



Research Article

Investigating and improving the seismic performance of CFRP-reinforced LCFST columns using finite element modeling

Babak Alinejad^{۱*}, Hamed Mohammadi^۲

^۱ - *Assistant Professor, Department of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

^۲ - MS student of Structural Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

Received: ۲۱ July ۲۰۲۵; Revised: ۲۷ July ۲۰۲۵; Accepted: ۲۳ August ۲۰۲۵; Published: ۲۳ October ۲۰۲۵

Abstract

Concrete-filled steel tubular (CFST) columns are recognized as a cost-effective alternative to other composite columns, with their most significant advantage being the reduced steel consumption compared to conventional steel-profile columns. In construction practices in countries such as Japan, the use of internal and external stiffening plates is widely common in the connections of such structures. Employing these plates can serve as an effective and efficient method for strengthening CFST column connections. In this research, to validate the finite element model, an experimental specimen of this type of connection, previously studied by Xiong et al. in 2017, was selected, and the numerical and experimental results were compared and verified. Subsequently, using the validated model, 19 numerical models across six different groups—with variables including opening size, concrete compressive strength, application of FRP sheets, columns with variable core concrete sections, and corrugated plates—were analyzed. The results demonstrated that the use of CFRP sheets significantly enhances the ultimate load-bearing capacity and also reduces plastic stress and strain. This led to a decrease in buckling in the connecting plates and transferred stress concentrations to the adjacent columns. Under identical conditions, the specimens strengthened with CFRP sheets exhibited higher load-bearing capacity and a lower rate of strength degradation after reaching peak load. Specifically, the specimen equipped with a CFRP sheet and without any opening, with a load-bearing capacity of 651.1 kN, showed approximately 37.4% higher capacity compared to its counterpart without any reinforcing sheet. Furthermore, this specimen demonstrated ۴۰, ۴۵% and ۲۵, ۶% higher load-bearing capacity along with lower strength degradation compared to specimens with opening diameters of 15 mm and 5 mm, respectively. The combination of corrugated plates with CFRP sheets markedly improved the performance of the models; for instance, Specimen 18 (featuring a corrugated plate with a 2 cm flange size and a CFRP sheet) recorded an average of 48% higher load-bearing capacity than the other specimens.

Keywords: Compressive strength, seismic behaviour, energy absorption, corrugated sheet, CFRP columns

Cite this article as Alinejad B, Mohammadi H. (2025). 'Investigating and improving the seismic performance of CFRP-reinforced LCFST columns using finite element modeling', Civil and Project, 7(8), e227517. doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2025.042626.1394>

ISSN: ۲۶۷۶-۵۱۱X / **Copyright:** © ۲۰۲۵ by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution ۴.۰ International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

بررسی و بهبود عملکرد لرزه‌ای ستون‌های LCFST تقویت شده با CFRP با استفاده از مدل‌سازی به روش اجزاء محدود

بابک علی نژاد^{۱*}، حامد محمدی^۲

۱- استادیار رشته مهندسی عمران-سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-سازه، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

تاریخ دریافت: ۳۰ تیر ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۰۵ مرداد ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۰۱ شهریور ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ آبان

چکیده

ستون‌های پر شده با بتن در لوله‌های فولادی (CFST) به عنوان جایگزینی مقرون به صرفه در مقایسه با سایر ستون‌های کامپوزیتی مطرح هستند که مهم‌ترین مزیت آن‌ها، کاهش مصرف فولاد در مقایسه با ستون‌های تنها با پروفیل فولادی است. در ساخت و سازهای کشورهای مانند ژاپن، استفاده از صفحات داخلی و خارجی به صورت گسترده‌ای در اتصالات این سازه‌ها رواج دارد. به کارگیری این صفحات می‌تواند روشی مؤثر و کارآمد برای تقویت اتصالات ستون‌های CFST باشد. در این پژوهش، به منظور صحت سنجی مدل اجزای محدود، نمونه‌ای آزمایشی از این نوع اتصال که توسط شیونگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ مورد مطالعه قرار گرفته بود، انتخاب و نتایج عددی و آزمایشگاهی آن مقایسه و تأیید شد. سپس با استفاده از مدل صحت سنجی شده، ۱۹ مدل عددی در ۶ گروه مختلف با متغیرهای اندازه بازشو، مقاومت فشاری بتن، استفاده از ورق‌های FRP، ستون با مقاطع متغیر در هسته بتنی و ورق موجدار مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از ورق‌های CFRP تأثیر قابل توجهی در افزایش ظرفیت باربری نهایی داشته و همچنین منجر به کاهش تنش و کرنش پلاستیک می‌شود. این امر باعث کاهش کمانش در ورق‌های اتصال دهنده و انتقال تمرکز تنش به ستون‌های کناری گردید. در شرایط یکسان، نمونه‌های تقویت شده با ورق CFRP از ظرفیت باربری بالاتر و نرخ افت مقاومت کمتری پس از رسیدن به بار حداکثر برخوردار بودند. به طور مشخص، نمونه مجهز به ورق CFRP و فاقد بازشو با ظرفیت باربری ۶۵۱۰۱ کیلونیوتن، حدود ۳۷۰۴ درصد ظرفیت باربری بیشتری را در مقایسه با نمونه مشابه بدون ورق تقویتی نشان داد. همچنین این نمونه در مقایسه با نمونه‌های دارای بازشو به قطر ۱۵ و ۵ میلی‌متر، به ترتیب ۴۰۰۴ و ۲۵۰۶ درصد ظرفیت باربری بیشتر و افت مقاومت کمتری داشت. تلفیق ورق موجدار با ورق CFRP عملکرد مدل‌ها را به طور چشمگیری بهبود بخشید؛ به طوری که نمونه ۱۸ (دارای ورق موجدار با اندازه بال ۲ سانتیمتر و ورق CFRP) به طور متوسط ۴۸ درصد ظرفیت باربری بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها ثبت کرد.

واژه‌های کلیدی: مقاومت فشاری، رفتار لرزه‌ای، جذب انرژی، ورق موجدار، ستون CFRP

۱- مقدمه

ستون‌های مرکب فولادی-بتنی که به صورت مقاطع توپر رایج دایره‌ای، مربعی و مستطیلی با بتن پر شده‌اند، به اختصار ستون‌های CFST (Concrete-Filled Steel Tube) نامیده می‌شوند. نوع پرکاربرد دیگر این ستون‌ها که دارای دو جداره فولادی با بتن در بین آنها هستند، ستون‌های CFDST (Concrete-Filled Double-Skin Steel Tube) نام دارند. پوسته فولادی این مقاطع معمولاً از پروفیل‌های نورد شده سازه‌ای یا لوله‌های فولادی تشکیل می‌شود. برای هسته بتنی نیز می‌توان از بتن‌های معمولی، الیافی، خودتراکم (SCC) یا بتن‌های با مقاومت بالا استفاده نمود. (Han, Li, & Bjorhovde, ۲۰۱۴) ترکیب پوسته فولادی و هسته بتنی، یک سیستم کامپوزیتی کارآمد ایجاد می‌کند که امکان استفاده از انواع سیستم‌های سقف و تیرهای فولادی را فراهم می‌آورد.

ستون‌های CFST ترکیبی از مزایای ستون‌های بتن‌آرمه و فولادی را ارائه می‌دهند. این ستون‌ها از شکل‌پذیری بیشتری نسبت به ستون‌های بتن‌آرمه معمولی برخوردارند و جزئیات اتصالات در آنها مشابه ساختمان‌های با اسکلت فولادی است (AISC, ۲۰۰۵). پر کردن فضای داخلی مقاطع فولادی با بتن نه تنها ظرفیت باربری محوری و خمشی را افزایش می‌دهد، بلکه سختی جانبی آنها را نیز به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای ارتقاء می‌بخشد که این امر در کنترل تغییرمکان نسبی طبقات تحت بارهای لرزه‌ای بسیار حائز اهمیت است. علاوه بر این، وجود بتن در هسته مرکزی، مقاومت ستون را در برابر حریق بهبود می‌بخشد. پارامترهای متعددی بر رفتار این ستون‌ها تأثیرگذارند که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: الف) نسبت لاغری ستون و کمانش موضعی پوسته فولادی، ب) اثر محصورشدگی ارائه شده توسط پوسته فولادی بر مقاومت و شکل‌پذیری هسته بتنی، پ) خواص مصالح شامل نوع فولاد و بتن، تنش‌های پسماند و اثرات گوشه در مقاطع مستطیلی، ت) پدیده‌های خزش و وابستگی به زمان در بتن، و ث) عملکرد اتصالات و مکانیزم چسبندگی بین بتن و فولاد (Tao, Wang, & Yu, ۲۰۱۳; Liao, Han, & He, ۲۰۱۲).

در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای بر روی رفتار این ستون‌ها انجام شده است. برای مثال، وارما و همکاران (۲۰۰۲) رفتار ستون‌های توپر با مقطع مربعی تحت بارهای ترکیبی را مورد بررسی قرار دادند. یافته‌ها به‌طور کلی حاکی از آن است که ستون‌های بتنی محصورشده با پوسته‌های فولادی، به‌ویژه در مناطق لرزه‌خیز، از عملکرد سازه‌ای و لرزه‌ای مطلوبی برخوردار بوده و قابلیت شکل‌پذیری و جذب انرژی بسیار بالایی از خود نشان می‌دهند. (Varma, Ricles, Sause, & Lu, ۲۰۰۲)

۲- تاریخچه تحقیقات گذشته

(Chen et al., ۲۰۲۰) در تحقیقی به مطالعه نمونه‌های آزمایشگاهی در قالب ۵ گروه با بارگذاری خارج از مرکز برای مطالعه خواص مکانیکی ستون‌های SCFST با توجه به نیروی محوری و لنگر خمشی حول محور اصلی مرکز، با استفاده از فاصله خارج از مرکز و جهت خارج از مرکز به عنوان پارامتر متغیر پرداختند. نتایج مدل به خوبی با نتایج تجربی مطابقت دارد. براساس مطالعه تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود با استناد به استانداردهای کشورهای مختلف، فرمولی برای محاسبه پایداری درون صفحه ستون‌های تحت نیروی محوری و خمشی گشتاور حول محور اصلی مرکزی استخراج شد. یافته‌های این مطالعه می‌تواند راهنمایی برای طراحی مهندسی آینده باشد.

(Xu et al., ۲۰۱۶) نتایج یک بررسی تجربی از ستون‌های L شکل متشکل از لوله‌های فولادی پر شده با بتن (ستون‌های LCFST) که توسط صفحات اتصال فولادی به هم متصل شده‌اند، ارائه می‌کند. به‌عنوان نوع جدیدی از ستون‌های مرکب، رفتار ساختاری ستون‌های LCFST که با صفحات اتصال فولادی متصل شده‌اند در این مقاله مورد بحث قرار می‌گیرد. هشت ستون LCFST در مقیاس بزرگ ساخته شده و تحت فشار محوری متحدالمرکز یا فشرده سازی برون محوری دو محوری تا شکست

بارگذاری شدند. نسبت باریکی، ضخامت صفحات اتصال فولادی و خروج از مرکز بار همه در برنامه تجربی مورد مطالعه قرار گرفتند. روابط بار در مقابل جابجایی طولی، انحراف جانبی در ارتفاع وسط، کرنش طولی در ارتفاع میانی و غیره ارائه شده است. نتایج نشان دادند که فرمول‌های پیش‌بینی‌کننده برای محاسبه بارهای نهایی ستون‌های LCFST که با صفحات اتصال فولادی متصل شده‌اند، مشابه دستورالعمل‌های ۳۶۰-۰۵ ANSI/AISC می‌باشد. همچنین استفاده از ستون‌های CFST به طور قابل توجهی به ظرفیت باربری ستون‌ها کمک می‌کند.

(Zhang, Chen, & Xiong, ۲۰۱۸) عملکرد نوع جدیدی از ستون‌های مرکب را بررسی می‌کند: ستون‌های L شکل که شامل لوله‌های فولادی پر شده از بتن است که توسط صفحات فولادی دوگانه عمودی (LCFST-D) متصل شده‌اند. رفتار ساختاری اساسی ستون‌های LCFST-D مورد بحث قرار می‌گیرد. هفت ستون LCFST-D تحت فشار محوری مورد آزمایش قرار گرفتند. در آزمایش‌ها، متغیرها ارتفاع و عرض صفحات فولادی عمودی بودند. نتایج تجربی برای ارزیابی رابطه بار-تغییر شکل، توزیع کرنش و شاخص مقاومت استفاده شد. آزمایش‌ها نشان داد که عملکرد فشاری محوری ستون‌های LCFST-D مطلوب بود و نشان داد که تک‌ستون‌ها در شکل ساختاری ستون LCFST-D با همکاری بیشتری کار می‌کنند. سپس، مدل‌های المان غیرخطی سه بعدی برای تجزیه و تحلیل خواص مکانیکی و رفتار فشاری محوری ستون‌های LCFST-D مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تجزیه و تحلیل اجزای محدود با نتایج تجربی مطابقت خوبی داشت.

(Varma, Ricles, Sause, & Lu, ۲۰۰۲) نیز تحقیقاتی را بر روی رفتار چشمه اتصال ستون‌های CFT انجام دادند. تحقیقات آن‌ها شامل آزمایش بر روی ۱۰ نمونه اتصال خمشی با ابعاد واقعی تحت بار زلزله بود. هر نمونه اتصال تیر بال پهن به ستون جعبه‌ای با جزئیات متفاوتی بود. در این نمونه‌ها اثر تلف شدن انرژی چشمه اتصال نیز بررسی شده است. همچنین مشخص شد می‌توان با استفاده از جزئیات صحیح به ۰.۴۵ رادیان جابجایی نسبی غیرالاستیک طبقات (دریافت نسبی) تحت بار لرزه ای رسید. همچنین مشخص گردید با استفاده از دیافراگم داخلی می‌توان چشمه اتصال را سخت تر کرد اما این کار باعث ایجاد تمرکز کرنش در محل سوراخ دسترسی جوش و در نهایت شکست جوش می‌شود.

(Xiong et al., ۲۰۱۷) در مطالعه‌ای، هفت ستون L شکل با استفاده از لوله‌های فولادی پر شده با بتن به هم متصل شدند را تحت فشار محوری مورد آزمایش قرار دادند. حالت‌های شکست، رابطه بار-تغییر شکل، توزیع کرنش، شکل‌پذیری و شاخص مقاومت ستون‌ها مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج آزمایش نشان داد که کماتش موضعی صفحات فولادی عمودی با پر کردن با بتن به تاخیر افتاد. ظرفیت باربری و نسبت شکل‌پذیری به ترتیب ۲۱.۱٪ و ۸.۱٪ در مقایسه با نمونه بدون بتن در صفحات فولادی عمودی افزایش یافت. سخت‌کننده‌های عرضی برای افزایش سختی محوری با مهار تغییر شکل صفحات فولادی عمودی استفاده شد. با این حال، اثر سخت‌کننده‌های عرضی بر ظرفیت باربری ناچیز بود. رفتار ستون‌های LCFST-D با بتن پر شده بین دو صفحه فولادی عمودی، بدون سخت‌کننده‌های عرضی، مطلوب‌تر از ستون‌های LCFST-D با سخت‌کننده‌های عرضی بود و بنابراین برای کاربرد مهندسی عملی توصیه می‌شود.

۳- صحت سنجی نتایج عددی

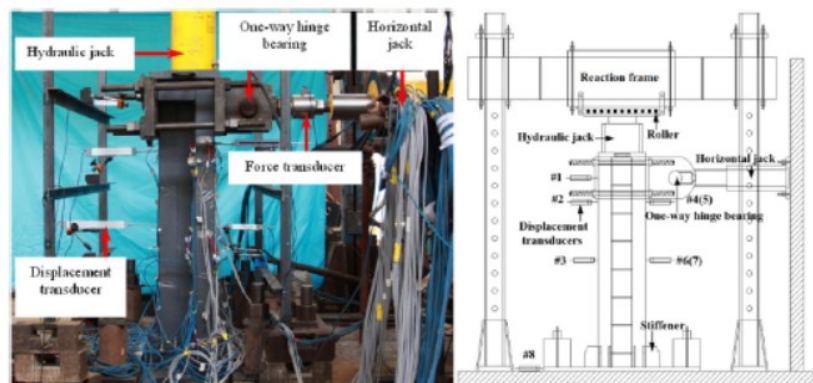
اهداف:

(۱) مقایسه خروجی‌های نرم افزار با داده‌های آزمایشگاهی

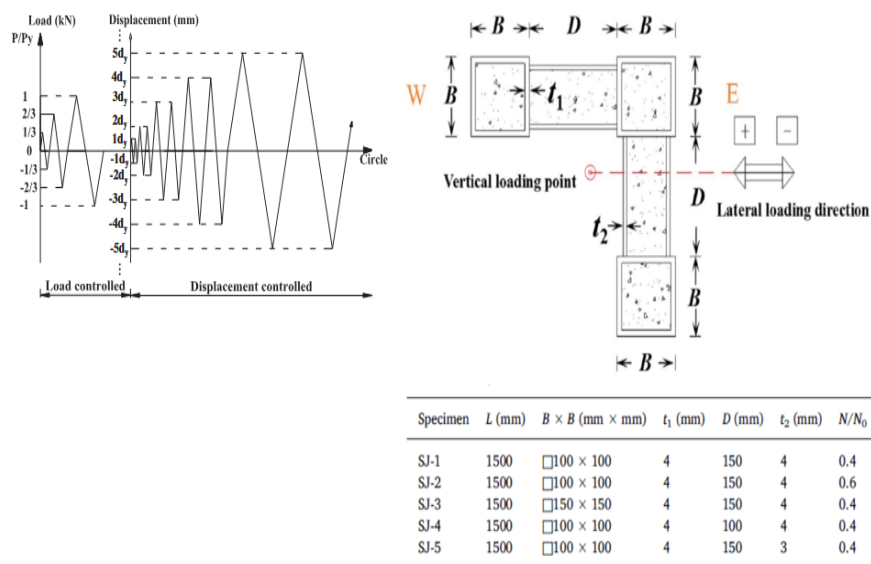
(۲) تایید صحت مدل‌سازی نمونه عددی با نمونه آزمایشگاهی

در این تحقیق به منظور تایید مدل اجزای محدود، نمونه‌ای از این نوع اتصال توسط Xiong و همکارانش در سال ۲۰۱۷ مورد آزمایش قرار گرفته است، به عنوان نمونه صحت سنجی انتخاب شده است. در شکل ۱ نمای از شرایط تکیه‌گاهی و نحوه

اعمال بار در محیط آزمایشگاهی نشان داده شده است. شکل ۲ مشخصات هندسی اتصال نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد (Xiong et al., ۲۰۱۷).



شکل ۱: نمایی از شرایط مرزی و بارگذاری نمونه آزمایشگاهی (Xiong et al., ۲۰۱۷).



شکل ۲: مشخصات هندسی و پروتکل بارگذاری نمونه مورد بررسی (Xiong et al., ۲۰۱۷).

برای اختصاص مشخصات مصالح به المان ها باید به این نکته اشاره کرد که منحنی تنش-کرنش ارائه شده در مقاله مربوط به تنش و کرنش های مهندسی می باشد که در روابط آیین نامه ای از آنها استفاده می شود، در صورتیکه در موارد مدل سازی اجزاء محدود برای حصول جواب های دقیق تر باید از پارامترهای واقعی که با استفاده از رابطه ۱ بدست می آیند استفاده کرد.

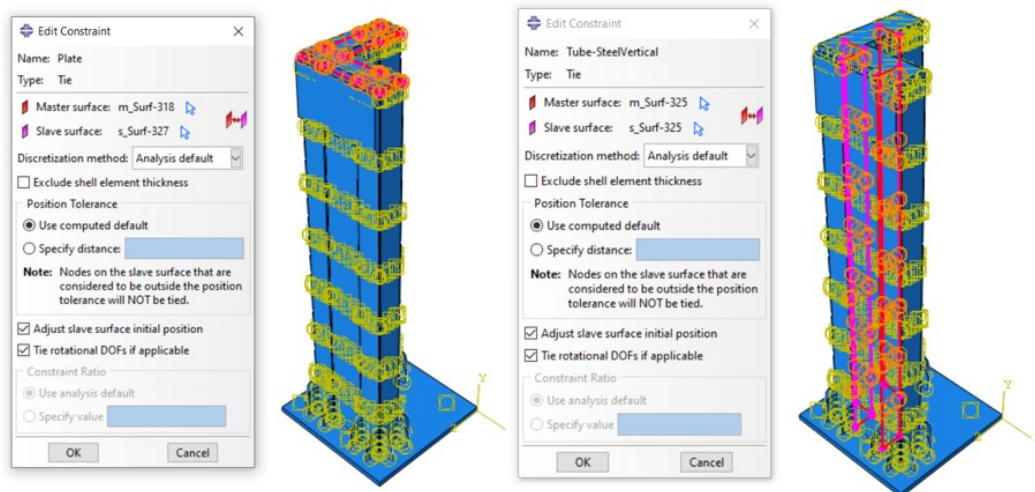
$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\varepsilon_{true}^p = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) - \left(\frac{\sigma_{true}}{E}\right)$$

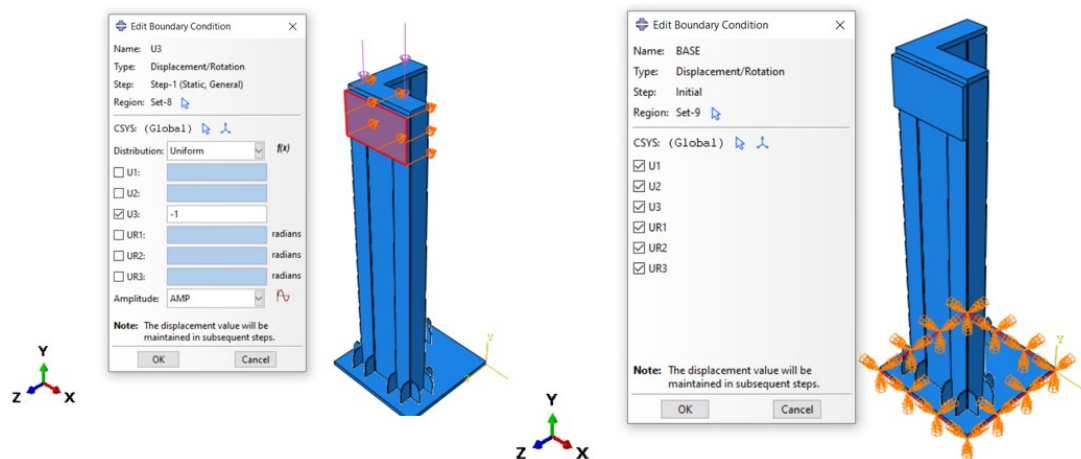
جدول ۱- مقادیر تنش- کرنش تبدیل شده جهت استفاده در نرم افزار (Xiong et al., ۲۰۱۷)

A36 (Fy≈250 Mpa)			
Engineering Curve		True Curve	
Strain (%)	Stress (Mpa)	Strain (%)	Stress (Mpa)
0.00%	0.00	0.00%	0.00
0.94%	260.10	0.94%	262.55
1.10%	246.67	1.09%	249.38
1.41%	249.31	1.40%	252.83
4.24%	248.93	4.15%	259.47
4.39%	246.22	4.30%	257.04
5.41%	289.01	5.27%	304.65
6.67%	326.40	6.45%	348.16
7.69%	355.78	7.41%	383.12
9.02%	379.74	8.64%	413.99
11.29%	398.22	10.70%	443.19
13.33%	387.21	12.52%	438.84
15.06%	365.52	14.03%	420.56
16.55%	343.86	15.31%	400.76
18.12%	311.45	16.65%	367.88
18.35%	303.37	16.85%	359.05

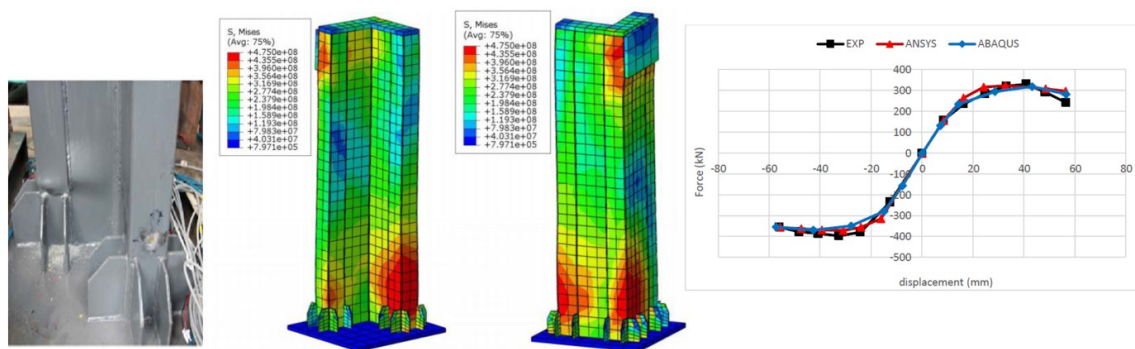
برای آنالیز مدل از تحلیل استاتیکی غیرخطی و برای بارگذاری چرخه‌ای استفاده شده است. برای کل مدل اندازه‌م‌ش‌بندی در حدود ۵mm لحاظ شده و از المان‌های سه بعدی C3D8R استفاده شده است. برای تعریف اندرکنش بین قطعات از المان tie استفاده شده است شکل ۳. نحوه معرفی تکیه‌گاه محسوب خواهد شد به برنامه معرفی می‌گردد. که در نهایت با تعیین درجات آزادی معرفی تکیه‌گاه از مدل، که به عنوان تکیه‌گاه محسوب خواهد شد به برنامه معرفی می‌گردد. که در نهایت با تعیین درجات آزادی معرفی تکیه‌گاه به اتمام می‌رسد. برای ایجاد این شرایط در نرم افزار Abaqus، در تکیه‌گاه‌ها درجه آزادی در کلیه جهات در راستای انتقالی و هم در راستای دورانی بسته خواهد شد. برای بارگذاری نیز از روش کنترل تغییرمکان استفاده می‌شود. در شکل ۴ تنظیمات شرایط مرزی نشان داده شده است. در شکل ۵ تغییر شکل نمونه عددی بعد از بارگذاری نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تقریباً تغییر شکل‌های ایجاد شده و توزیع تنش و کرنش در نمونه عددی با نمونه آزمایشگاهی مطابقت خوبی داشته و با بررسی خروجی نمونه عددی و نمونه آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که اختلاف بین نتایج بسیار کم بوده و نتایج مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته است.



شکل ۳- تعریف اندرکنش بین المان‌های نمونه عددی



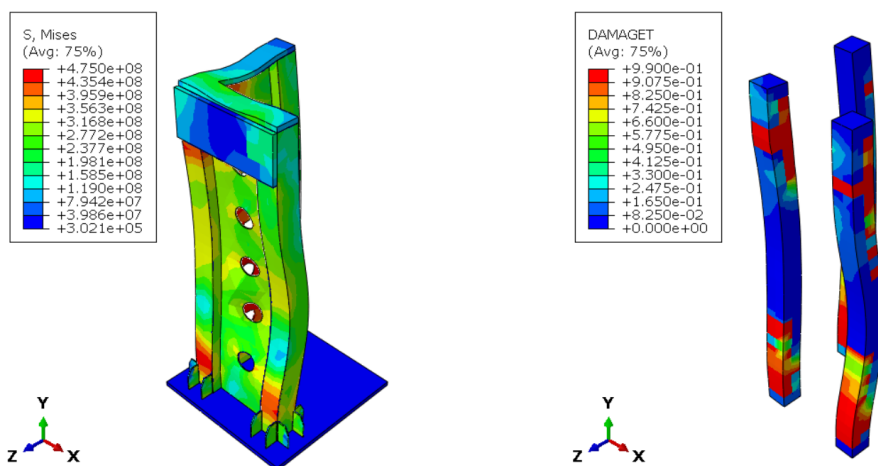
شکل ۴- شرایط مرزی و بارگذاری نمونه عددی



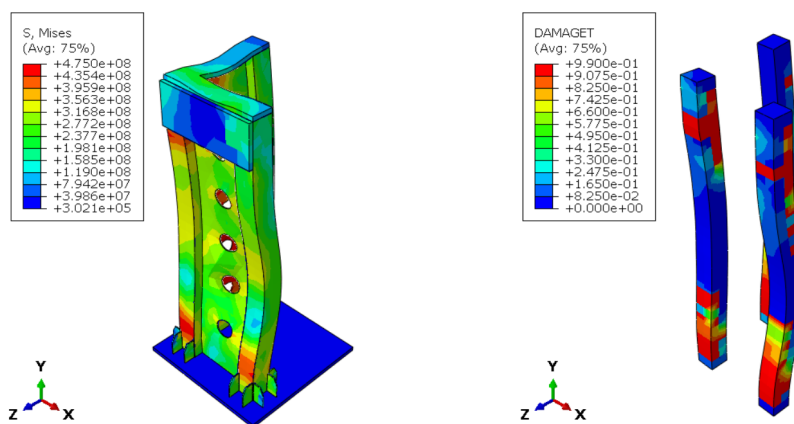
شکل ۵- مقایسه نتایج عددی و نحوه توزیع تنش و کرنش پلاستیک در نمونه عددی

۴- ارزیابی عملکرد نمونه‌های عددی توسعه یافته

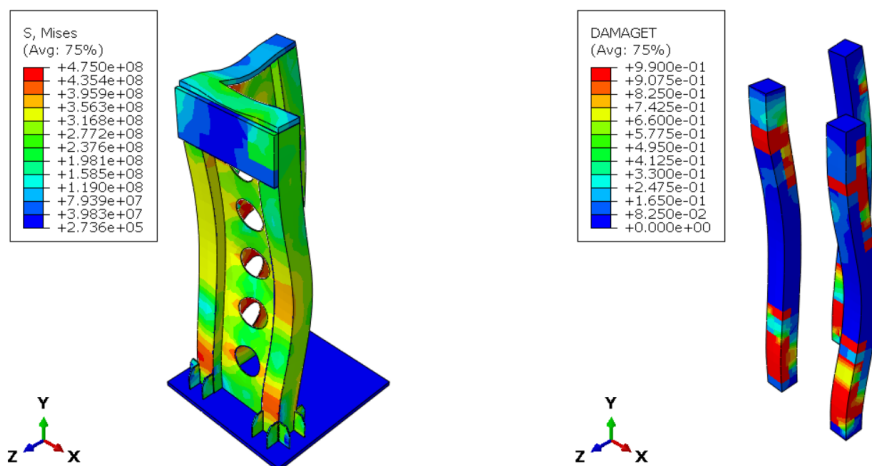
در این مرحله با اعمال الگوی بارگذاری نمونه صحت سنجی، نمونه‌های عددی مورد نظر را تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار داده تا ظرفیت تسلیم و مقاومت نهایی بدست آید. روش بارگذاری به صورت کنترل جابجایی در نظر گرفته شده است. در این تحقیق به بررسی ۱۹ مدل عددی در ۶ گروه با متغیرهایی از قبیل اندازه بازشو، مقاومت فشاری بتن، استفاده از ورق CFRP، ستون با مقاطع متغیر در هسته بتن، ورق موجدار پرداخته شده است. در شکل‌های ۹ تا ۱۶ به بررسی تاثیر اندازه سوراخ پرداخته شده و کانتورهای تنش و کرنش پلاستیک ایجاد شده در هر یک از المان‌های نمونه‌های عددی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در ستون‌های کناری کماتش ایجاد شده و بتن داخل ستون‌ها در برخی نقاط علی‌الخصوص در نقاط نزدیک به تکیه‌گاه دچار خسارت کششی شده است. که این موضوع با افزایش قطر سوراخ در ورق نمونه‌ها از شدت بیشتری برخوردار بوده، به طوری که مقادیر کرنش پلاستیک ایجاد شده در ورق اتصال دهنده و ستون‌ها در نمونه‌های سوراخ‌دار از شدت و گستردگی بیشتری برخوردار بوده است. در شکل ۱۰ به مقایسه منحنی هیسترسیس نمونه‌های ۱ تا ۴ پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش قطر سوراخ در ورق اتصال دهنده، مقدار ظرفیت باربری افزایش یافته و از افت مقاومت و کاهش سختی در سیکل‌های انتهایی کمتری برخوردار می‌باشد.



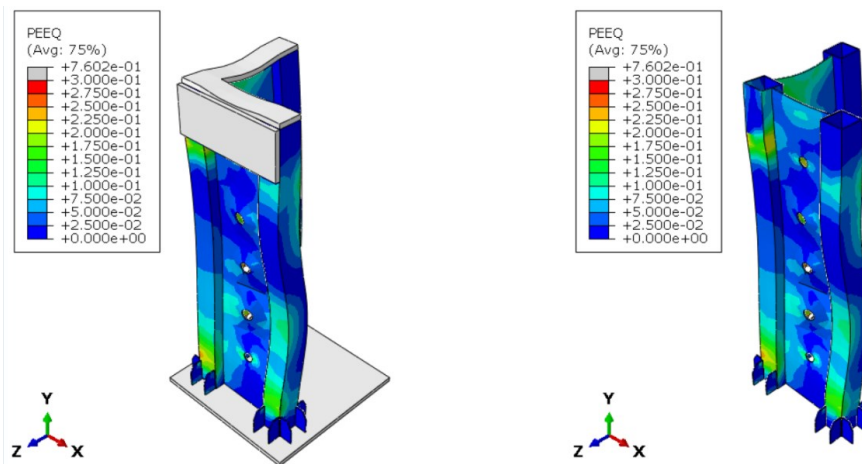
شکل ۶- به ترتیب از راست به چپ کرنش پلاستیک‌های ایجاد شده در المان‌های فولادی و توزیع کرنش پلاستیک در نمونه شماره ۱



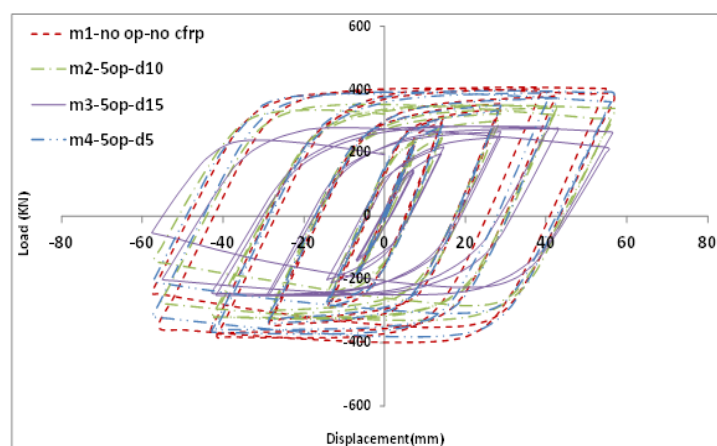
شکل ۷- به ترتیب از راست به چپ خرابی‌های کششی ایجاد شده در المان‌های بتنی و توزیع تنش در نمونه شماره ۲



شکل ۸- به ترتیب از راست به چپ خرابی‌های کششی ایجاد شده در المان‌های بتنی و توزیع تنش در نمونه شماره ۳

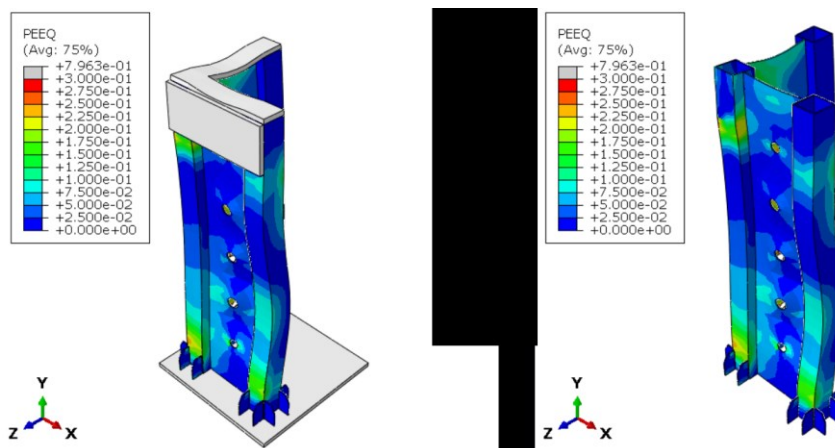


شکل ۹- به ترتیب از راست به چپ کرنش پلاستیک‌های ایجاد شده در المان‌های فولادی و توزیع کرنش پلاستیک در نمونه شماره ۴

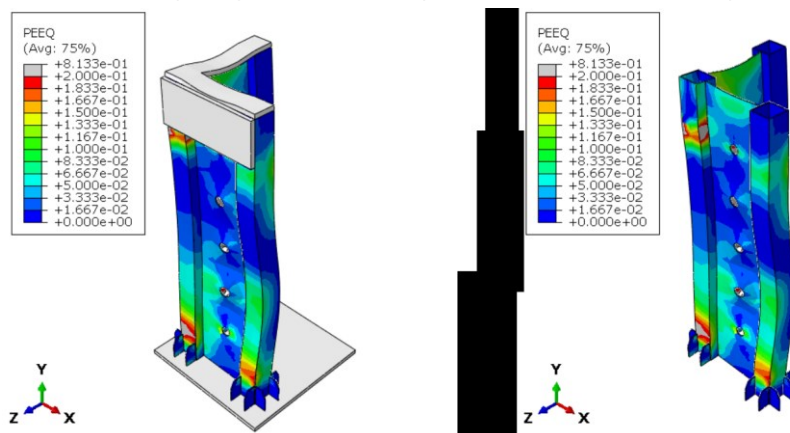


شکل ۱۰- مقایسه تاثیر بازشو در عملکرد نمونه‌های عددی

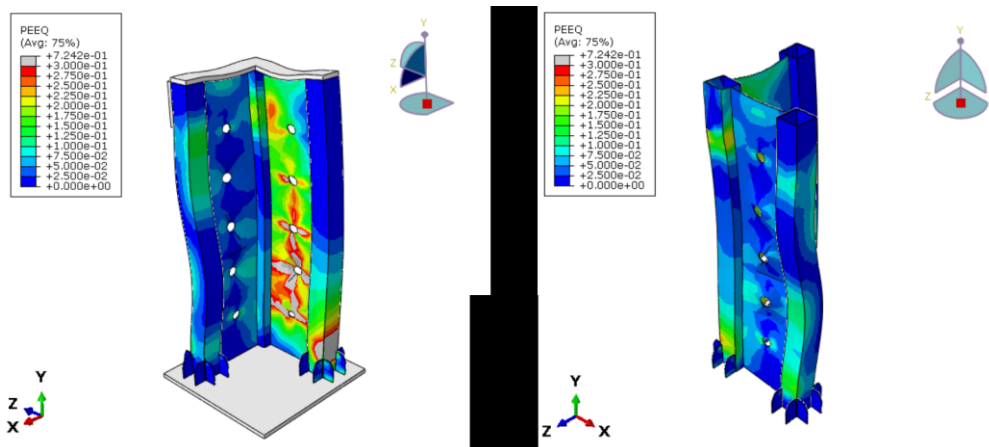
در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ همانطور که مشاهده می‌شود استفاده از بتن با مقاومت‌های فشاری مختلف تاثیر کمتری بر عملکرد نمونه‌ها داشته و بتن محصور شده در داخل ستون فلزی حتی در لحظه رسیدن به مقاومت نهایی نیز دچار گسیختگی کامل نشده است. به عنوان نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت که عضوهای فولادی دارای مزیت مقاومت کششی و شکل پذیری بالا و عضوهای بتنی دارای فواید استحکام و مقاومت فشاری بالا می‌باشند. که با ترکیب هر دو عضو (فولادی و بتنی) منجر به عضوی می‌شود که دارای کیفیت‌های مفید هر دو ماده می‌باشد. در نهایت با بررسی نتایج نمونه‌های عددی مشاهده می‌شود که تقریباً هر سه نمونه از شدت و گستردگی تنش و کرنش یکسانی برخوردار بوده و مقادیر کرنش پلاستیک و تنش تسلیم در نواحی نزدیک به بازشوها دایره‌ای از شدت بیشتری برخوردار بوده است. در شکل ۱۴ به مقایسه تاثیر مقاومت فشاری هسته ستون پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود هر سه نمونه عملکرد یکسانی داشته و دارای سیکل‌های رفت و برگشتی پایدار و یکنواختی می‌باشند.



شکل ۱۱- به ترتیب از راست به چپ کرنش پلاستیک‌های ایجاد شده در المان‌های فولادی و توزیع کرنش پلاستیک در نمونه شماره ۵

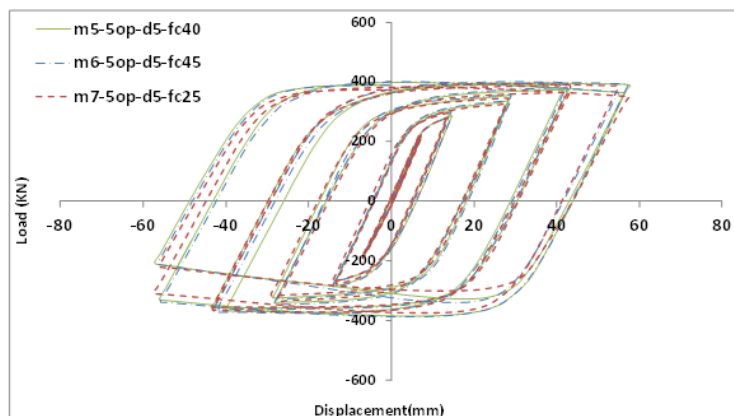


شکل ۱۲- به ترتیب از راست به چپ کرنش پلاستیک‌های ایجاد شده در المان‌های فولادی و توزیع کرنش پلاستیک در نمونه شماره ۶



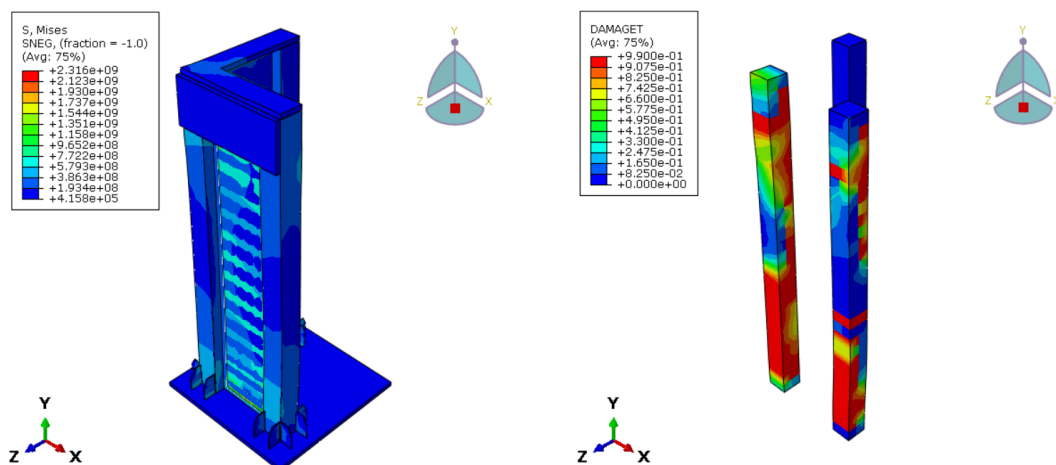
شکل ۱۳- به ترتیب از راست به چپ کرنش پلاستیک‌های ایجاد شده در المان‌های فولادی و توزیع کرنش پلاستیک در نمونه

شماره ۷

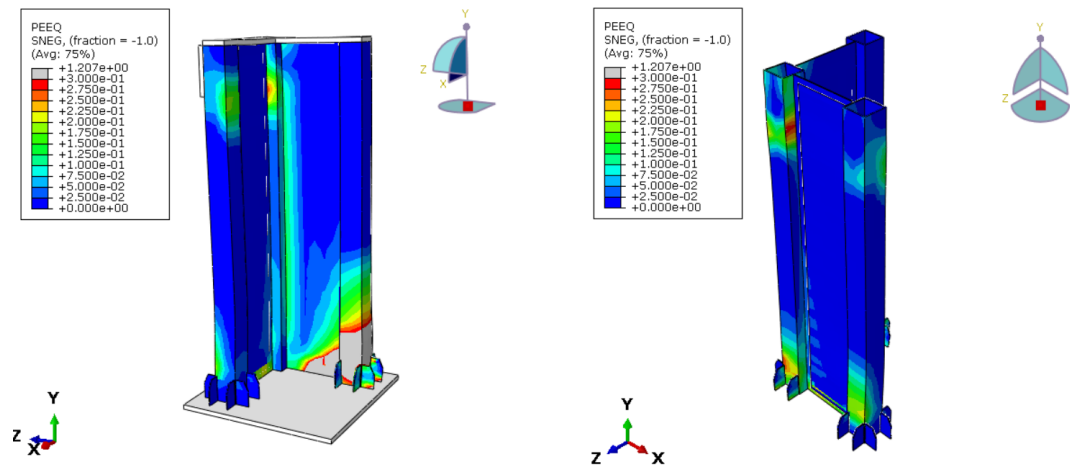


شکل ۱۴- مقایسه تاثیر مقاومت فشاری در عملکرد نمونه‌های عددی

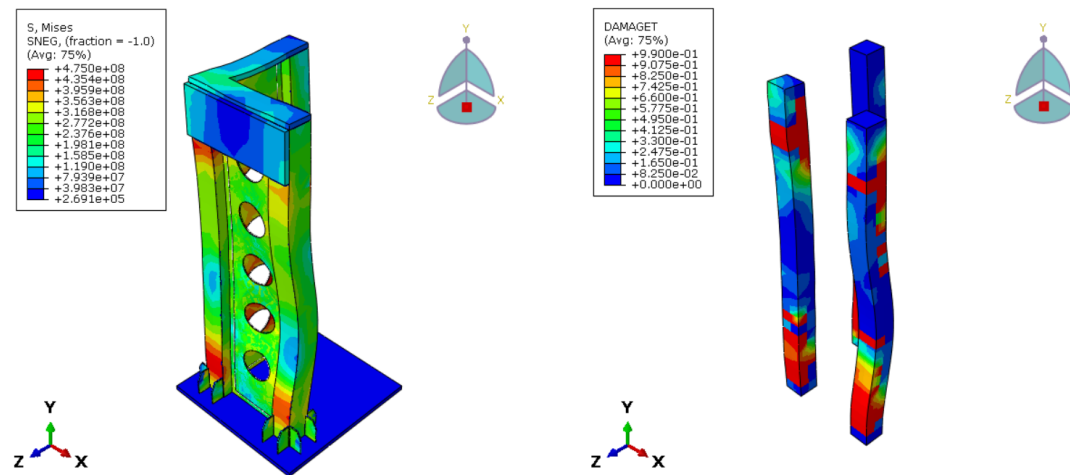
در شکل‌های ۲۰ تا ۲۵ همانطور که مشاهده می‌شود استفاده از ورق CFRP تاثیرگذاری بیشتری در افزایش ظرفیت باربری و همچنین باعث کاهش تنش و کرنش پلاستیک داشته است. به طوری که کمانش‌های ایجاد شده در ورق‌های اتصال دهنده ستون‌ها کاهش یافته و بیشتر در ستون‌های کناری متمرکز شده است. در شکل ۲۱ به مقایسه تاثیر استفاده از ورق CFRP در نمونه‌های بدون سوراخ پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در شرایط یکسان استفاده از ورق CFRP مقدار ظرفیت باربری را افزایش داده و از افت و زوال مقاومت کمتری برخوردار بوده است. از نظر عددی نمونه با ورق CFRP و بدون بازشو با نیروی ۶۵۱/۱ کیلونیوتن نسبت به نمونه بدون ورق و بدون بازشو در حدود ۳۷/۴ درصد ظرفیت باربری بیشتری داشته است. در شکل ۲۲ به مقایسه نمونه با ورق CFRP و دارای بازشو با نمونه بدون بازشو و دارای ورق CFRP پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه بدون بازشو با ورق تقویتی با نیروی ۶۵۱/۱ کیلونیوتن نسبت به نمونه با بازشو به قطر ۱۵ میلیمتر و ۵ میلیمتر به ترتیب ۴۰/۴ درصد و ۲۵/۶ درصد دارای ظرفیت باربری بیشتری بوده و از افت مقاومت کمتری برخوردار بوده است. در بین این نمونه‌ها نمونه با بازشوی ۱۵ میلیمتر از افت مقاومت و زوال سختی بیشتری برخوردار بوده است.



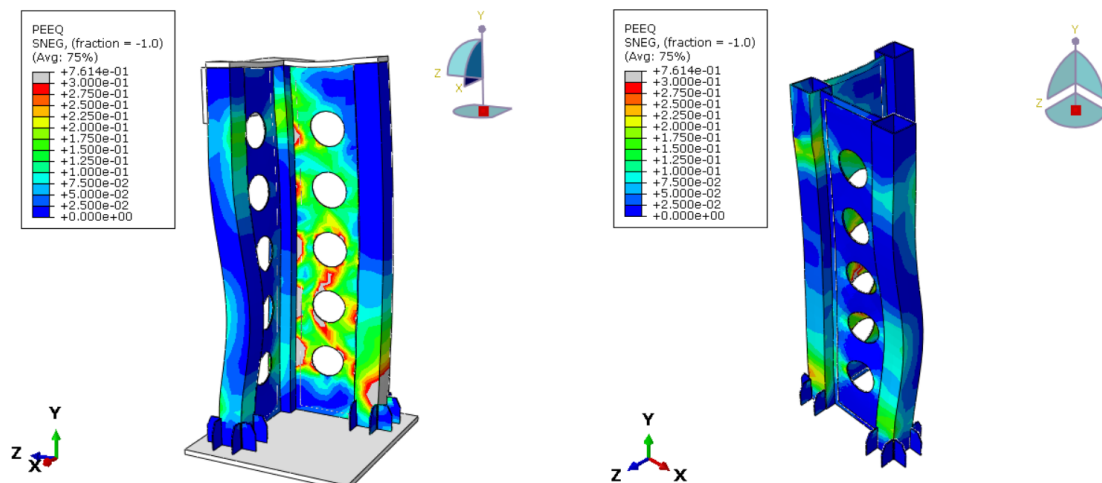
شکل ۱۵- به ترتیب از راست به چپ خرابی‌های کششی ایجاد شده در المان‌های بتنی و توزیع تنش در نمونه شماره ۸



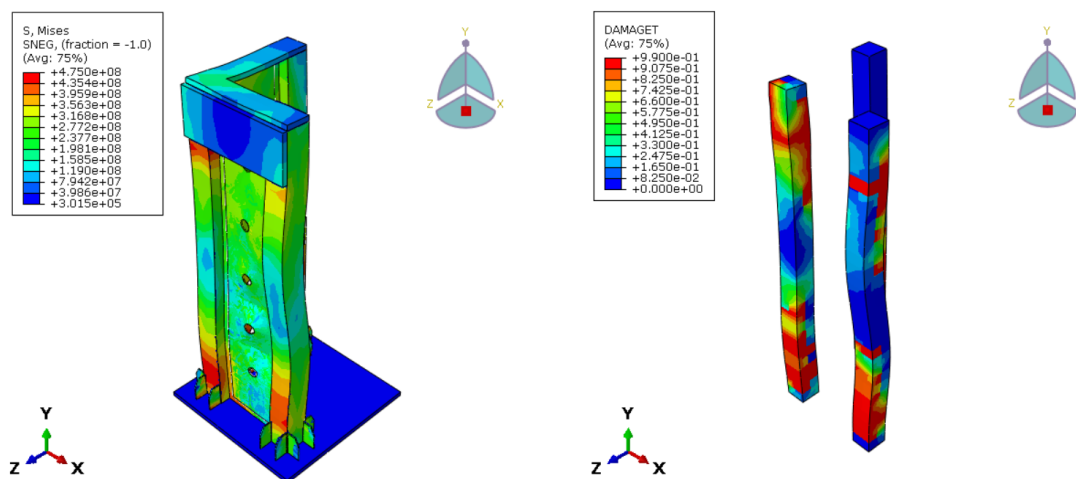
شکل ۱۶- به ترتیب از راست به چپ کرنش پلاستیک‌های ایجاد شده در المان‌های فولادی و توزیع کرنش پلاستیک در نمونه شماره ۸



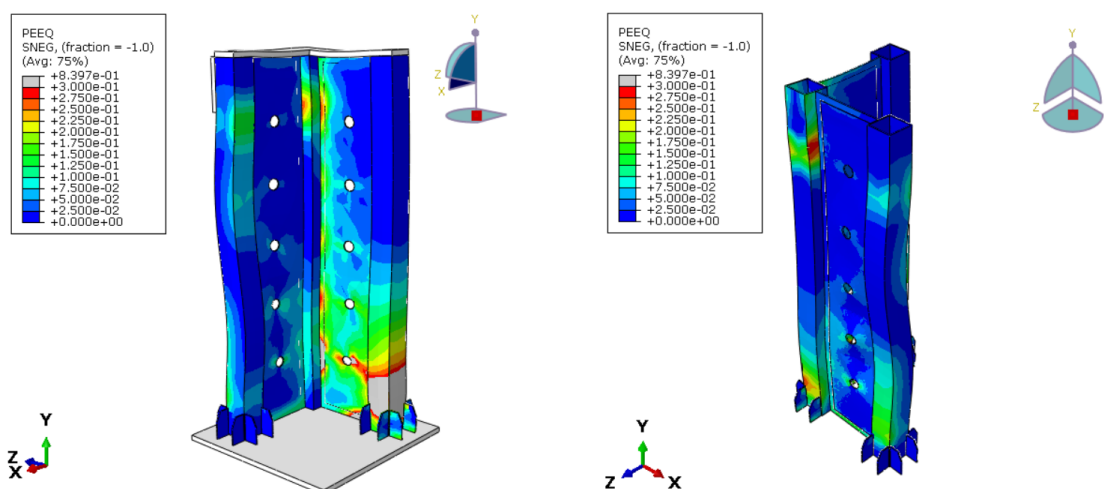
شکل ۱۷- به ترتیب از راست به چپ خرابی‌های کششی ایجاد شده در المان‌های بتنی و توزیع تنش در نمونه شماره ۹



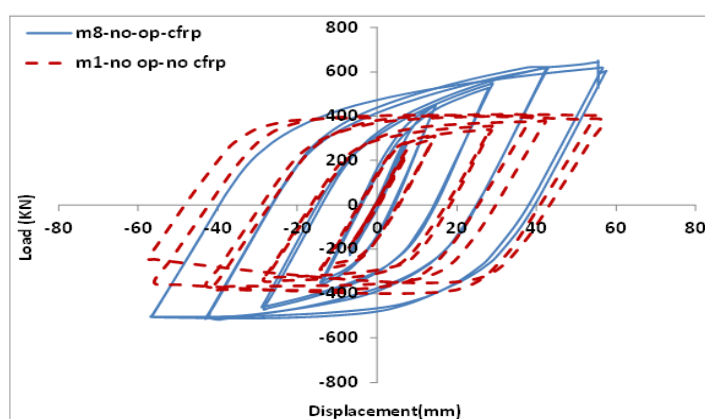
شکل ۱۸- به ترتیب از راست به چپ کرنش پلاستیک‌های ایجاد شده در المان‌های فولادی و توزیع کرنش پلاستیک در نمونه شماره ۹



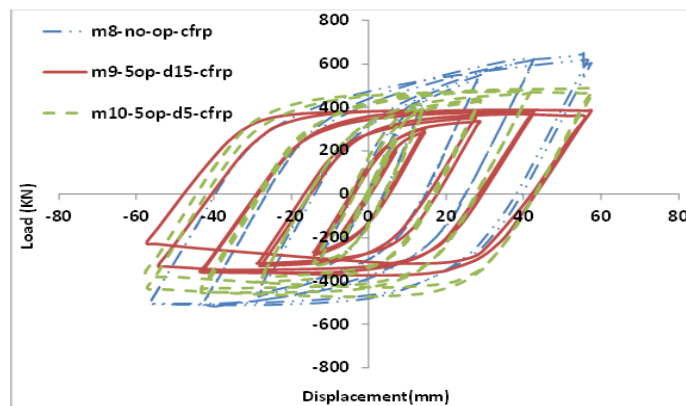
شکل ۱۹- به ترتیب از راست به چپ خرابی های کششی ایجاد شده در المان های بتنی و توزیع تنش در نمونه شماره ۱۰



شکل ۲۰- به ترتیب از راست به چپ کرنش پلاستیک های ایجاد شده در المان های فولادی و توزیع کرنش پلاستیک در نمونه شماره ۱۰

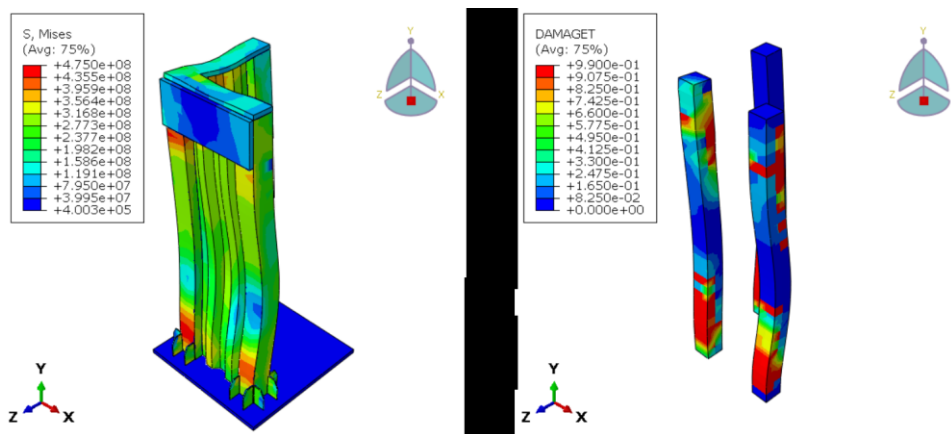


شکل ۲۱- مقایسه تاثیر ورق CFRP در نمونه بدون بازشو در عملکرد نمونه های عددی

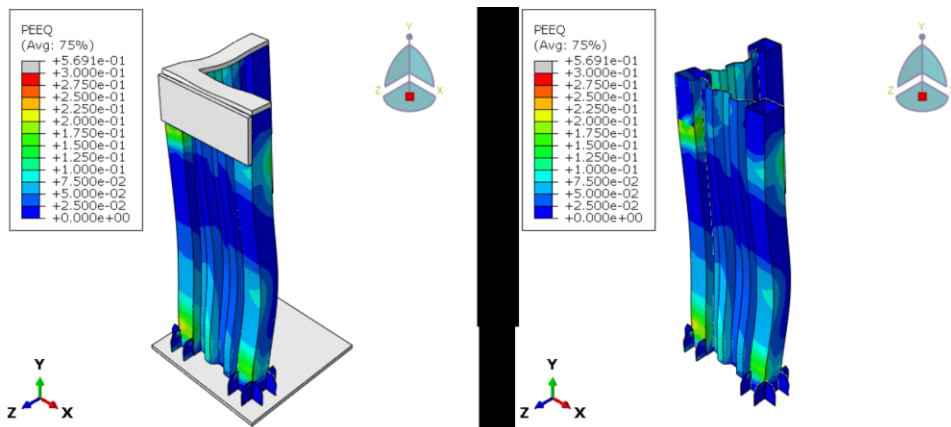


شکل ۲۲- مقایسه تاثیر ورق CFRP در نمونه با بازشو در عملکرد نمونه‌های عددی

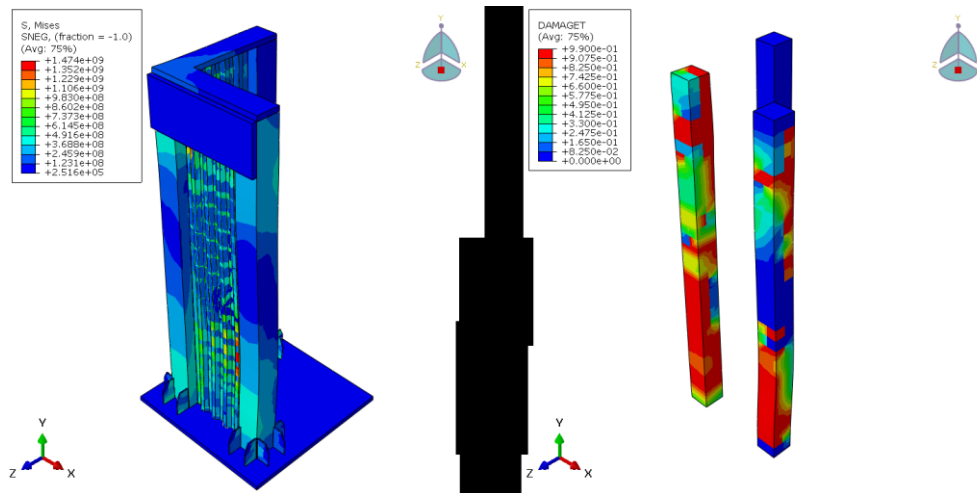
در شکل‌های ۲۳ تا ۳۲ کانتور تنش و کرنش پلاستیک ایجاد شده در نمونه‌های عددی دارای متغیر ستون مدفون قوطی شکل در ستون CFT نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در نمونه بدون سوراخ سطح گسترش کرنش پلاستیک و تغییر شکل‌های ماندگار کمتر از سایر نمونه‌ها بوده و در نمونه‌هایی که از ورق موجدار استفاده شده است، مقدار کمایش ستون‌های کناری و تغییر شکل درون صفحه‌ای ورق اتصال دهنده به شدت کاهش یافته است. در شکل‌های ۳۳ و ۳۴ به مقایسه نمودار هیسترسیس تاثیر استفاده از المان مدفون با عرض‌های مختلف با دو شکل هندسی دایره‌ای و مربعی در داخل ستون CFT پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود هر سه نمونه تاثیر گذاری یکسانی در عملکرد نمونه‌ها داشته و دارای سیکل‌های پایداری در بارگذاری رفت و برگشتی بوده و به طور متوسط دارای ظرفیت باربری یکسانی می‌باشند.



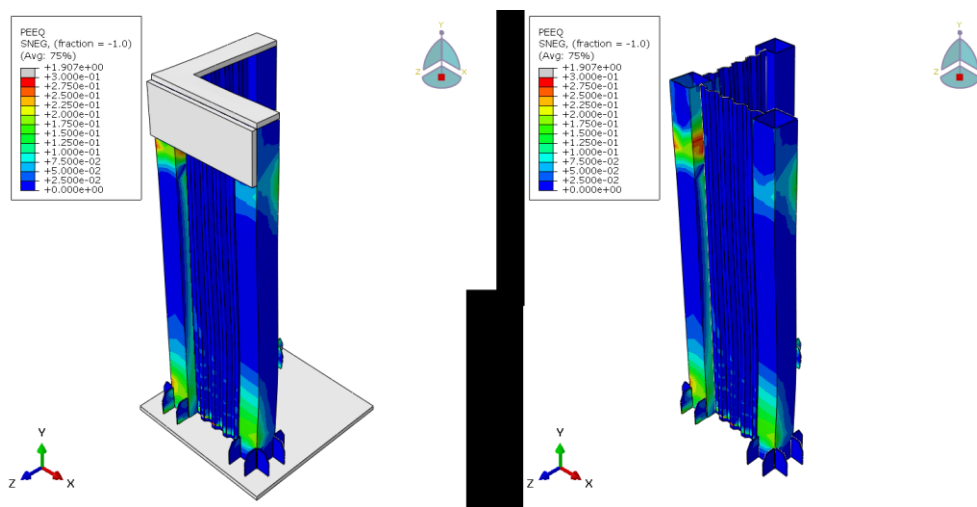
شکل ۲۳- به ترتیب از راست به چپ خرابی‌های کششی ایجاد شده در المان‌های بتنی و توزیع تنش در نمونه شماره ۱۱



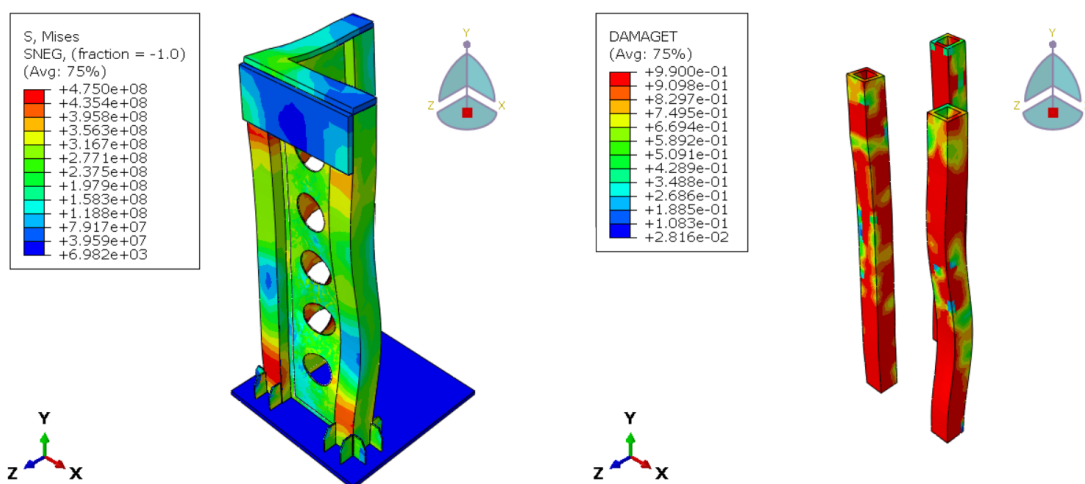
شکل ۲۴- به ترتیب از راست به چپ کرنش پلاستیک‌های ایجاد شده در المان‌های فولادی و توزیع کرنش پلاستیک در نمونه شماره ۱۱



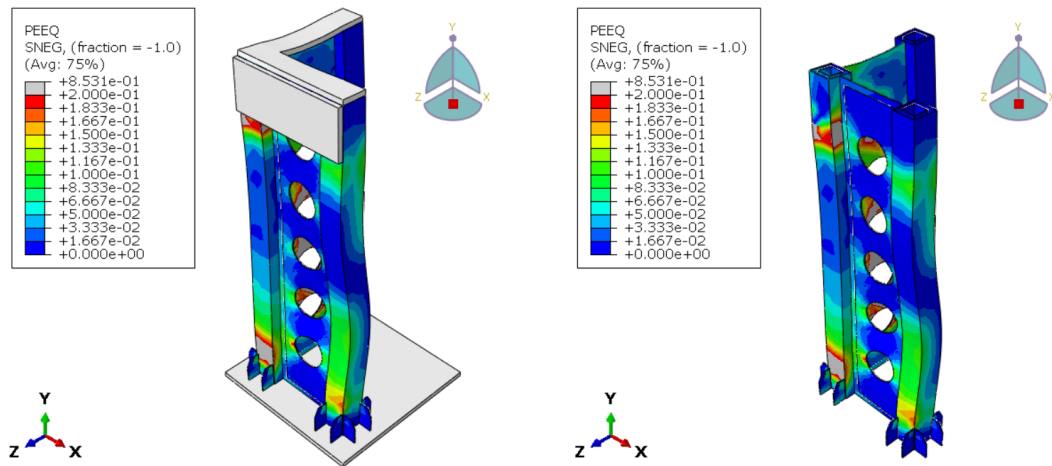
شکل ۲۵- به ترتیب از راست به چپ خرابی های کششی ایجاد شده در المان های بتنی و توزیع تنش در نمونه شماره ۱۲



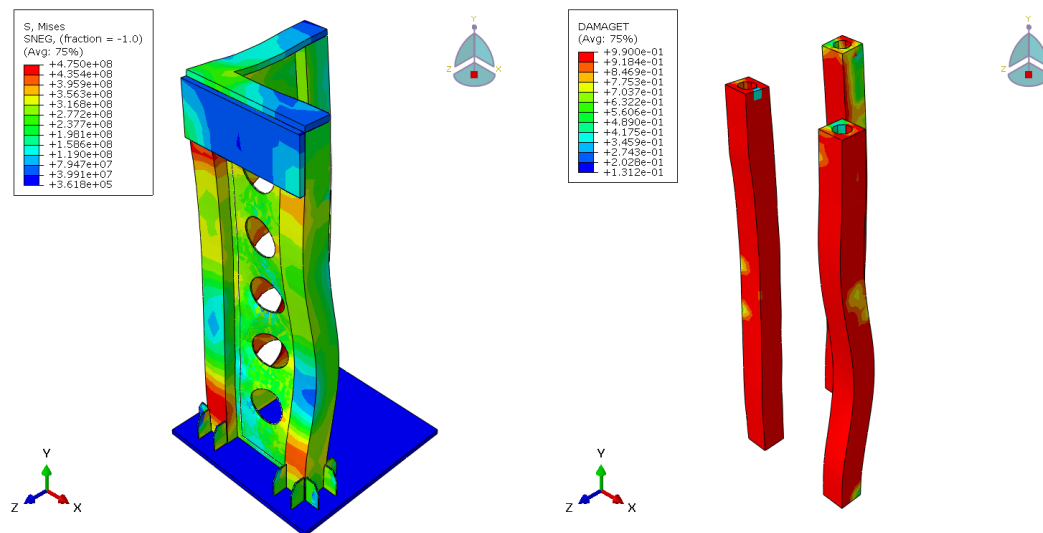
شکل ۲۶- به ترتیب از راست به چپ کرنش پلاستیک های ایجاد شده در المان های فولادی و توزیع کرنش پلاستیک در نمونه شماره ۱۲



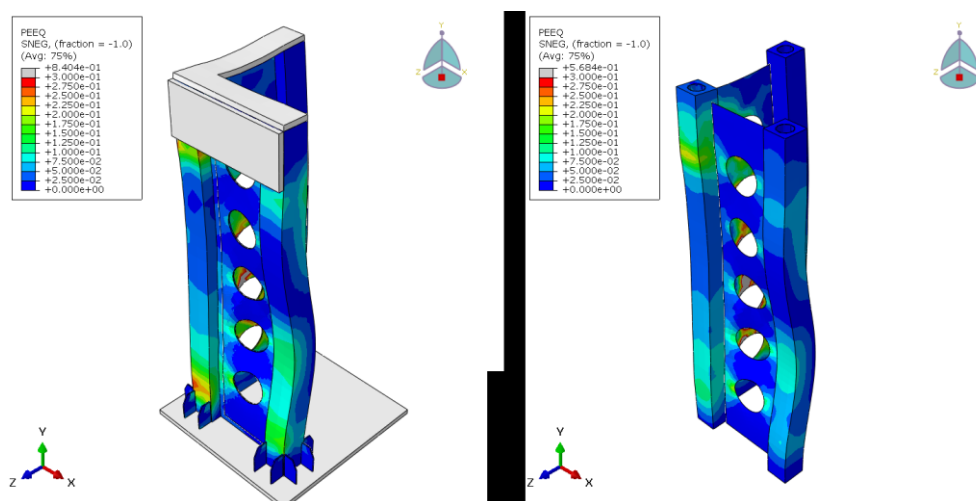
شکل ۲۷- به ترتیب از راست به چپ خرابی های کششی ایجاد شده در المان های بتنی و توزیع تنش در نمونه شماره ۱۳



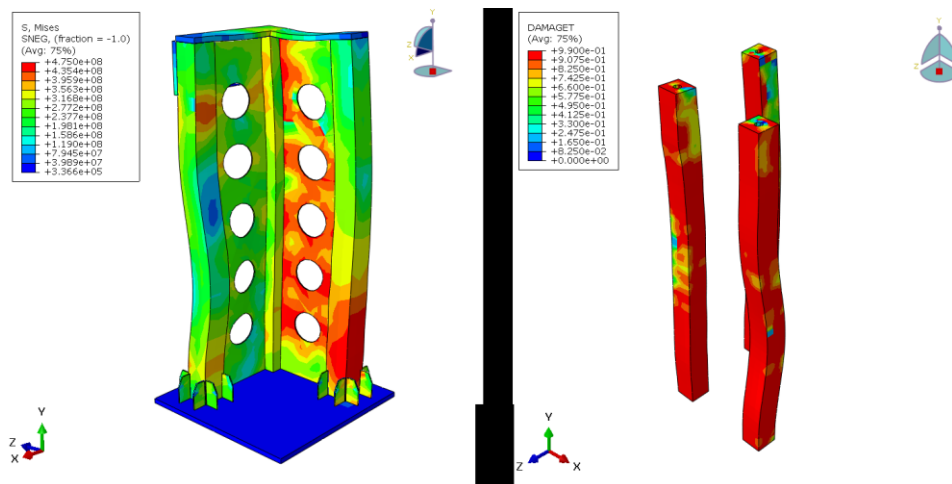
شکل ۲۸- به ترتیب از راست به چپ کرنش پلاستیک‌های ایجاد شده در المان‌های فولادی و توزیع کرنش پلاستیک در نمونه شماره ۱۳



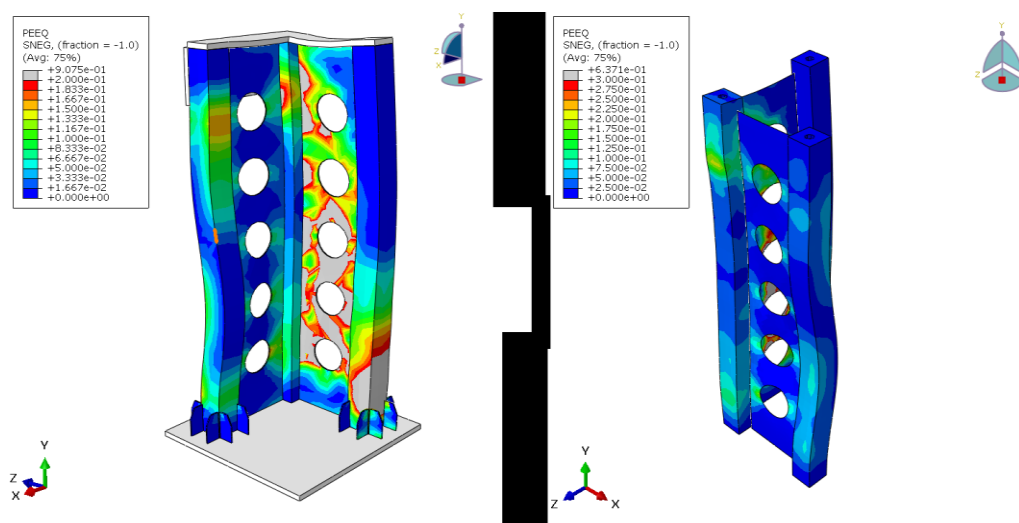
شکل ۲۹- به ترتیب از راست به چپ خرابی‌های کششی ایجاد شده در المان‌های بتنی و توزیع تنش در نمونه شماره ۱۴



شکل ۳۰- به ترتیب از راست به چپ کرنش پلاستیک‌های ایجاد شده در المان‌های فولادی و توزیع کرنش پلاستیک در نمونه شماره ۱۴

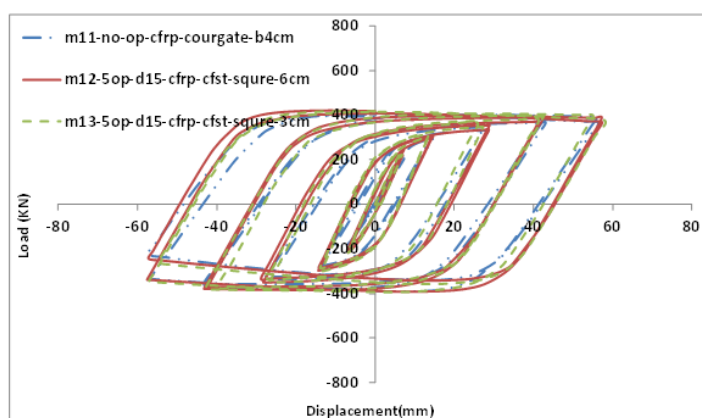


شکل ۳۱- به ترتیب از راست به چپ خرابی های کششی ایجاد شده در المان های بتنی و توزیع تنش در نمونه شماره ۱۵

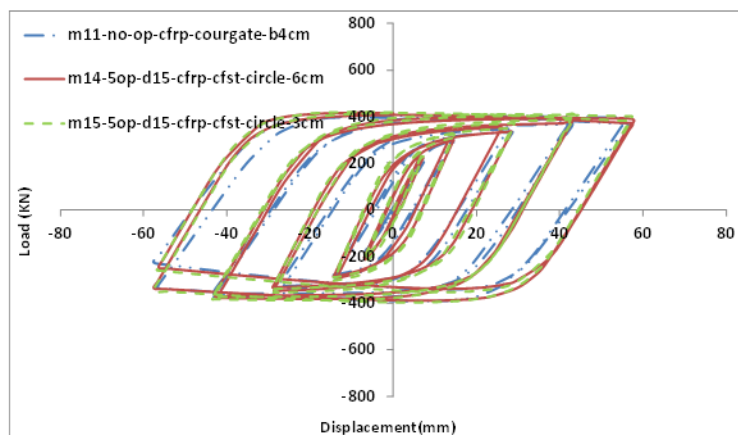


شکل ۳۲- به ترتیب از راست به چپ کرنش پلاستیک های ایجاد شده در المان های فولادی و توزیع کرنش پلاستیک در نمونه

شماره ۱۵

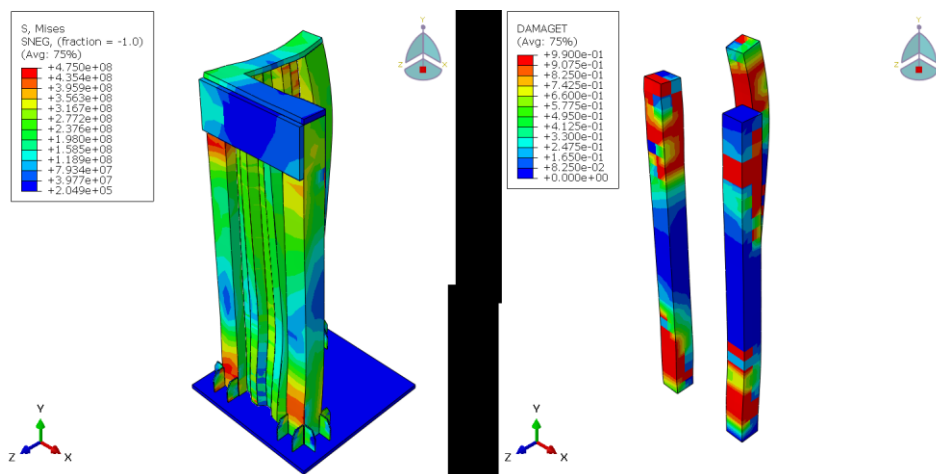


شکل ۳۳- مقایسه عملکرد پروفیل فولادی قوطی در هسته ستون با عرض های مختلف

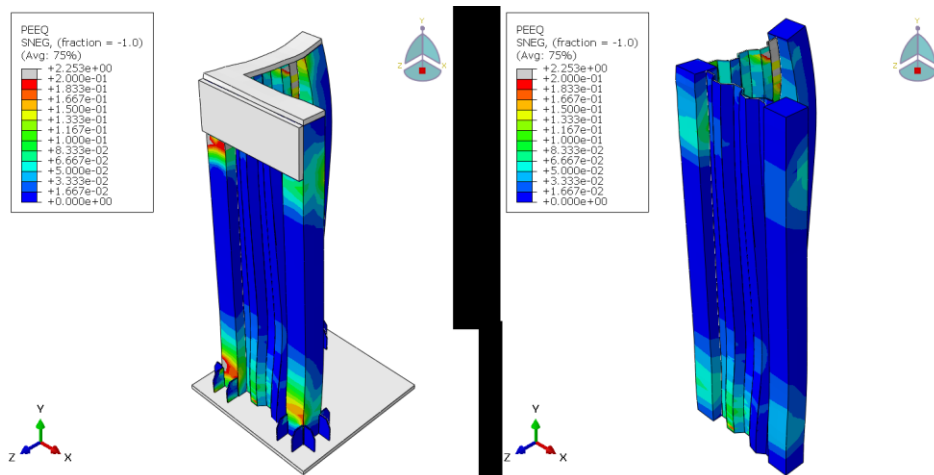


شکل ۳۴- مقایسه تاثیر شکل هندسی پروفیل فولادی دایره‌ای در هسته ستون در قطرهای مختلف

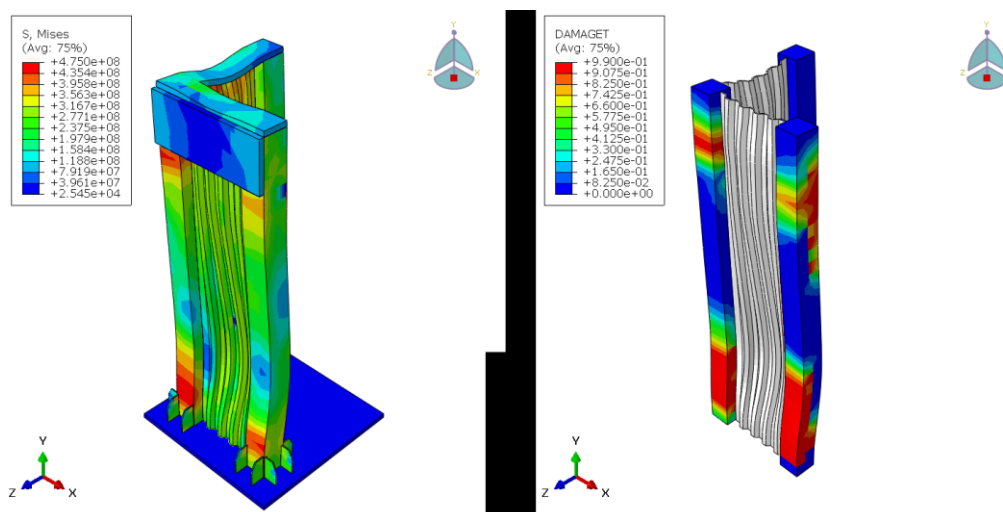
در شکل‌های ۳۵ تا ۴۰ به مقایسه تاثیر عرض ورق موجدار با و بدون ورق CFRP پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش عرض ورق موجدار مقدار کرنش پلاستیک و کمانش‌های جانبی ورق و ستون کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته و گسترش تنش حالت یکنواخت‌تری پیدا کرده است. همچنین با کاهش عرض ورق از ۴ به ۲ سانتیمتر به‌همراه استفاده از ورق CFRP باعث کاهش کمانش‌های درون صفحه‌ای و افزایش ظرفیت باربری گردیده است. در شکل ۴۱ به مقایسه عددی تاثیر استفاده از ورق موجدار با عرض‌های مختلف پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود استفاده از ورق موجدار با ورق تقویتی CFRP عملکرد نمونه‌ها را بهبود بخشیده است. به طوری که در نمونه ۱۸ ورق موجدار در اندازه‌های ۲ سانتیمتر با ورق CFRP به طور متوسط ۴۸ درصد دارای ظرفیت باربری بیشتری نسبت به سایر نمونه داشته است. همچنین می‌توان گفت که استفاده از ورق موجدار با عرض ۲ سانتیمتری بدون ورق CFRP ظرفیت باربری بیشتری نسبت به نمونه با ورق تقویتی CFRP با عرض ورق موجدار ۴ سانتیمتری داشته است.



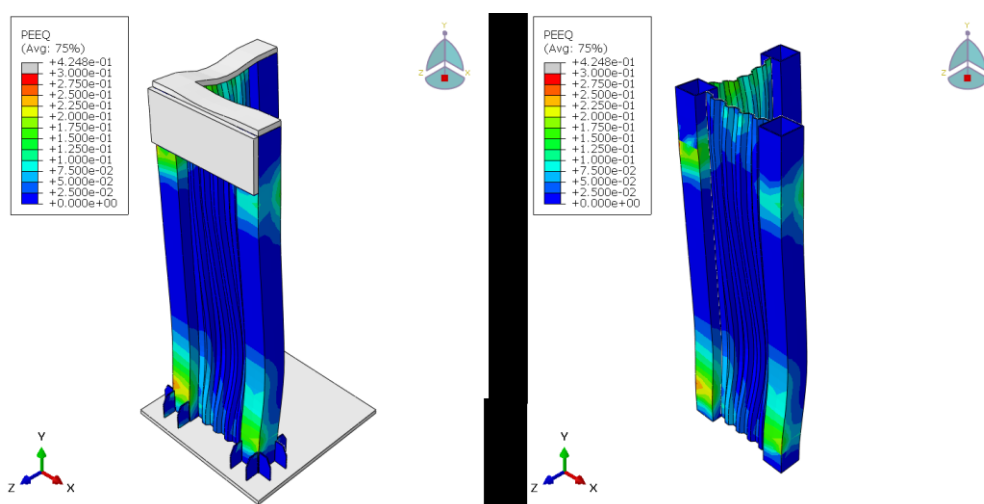
شکل ۳۵- به ترتیب از راست به چپ خرابی‌های کششی ایجاد شده در المان‌های بتنی و توزیع تنش در نمونه شماره ۱۶



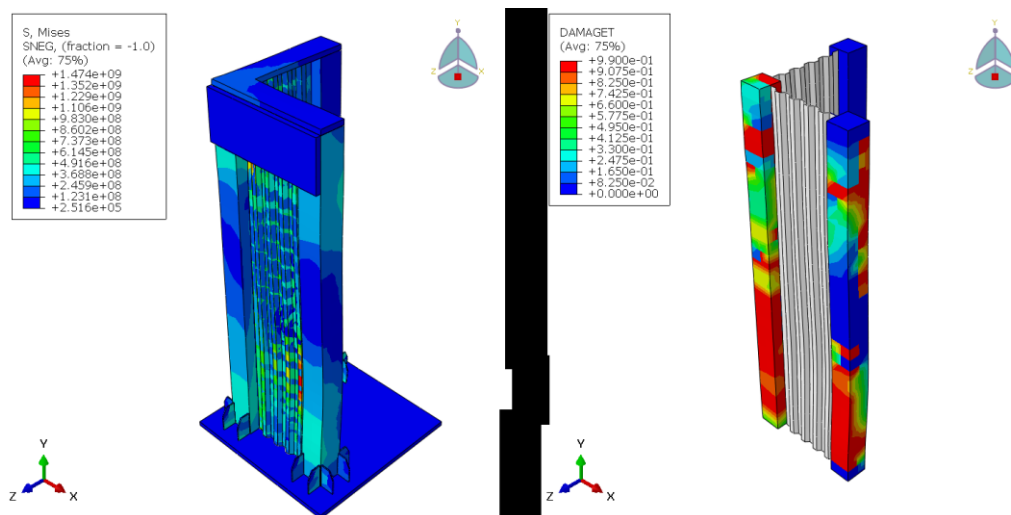
شکل ۳۶- به ترتیب از راست به چپ کرنش پلاستیک‌های ایجاد شده در المان‌های فولادی و توزیع کرنش پلاستیک در نمونه شماره ۱۶



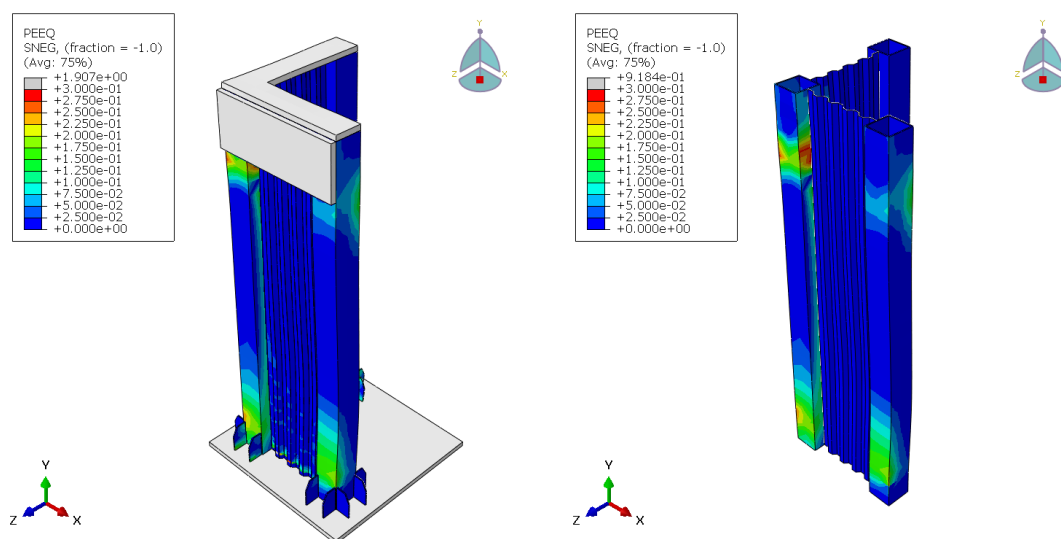
شکل ۳۷- به ترتیب از راست به چپ خرابی‌های کششی ایجاد شده در المان‌های بتنی و توزیع تنش در نمونه شماره ۱۷



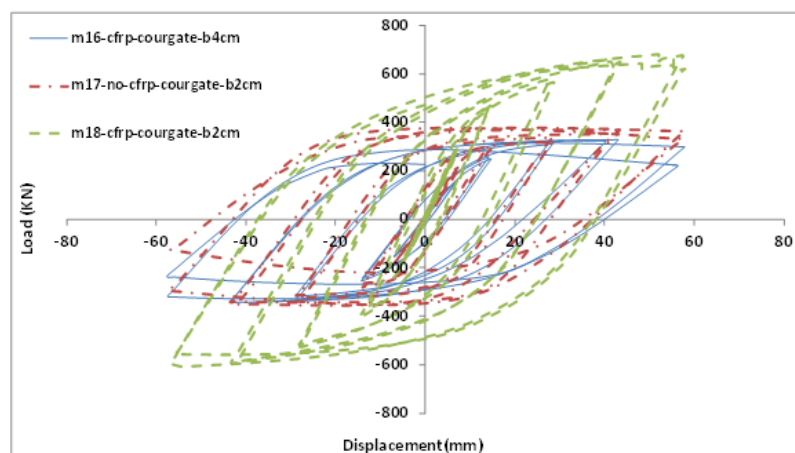
شکل ۳۸- به ترتیب از راست به چپ کرنش پلاستیک‌های ایجاد شده در المان‌های فولادی و توزیع کرنش پلاستیک در نمونه شماره ۱۷



شکل ۳۹- به ترتیب از راست به چپ خرابی های کششی ایجاد شده در المان های بتنی و توزیع تنش در نمونه شماره ۱۸

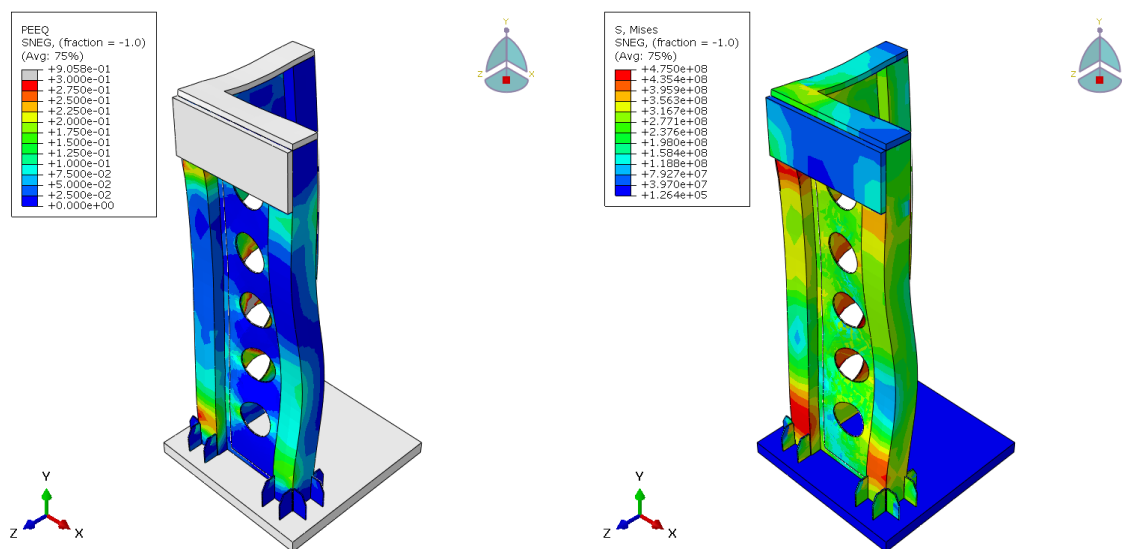


شکل ۴۰- به ترتیب از راست به چپ کرنش پلاستیک های ایجاد شده در المان های فولادی و توزیع کرنش پلاستیک در نمونه شماره ۱۸

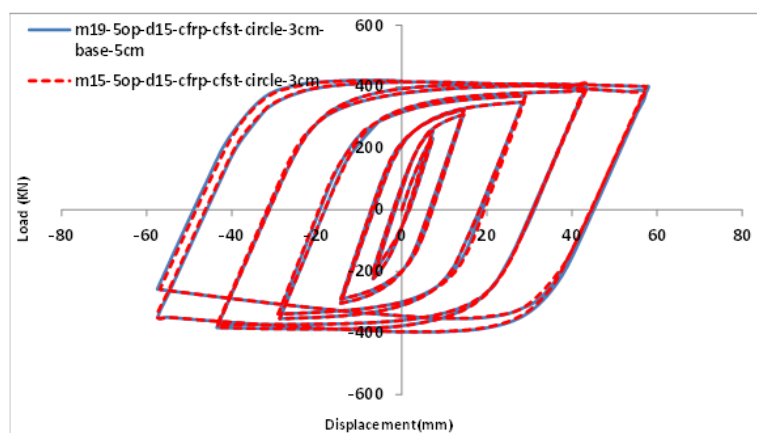


شکل ۴۱- مقایسه تاثیر شکل ورق موجدار با عرض های مختلف در عملکرد نمونه های عددی

در ادامه برای بررسی تاثیر ضخامت ورق پای ستون به عنوان نمونه برای یکی از مدل ها ضخامت ورق از ۲ به ۵ سانتیمتر افزایش داده شد (نمونه شماره ۱۵) و بعد از آنالیز نتایج نشان داد که افزایش ضخامت ورق پای ستون تاثیرگذاری چندانی در عملکرد نمونه نداشته است. در شکل های ۴۳ و ۴۴ کانتورهای تنش و مقایسه نتایج نشان داده شده است.



شکل ۴۲- به ترتیب از راست به چپ تنش و کرنش پلاستیک های ایجاد شده در نمونه ۱۹ با متغیر افزایش ضخامت ورق پای ستون



شکل ۴۳- مقایسه تاثیر افزایش ضخامت ورق پای ستون در نمونه شماره ۱۵ و ۱۹

۵- نتایج عددی تحقیق

۱. تغییر مقاومت فشاری بتن هسته تاثیر محدودی بر رفتار کلی نمونه ها داشت. بتن محصور شده در داخل لوله فولادی، حتی در لحظه رسیدن به مقاومت نهایی، از خود گسیختگی کامل نشان نداد. این مشاهده مؤید این اصل کلی است که ترکیب اعضای فولادی (با مزایای مقاومت کششی و شکل پذیری بالا) و اعضای بتنی (با مزایای استحکام فشاری بالا) منجر به ایجاد عضوی مرکب می شود که کیفیت های مفید هر دو ماده را در خود دارد.

۲. ارزیابی متغیر مقاومت فشاری بتن نشان داد که تمامی نمونه ها از نظر عملکرد چرخه های رفت و برگشتی، رفتار یکسان، پایدار و یکنواختی را از خود نشان می دهند.

۳. به کارگیری ورق های CFRP تاثیر بسزایی در افزایش ظرفیت باربری نهایی داشت و همچنین منجر به کاهش قابل ملاحظه ای سطوح تنش و کرنش پلاستیک گردید. این امر باعث کاهش کمانش موضعی در ورق های اتصال دهنده و انتقال تمرکز تنش به سمت ستون های کناری شد.

۴. در شرایط یکسان، نمونه‌های تقویت‌شده با ورق CFRP از ظرفیت باربری بالاتر و نرخ افت مقاومت کمتری پس از نقطه حداکثر برخوردار بودند. به‌طور کمی، نمونه مجهز به ورق CFRP و فاقد بازشو با ظرفیت باربری ۶۵۱۰۱ کیلونیوتن، حدود ۳۷۰۴ درصد ظرفیت باربری بیشتری را در مقایسه با نمونه مشابه بدون ورق CFRP نشان داد.
۵. نمونه فاقد بازشو و مجهز به ورق تقویتی (با بار ۶۵۱۰۱ کیلونیوتن) در مقایسه با نمونه‌های دارای بازشو به قطر ۱۵ و ۵ میلی‌متر، به‌ترتیب ۴۰۰۴ و ۲۵۰۶ درصد ظرفیت باربری بیشتر و افت مقاومت کمتری داشت. در بین نمونه‌های دارای بازشو، نمونه با قطر ۱۵ میلی‌متر بیشترین میزان افت مقاومت و زوال سختی را تجربه کرد.
۶. بررسی کانتورهای تنش و کرنش پلاستیک در نمونه‌های دارای عضو مدفون قوطیشکل در ستون CFST نشان داد که سطح گسترش کرنش پلاستیک و تغییرشکل‌های ماندگار در نمونه فاقد بازشو کمتر از سایرین بود. همچنین، در نمونه‌های مجهز به ورق موجدار، مقادیر کمانش در ستون‌های کناری و تغییرشکل درون‌صفحه‌ای ورق اتصال‌دهنده به‌طور محسوسی کاهش یافت.
۷. مطالعه تأثیر استفاده از عضو مدفون با مقاطع دایره‌ای و مربعی و عرض‌های مختلف در داخل ستون CFT حاکی از آن است که این متغیر تأثیر معناداری بر ظرفیت باربری نهایی و میزان جذب انرژی نمونه‌ها نداشته است.
۸. کاهش عرض ورق موجدار منجر به کاهش قابل‌توجه کرنش پلاستیک و کمانش‌های جانبی در ورق و ستون شد و الگوی گسترش تنش را یکنواخت‌تر کرد. به‌طور خاص، کاهش عرض ورق از ۴ به ۲ سانتیمتر در ترکیب با ورق CFRP، باعث کاهش کمانش‌های درون‌صفحه‌ای و افزایش ظرفیت باربری گردید.
۹. تلفیق ورق موجدار با ورق CFRP به بهبود چشمگیر عملکرد نمونه‌ها منجر شد. نمونه ۱۸ (دارای ورق موجدار با اندازه بال ۲ سانتیمتر و ورق CFRP) به‌طور متوسط ۴۸ درصد ظرفیت باربری بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها ثبت کرد. جالب‌تر آنکه، استفاده از ورق موجدار با عرض ۲ سانتیمتر (حتی بدون حضور ورق CFRP) ظرفیت باربری بالاتری را در مقایسه با نمونه دارای ورق CFRP و ورق موجدار با عرض ۴ سانتیمتر نشان داد.

منابع

- AISC. (۲۰۰۵). *Specification for structural steel buildings*. American Institute of Steel Construction.
- Chen, X., Zhou, T., Chen, Z., Liu, J., & Jiang, B. (۲۰۲۰). Mechanical properties of special-shaped concrete-filled steel tube columns under eccentric compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 175, ۱۰۶۳۶۸. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106368>
- Deng, Y., Zhang, Z., & Chen, J. (۲۰۲۱). Seismic behavior of square CFST columns strengthened with CFRP under high axial load: Experimental and numerical study. *Engineering Structures*, 243, ۱۱۲۶۶۷. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112667>
- Elsanadedy, H. M., Almusallam, T. H., Al-Salloum, Y. A., & Abbas, H. (۲۰۱۷). Effect of blast loading and subsequent seismic events on CFRP-strengthened RC columns. **Thin-Walled Structures*, ۱۱۹*, ۸۷۰-۸۸۴. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.07.019>
- Fanggi, B. A. L., & Ozbakkaloglu, T. (۲۰۱۵). Behavior of square and rectangular ultra high-strength concrete-filled FRP tubes under axial compression. *Composites Part B: Engineering*, 70, ۱۹۴-۲۱۰. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.037>
- Han, L. H., Li, W., & Bjorhovde, R. (۲۰۱۴). Developments and advanced applications of concrete-
- Jiang, H., & Han, L. H. (۲۰۲۱). Finite element analysis on seismic behavior of CFRP confined rectangular CFST columns. *Structures*, 33, ۱۹۴۱-۱۹۵۷. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.05.069>

Liao, F. Y., Han, L. H., & He, S. H. (۲۰۱۲). Behavior of CFST short columns and beams with initial concrete imperfection: Analysis and modeling. *Journal of Constructional Steel Research*, 70, ۵۷-۷۴. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.09.001>

Liu, J., Zhou, X., & Fan, J. (۲۰۲۰). Seismic performance of CFRP-strengthened concrete-filled steel tube columns under cyclic loading. *Journal of Composites for Construction*, 24(۲), ۰۴۰۲۰۰۰۳. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-0614.0001001](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-0614.0001001)

Ministry of Roads and Urban Development. (۲۰۱۳). *Iranian National Building Code, Part 10: Steel Building Design* (۲nd ed.). Iran Development Publications. (Original work published ۱۳۹۲)

Ozbakkaloglu, T., & Fanggi, B. L. (۲۰۱۴). Axial compressive behavior of FRP-concrete-steel double-skin tubular columns made of normal- and high-strength concrete. *Journal of Composites for Construction*, 18(۱), ۰۴۰۱۳۰۲۰. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-0614.0001010](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-0614.0001010)

Tao, Z., Wang, Z. B., & Yu, Q. (۲۰۱۳). Finite element modeling of concrete-filled steel stub columns under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 89, ۱۲۱-۱۳۱. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.07.001>

Varma, A. H., Ricles, J. M., Sause, R., & Lu, L. W. (۲۰۰۲). Experimental behavior of high strength square concrete-filled steel tube beam-columns. *Journal of Structural Engineering*, 128(۳), ۳۰۹-۳۱۸. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9440\(2002\)128:3\(309\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9440(2002)128:3(309))

Wang, Z., Wang, D., Smith, S. T., & Lu, D. (۲۰۱۹). Experimental and numerical study on the seismic performance of CFRP-confined circular CFST columns. *Engineering Structures*, 199, ۱۰۹۶۲۰. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109620>

Xiong, Q., Chen, Z., Zhang, W., Du, Y., Zhou, T., & Kang, J. (۲۰۱۷). Compressive behaviour and design of L-shaped columns fabricated using concrete-filled steel tubes. *Engineering Structures*, 152, ۷۵۸-۷۷۰. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.044>

Xu, M., Zhou, T., Chen, Z., Li, Y., & Bisby, L. (۲۰۱۶). Experimental study of slender LCFST columns connected by steel linking plates. *Journal of Constructional Steel Research*, 127, ۲۳۱-۲۴۱. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.08.009>

Zhang, W., Chen, Z., & Xiong, Q. (۲۰۱۸). Performance of L-shaped columns comprising concrete-filled steel tubes under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 145, ۵۷۳-۵۹۰. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.02.000>

Zhao, X. L., & Zhang, L. (۲۰۰۷). State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures. *Engineering Structures*, 29(۸), ۱۸۰۸-۱۸۲۳. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.10.006>