

اثرات خوردگی بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی بتن آرمه

محسنعلی شایانفر^{۱*}، حمیدرضا ساوج^۲، محمد قانونی‌بقا^۳، علی خدام^۴

۱- دانشیار، قطب علمی پژوهش‌های بنیادین در مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شرق (قیامدشت)، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۴- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

چکیده

در سالهای اخیر، بررسی تاثیرات استهلاک و خوردگی آرماتورها بر رفتار لرزه ای سازه های بتن مسلح تحت اثر زلزله به شدت مورد توجه جوامع مهندسی سازه و زلزله قرار گرفته است که این توجه عمدتاً به دلیل اهمیت موضوع از دیدگاه اقتصادی و ایمنی و توسعه پایدار می باشد. خوردگی آرماتورها در سازه‌های بتن آرمه، موجب تغییر در رفتار غیرخطی این سازه‌ها می‌گردد که نادیده گرفتن آن ممکن است به تخریب زود هنگام سازه منجر شود. بررسی اثرات خوردگی آرماتورها بر رفتار اعضا در سازه‌های بتنی موضوع اصلی این پژوهش می‌باشد. در این تحقیق ابتدا مکانیزم‌های خوردگی فولاد در اعضای بتن آرمه بررسی شده و سپس اثرات منفی خوردگی بر رفتار مقطع و چگونگی لحاظ این اثرات در منحنی لنگر-انحنای مورد مطالعه قرار می‌گیرد. سرانجام با استفاده از مطالعه موردی قاب دو بعدی، رفتار لرزه ای اعضا و کل سازه، تحت سناریوهای مختلف خوردگی مورد نظر در این تحقیق با رویکرد نشریه ۳۶۰ مقایسه می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل قاب مذکور، پیشنهاد می‌شود در نشریه ۳۶۰ جهت اعمال اثرات خوردگی، ضریب آگاهی به جای حد تغییر شکل، همواره ظرفیت نهایی مقطع را کاهش دهد. نتیجه حاصل از نشریه مذکور در حالت بدون خوردگی نسبت به واقعیت اندکی محافظه کارانه است.

کلمات کلیدی: دیوارهای مصالح بنایی، برش درون صفحه، مقاوم سازی لرزه ای، بتن الیافی، مدل اجزا محدود

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2017.86063.1183	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/JSCE.2017.86063.1183	۱۳۹۷/۵/۳۰	۱۳۹۶/۴/۳۱	۱۳۹۶/۴/۳۱	۱۳۹۶/۴/۱۸	۱۳۹۶/۳/۲۵
				*نویسنده مسئول:		محسنعلی شایانفر
				پست الکترونیکی:		shayanfar@iust.ac.ir

The effects of corrosion on seismic performance of reinforced concrete moment frames

Mohsen-Ali Shayanfar^{*1}, Hamid-Reza Savoj², Mohammad Ghanooni Bagha³, Ali Khodam⁴

1- Associate Professor, The Centre of Excellence for Fundamental Studies in Structural Engineering, Iran University of Science and Technology, P.O.BOX: 16765-163; Narmak, Tehran, Iran

2- School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, P.O. Box 16765-163, Narmak, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of civil Engineering, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

ABSTRACT

In recent years, evaluation of deterioration and aging effects on seismic performance assessment of existing reinforced concrete structures has been paid much attention in earthquake and structural engineering community due to economical and safety issues. Corrosion of concrete reinforcement causes changing of nonlinear behaviour of reinforced concrete structures and ignoring these changes may lead to structural damage during the design life time of RC structures. Investigation of reinforcement corrosion effects in concrete structures on nonlinear behaviour of reinforced concrete members is the main subject of this research. In this study, the structural behaviour of the moment-curvature curve was investigated under these corrosion effects. After occurring the corrosion, cross section of the reinforcement is gradually reduced and consequently load bearing capacity of the reinforced concrete members will be reduced significantly. Accordingly, the relationship between corrosion and moment-curvature curve of structural members will be discussed. A two-dimensional frame is considered to investigate the seismic behaviour of structural frame and members, under different scenarios of corrosion in comparison with the approach proposed by Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (No. 360). Based on these results, to take the corrosion effects into consideration, it is recommended to use a k factor associated to ultimate sectional capacity instead of ductility limit.

ARTICLE INFO

Received: 15/05/2017

Revised: 29/06/2017

Accepted: 22/07/2017

Keywords:

Reinforced concrete structures

Corrosion effect

Moment-curvature

Nonlinear hinge

Pushover analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2017.86063.1183

*Corresponding author: Mohsen Ali Shayanfar
Email address: shayanfar@iust.ac.ir

۱- مقدمه

بتن مسلح که یکی از پر کاربردترین مصالح در مهندسی عمران است، به دلایل متعددی رفتاری غیر خطی تحت شرایط متفاوت بار گذاری از خود نشان می دهد. یکی از دلایل بروز این رفتار، ایجاد خوردگی در آرماتورهای درون بتن است [۱]. اغماض از رفتار غیر خطی ناشی از خوردگی می تواند تبعات ناخوشایندی به همراه داشته باشد [۲]. در طراحی و مقاوم سازی سازه های بتن آرمه، تخمین قابل اطمینان تغییرات و زوال در رفتار سازه بسیار مهم است. تغییرات در خواص مکانیکی مصالح در طول زمان، می تواند به دلیل حملات شیمیایی، فیزیکی و محیطی در طول مدت خدمت رسانی سازه باشد [۳]. امروزه اکثر سازه های بتن آرمه موجود تحت تأثیر خرابی های سطحی یا داخلی می باشند. پی بردن به عامل اصلی خرابی و زوال رفتاری سازه بسیار مشکل است زیرا معمولاً عوامل متعددی وجود دارند [۲]. مطالعات و بازبینی سازه ها خصوصاً در مورد سازه هایی که در مناطق ساحلی و گرم ساخته شده اند، نشان می دهد خوردگی آرماتورها یکی از خطرناک ترین عوامل آسیب است که تأثیرات زیان باری بر مقاومت، سختی، شکل پذیری و ظرفیت تغییر شکل اعضا در سازه بتنی دارند [۴]. السلیمانی و همکاران [۵] آزمایش کشش مستقیم را روی نمونه های بتن با درصد خوردگی متفاوت انجام دادند و اثرات منفی درصدهای بالای خوردگی را بر تنش پیوستگی فولاد و بتن مشاهده کردند. معالج و همکاران [۶] با مطالعه بر روی منحنی نیرو-تغییر مکان سه تیر بتن آرمه تحت بارگذاری مشخص، تأثیرات خوردگی و برخی ترکیبات خاص بتن در کاهش اثرات نامطلوب خوردگی آرماتور را بررسی کردند. مانگات و الجارف [۷] با مقایسه بین نمونه های با درصد خوردگی های متفاوت، رابطه ای بین کاهش مقاومت خمشی تیر و درصد خوردگی و زمان پس از شروع خوردگی آرماتور طولی ارائه داده اند. ا و همکاران [۸] مطالعه تأثیر خوردگی روی عملکرد لرزهای ۹ نمونه تیر بتنی را انجام دادند. نتایج نشان داد با افزایش درصد خوردگی، شکل پذیری، ظرفیت چرخش مفصل پلاستیک و ظرفیت جذب انرژی تیرها ابتدا اندکی افزایش و سپس کاهش می یابند. ما و همکاران [۹] تأثیر منفی خوردگی آرماتور بر رفتار لرزهای ستون با مقطع دایره ای را تحت ترکیب بار محوری ثابت و چرخه های بار جانبی بررسی کردند. بررسی منحنی های هیستریزس حاصل از آزمایش ها و ترسیم پوش آنها نشان داد که ظرفیت جذب انرژی، پایداری چرخه های هیستریزس و شکل پذیری نمونه ها با افزایش درصد خوردگی کاهش می یابد. کیول و همکاران [۱۰] عملکرد لرزهای سازه تحت اثر خوردگی را با انجام ۶۰ آزمایش بیرون کشیدگی تک جهته و سیکلی بررسی نمودند. کاهش شکل پذیری و محصور شدگی و تغییر در مکانیزم شکست ناشی از خوردگی آرماتورهای عرضی، از یافته های این محققین بود. اینکی و همکاران [۱۱] اثرات خوردگی حفره ای آرماتورهای طولی ستون بر رفتار سازه بتنی را مطالعه کردند. ایشان تأثیر خوردگی حفره ای بر کاهش سطح مقطع آرماتور و هم چنین کاهش طول مفصل پلاستیک را در این مطالعه در نظر گرفتند. آنالیز لنگر-انحنای تحت سناریوهای مختلف خوردگی حفره ای نمایانگر کاهش لنگر نهایی مقطع (به دلیل کاهش سطح مقطع آرماتور) و عدم تغییر در انحنای نهایی مقطع بود. یالکینر و همکاران [۱۲] با در نظر گرفتن اثرات خوردگی شامل کاهش سطح مقطع آرماتورها، کاهش مقاومت بتن و افزایش جابه جایی به دلیل لغزش آرماتورها درون بتن، یک سازه یک درجه آزادی را در زمان های ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سال در معرض خوردگی مورد مطالعه تحلیلی قرار دادند. مقایسه منحنی های لنگر انحنای برای مقادیر مختلف خوردگی نشان داد با افزایش خوردگی، ظرفیت لنگر مقطع و جذب انرژی آن کاهش یافته و انحنای زیاده تر برای مقادیر کمتر لنگر، رخ می دهد.

با ارزیابی اثرات خوردگی بر رفتار اعضا در سازه های بتن آرمه، مدل های رفتار غیرخطی نیاز به بهبود دارند تا تأثیرات میزان خوردگی در این سازه ها را به طور مناسب تری در نظر گیرند. نشریه ۳۶۰ در مقاوم سازی سازه های در معرض خوردگی، استفاده از منحنی لنگر-انحنای مقاطع خورده نشده را به همراه ضریب آگاهی ۰/۷۵ پیشنهاد می دهد [۱۳] ولی این عدد مستقل از درصد خوردگی و میزان خسارت وارده است. به همین دلیل، در این تحقیق به دست آوردن منحنی دقیق لنگر-انحنای با در نظر گرفتن اثرات خوردگی، تحت درجات مختلف خوردگی، به عنوان جایگزین مناسب و دقیق تری برای ضریب آگاهی، پیشنهاد شده است. نتایج به دست آمده در مدل سازی یک سازه بتن آرمه به کار گرفته شده است.

۲- اثرات خوردگی بر رفتار و مشخصات اعضای (سازه‌های) بتن آرمه

رایج‌ترین حملات محیطی که منجر به خوردگی می‌شوند عبارتند از: ۱- کربناسیون بتن که معمولاً حملات گسترده‌ای را به کل سطح آرماتور باعث می‌شود. ۲- نفوذ یون کلر معمولاً باعث حملات محلی به سطح سازه و آرماتور شده که به اصطلاح به آن خوردگی حفره‌ای^۱ گویند [۱۴]. در ادامه این بخش، برخی از مهم‌ترین اثرات خوردگی بر رفتار سازه را به‌طور مختصر بررسی می‌کنیم:

۲-۱- تغییر در خواص مکانیکی آرماتور

تنش تسلیم و نهایی فولاد، با افزایش خوردگی اندکی کاهش می‌یابد [۱۵]. شکل پذیری و تغییر شکل نهایی فولاد، با افزایش خوردگی کاهش می‌یابد و رفتار ترد می‌شود [۴]. شایانفر و همکاران در رابطه‌ای نشان دادند که حساسیت کرنش تسلیم آرماتورهای فولادی به درجه خوردگی آنها بستگی دارد، همچنین به قطر آرماتور و کاور بتنی وابسته است [۱۶]. نتایج آزمایشگاهی رودریگوئز و همکاران کاهش ۳۰٪ و ۵۰٪ کرنش ماکزیمم را برای کاهش سطح مقطع آرماتور ۱۵٪ و ۲۸٪ ناشی از خوردگی نشان داد [۱۷].

۲-۲- کاهش سطح مقطع آرماتور

بر حسب نوع خوردگی ایجاد شده در سازه‌های بتن آرمه، روابط مختلفی برای محاسبه قطر باقیمانده آرماتور پس از خوردگی ارائه شده است. رودریگوئز و همکاران رابطه ۱ را ارائه نمودند [۱۸]:

$$\Phi_t = \Phi_0 - \alpha P_x \quad (1)$$

Φ_0 قطر آرماتور خورده نشده و Φ_t قطر باقیمانده آرماتور بعد از t سال از شروع خوردگی می‌باشد. α ضریبی است که بر اساس نوع خوردگی تعیین می‌شود. برای خوردگی گسترده (یکنواخت) مقدار آن برابر با ۲ و برای خوردگی حفره‌ای مقدار آن تا ۱۰ می‌تواند افزایش یابد. P_x مقدار میانگین عمق نفوذ خوردگی بر حسب میلی‌متر است.

۲-۳- ترک خوردگی بتن و از بین رفتن کاور بتن

به دلیل افزایش حجم فرآورده‌های تشکیل شده در واکنش خوردگی (اکسید آهن)، نیروی فشاری شعاعی در سراسر سطوح آرماتور ایجاد شده و باعث تنش‌های کششی در بتن اطراف آرماتور می‌شود. در خوردگی‌های کم و متوسط، ترک خوردگی و سپس لایه‌لایه شدن رخ داده که برای مدل‌سازی این پدیده، قانونی بقا و شایانفر [۲۰] رابطه ۲ را ارائه داده‌اند:

$$\lambda = 2.288C_w - 1.733 \quad (2)$$

در رابطه بالا C_w درصد خوردگی و λ درصد کاهش مقاومت فشاری است. در خوردگی‌های شدیدتر، از بین رفتن کل کاور بتنی^۲ می‌تواند رخ دهد. این فرآیند در خوردگی گسترده و کلی شدیدتر از خوردگی حفره‌ای یا محلی رخ می‌دهد [۲۰].

۳- تحلیل غیرخطی با منحنی لنگر انحنای

از آنجایی که یک سازه از تعداد زیادی اعضای سازه‌ای تشکیل می‌شود و یک عضو از تجمع مقاطع شکل می‌گیرد، بنابراین می‌توان گفت رفتار غیر خطی مقاطع اعضای اصلی، سبب رفتار غیر خطی در سازه می‌شود. در مورد تیرها و ستون‌ها که اجزای اصلی تشکیل‌دهنده یک قاب سازه هستند، نیروهای داخلی معمولاً در مقطعی متمرکز می‌شوند که در دو انتها و وسط عضو واقع شده‌اند [۱۳]. با توجه به این

¹ Pitting corrosion

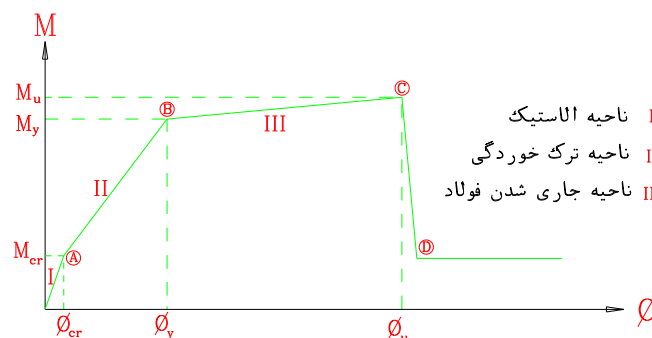
² spalling

ویژگی سازه، آنالیز مفصل پلاستیک در تحلیل غیرخطی و مقاومسازی سازه‌ها به طور گسترده به کار گرفته شده است. رفتار خمشی در ناحیه مفصل پلاستیک به صورت رابطه‌ای میان لنگر خمشی وارده و انحناء (شیب کرنش توزیع شده در مقطع) بیان می‌شود.

رابطه لنگر-انحناء برای یک مقطع با استفاده از روش آنالیز مقطع تعیین می‌شود، به طوری که شرایط سازگاری کرنش، تعادل نیروها و روابط تنش-کرنش ارضاء گردد. این روش بر اساس این فرض استوار می‌باشد که مقاطع مسطح، بعد از خمش مسطح باقی می‌مانند و هم‌چنین روابط تنش-کرنش برای فولاد و بتن مشخص می‌باشد. آنالیز، شامل تعیین عمق محور خمشی به ازاء یک مقدار انحناء با استفاده از تعادل محوری (منظور از تعادل محوری آن است که مجموع نیروهای ناشی از بتن و فولاد برابر با بار محوری وارده بر مقطع شود) و سپس استفاده از تعادل دورانی جهت محاسبه لنگر خمشی متناظر با انحناء می‌باشد [۲۱].

۳-۱- مدل سه خطی لنگر-انحناء

یک رابطه لنگر-انحناء برای یک مقطع تحت مسلح، می‌تواند به صورت یک رابطه سه‌خطی ایده‌آل شود. این رابطه شامل ۳ ناحیه می‌باشد: الف) ناحیه الاستیک قبل از ترک خوردگی. ب) ناحیه ایجاد و گسترش ترک‌ها. ج) ناحیه تسلیم فولاد تا رسیدن به گسیختگی. برای درک بهتر، رفتار عضو شکل پذیر در شکل ۱ مطابق نشریه ۳۶۰ نشان داده شده است. در نقطه ترک خوردگی A، کرنش در آخرین تار کششی بتن برابر با کرنش ترک خوردگی بتن می‌باشد. لنگر نظیر نقطه ترک خوردگی M_{cr} و انحنای نظیر Φ_{cr} نامیده می‌شود. در نقطه تسلیم B، با فرض این که کرنش در آرماتورهای کششی به کرنش تسلیم فولاد برسد، محل تار خمشی حدس زده شده و به روش سعی و خطا، تار خمشی به گونه‌ای تعیین می‌شود که تعادل نیرویی در مقطع برقرار باشد. لنگر نظیر این نقطه M_y و انحنای نظیر Φ_y نامیده می‌شود. در نقطه نهایی $C(\Phi_u, M_u)$ کرنش در آخرین تار فشاری را برابر با 0.0035 گرفته و با سعی و خطا ارتفاع تار خمشی به گونه‌ای محاسبه می‌شود که برآیند نیروهای وارد بر مقطع برابر با صفر گردد.



شکل ۱: مدل سه خطی لنگر-انحناء [۱۳]

شیب رابطه لنگر-انحناء بیانگر سختی خمشی الاستیک^۳ می‌باشد که شامل خصوصیات مقطع تحت شرایط بارگذاری مشخص می‌باشد. با توجه به شکل، اثر ترک خوردگی و تسلیم فولاد در کاهش سختی و ایجاد رفتار غیرخطی به خوبی قابل درک می‌باشد.

۳-۲- رابطه تنش-کرنش بتن در فشار

برای مدلسازی بتن در ناحیه فشاری، مدل کنت و پارک اصلاح شده توسط اسکات [۲۲] مطابق روابط زیر، استفاده شده است، این سه رابطه به ترتیب مربوط به ناحیه صعودی منحنی، ناحیه نزولی منحنی و تنش باقیمانده بتن می‌باشند.

$$\sigma_c = Kf'_c \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right], \quad \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c0} \quad (3)$$

³ EI

$$\sigma_c = Kf'_c [1 - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_{c0})], \quad \varepsilon_{c0} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_u \quad (4)$$

$$\sigma_c = 0.2Kf'_c, \quad \varepsilon_c \geq \varepsilon_u \quad (5)$$

در روابط فوق $\varepsilon_{c0} = 0.002K$ کرنش بتن نظیر تنش ماکزیمم است. $K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f'_c}$ ضریب افزایش مقاومت به دلیل محصورشدگی

است. و Z شیب شاخه نزولی نمودار تنش-کرنش در فشار است که از رابطه ۶ محاسبه می شود.

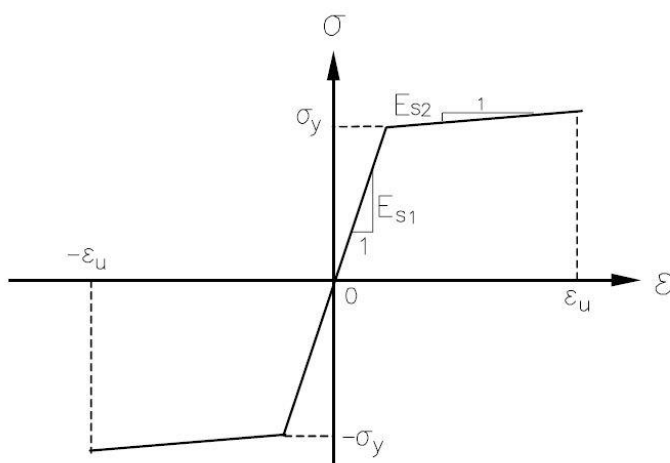
$$Z = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.0284f'_c}{14.21f'_c - 1000} + 0.75\rho_s \sqrt{\frac{h'}{s_h}} - 0.002K} \quad (6)$$

f_{yh} تنش تسلیم خاموت و f'_c مقاومت فشاری بتن بر حسب kg/cm^2 می باشد. ρ_s Error! Bookmark not defined. نسبت حجمی

آرماتور خاموت به هسته بتن محصورشده توسط آن (تا لایه بیرونی خاموت)، h' عرض هسته بتنی محصورشده و s_h فاصله خاموتها از یکدیگر است.

۳-۳- رابطه تنش-کرنش فولاد

مدل به کار رفته جهت بیان رابطه تنش-کرنش فولاد شامل دو ناحیه است. به طوری که ناحیه اول، الاستیک خطی با شیب E_{s1} و ناحیه دوم، سخت شدگی مجدد با شیب E_{s2} می باشد. به طور کلی فرض رفتار سخت شدگی مجدد بلافاصله بعد از تسلیم آرماتورهای فولادی زمانی صحیح می باشد که شیب ناحیه سخت شدگی مجدد به گونه ای تعیین گردد که انرژی کرنشی مدل برابر با انرژی کرنشی رابطه تنش-کرنش فولاد بدست آمده از آزمایش شود. به عبارت دیگر، مساحت زیر نمودار دوخطی شده و منحنی تنش کرنش واقعی، باید یکسان باشد. معمولاً استفاده از شیب 0.03 مقدار مناسبی می باشد [۲۱]. در شکل ۲، σ_y تنش تسلیم و ε_u کرنش نهایی فولاد می باشد.



شکل ۲: مدل دو خطی تنش-کرنش فولاد [۲۱]

۴- مطالعه موردی

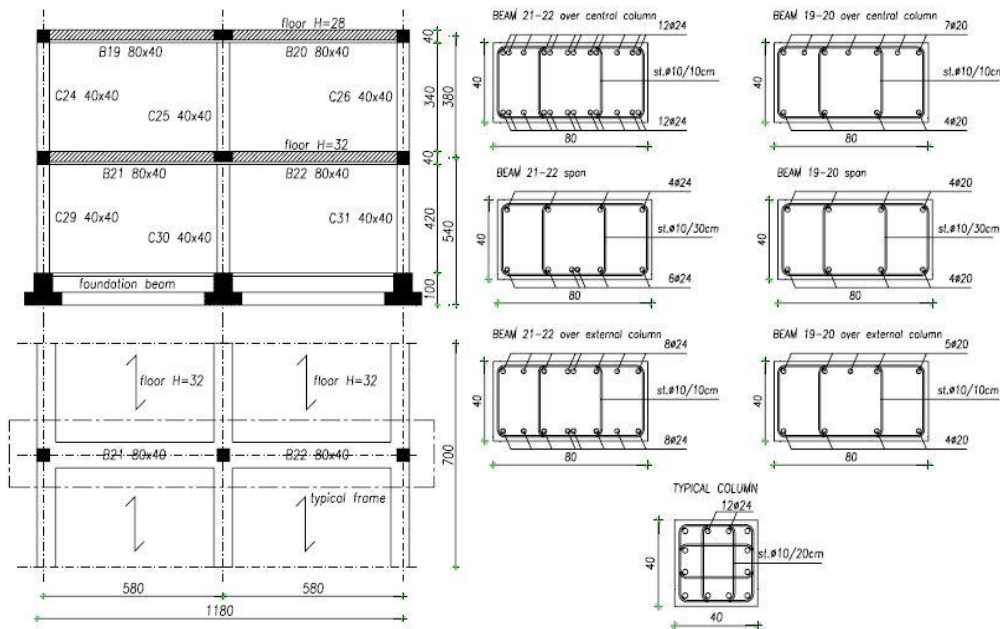
۴-۱- قاب دوبعدی [۴]

سازه بتنی دو طبقه و دو دهانه، منظم در پلان و ارتفاع می باشد. بار مرده و زنده وارد بر سقف در طبقه همکف به ترتیب برابر 88.0 kg/m^2 و 40.0 kg/m^2 می باشد. بار مرده و زنده وارد بر سقف در طبقه اول به ترتیب برابر 73.0 kg/m^2 و 9.0 kg/m^2 می باشد. پای ستونها

گیردار مدل شده‌اند. مقاومت فشاری متوسط نمونه استوانه‌ای برابر با ۳۰٫۵ مگاپاسکال و مقاومت تسلیم آرماتورها برابر با ۴۳۰ مگاپاسکال می‌باشد. مشخصات پلان، نما و مقاطع مورد استفاده در سازه در شکل ۳ و ۴ ارائه شده است. ساختمان مورد نظر در نرم افزار SAP2000 ورژن ۱۵ مدل‌سازی گردیده است. دوره تناوب موثر سازه ۰٫۸۷ و سایر پارامترها و ضرایب تغییر مکان برای تحلیل غیرخطی براساس مرجع ۱۳ محاسبه شده است. جابجایی نقطه هدف $\delta=17,7\text{cm}$ به دست آمده که براساس نشریه ۳۶۰، مقدار $\delta=26,6\text{cm}$ جهت رسم نمودارها به نرم افزار معرفی شده است. در تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی، دو توزیع بار جانبی به سازه اعمال می‌شود: ۱- الگوی بار جانبی یکنواخت متناسب با جرم هر طبقه و صرف نظر از ارتفاع. ۲- الگوی مودال متناسب با توزیع بار جانبی در آنالیز الاستیک.

سازه مورد نظر در حالات زیر توسط آنالیز پوش آور بررسی شده است:

- سازه بدون اثر خوردگی با استفاده از منحنی سه خطی لنگر-انحنای
- سازه بدون اثر خوردگی با استفاده از منحنی لنگر-انحنای پیش‌نهادی نشریه ۳۶۰
- سازه تحت اثر خوردگی حدود ۶٪ بر اساس پیشنهاد مرجع ۴
- سازه تحت اثر خوردگی با ۲۵٪ کاهش سطح مقطع آرماتور
- سازه تحت اثر خوردگی با ضریب آگاهی ۰٫۷۵ بر اساس پیشنهاد نشریه ۳۶۰
- از اثر خوردگی بر لغزش آرماتور صرف نظر شده و پیوستگی کامل بین بتن و فولاد در نظر گرفته می‌شود.
- سناریو خوردگی یکنواخت در تمامی المان‌های سازه بررسی شده است.



شکل ۴: مقاطع سازه مورد بررسی [۴]

شکل ۳: مشخصات کلی سازه مورد بررسی [۴]

۴-۲- اثر خوردگی

۴-۲-۱- کاهش سطح مقطع آرماتورها

الف) در خوردگی ملایم بر اساس پیشنهاد مرجع ۴ طبق سناریوی شماره ۳ بخش ۴-۱، فرض می‌شود سطح مقطع آرماتورها ۶٪ کم شود.

ب) در خوردگی شدید طبق سناریوی شماره ۴ بخش ۴-۱، فرض می‌شود سطح مقطع آرماتورها ۲۵٪ کم شود.

۴-۲-۲- زوال مقاومت فشاری بتن

الف- خوردگی ۰.۶٪: ترک خوردگی بتن، ناشی از خوردگی آرماتورها منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن گردیده که از رابطه معرفی شده در بخش ۲-۳ در محاسبات استفاده شده است:

$$c_w = 6\% \rightarrow \lambda = 12\% f'_c \rightarrow (1 - \lambda) f'_c = 0.88 f'_c$$

ب- خوردگی ۰.۲۵٪: در خوردگی ۰.۲۵٪ می‌توان فرض کرد به شعاع کاور و به مرکز آرماتور، بتن تحت تأثیر خوردگی قرار گرفته است. یعنی علاوه بر حذف کاور از مقطع، به همان مقدار بتن باقیمانده هم تضعیف شده است. برای مثال در مقطع به ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر، ۵ سانتی‌متر از بالا و پایین مقطع حذف شده و ۵ سانتی‌متر دوم از بالا و پایین کاهش مقاومت فشاری را تجربه می‌کنند. پس ۳۳٪ مقطع باقیمانده تحت اثر خوردگی است و لذا مقاومت فشاری ۳۳٪ کاهش می‌یابد.

۴-۲-۳- کاهش تغییر شکل نهایی آرماتور

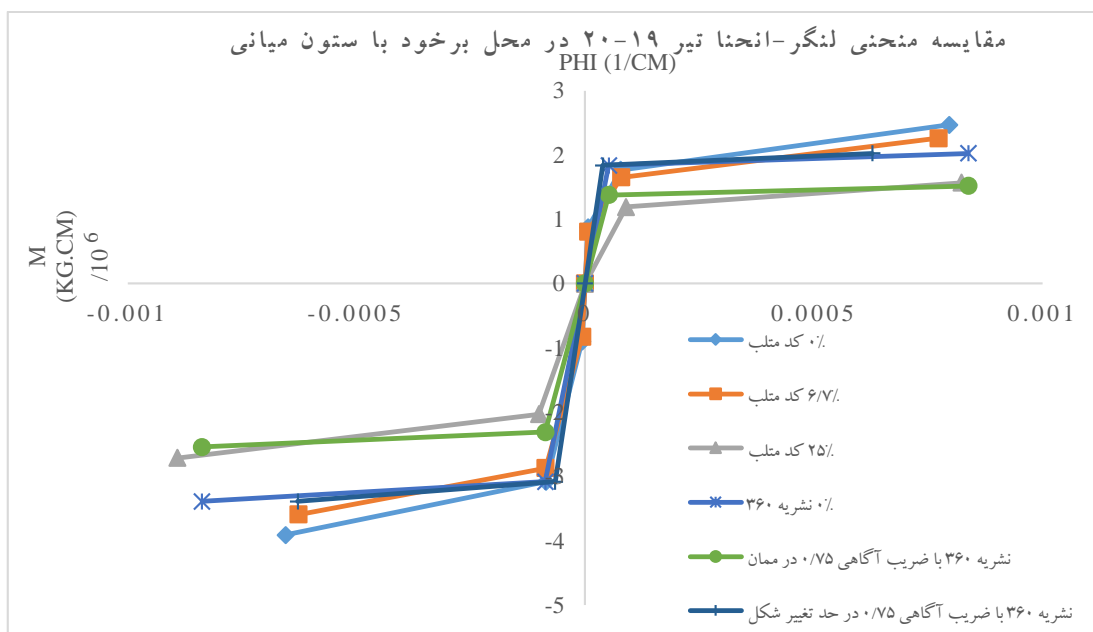
در خوردگی ۰.۶٪: کاهش کرنش نهایی فولاد ۲۱٪ می‌باشد [۱۷].

در خوردگی ۰.۲۵٪: کاهش کرنش نهایی فولاد ۴۵٫۴٪ می‌باشد [۱۷].

۵- آنالیز سازه و تفسیر نتایج

۵-۱- مقایسه مفاصل غیر خطی تیرها در حالات مختلف

الف) تیر ۲۰-۱۹ بالای ستون میانی مطابق شکل ۴ دارای ۴ آرماتور ۲۰ در پایین و ۷ آرماتور ۲۰ در بالای مقطع می‌باشد. در نمودار زیر منحنی‌های دقیق لنگر-انحنای برای مقطع تیر در حالات بدون خوردگی (۰٪)، خوردگی ۰.۶٪ و ۰.۲۵٪ با منحنی‌های لنگر-انحنای پیشنهادی نشریه ۳۶۰ در حالات بدون خوردگی و با خوردگی مقایسه شده است. لازم به ذکر است که نشریه ۳۶۰ برای وارد کردن اثر خوردگی و زوال یافتگی از ضریب آگاهی ۰٫۷۵ استفاده می‌کند [۲۳]. در تحلیل غیر خطی، این ضریب برای اعضای کنترل شونده توسط تغییر شکل در حد تغییر شکل و برای اعضای کنترل شونده توسط نیرو در ظرفیت باربری آن‌ها وارد می‌شود [۲۳].



شکل ۵: مفاصل غیر خطی تیر ۲۰-۱۹ در محل برخورد با ستون میانی تحت سناریوهای خوردگی تعریف شده

در شکل ۵ از مقایسه نتایج کد متلب در لنگر منفی مشاهده می‌شود در خوردگی ۶٪ نسبت به حالت بدون خوردگی لنگر نهایی ۸٪ و انحنای نهایی ۴٪ کاهش یافته است. در خوردگی ۲۵٪ لنگر نهایی ۳۰٪ کاهش ولی انحنای نهایی ۳۶٪ افزایش یافته است که دلیل این افزایش، پوسته‌ای شدن و حذف کاور بتن از مقطع است که موجب کاهش سختی مقطع و بروز انحنای بیشتر در لنگر کمتر است. این کاهش انحنای در درصدهای کم خوردگی و افزایش آن با نمودارهای ارائه شده در مرجع ۱۲ (پالکینر و همکاران) مطابقت دارد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود پیش‌نهاد نشریه ۳۶۰ پیرامون اعمال ضریب آگاهی برای خوردگی در مورد اعضای نیرویی در ظرفیت و تغییر شکلی در حد تغییر شکل، با نتیجه اینکی و همکاران (عدم تغییر در انحنای نهایی بر اثر خوردگی) و پالکینر و همکاران و نمودارهای مطالعه حاضر تفاوت دارد. پیشنهاد می‌شود در نشریه ۳۶۰ جهت اعمال اثرات خوردگی، ضریب آگاهی به جای حد تغییر شکل، همواره ظرفیت را کاهش دهد.

در لنگر مثبت نتایج مشابهی حاصل می‌شود فقط در خوردگی ۲۵٪ افزایش انحنای نهایی به ۳٪ محدود می‌شود که دلیل آن تغییر در مکانیزم شکست و رسیدن کرنش آرماتور به کرنش نهایی (ϵ_{su}) کاهش یافته پیش از رسیدن بتن به کرنش نهایی است.

مقادیر عددی لنگر خمشی و انحنای متناظر با نقاط ترک خوردگی، تسلیم و حدنهایی در هر یک از سناریوهای مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: نتایج آنالیز تیر ۱۹-۲۰ در محل برخورد با ستون میانی در خوردگی ۰٪، ۶٪ و ۲۵٪

B19-20 over central col						
نقطه	۰٪		۶٪		۲۵٪	
	انحنا	لنگر	انحنا	لنگر	انحنا	لنگر
نهایی	-۰,۰۰۰۶۵۵	-۳۹۱۰۰۰۰	-۰,۰۰۰۶۲۶	-۳۵۹۰۰۰۰	-۰,۰۰۰۸۹۱	-۲۷۱۰۰۰۰
تسلیم	-۰,۰۰۰۰۸۵۲	-۳۰۸۰۰۰۰	-۰,۰۰۰۰۸۶۴	-۲۸۷۰۰۰۰	-۰,۰۰۰۱۰۱	-۲۰۳۰۰۰۰
ترک خوردگی	-۰,۰۰۰۰۰۶۷۳	-۸۹۷۰۰۰	-۰,۰۰۰۰۰۶۷۳	-۸۲۸۰۰۰	.	.
.
ترک خوردگی	۰,۰۰۰۰۰۶۵۶	۸۷۴۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۶۵۶	۸۰۶۰۰۰	.	.
تسلیم	۰,۰۰۰۰۰۷۸	۱۷۷۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۷۸۷	۱۶۵۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۸۹۷	۱۱۹۰۰۰۰
نهایی	۰,۰۰۰۰۷۹۶	۲۴۷۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۷۷۳	۲۲۶۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۸۲۳	۱۵۷۰۰۰۰

انحنا برحسب (1/cm) و لنگر بر حسب (kg.cm) آمده است.

جدول ۲: نتایج آنالیز تیر ۱۹-۲۰ در محل برخورد با ستون میانی - مقادیر پیشنهادی نشریه ۳۶۰

نقطه	نشریه ۳۶۰		نشریه ۳۶۰ با ضریب آگاهی ۰,۷۵ در ممان		نشریه ۳۶۰ با ضریب آگاهی ۰,۷۵ در حد تغییر شکل	
	انحنا	لنگر	انحنا	لنگر	انحنا	لنگر
نهایی	-۰,۰۰۰۰۸۳۷۴	-۳۳۸۸۰۰۰	-۰,۰۰۰۰۸۳۷۴	-۲۵۴۱۰۰۰	-۰,۰۰۰۰۶۲۸	-۳۳۸۸۰۰۰
تسلیم	-۰/۰۰۰۰۸۷۲	-۳۰۸۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۸۷۲	-۲۳۱۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۶۵۴	-۳۰۸۰۰۰۰
.
تسلیم	۰/۰۰۰۰۵۲۱	۱۸۴۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۵۲۱	۱۳۸۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۳۹۱	۱۸۴۰۰۰۰
نهایی	۰,۰۰۰۰۸۳۷۴	۲۰۲۴۰۰۰	۰,۰۰۰۰۸۳۷۴	۱۵۱۸۰۰۰	۰,۰۰۰۰۶۲۸	۲۰۲۴۰۰۰

انحنا برحسب (1/cm) و لنگر بر حسب (kg.cm) آمده است.

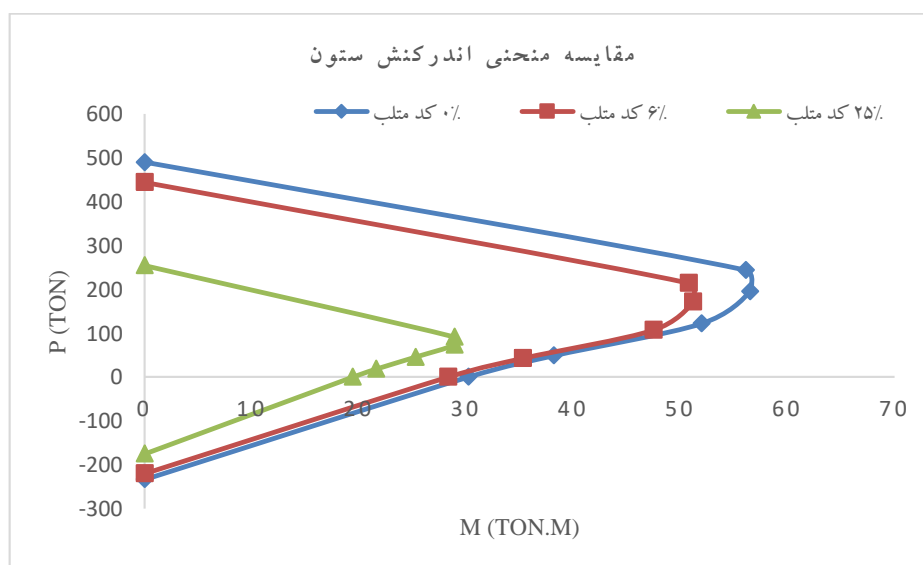
(ب) تیر ۱۹-۲۰ بالای ستون کناری که مطابق شکل ۳ دارای ۴ آرماتور ۲۰ در پایین و ۵ آرماتور ۲۰ در بالای مقطع می‌باشد. نمودار مقایسه منحنی‌ها در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج مشابه تیر ۱۹-۲۰ بالای ستون میانی است.



شکل ۶: مفاصل غیرخطی تیر ۱۹-۲۰ در محل برخورد با ستون کناری تحت سناریوهای خوردگی تعریف شده

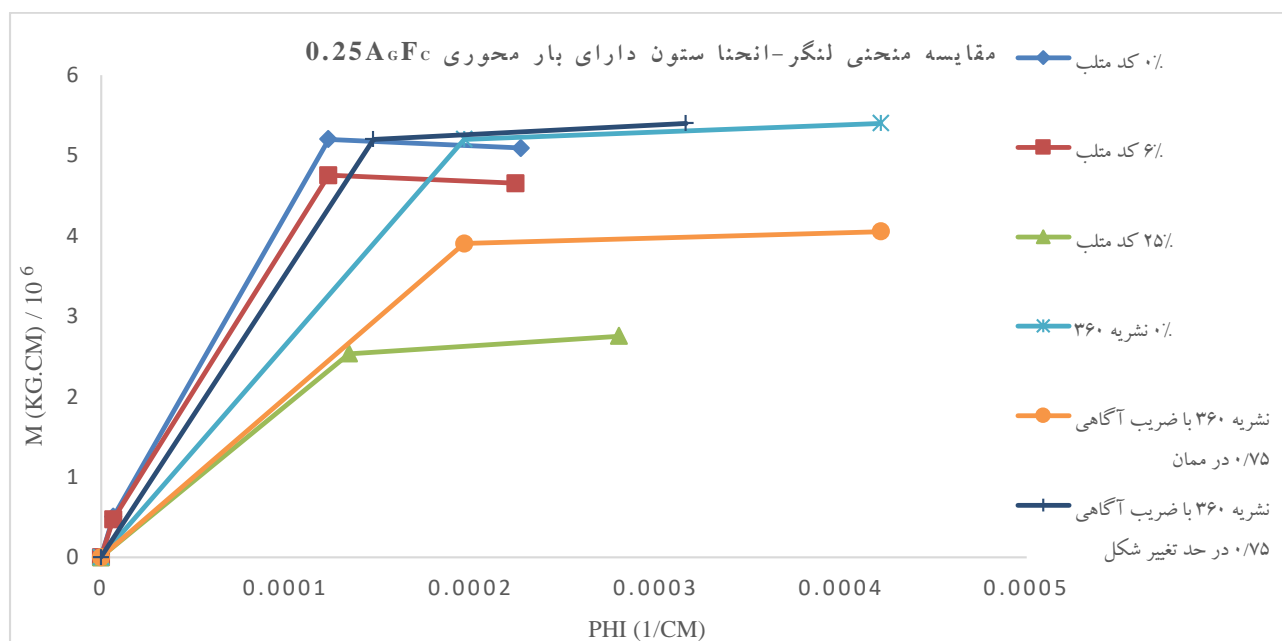
۲-۵- مقایسه مفاصل غیر خطی ستون‌ها در حالات مختلف

مقطع ستون‌ها ۴۰×۴۰ دارای ۱۲ آرماتور ۲۴ می‌باشد. آنالیز لنگر-انحنای مقطع ستون تحت سطوح مختلف بار محوری ۰، $0.1A_gF_c$ ، $0.25A_gF_c$ ، $0.4A_gF_c$ و $0.5A_gF_c$ انجام گرفته و نمودارهای اندرکنش بارمحوری-لنگر برای حالات بدون خوردگی، ۰.۶٪ و ۰.۲۵٪ خوردگی در شکل ۷ حاصل شده‌است:



شکل ۷: منحنی اندرکنش ستون در خوردگی ۰٪، ۰.۶٪ و ۰.۲۵٪

همان گونه که در شکل ۸ مشاهده می شود، به دلیل وجود بار محوری تقریباً زیاد به تدریج از شکل پذیری مقاطع کاسته شده و منحنی های ۰٪ و ۶٪ حاصل از کد متلب، کاهش ظرفیت نهایی نسبت به لنگر تسلیم را نشان می دهند. همچنین مشابه نمودار تیرها شاهد کاهش جزئی انحنای نهایی در خوردگی ۶٪ و افزایش آن در خوردگی ۲۵٪ هستیم.



شکل ۸: مفاصل غیرخطی ستون تحت سناریوهای خوردگی تعریف شده - بار محوری $0.25A_gF_c$

جدول ۳: نتایج آنالیز ستون تحت اثر بار محوری $0.25A_gF_c$ در خوردگی ۰٪، ۶٪ و ۲۵٪

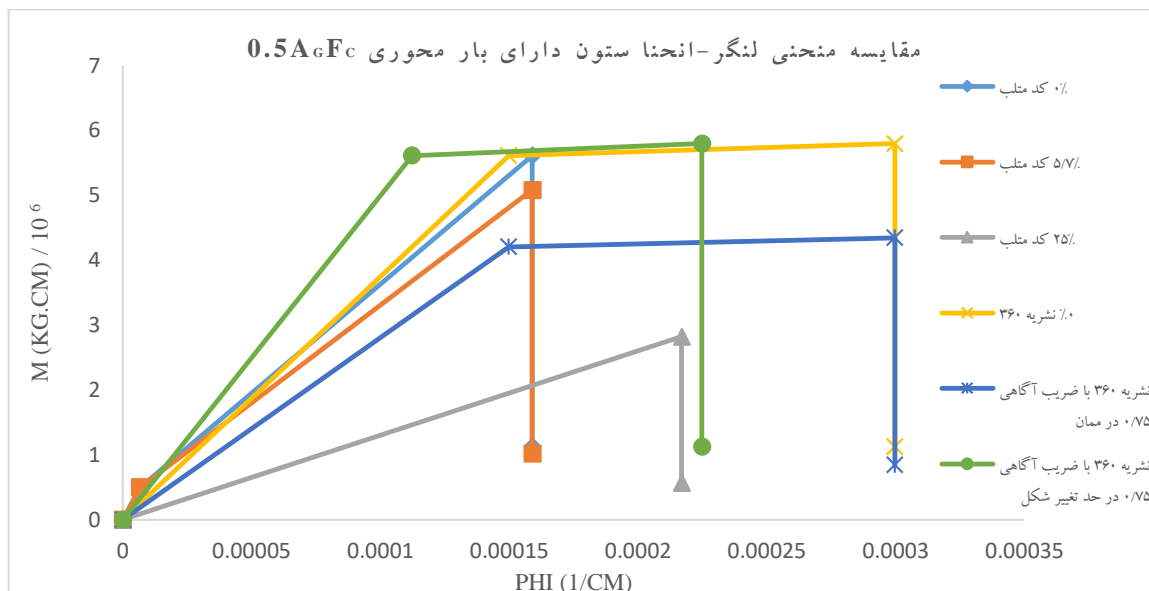
نقطه	۰٪		۶٪		۲۵٪	
	انحنا	لنگر	انحنا	لنگر	انحنا	لنگر
•	•	•	•	•	•	•
ترک خوردگی	۰,۰۰۰۰۰۶۶۴	۴۹۹۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۶۶۴	۴۶۹۰۰۰	•	•
تسلیم	۰,۰۰۰۱۲۳	۵۲۰۰۰۰	۰,۰۰۰۱۲۳	۴۷۵۰۰۰	۰,۰۰۰۱۳۴	۲۵۳۰۰۰
نهایی	۰,۰۰۰۲۲۷	۵۰۹۰۰۰	۰,۰۰۰۲۲۴	۴۶۵۰۰۰	۰,۰۰۰۲۸	۲۷۵۰۰۰

جدول ۴: نتایج آنالیز ستون تحت اثر بار محوری $0.25A_gF_c$ - مقادیر پیشنهادی نشریه ۳۶۰

نقطه	نشریه ۳۶۰		نشریه ۳۶۰ با ضریب آگاهی ۰,۷۵ در حد تغییر شکل		نشریه ۳۶۰ با ضریب آگاهی ۰,۷۵ در حد تغییر شکل	
	انحنا	لنگر	انحنا	لنگر	انحنا	لنگر
•	•	•	•	•	•	•
تسلیم	۰/۰۰۰۱۹۶۳	۵۲۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱۹۶۳	۳۹۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱۴۷۲	۵۲۰۰۰۰
نهایی	۰/۰۰۰۴۲۱۳	۵۳۹۸۶۷۳	۰/۰۰۰۴۲۱۳	۴۰۴۹۰۰۵	۰/۰۰۰۳۱۵۹	۵۳۹۸۶۷۳

انحنا برحسب (1/cm) و لنگر بر حسب (kg.cm) آمده است.

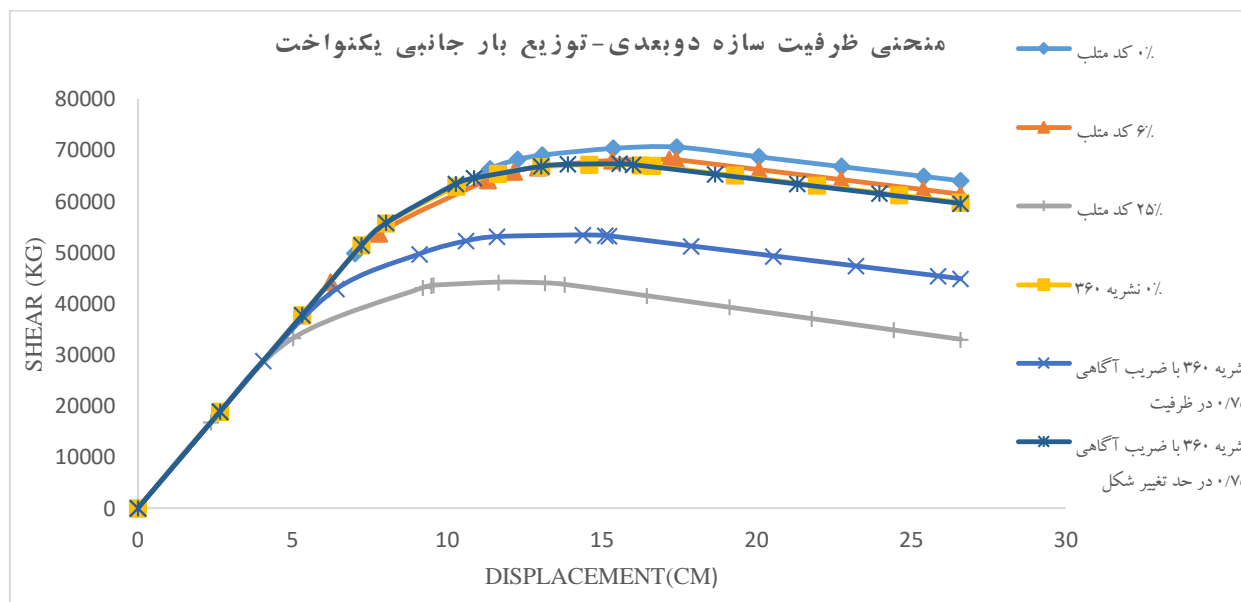
در شکل ۹ منحنی رفتار مقطع تحت بار محوری $0.5A_gF_c$ ارائه شده است. مشاهده می شود در نمودارهای ۰٪ و ۶٪ و ۲۵٪ کد متلب، به دلیل حضور بار محوری زیاد، رفتار مقطع کاملاً ترد است و شکست در بتن فشاری پیش از تسلیم آرماتورهای کششی رخ می دهد.



شکل ۹: مفاصل غیرخطی ستون تحت سناریوهای خوردگی تعریف شده - بار محوری $0.5A_gF_c$

۳-۵- نمودار ظرفیت سازه

در انتها با توجه به مشخصات رفتاری هر عضو تحت سناریوهای مختلف خوردگی که در بخش ۴-۱ معرفی شد، قاب بتن آرمه مورد نظر تحلیل شد و نمودار نیروی برش پایه در مقابل جابجایی نقطه کنترل یا مرکز جرم بام در هر حالت بدست آمد. (شکل ۱۰)



شکل ۱۰: منحنی برش پایه-تغییر مکان سازه مورد مطالعه تحت سناریوهای مختلف

از مقایسه نتایج کد متلب مشاهده می‌شود در خوردگی ۶٪ نسبت به حالت بدون خوردگی برش پایه ۳،۵٪ و در خوردگی ۲۵٪، ۴۱٪ کاهش یافته است. همان طور که ملاحظه می‌شود اعمال ضریب آگاهی ۰،۷۵ در حد تغییر شکل مقاطع، تأثیری بر منحنی ظرفیت سازه ندارد. زیرا مقاطع تحت اثر پوش وارده به انتهای ظرفیت تغییر شکل خود نزدیک نشده‌اند. یعنی در سازه مورد مطالعه، مفاصل پلاستیک نقطه D را رد نکرده‌اند. هم‌چنین اعمال ضریب آگاهی ۰،۷۵ در ظرفیت مقاطع برای خوردگی متوسط (۶٪) غیراقتصادی و برای خوردگی شدید (۲۵٪) غیرایمن است.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا مکانیزم‌های خوردگی فولاد در اعضای بتن آرمه بررسی گردید، سپس چگونگی لحاظ اثرات خوردگی در منحنی لنگر-انحنای مورد مطالعه قرار گرفت. سرانجام با استفاده از مطالعه موردی قاب دو بعدی، رفتار لرزه ای اعضا و کل سازه، تحت سناریوهای مختلف خوردگی مورد نظر در این تحقیق با رویکرد نشریه ۳۶۰ مقایسه شود. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل قاب مذکور نتایج زیر بدست آمد:

- نتیجه حاصل از نشریه ۳۶۰ در حالت بدون خوردگی نسبت به واقعیت اندکی محافظه کارانه است.
- در خوردگی ملایم (۰.۶٪) نسبت به حالت بدون خوردگی، لنگر نهایی و انحنای نهایی اندکی کاهش می‌یابد.
- در خوردگی شدید (۲.۵٪) لنگر نهایی کاهش چشمگیر و انحنای نهایی افزایش می‌یابد.
- پیش‌نهاد نشریه ۳۶۰ پیرامون اعمال ضریب آگاهی برای خوردگی در مورد اعضای نیرویی در ظرفیت و تغییر شکلی در حد تغییر شکل، با نتیجه اینکی و همکاران (عدم تغییر در انحنای نهایی بر اثر خوردگی) و یالکینر و همکاران و نمودارهای مطالعه حاضر تفاوت دارد.
- پیشنهاد می‌شود در نشریه ۳۶۰ جهت اعمال اثرات خوردگی، ضریب آگاهی به جای حد تغییر شکل، همواره ظرفیت را کاهش دهد.
- همچنین اعمال ضریب آگاهی ۰.۷۵ در ظرفیت مقاطع برای خوردگی متوسط (۰.۶٪) غیراقتصادی و برای خوردگی شدید (۲.۵٪) غیرایمن است.

مراجع

- [۱] شایان فر محسنعلی، قانونی بقا محمد. مطالعه اثرات خوردگی آرماتورها در باربری ستون‌های بتن آرمه پل‌ها به روش المان محدود غیر خطی، مجله عملی-پژوهشی شریف، دوره ۲-۲۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۱، صفحه ۵۹-۶۸.
- [2] Salari, M.R. and Spacone, E. (2001). Finite element formulations of one-dimensional elements with bond-slip. *Engineering structures*, 23(7), pp.815-826.
- [3] Shayanfar, M.A., Barkhordari, M.A. and Ghanooni-Bagha, M. (2015). Estimation of Corrosion Occurrence in RC Structure Using Reliability Based PSO Optimization. *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, 59(4), p.531.
- [4] Simioni, P. (2009). *Seismic response of reinforced concrete structures affected by reinforcement corrosion*. Doctoral dissertation. University of Florence.
- [5] Al-Sulaimani, G.J., Kaleemullah, M. and Basunbul, I.A. (1990). Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members. *Structural Journal*, 87(2), pp.220-231.
- [6] Maalej, M., Ahmed, S.F. and Paramasivam, P. (2003). Corrosion durability and structural response of functionally-graded concrete beams. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), pp.307-316.
- [7] M Mangat, P.S. and Elgarf, M.S. (1999). Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement. *Structural Journal*, 96(1), pp.149-158.
- [8] Ou, Y.C., Tsai, L.L. and Chen, H.H. (2012). Cyclic performance of large-scale corroded reinforced concrete beams. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(4), pp.593-604.
- [9] Ma, Y., Che, Y. and Gong, J. (2012). Behavior of corrosion damaged circular reinforced concrete columns under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 29, pp.548-556.
- [10] Kivell, A., Palermo, A. and Scott, A. (2012). Corrosion Related Bond Deterioration and Seismic Resistance of Reinforced Concrete Structures. In: *ASCE/SEI Structures Congress*. Chicago, Illinois, USA (pp. 29-31).
- [11] Inci, P., Goksu, C., Ilki, A. and Kumbasar, N. (2012). Effects of reinforcement corrosion on the performance of RC frame buildings subjected to seismic actions. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 27(6), pp.683-696.
- [12] 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.
- [۱۳] محسنعلی شایانفر، محمد قانونی بقا، "آموزش کاربردی روش‌های مقاوم سازی ساختمان‌ها"، انتشارات فدک‌ایستیس، ۱۳۹۲
- [14] International federation for structural concrete (FIB). (2006). *Model code for service life design*. Switzerland, p.110.
- [15] Apostolopoulos, C.A. and Papadakis, V.G. (2008). Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. *Construction and Building Materials*, 22(12), pp.2316-2324.

- [۱۶] قانونی بقاء، محمد، " مطالعه اثرات خوردگی آرماتورهای طرفیت باربری ستون‌ها به روش المان محدود غیرخطی " ، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، زمستان ۱۳۸۸.
- [17] Rodriguez, J. and Andrade, C. (2001). *CONTECVET—a validated user's manual for assessing the residual service life of concrete structures*. Madrid: GEOCISA.
- [18] Rodriguez, J., Ortega, L.M. and Casal, J. (1994). 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).
- [19] Vu, K.A.T. and Stewart, M.G. (2000). Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models. *Structural safety*, 22(4), pp.313-333.
- [۲۰] قانونی بقاء، محمد، " برآورد کاهش ظرفیت اعضای قابی سازه های بتن آرمه تحت اثر خوردگی آرماتورها "، رساله دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران، اردیبهشت ۱۳۹۴.
- [21] Kwak, H.G. and Kim, S.P. (2002). Nonlinear analysis of RC beams based on moment–curvature relation. *Computers & structures*, 80(7), pp.615-628.
- [22] Scott, B.D., Park, R. and Priestley, M.J.N. (1982). Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates. *ACI journal*, 79(1), pp.13-27.
- [۲۳] سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود (نشریه شماره ۳۶۰)، ۱۳۸۵.