



## ارزیابی رفتار بار تغییر شکل ستون و تیرهای بتنی تحت اثر خوردگی در سنین مختلف با استفاده از مدل سازی نرم افزاری

معین بیگ زاده

گروه عمران، دانشگاه پیام نور، تهران شمال، ایران.

### چکیده

خوردگی آرماتور تأثیرات زیادی بر متعددی بر رفتار سازه های بتن مسلح می گذارد. زمانی که خوردگی میلگردها در سازه بتن مسلح زیاد می شود، با استفاده از سازه باعث می شود که آسیب کلی ایجاد شود و یا موجب تخریب قسمتی از ستون در کل تمام ساختمان شود. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار Abaqus به ارزیابی رفتار تیر و ستون های بتنی تحت اثر خوردگی پرداخته شد. پس از انجام صحت سنجی برای بررسی دقیق تغییرات ایجاد شده ناشی از پدیده خوردگی در سازه، سعی شده است طیف وسیعی از میزان خوردگی آرماتورهای مختلف انتخاب شد. مد سازی های انجام شده برای محاسبه نتایج المان های ستون و تیر، با میزان ۳۰، ۱۰، ۰ و ۵۰ درصد بود. نتایج بررسی نشان داد که با توجه به نتایج خروجی مدل ها کاهش سطح مقطع آرماتورها بر اثر افزایش درصد خوردگی، سبب می شود که رفتار سازه ترد تر شود و باعث کاهش شکل پذیری سازه گردد. این میزان در بیشترین میزان خوردگی حدود ۱/۰۲۵ است. همچنین با کاهش سطح مقطع آرماتورها بر اثر افزایش خوردگی میزان تنش قابل تحمل در آرماتورها روندی کاهشی دارد و در سازه های با ۳۰ و ۵۰ درصد خوردگی این میزان ثابت شده است و در نتیجه ظرفیت باربری آن ها کاهش پیدا می کند. میزان ظرفیت باربری قاب ها با افزایش میزان خوردگی روند کاهشی داشت. به نحوی که در بیشترین میزان خوردگی، حدود ۲/۷ برابر کاهش ظرفیت باربری مشاهده شد.

**واژگان کلیدی:** خوردگی، بتن، تیر، ستون، آباکوس، شکل پذیری، میلگرد



## مقدمه

بتن مسلح به عنوان یکی از پر استفاده مواد و مصالح در مهندسی عمران است. زیرا به دلایل گوناگونی رفتاری غیرخطی را تحت شرایط مختلف بارگذاری از خود نشان می دهد. اتفاق خوردگی آرماتورها در سازه های بتن مسلح اثرات زیان بار و جدی بر رفتار سازه های ما دارد. خوردگی بر سختی، شکل پذیری و ظرفیت باربری سازه بتنی مؤثر است. ایجاد خرابی در سازه ها به دلیل اثرات خوردگی، جدی بودن آن را تأیید می کند. خوردگی آرماتورها یکی از اصلی ترین عوامل ایجاد خرابی عضوهای بتن آرمه است. طراحی نامناسب، انتخاب مصالح نامرغوب و از همه با اهمیت تر در نظر نگرفتن شرایط محیطی خورنده در طول محاسبات ممکن است سبب خرابی های زیاد ناشی خوردگی در اعضای بتن آرمه شود. مشکلات ناشی از خوردگی میلگردهای ستون سازه بتن آرمه باعث ضعیف در تیر و ستون در عضو بتن آرمه تا خرابی های جبران ناپذیر می شود. برای تحلیل یک سازه دچار آسیب شده، نیاز است تا آسیب های وارده، مانند خوردگی آرماتور را به نوعی در مدل سازی های عددی اعمال شود. خوردگی آرماتور تأثیرات زیادی و متعددی بر رفتار سازه های بتن مسلح می گذارد. زمانی که خوردگی میلگردها در سازه بتن مسلح زیاد می شود، با استفاده از سازه باعث می شود که آسیب کلی ایجاد شود و یا موجب تخریب قسمتی از ستون در کل تمام ساختمان شود. بتن به عنوان یکی از پر استفاده ترین مصالح ساختمانی در ایران و دنیا شناخته شده است. خوردگی فولاد به عنوان فرآیند تخریب آرماتورهای فولادی ناشی از واکنش شیمیایی در بتن در اثر اعمال محیطی تعریف می شود. هنگامی که فولاد با آب یا کلرید واکنش می دهد، واکنش شیمیایی رخ می دهد و در نتیجه لایه ای از مقیاس در اطراف میل فولادی تشکیل می شود که به نام زنگ زدگی شناخته می شود. در نتیجه تشکیل تدریجی زنگ در طول زمان، حجم آرماتورهای فولادی افزایش می یابد و تنش داخلی در بتن ایجاد می شود که باعث ترک خوردن، پوسته شدن و لایه برداری بتن می شود. (موسا، ۲۰۱۶) با گذشت زمان، فولاد عملکرد خود را از دست می دهد. خوردگی فولاد یک مشکل ساختاری اصلی است که اغلب با یک نگرانی جدی در مورد دوام مرتبط است. اگر میل فولادی به طور موثر و سریع درمان نشود، زنگ زدگی در کل میل فولادی رخ می دهد (احمد، ۲۰۰۳، برتو، ۲۰۰۴). بنابراین، قبل از اینکه خوردگی به ریزش جزئی یا کلی سازه تبدیل شود، باید اقدام فوری برای خشک کردن میل فولادی انجام شود به دلیل شرایط محیطی تهاجمی، چسبندگی بین آرماتور و بتن بدتر می شود. این عامل بر ایمنی و کارایی ساختمان ها و سازه ها تأثیر بسزایی دارد. استحکام چسبندگی بین آرماتور و بتن در فرآیند خوردگی کاهش می یابد و بنابراین نیاز به طول لنگر بیشتر آرماتور دارد. هر چه طول لنگر بیشتر باشد، تضمین بیشتری برای عدم تخریب آرماتور در بتن تا زمانی که طول عمر عناصر بتن مسلح به پایان رسیده است، بیشتر می شود. پارامترهای مختلف موثر بر مقاومت چسبندگی آرماتور در عناصر بتن مسلح در نظر گرفته شده است. نسبت ضخامت لایه محافظ و قطر آرماتور ( $c/ds$ ) بر قدرت چسبندگی تأثیر می گذارد. با نسبت بالاتر ( $c/ds$ ) از دست دادن قدرت چسبندگی کمتر از نسبت ( $c/ds$ ) کمتر است. از دست دادن جرم آرماتور یک پارامتر مهم است و می تواند سطح خوردگی را تعیین کند. این مقدار می تواند برای توسعه همبستگی بین خوردگی، ترک خوردگی، چسبندگی و مقاومت نهایی عناصر بتن مسلح مورد استفاده قرار گیرد (لی، ۲۰۰۲، وین، ۲۰۰۳).

آسانی دسترسی به اجزاء تشکیل دهنده، اقتصادی بودن، شکل پذیری و پایداری نسبتاً بالای این مصالح باعث توجه روزافزون به آن شده است. البته همانند دیگر مصالح، انتخاب مناسب اجزاء، نحوه تولید و کنترل کیفیت از عوامل مؤثر در کاربرد بیشتر بتن خواهند بود. خوردگی میلگردها و آرماتورها یکی از اصلی ترین عوامل ایجاد آسیب در اعضای بتن آرمه است. عوامل مختلفی مثل کربناسیون، نفوذ یون کلر یا حملات سولفاتی ممکن است منجر به شروع و ایجاد خوردگی در میلگردهای فولادی شود. بنابراین رفتار و عملکرد ساختمان بتنی مسلح تحت اثر خوردگی میلگردها ممکن است نسبت به حالت اولیه طراحی سازه متفاوت باشد. همچنین، میزان تحمل بار توسط المان های در معرض خوردگی بر اساس شکل خرابی المان نسبت به آنچه در طراحی های اولیه در نظر گرفته شده، تغییر کند.

در این پژوهش با استفاده از نرم افزار Abaqus به ارزیابی رفتار تیر و ستون های بتنی تحت اثر خوردگی پرداخته می شود.



## روش تحقیق

تحلیل المان محدود (FEA) استفاده از محاسبات، مدل‌ها و شبیه‌سازی‌ها برای پیش‌بینی و درک چگونگی رفتار یک شی تحت شرایط فیزیکی مختلف است. مهندسان از FEA برای یافتن آسیب‌پذیری‌ها در نمونه‌های اولیه طراحی خود استفاده می‌کنند. FEA از روش اجزای محدود (FEM) استفاده می‌کند، یک تکنیک عددی که ساختار یک شی را به چندین قطعه یا عنصر برش می‌دهد و سپس عناصر را در نقاطی به نام گره‌ها دوباره به هم متصل می‌کند. FEM مجموعه‌ای از معادلات جبری را ایجاد می‌کند که مهندسان، توسعه دهندگان و دیگر طراحان می‌توانند از آنها برای انجام تجزیه و تحلیل اجزای محدود استفاده کنند. اغلب، تجربیات فیزیکی یک محصول - مانند رفتار ساختاری یا سیال و انتقال حرارتی آن - با استفاده از معادلات دیفرانسیل جزئی (PDEs) توصیف می‌شوند. تجزیه و تحلیل المان محدود به عنوان راهی برای رایانه‌ها برای حل PDE های خطی و غیرخطی پدیدار شد. با این حال، مهم است که توجه داشته باشید که FEA تنها یک راه حل تقریبی ارائه می‌دهد. این یک رویکرد عددی برای یافتن نتایج واقعی معادلات دیفرانسیل جزئی است. استفاده از تحلیل المان محدود می‌تواند تعداد نمونه‌های اولیه فیزیکی ایجاد شده و آزمایش‌های انجام‌شده را کاهش دهد و در عین حال تمام اجزا را در مرحله طراحی بهینه کند. نرم افزار تحلیل المان محدود در دهه ۱۹۷۰ با برنامه‌هایی مانند Adina، Abaqus و Ansys ظهور کرد. تعیین رفتار غیرخطی بتن مهم‌ترین مرحله در مدلسازی عددی سازه‌های بتن آرمه می‌باشد. در اکثر ابزارهای محاسباتی، رفتار غیرخطی مصالح تردی نظیر بتن را می‌توان به سه روش مدل ترک پخشی<sup>۱</sup>، مدل شکست ترد<sup>۲</sup> و مدل خسارت پلاستیک بتن<sup>۳</sup> تعریف نمود. هریک از این مدل‌ها این مدل‌ها دارای مزایایی می‌باشند که می‌توانند برحسب نیاز مورد استفاده قرار گیرند. مدل خسارت بتن تنها مدلی است که در هر دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی قابل استفاده است. در این مدل فرض بر این است که ترک کششی و خردشدگی فشاری دو جنبه اصلی مکانیزم گسیختگی بتن می‌باشد و برای مدلسازی شکست مصالح ترد تحت بارگذاری چرخه‌ای طراحی شده است. به‌طوری که امکان بازیابی سختی در طی بارهای رفت و برگشتی وجود دارد. برای بررسی رفتار قاب بتنی تحت تأثیر خوردگی، ابتدا یک قاب بتن مسلح در نرم‌افزار Abaqus مدل‌سازی می‌شود. سپس با اعمال درصدهای مختلف خوردگی در آرماتورهای این قاب بتنی، رفتار آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## صحت سنجی قاب بتن مسلح

برای صحت سنجی از پژوهش آقای چوی<sup>۴</sup> و پارک<sup>۵</sup> استفاده شده است [۵۰].

در شکل ۱ هندسه مدل آورده شده است.

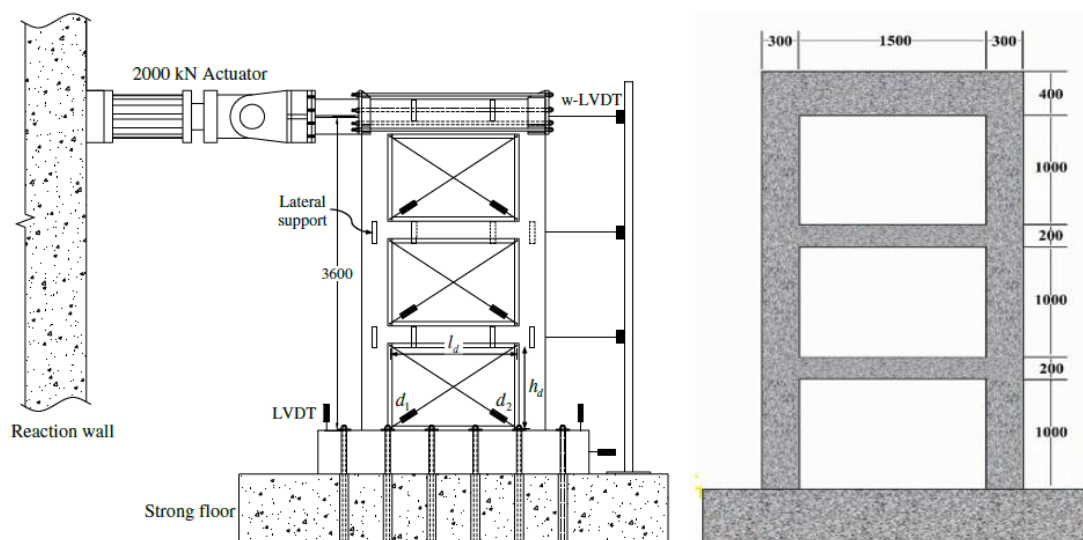
<sup>1</sup> Smearred crack concrete

<sup>2</sup> Brittle crack concrete

<sup>3</sup> Concrete Damage Plastisity

<sup>4</sup> . Choi

<sup>5</sup> . Park



شکل ۱. طرح شماتیک مدل مورد بررسی

در شکل ۳ خرابی قاب بتنی مشاهده می شود.



شکل ۲ خرابی سازه بتنی

در جدول ۱ مشخصات آرماتورها آمده است.

جدول ۱ مشخصات آرماتورها و محل قرارگیری

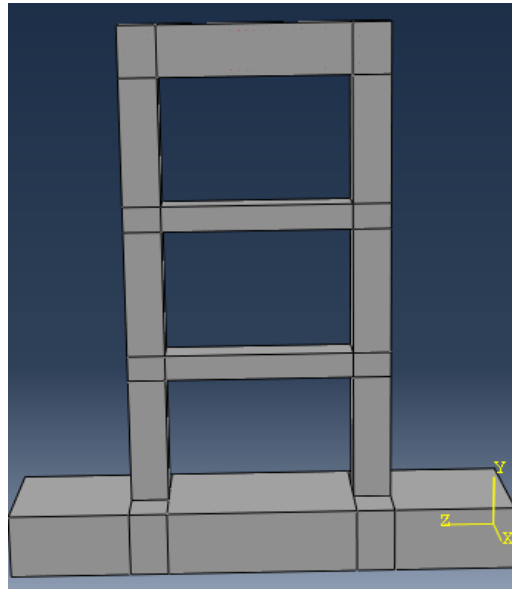
محل آرماتور گذاری		قطر (mm)	تعداد	تنش تسلیم (MPa)
ستون ها با مقطع مربعی		22	6	۴۳۰
		25	2	۴۴۳
تیرها		16	4	۴۷۱
تیر	ستون	10	@ 50 mm	۴۸۶
	تیر	10	@ 60 mm	

همچنین در جدول ۲ مشخصات مصالح بتنی آورده شده است.

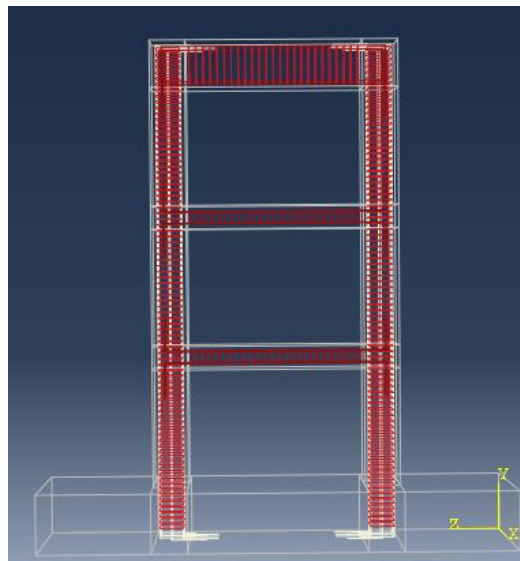
جدول ۲ مشخصات مصالح بتنی

جرم مخصوص Kg-f-s2/m4	وزن واحد حجم Kg/m3	ضریب پواسون (بدون واحد)	مقاومت فشاری بتن Kg/cm2	مدول الاستیسیته MPa
۲۴۰	۲۴۰۰	۰.۲	۳۰۰	۲۵۷۰۰

در شکل ۳ و ۴ طرح مدل نرم افزاری آورده شده است.

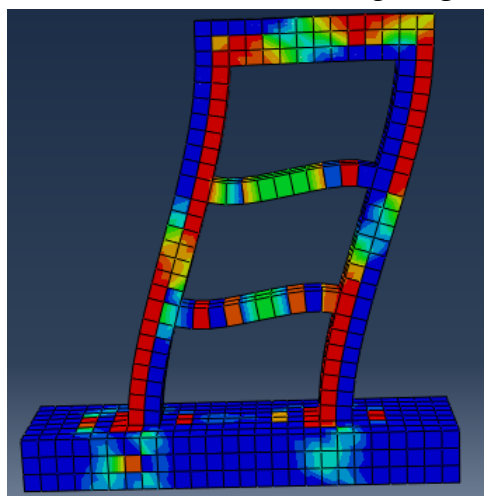


شکل ۴ مدل سازی نرم افزاری

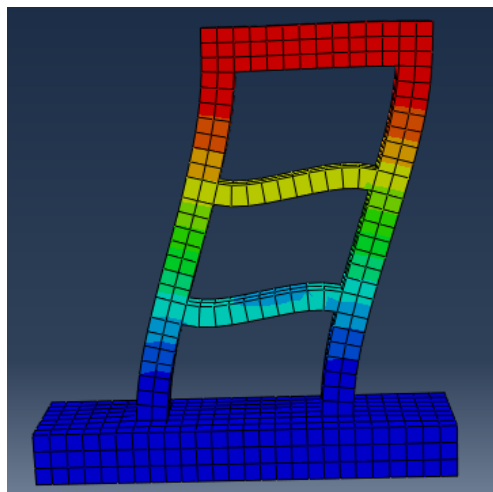


شکل ۴ محل قرارگیری آرماتورها

پس از اعمال بارگذاری، کانتورهای خروجی طبق اشکال ۵ تا ۶ به دست آمد.



شکل ۵ کانتور آسیب



شکل ۶ کانتور جابه جایی

در جدول ۳ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی نرم افزاری آورده شده است.

جدول ۳ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی

اعمال نیرو به صورت کششی		اعمال نیرو به صورت فشاری		
آزمایشگاهی	عددی	آزمایشگاهی	عددی	
-۲۵/۲	-۲۴/۱	۲۸/۱	۳۰/۰۲	$\delta$ (mm)
۰/۷	۰/۷۵	۰/۸	۰/۹	Drift (%)
۷	۷/۲	۶	۶/۷۵	$K^b$ (kN/mm)

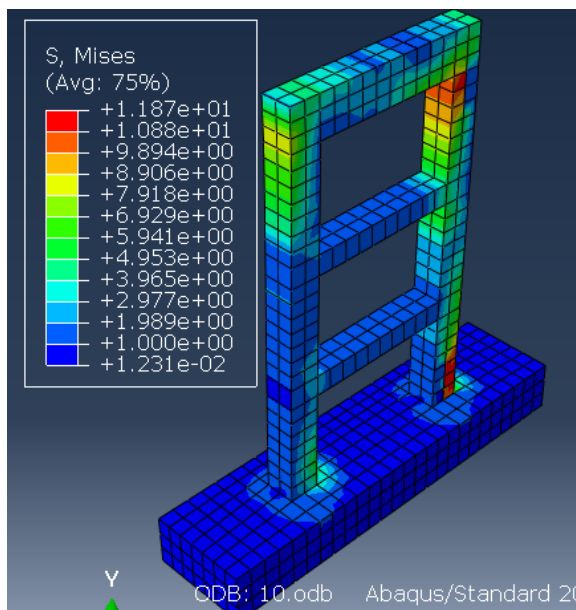
در ادامه با اعمال درصدهای مختلف خوردگی در آرماتورهای این قاب بتنی، رفتار آن مورد بررسی قرار می گیرد.

یافته ها

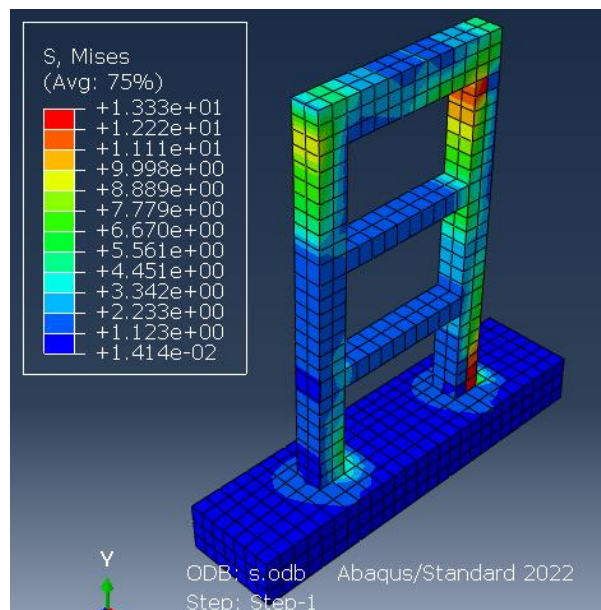
بررسی و مقایسه تاثیر خوردگی در سازه ها



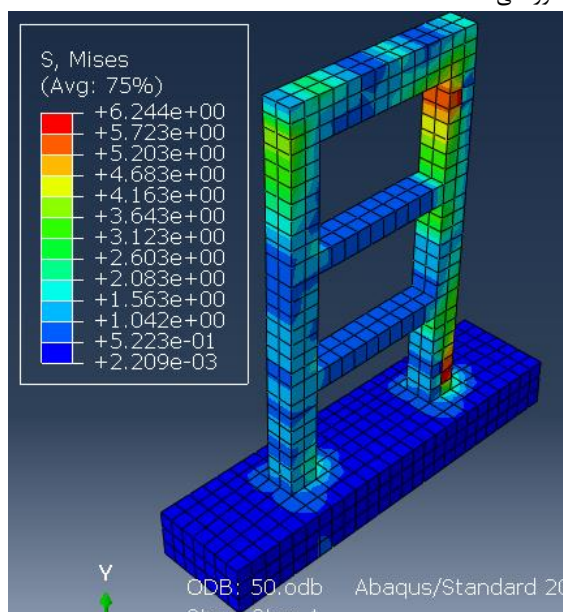
در شکل ۷ و ۹ میزان تنش فون میزس و جابه‌جایی قاب و آرماتورها آورده شده است.



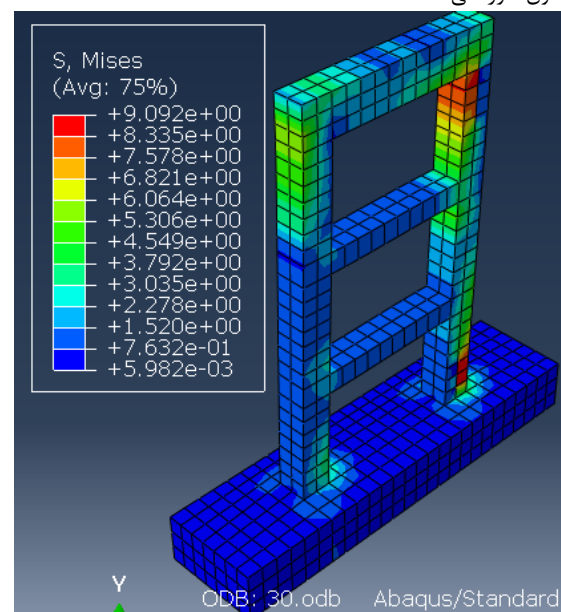
خوردگی ۱۰٪



بدون خوردگی

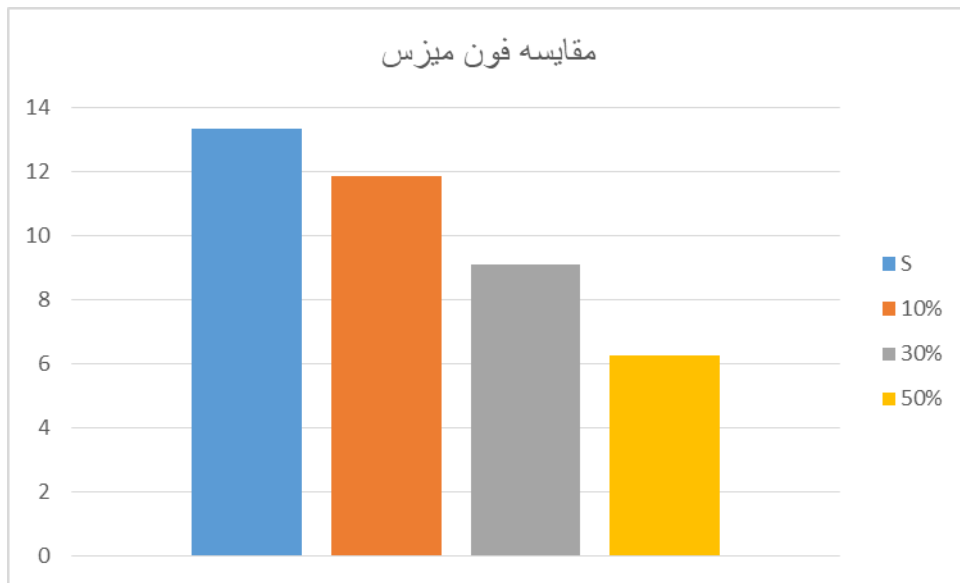


خوردگی ۵۰٪



خوردگی ۳۰٪

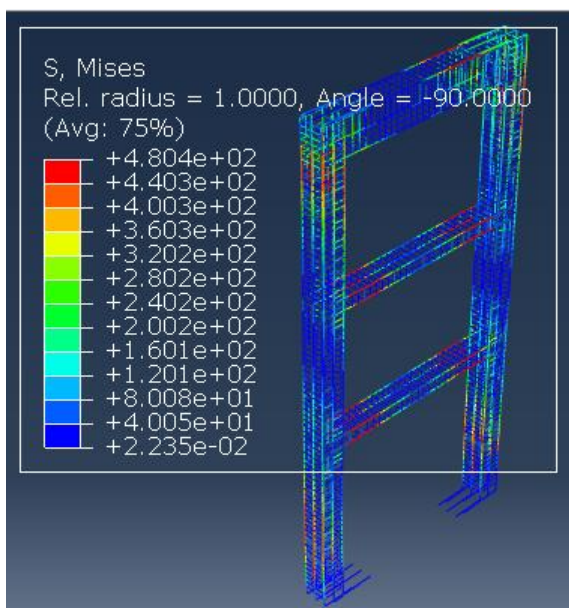
شکل ۷ میزان تنش فون میزس در قاب‌های بتنی



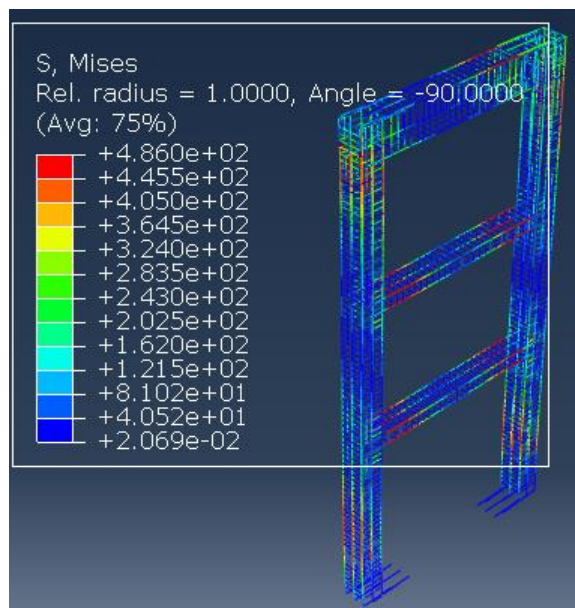
نمودار ۱ مقایسه تنش فون میزس در قابها

باتوجه به شکل ۷ و ۸ با کاهش سطح مقطع آرماتورها بر اثر افزایش خوردگی میزان تنش قابل تحمل در قابها کاهش پیدا کرده است و ظرفیت باربری آنها کاهش پیدا می کند.

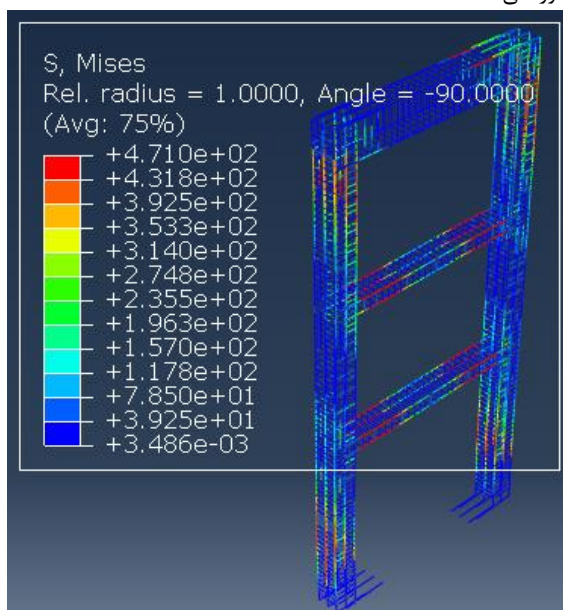




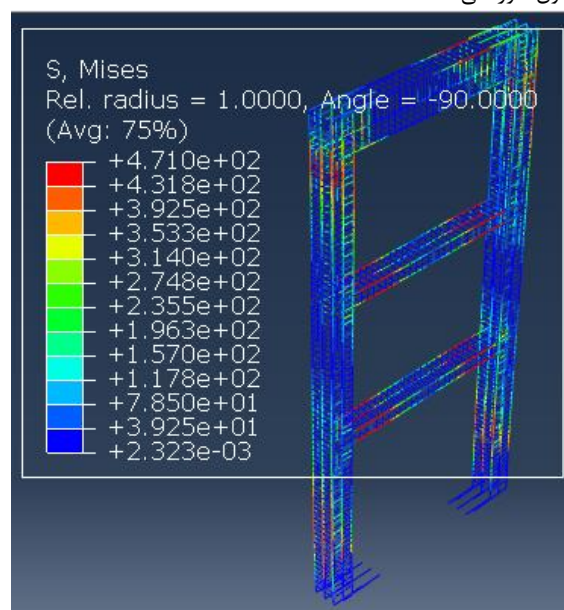
خوردگی ۱٪



بدون خوردگی



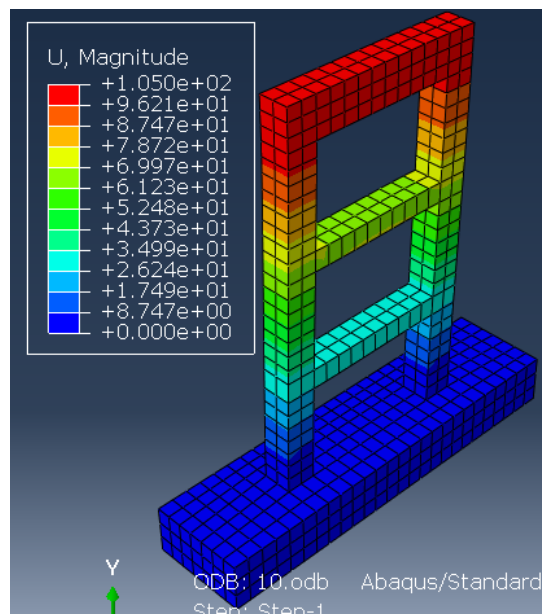
خوردگی ۵٪



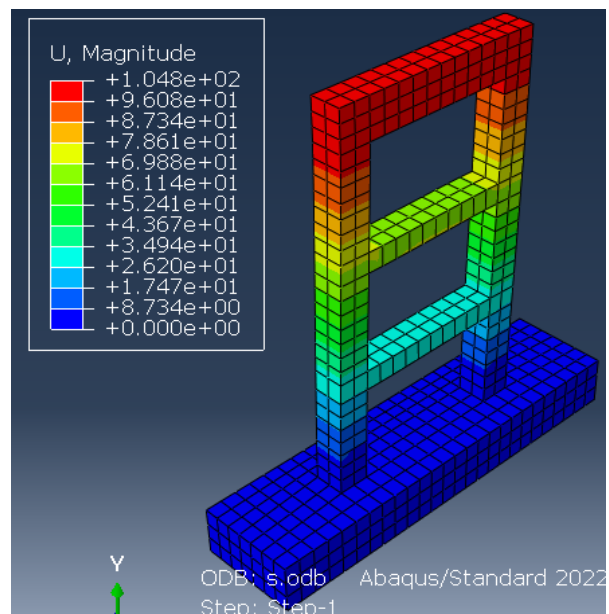
خوردگی ۳۰٪

شکل ۸ میزان تنش فون میزس در آرماتورها

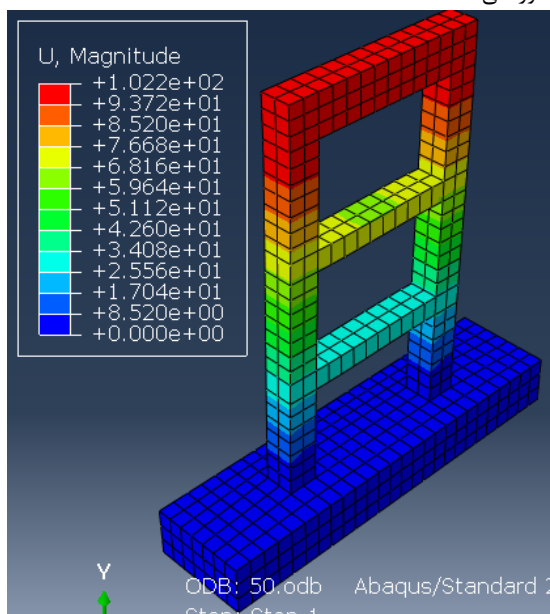
باتوجه به شکل ۸ با کاهش سطح مقطع آرماتورها بر اثر افزایش خوردگی میزان تنش قابل تحمل در آرماتورها روندی کاهشی دارد و در سازه‌های با ۳۰ و ۵۰ درصد خوردگی این میزان ثابت شده است و در نتیجه ظرفیت باربری آن‌ها کاهش پیدا می‌کند.



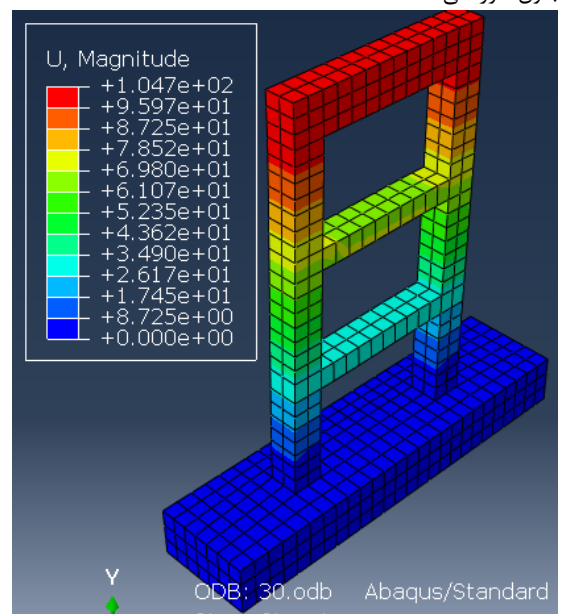
خوردگی ۱۰٪



بدون خوردگی

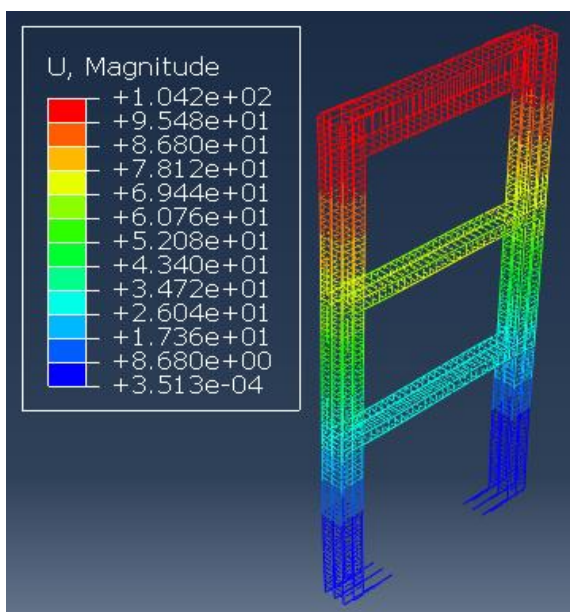


خوردگی ۵۰٪

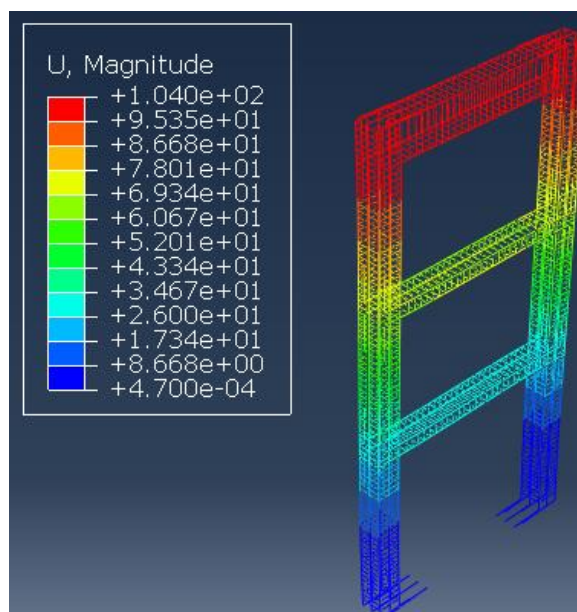


خوردگی ۳۰٪

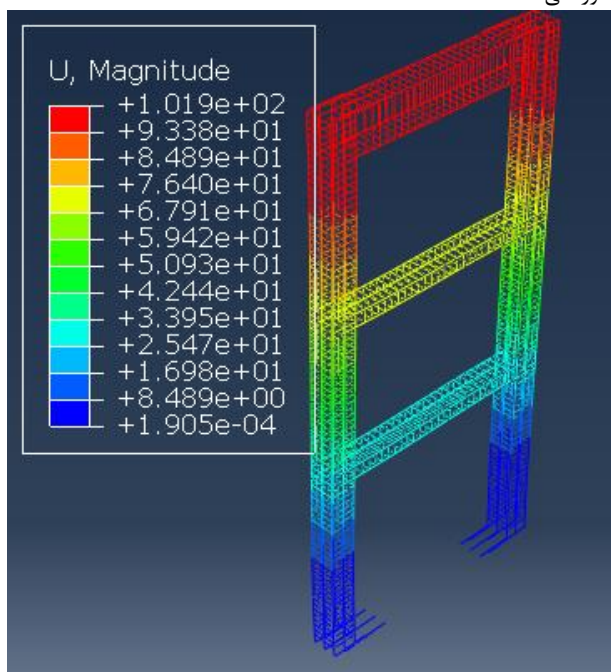
شکل ۹ میزان جابه‌جایی در قاب‌های بتنی



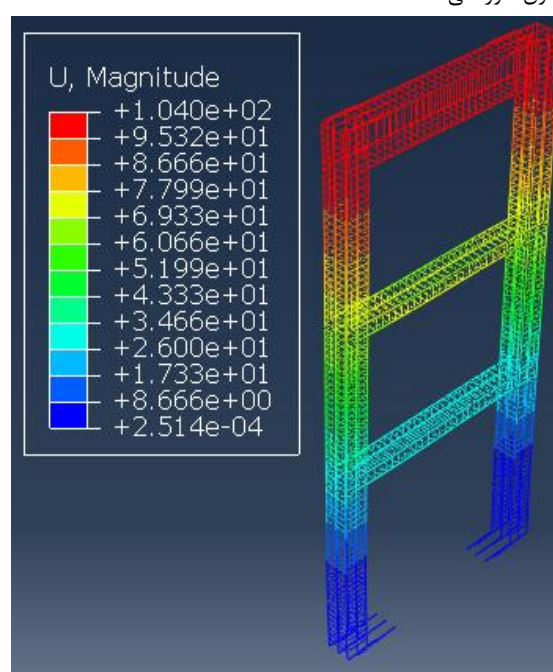
خوردگی ۱۰٪



بدون خوردگی



خوردگی ۵۰٪



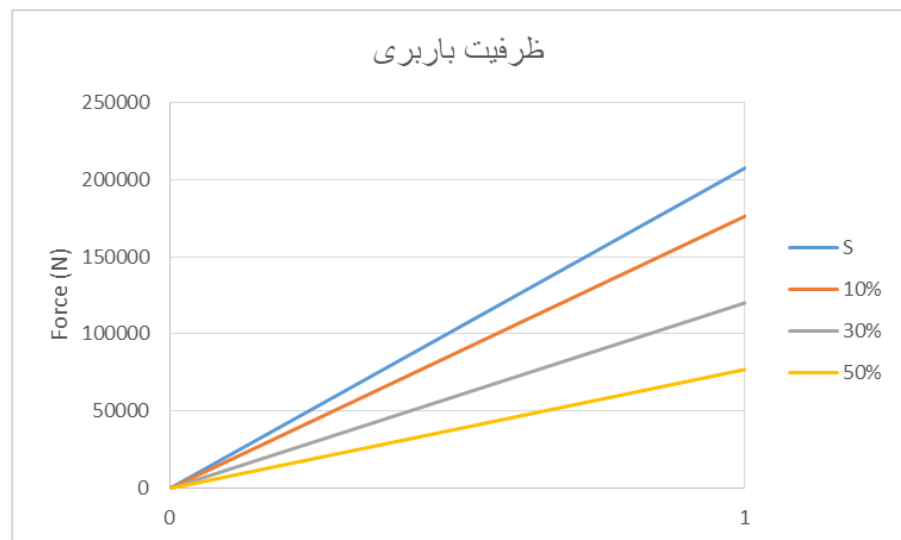
خوردگی ۳۰٪

شکل ۹ میزان جابه‌جایی در آرماتورها

باتوجه به نتایج خروجی مدل‌ها کاهش سطح مقطع آرماتورها بر اثر افزایش درصد خوردگی، سبب می‌شود که رفتار سازه ترد تر شود و باعث کاهش شکل پذیری سازه گردد.

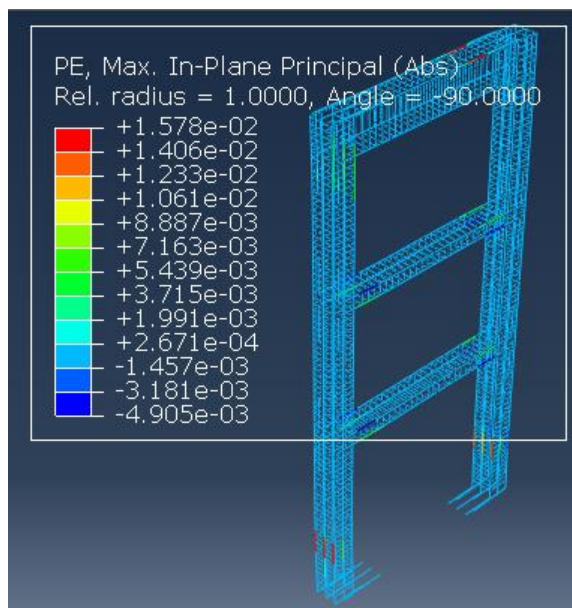
در شکل ۹ میزان ظرفیت باربری قاب‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.



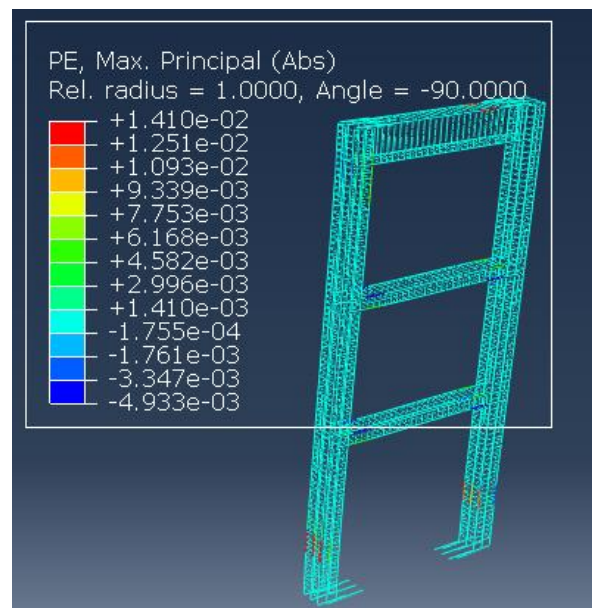


نمودار ظرفیت باربری قابها

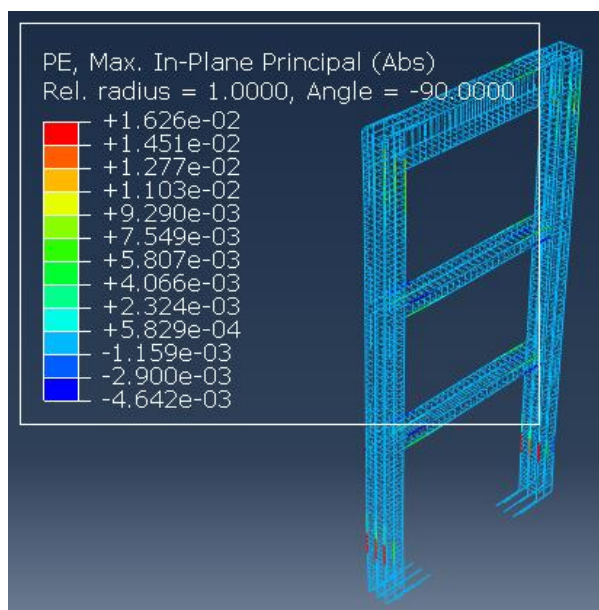
در شکل ۱۰ میزان کرنش پلاستیک آرماتورها با درصد های مختلف خوردگی آورده شده است.



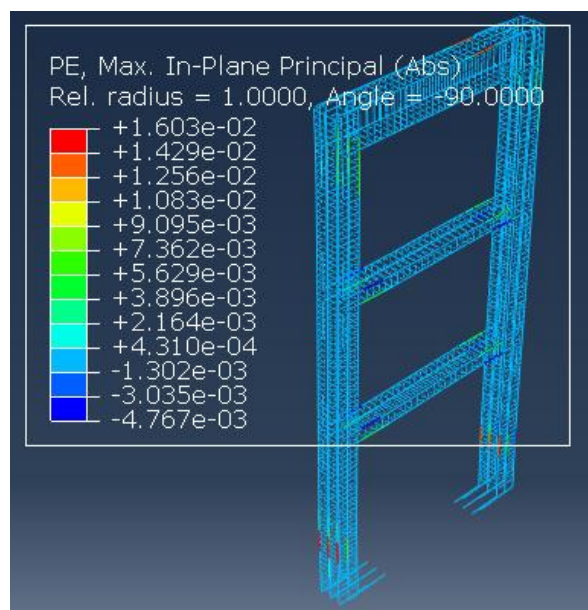
خوردگی ۱۰٪



بدون خوردگی

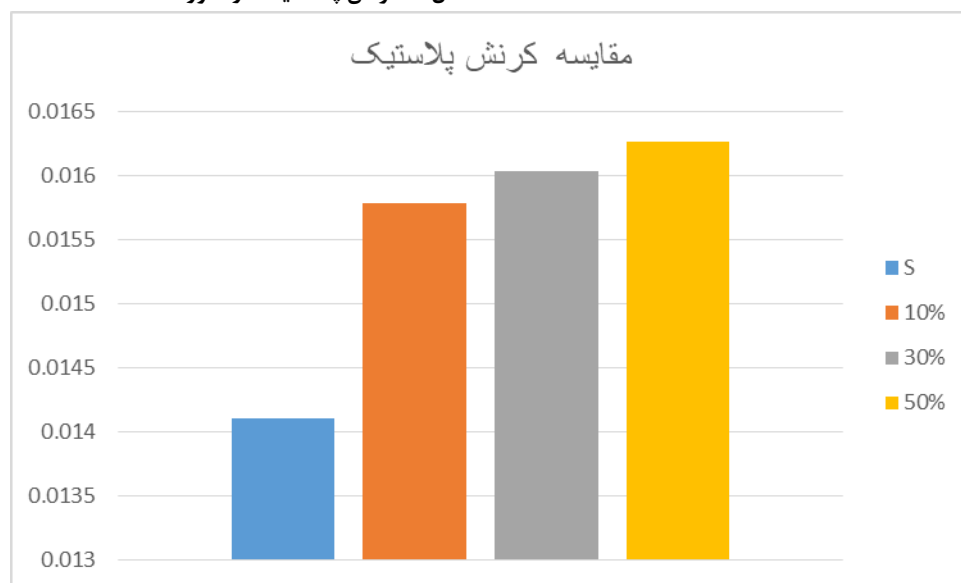


خوردگی ۵۰٪



خوردگی ۳۰٪

شکل ۱۱ کرنش پلاستیک آرماتورها



نمودار ۳ مقایسه کرنش پلاستیک

باتوجه به اشکال با افزایش میزان خوردگی و کاهش سطح مقطع آرماتورها، میلگردها با میزان وارد یکسان به سازه میزان کرنش پلاستیک بیشتری را تجربه می‌کنند.

### بحث و نتیجه‌گیری

خوردگی میلگردها تبعات زیادی برای سازه‌ها و ساختمان‌های بتن‌آرمه ایجاد می‌کند. تحقیقات انجام‌شده نشان داد که پدیده خوردگی در آرماتورها تأثیر زیادی بر کاهش ظرفیت باربری، پایداری و سختی سازه‌ها دارد. با تحقیقات صورت گرفته در حیطه تأثیر هر یک از

نتایج ناشی از خوردگی میلگردها در سازه بتن آرمه مشاهده شد که این تاثیرات علاوه بر اینکه برای سازه بسیار مضر و خطرناک هستند، همیشه تاثیر گذاری آن‌ها با یک مقدار ثابت تغییر نکرده و به دلیل تاثیراتی که بر یکدیگر می‌گذارند در میزان خوردگی‌های مختلف میزان تاثیرگذاری در کاهش میزان مقاومت و سختی و پایداری سازه ثابت نخواهد بود. با نتایج به دست آمده از این کار شناخت به این تاثیرات بیشتر شده و این امکان فراهم می‌گردد که با بررسی میزان خوردگی آرماتورها عوامل تاثیرگذارتر را شناخته و در جهت رفع آن، مقاومت‌سازی‌های لازم را انجام داد. برای مثال اگر کاهش سطح مقطع میلگردها اثر بیشتری دارد باید با تقویت ناحیه کششی المان اقدام کرد.

- با کاهش سطح مقطع آرماتورها بر اثر افزایش خوردگی میزان تنش قابل تحمل در قاب‌ها کاهش پیدا کرده است و ظرفیت باربری آن‌ها کاهش پیدا می‌کند. این مقدار در خوردگی با میزان ۵۰٪ درصد نسبت به سازه بدون خوردگی بیش از ۲ برابر است.
- باتوجه به نتایج خروجی مدل‌ها کاهش سطح مقطع آرماتورها بر اثر افزایش درصد خوردگی، سبب می‌شود که رفتار سازه ترد تر شود و باعث کاهش شکل پذیری سازه گردد. این میزان در بیشترین میزان خوردگی حدود ۱/۰۲۵ است.
- با کاهش سطح مقطع آرماتورها بر اثر افزایش خوردگی میزان تنش قابل تحمل در آرماتورها روندی کاهشی دارد و در سازه‌های با ۳۰ و ۵۰ درصد خوردگی این میزان ثابت شده است و در نتیجه ظرفیت باربری آن‌ها کاهش پیدا می‌کند.
- میزان ظرفیت باربری قاب‌ها با افزایش میزان خوردگی روند کاهشی داشت. به نحوی که در بیشترین میزان خوردگی، حدود ۲/۷ برابر کاهش ظرفیت باربری مشاهده شد.
- با افزایش میزان خوردگی و کاهش سطح مقطع آرماتورها، میلگردها با میزان وارد یکسان به سازه میزان کرنش پلاستیک بیشتری را تجربه می‌کنند. این مقدار در بیشترین میزان خوردگی در مقایسه با سازه بدون خوردگی حدود ۱/۱۵ برابر بود.

## منابع

- Ahmad, S. 2003. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction-a review. *Cement & Concrete Composites* 25:459-71.
- L. Berto, P. Simioni, and A. Saelta, "Numerical modelling of bond behaviour in RC structures affected by reinforcement corrosion," *Engineering Structures*, vol. 30, no. 5, pp. 1375–1385, May 2008.
- Li, C. Q. 2002. Initiation of chloride-induced reinforcement corrosion in concrete structural members-prediction. *ACI Structural Journal* 99(2):133-41.
- Mousa, M. I. (2016). Effect of bond loss of tension reinforcement on the flexural behaviour of reinforced concrete beams. *HBRC journal*, 12(3), 235-241.
- Win, P. P., M. Watanabe, and A. Machida. 2003. Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete. *Cement and Concrete Research* 34(7):1073-79.



## Evaluation of load behavior of concrete columns and beams under the effect of corrosion at different ages using software modeling

**Moein baigvzadeh**

Department of Civil Engineering, Payam Noor  
University, North Tehran, Iran.

### **Abstract - ۱-۱**

Reinforcement corrosion has many effects on the behavior of reinforced concrete structures. When the corrosion of the rebars in the reinforced concrete structure increases, using the structure causes a total damage or causes the destruction of a part of the column in the whole building. In this research, using Abaqus software, the behavior of concrete beams and columns under the effect of corrosion was evaluated. After carrying out validation in order to accurately check the changes caused by the phenomenon of corrosion in the structure, it has been tried to select a wide range of different corrosion levels. The modifications made to calculate the results in beams and columns were 30, 10, 0 and 50%. The results of the investigation showed that according to the output results of the models, the reduction of the cross-sectional area of the reinforcements due to the increase in the percentage of corrosion causes the behavior of the structure to become more brittle and reduces the ductility of the structure. This amount is about 1.025 in the highest corrosion rate. Also, with the reduction of the cross-sectional area of the reinforcements due to the increase in corrosion, the amount of tolerable stress in the reinforcements has a decreasing trend, and in the structures with 30 and 50% corrosion, this amount has been fixed, and as a result, their bearing capacity decreases. The bearing capacity of the frames decreased with the increase in the corrosion rate. In such a way, in the highest corrosion rate, about 2.7 times reduction in load capacity was observed..

**Keywords:** Corrosion, Concrete, Beam, Column, Abaqus, Ductility - ۱-۲