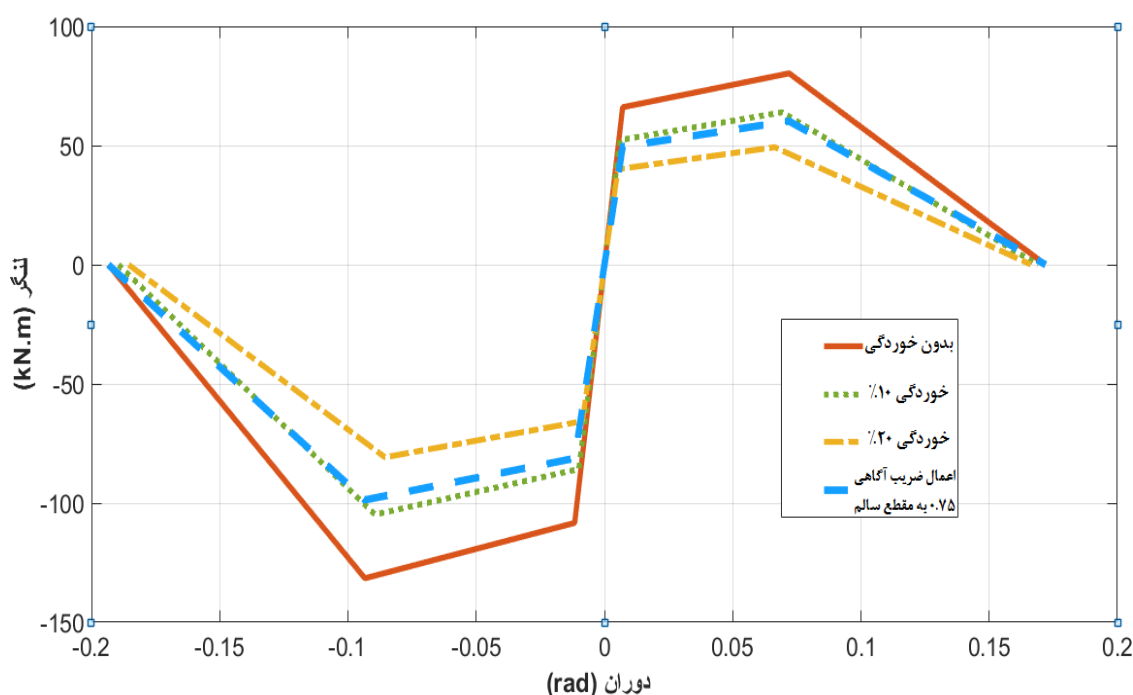


پ) منحنی لنگر-انحنای تیر مورد مطالعه در حالت خوردگی ۲۰٪

شکل ۵: منحنی لنگر - دوران تیر مورد مطالعه تحت سناریوی مختلف خوردگی با دو روش مختلف

با توجه به مقایسه انجام شده در شکل ۵ از اختلاف ۱۰ الی ۱۵ درصدی این دو روش صرف نظر کرده و برای مدلسازی المان‌های سازه‌ای چه در حالت سالم و چه در حالت خوردگی از روابط هسلتون استفاده می‌کنیم.

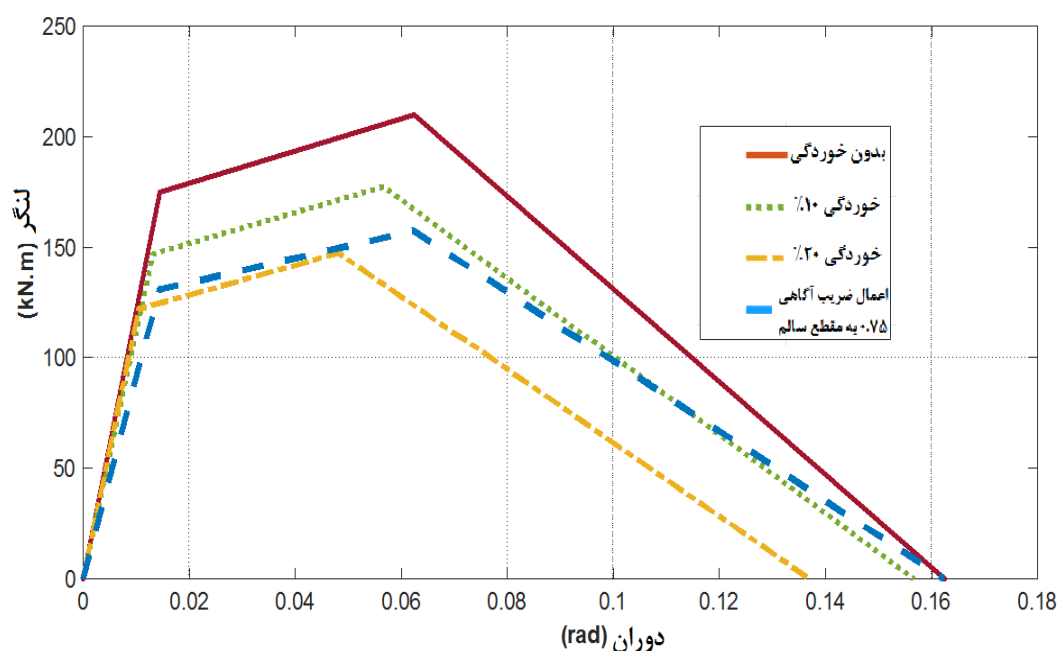
منحنی لنگر دوران تیر مورد مطالعه برای سناریوهای مختلف خوردگی و همچنین براساس ضریب آگاهی ۰,۷۵ که توصیه نشریه ۳۶۰ و FEMA-356 است، در شکل ۶ آمده است. همان طور که مشاهده می‌شود تحت سناریوی خوردگی ۱۰٪ و ۲۰٪ به ترتیب شاهد کاهش ۲۱٪ و ۳۹٪ در ظرفیت لنگر مقطع هستیم. همچنین، مشاهده می‌شود که منحنی لنگر-دوران براساس رویکرد نشریه ۳۶۰ از منحنی لنگر-دوران در حالت خوردگی ۱۰٪ کمتر است ولی از منحنی لنگر - دوران مقطع در حالت خوردگی ۲۰٪ بیشتر است. بنابراین ضریب آگاهی پیش‌بینی شده در نشریه ۳۶۰ و FEMA-356 برای خوردگی با سناریو ۲۰٪ غیرایمن و برای خوردگی با سناریو ۱۰٪ غیراقتصادی می‌باشد.



شکل ۶: منحنی لنگر - دوران تیر مورد مطالعه تحت سناریوی مختلف خوردگی

## ۵-۲ منحنی لنگر دوران ستون مورد مطالعه برای سناریوهای مختلف خوردگی

منحنی لنگر- دوران ستون مورد مطالعه تحت سناریوهای مختلف خوردگی و براساس ضریب آگاهی ۰,۷۵ در شکل ۷ آورده شده است. با توجه به اینکه ستون مورد مطالعه متقارن می‌باشد لذا فقط یک شاخه از منحنی لنگر- دوران رسم شده است. لازم به ذکر است که ظرفیت ستون‌ها تحت بار محوری ثقلی محاسبه می‌شود.



شکل ۷: منحنی لنگر - دوران ستون مورد مطالعه تحت سناریوی مختلف خوردگی

در مقطع ستون مورد نظر تحت خوردگی ۱۰ و ۲۰ درصد به ترتیب کاهش ۱۴٫۴٪ و ۲۷٫۱٪ در ظرفیت لنگر و کاهش ۷٫۵٪ و ۲۴٫۵٪ در شکل پذیری مقطع مشاهده می‌شود. جالب توجه است که بدانیم در اثر خوردگی درصد کاهش ظرفیت در تیر مورد مطالعه نسبت به ستون بیشتر است و این بدان معناست که خوردگی بر تیر بیشتر از ستون تأثیرگذار است.

### ۳-۵ تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه ۳ و ۷ طبقه تحت سناریوهای مختلف خوردگی

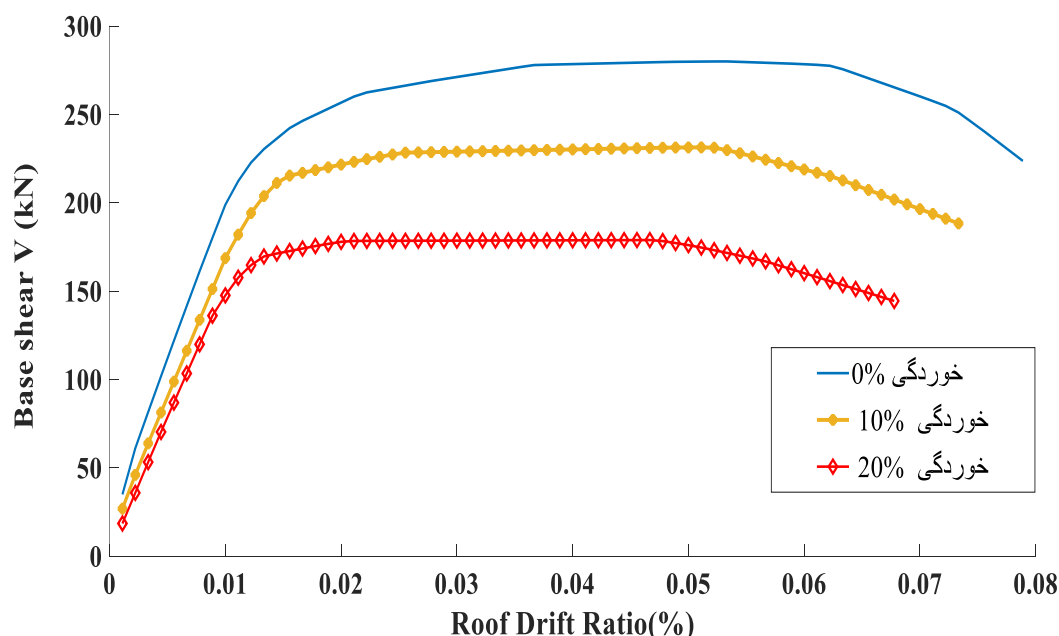
طبق نشریه FEMA-P695 [۳۰]، سازه‌ها به هنگام پوش تحت اثر ترکیب بارثقلی به صورت  $1.05D+0.25L$  قرار می‌گیرند. توزیع نیروهای جانبی در ارتفاع سازه باید بر اساس شکل مود اصلی در راستای مورد نظر باشد. در تحلیل بار افزون طبق توصیه‌ی FEMA-P695 مرکز جرم بام به عنوان نقطه‌ی کنترل تحلیل انتخاب می‌شود. پوش سازه تا جایی ادامه پیدا می‌کند که سازه به حالت ناپایداری کلی در شاخه نزولی رفتار سازه رسیده باشد.

شکل ۸ و ۹ منحنی ظرفیت سازه ۳ و ۷ طبقه تحت سناریوهای مختلف خوردگی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ظرفیت حداکثر سازه با افزایش درصد خوردگی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد خوردگی، سازه در درصد جابه‌جایی نسبی کمتری به ناپایداری کلی در شاخه‌ی نزولی  $(0.8V_{max})$  می‌رسد. این بدان معناست که با افزایش خوردگی ضریب اضافه مقاومت  $(\Omega)$  و ضریب شکل پذیری  $(\mu_T)$  سازه کاهش می‌یابد. بر اساس داده‌های به دست آمده از منحنی‌های پوش سازه، پارامترهای «اضافه مقاومت سازه‌ها» و «شکل‌پذیری مبتنی بر زمان تناوب» از روابط زیر مطابق FEMA-P695 قابل محاسبه است.

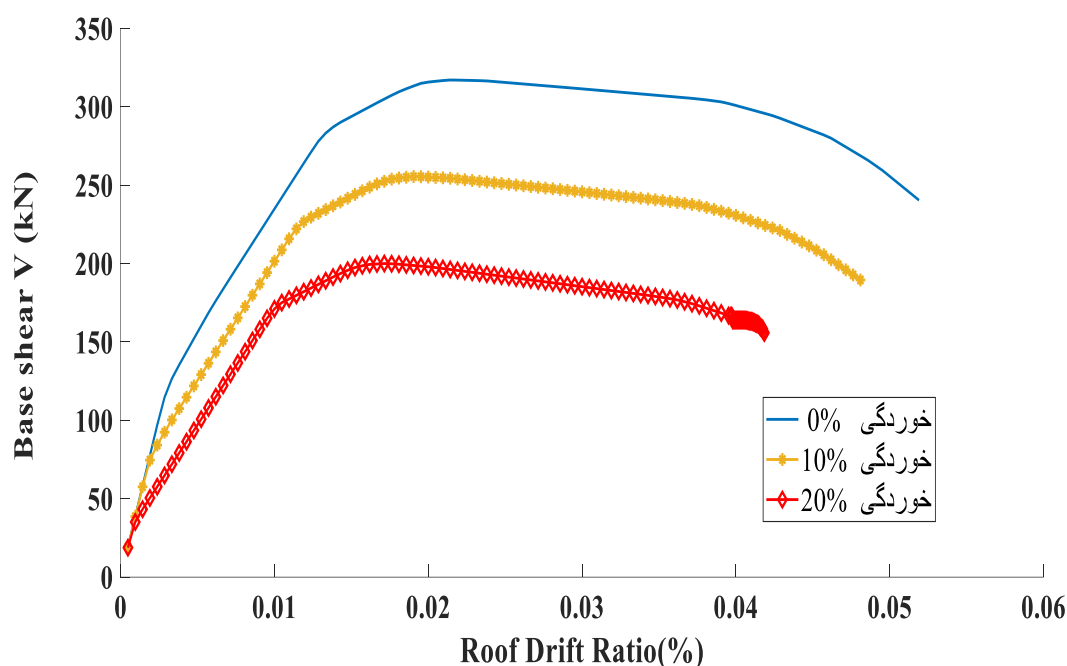
$$\Omega = \frac{V_{max}}{V} \quad [۳۰] \quad (۱۸)$$

$$\mu_T = \frac{\delta_u}{\delta_{y,eff}} \quad [۳۰] \quad (۱۹)$$

در این روابط  $V_{max}$  حداکثر مقاومت برشی سازه،  $V$  برش پایه طراحی سازه،  $\delta_u$  جابجایی نسبی حداکثر بام و  $\delta_{y,eff}$  جابجایی نسبی تسلیم بام است. مطابق نشریه مذکور  $\delta_u$  جابجایی نسبی حداکثر بام متناظر با نقطه‌ی زوال ۲۰٪ مقاومت از حداکثر مقاومت جانبی سازه  $(0.8V_{max})$  است. این پارامترها برای سناریوهای مختلف خوردگی و برای هر دو سازه در جدول ۵ و ۶ آمده است.



شکل ۸: منحنی ظرفیت سازه ۳ طبقه تحت سناریوهای مختلف خوردگی (۰٪، ۱۰٪ و ۲۰٪)



شکل ۹: منحنی ظرفیت سازه ۷ طبقه تحت سناریوهای مختلف خوردگی (۰٪، ۱۰٪ و ۲۰٪)

همانطور که در شکل ۸ و ۹ مشاهده می‌شود علی‌رغم اینکه ابعاد مقاطع تحت سناریوهای مختلف خوردگی تغییری نیافته است اما سختی سازه در اثر خوردگی مقداری کاهش یافته است. در واقع با کاهش مقاومت فشاری بتن که رابطه مستقیمی با مدول الاستیسیته بتن دارد، سختی سازه دچار کاهش می‌شود. تغییرات سختی سازه ۷ طبقه نسبت به سازه ۳ طبقه محسوس تر است.

جدول ۵: خلاصه پارامترهای طراحی برای سازه ۳ طبقه تحت سناریوی مختلف خوردگی

درصد خوردگی آرماتورها	$T$	$V_{max} (kN)$	$V_{design} (kN)$	$\delta_u (m)$	$\delta_{y,eff} (m)$	مقادیر محاسبه شده	
	تحلیل ترک خورده					$\mu_T$	$\Omega$
۰٪	۰٫۷۴	۲۸۲٫۲	۸۸٫۲۸	۰٫۷۱	۰٫۱	۷٫۱	۳٫۱۹
۱۰٪	۰٫۷۶	۲۲۳	۸۸٫۲۸	۰٫۶۷	۰٫۱۱	۶٫۱	۲٫۵
۲۰٪	۰٫۷۶	۱۷۸٫۸	۸۸٫۲۸	۰٫۶۱	۰٫۱۲	۵٫۱	۲

جدول ۶: خلاصه پارامترهای طراحی برای سازه ۷ طبقه تحت سناریوی مختلف خوردگی

درصد خوردگی آرماتورها	$T$	$V_{max} (kN)$	$V_{design} (kN)$	$\delta_u (m)$	$\delta_{y,eff} (m)$	مقادیر محاسبه شده	
	تحلیل ترک خورده					$\mu_T$	$\Omega$
۰٪	۱٫۵۴	۳۱۵	۱۲۷٫۶	۱٫۱	۰٫۱۵	۷٫۳	۲٫۴۷
۱۰٪	۱٫۵۶	۲۵۲٫۵	۱۲۷٫۶	۱	۰٫۱۵	۶٫۷	۱٫۹۸
۲۰٪	۱٫۵۶	۲۰۲٫۵	۱۲۷٫۶	۰٫۸۸	۰٫۱۴	۶٫۳	۱٫۵۸

## ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه با هدف بررسی تأثیرات خوردگی بر رفتار سازه‌های موجود، ابتدا مکانیزم و انواع خوردگی بیان شد. سپس آثار منفی خوردگی مانند کاهش سطح مقطع آرماتورها، تغییر مشخصات مکانیکی فولاد و کاهش مقاومت فشاری بتن و همچنین روابط آزمایشگاهی که طی تحقیقات متعددی برای محاسبه این آثار استخراج شده است، مرور گردید. در ادامه اثرات منفی خوردگی بر منحنی لنگر - دوران یک تیر و ستون مورد بررسی قرار گرفت و با رویکرد نشریه‌های ۳۶۰ و FEMA-356 مقایسه شد. برای بررسی خوردگی در سطح سازه‌ای، قاب خمشی بتن آرمه ۳ و ۷ طبقه براساس مدل پلاستیسسته متمرکز مدلسازی شده و تحت سناریوهای خوردگی ۰٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ به صورت استاتیکی غیرخطی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق به صورت زیر خلاصه می‌شود:

- ۱- مقایسه نشان می‌دهد اعمال ضریب آگاهی ۰,۷۵ برای اعضای خورده شده به منظور محاسبه ظرفیت و تغییرشکل‌های اعضا زوال یافته که در نشریه ۳۶۰ و FEMA-356 برای ارزیابی سازه‌ها در نظر گرفته می‌شود، در خوردگی با سناریوی ۲۰٪ غیرایمن و در خوردگی با سناریوی ۱۰٪ غیراقتصادی است (برای دو سازه مورد بررسی در این پژوهش).
- ۲- در یک سناریوی خوردگی یکسان تأثیر منفی خوردگی بر تیرها نسبت به ستون‌ها بیشتر است.
- ۳- ظرفیت و شکل‌پذیری سازه ۳ و ۷ طبقه در اثر خوردگی کاهش یافته است.
- ۴- تحت خوردگی ۱۰٪ و ۲۰٪ ظرفیت حداکثر سازه ۳ طبقه به ترتیب ۲۱ و ۳۶ درصد نسبت به حالت بدون خوردگی کاهش یافته و ظرفیت حداکثر سازه ۷ طبقه به میزان ۱۹ و ۳۵ درصد افت داشته است.
- ۵- تحت خوردگی ۱۰٪ و ۲۰٪ ضریب شکل‌پذیری سازه ۳ طبقه به ترتیب ۱۴ و ۲۸ درصد نسبت به حالت بدون خوردگی کاهش یافته و ضریب شکل‌پذیری سازه ۷ طبقه به میزان ۸ و ۱۴ درصد افت داشته است.

## ۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
$A_g$	مساحت کل مقطع، $mm^2$
$A_{s0}, A_s$	به ترتیب مساحت میلگرد در حالت خوردگی و بدون خوردگی، $mm^2$
$ast$	شاخص بیانگر احتمال لغزش آرماتور که اگر برابر یک در نظر گرفته شود بیانگر احتمال بروز لغزش و اگر صفر در نظر گرفته شود بیانگر عدم احتمال بروز لغزش آرماتورهای طولی است.
$b$	عرض مقطع، mm
$c/d$	نسبت پوشش بتن به قطر میلگرد
$C_u, C_w$	به ترتیب تراز خوردگی و تراز خوردگی نهایی
$c_{unit}$	ضریب تبدیل واحد است و در صورتیکه $f_c'$ بر حسب مگاپاسکال باشد مقدار آن برابر ۱ است.
$d'$	عمق مؤثر مقطع، mm
$E_s, E_c$	به ترتیب مدول الاستیسسته بتن و فولاد، MPa
$E_{ss}, E_{cs}$	به ترتیب مدول الاستیسسته آرماتور در حالت خوردگی و بدون خوردگی، MPa
$f_c'$	مقاومت فشاری بتن، MPa
$f_y$	تنش تسلیم فولاد، MPa
$I_y, I_g$	به ترتیب ممان اینرسی کل مقطع و ممان اینرسی مؤثر مقطع، $mm^4$
$k_y$	ضریب عمق ناحیه فشاری مقطع
$M_c, M_y$	به ترتیب ظرفیت لنگر تسلیم و حداکثر مقاومت خمشی مقطع، N.m
$N, P$	نیروی فشاری مقطع (با علامت مثبت)، N
$n$	نسبت مدول الاستیسسته فولاد به مدول الاستیسسته بتن
$P_x$	عمق نفوذ خوردگی، mm
$s/d$	نسبت فاصله خاموت‌ها به عمق مؤثر مقطع



زمان تناوب اصلی سازه	$T$
برش پایه طراحی سازه، $N$	$V$
حداکثر مقاومت برشی سازه، $N$	$V_{max}$
<b>علائم یونانی</b>	
ضریب مربوط به نوع حمله و خوردگی است که مقدار آن می‌تواند بین ۲ (برای خوردگی یکنواخت) تا ۱۰ (برای خوردگی حفره‌ای) باشد.	$\alpha$
درصد خوردگی (درصد کاهش جرم فولاد)	$\Delta_w$
نسبت بین فاصله مرکز آرماتورهای فشاری تا دورترین تار فشاری مقطع و عمق مؤثر مقطع ( $d'/d$ )	$\delta'$
به ترتیب جابجایی نسبی حداکثر بام و جابجایی نسبی تسلیم بام، $m$	$\delta_{y,eff}, \delta_u$
کرنش دورترین تار فشاری بتن	$\epsilon_c$
به ترتیب ظرفیت چرخش پلاستیک مقطع و ظرفیت چرخش بعد از نقطه‌ی حداکثر ظرفیت خمشی مقطع، rad	$\theta_{pc}, \theta_{cap,pl}$
پارامتر ظرفیت اتلاف انرژی چرخه‌ای	$\lambda$
پارامتر شکل‌پذیری مبتنی بر زمان تناوب سازه	$\mu_T$
نسبت نیروی محوری نرمال شده در روابط هسلتون ( $N/A_g f_c$ )	$\nu$
به ترتیب درصد آرماتورهای کششی، فشاری و جان که به صورت نسب مساحت آرماتور به (bd) محاسبه می‌شود	$\rho_v, \rho', \rho$
درصد آرماتورهای جانبی که به صورت نسبت مساحت خاموت‌ها به فاصله خاموت‌ها محاسبه می‌شود ( $A_{st}/s$ )	$\rho_{sh}$
به ترتیب تنش تسلیم میلگرد در حالت خوردگی و بدون خوردگی، MPa	$\sigma_{sy}, \sigma_{cy}$
به ترتیب قطر اولیه آرماتور و قطر آرماتور در زمان $t$ پس از خوردگی، mm	$\phi_t, \phi_0$
انحنای تسلیم مقطع	$\phi_y$

## مراجع

- Salari, M.R. and Spacone, E., (2001). Finite element formulations of one-dimensional elements with bond-slip. *Engineering structures*, 23(7), pp.815-826.
- Chen, G. and Baker, G., (2003). Influence of bond slip on crack spacing in numerical modeling of reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering*, 129(11), pp.1514-1521.
- Böhni, H. ed., (2005). Corrosion in reinforced concrete structures. Elsevier.
- Broomfield, J.P., (2003). Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair. CRC Press.
- Luca, B., Bernhard, E., Pietro, P. and Rob, P., (2004). Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair. *Bedin: Wiley—VCH*.
- Malumbela, G., Alexander, M. and Moyo, P., (2009). Steel corrosion on RC structures under sustained service loads-A critical review. *Engineering Structures*, 31(11), pp.2518-2525.
- Shayanfar, M.A., Ghalehnovi, M. and Safiey, A., (2007). Corrosion effects on tension stiffening behavior of reinforced concrete. *Computers and Concrete*, 4(5), pp.403-424.
- Simioni, P., (2009). Seismic response of reinforced concrete structures affected by reinforcement corrosion (Doctoral dissertation, Technische Universität Braunschweig).
- Yalciner, H., Sensoy, S. and Eren, O., (2012). Time-dependent seismic performance assessment of a single-degree-of-freedom frame subject to corrosion. *Engineering Failure Analysis*, 19, pp.109-122.
- Dizaj, E.A., Madandoust, R. and Kashani, M.M., (2018). Probabilistic seismic vulnerability analysis of corroded reinforced concrete frames including spatial variability of pitting corrosion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114, pp.97-112.
- Kashani, M.M., Lowes, L.N., Crewe, A.J. and Alexander, N.A., (2015). Phenomenological hysteretic model for corroded reinforcing bars including inelastic buckling and low-cycle fatigue degradation. *Computers & Structures*, 156, pp.58-71.
- Iran's Management and Planning Organization, (2014), *Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (Journal 360)*, (in Persian).
- Prestandard, F.E.M.A., (2000). commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA356). *Washington, DC: Federal Emergency Management Agency*, 7.
- Shayanfar, M., Savoj, H.R., Ghanooni-Bagha, M. and Khodam, A., (2018). The effects of corrosion on seismic performance of reinforced concrete moment frames. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5, pp.146-59.

- M. Ghalehnavi, (2004), *Constitutive Relationships in Nonlinear Analysis of RC Structures Considering effects of Bond – Slippage and Corrosion*. Doctoral dissertation, University of Iran University of Science and Technology. (In Persian)
- Lee, H.S. and Cho, Y.S., (2009). Evaluation of the mechanical properties of steel reinforcement embedded in concrete specimen as a function of the degree of reinforcement corrosion. *International journal of fracture*, 157(1-2), pp.81-88.
- Rodriguez, J., Ortega, L.M. and Casal, J., (1994), June. Corrosion of reinforcing bars and service life of reinforced concrete structures: corrosion and bond deterioration. *In International conference on concrete across borders, Odense, Denmark* (Vol. 2, pp. 315-326).
- Ghanooni-Bagha, M., Shayanfar M. A., Yekefallah M. R., The Effect of Changes in Carbon-dioxide Concentrations on Corrosion Initiation of Reinforced Concrete Structures, (2018), *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(4), 697-706. (In Persian)
- Shayanfar, M., Ghanooni-Bagha, M. (2016). *practical Training in Building Retrofit Methods*, Fadak Isatis (in Persian).
- Ting, S.C. and Nowak, A.S., (1991). Effect of reinforcing steel area loss on flexural behavior of reinforced concrete beams. *Structural Journal*, 88(3), pp.309-314.
- Haselton, C.B. and Pacific Earthquake Engineering Research Center, (2008). *Beam-column element model calibrated for predicting flexural response leading to global collapse of RC frame buildings*. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Ibarra, L.F., Medina, R.A. and Krawinkler, H., (2005). Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 34(12), pp.1489-1511.
- OpenSees. The open system for earthquake engineering simulation, (2012). *Berkeley Pacific Earthquake Engineering Research Center*, University of California.
- Deierlein, G., Reinhorn, A. and Willford, M., (2010). *NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 4-Nonlinear Structural Analysis for Seismic Design: A Guide for Practicing Engineers* (No. Grant/Contract Reports (NISTGCR)-10-917-5).
- Berry, M.P., Lehman, D.E. and Lowes, L.N., (2008). Lumped-plasticity models for performance simulation of bridge columns. *ACI Structural Journal*, 105(3), p.270.
- Panagiotakos, T.B. and Fardis, M.N., (2001). Deformations of reinforced concrete members at yielding and ultimate. *Structural Journal*, 98(2), pp.135-148.
- Structural Engineering Institute., (2006). *Minimum design loads for buildings and other structures*. Amer Society of Civil Engineers.
- ACI Committee and International Organization for Standardization, (2008). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary*. American Concrete Institute.
- Hosseinpour, F. and Abdelnaby, A.E., 2017. Effect of different aspects of multiple earthquakes on the nonlinear behavior of RC structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, pp.706-725.
- Applied Technology Council, (2009). *Quantification of building seismic performance factors*. US Department of Homeland Security, FEMA.