



## بررسی رفتار اتصال صلب تیر به ستون فولادی CFT با وجود ورق پیوستگی داخلی سوراخ شده سروش یعقوبی زاده؛ نادر فنائی<sup>۲</sup>

چکیده

ستون فولادی با مقطع توخالی پر شده با بتن (CFT)، گزینه‌ای مطلوب و اقتصادی برای طراحی ساختمان‌های با ارتفاع متوسط و بلند می‌باشد. با این وجود، عدم امکان اجرای ورق پیوستگی داخلی مانند قاب‌های خمشی متداول به علت وجود بتن درون مقطع ستون فولادی، باعث ضعیف شدن چشمه اتصال می‌شود. مشکل اصلی در به کار بردن ورق پیوستگی داخلی، عدم وجود یک آئین نامه معتبر جهت طراحی و تعیین مقاومت و تعیین اندازه شکل و اندازه سوراخ ورق پیوستگی می‌باشد، به طوری که در فصل ۹ از آیین نامه شماره ۹ CIDECT فقط به روابط طراحی ورق‌های پیوستگی خارجی اشاره شده و همچنین در آیین نامه AISC نیز دستورالعملی در مورد طراحی ورق‌های پیوستگی داخلی در ستون‌های CFT ارائه نشده است. راهکار پیشنهادی در این کار تحقیقاتی، بریدن ورق‌های پیوستگی داخلی در ستون‌های پر شده با بتن به شکل مربعی یا لوزی شکل با هدف عبور بتن می‌باشد. در اثر سوراخکاری ورق پیوستگی، توزیع تنش در این ورق نسبت به حالت بدون سوراخ، تغییر کرده و مقاومت و سختی آن کاهش می‌یابد. عوامل موثر در توزیع تنش در ورق پیوستگی، شامل شکل و بعد سوراخ و ضخامت ورق پیوستگی می‌باشد. در این تحقیق، با استفاده از مدلسازی آباکوس به آنالیز حساسیت روی تأثیر اندازه و شکل سوراخ ورق پیوستگی پرداخته شده و توزیع تنش این ورق بررسی شده است که نتیجه گردید سوراخ لوزی شکل از سوراخ مربعی مناسبتر می‌باشد. نهایتاً در این تحقیق برای تعیین مقاومت ورق‌های پیوستگی سوراخدار لوزی شکل و مربعی شکل، روابطی ارائه شده است.

**واژگان کلیدی:** ستون پر شده با بتن، اتصال صلب تیر به ستون، ورق پیوستگی داخلی سوراخدار، سوراخ مربعی، سوراخ لوزی

<sup>۱</sup> فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، sosh19632@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، fanaie@kntu.ac.ir



## Investigation on the Behavior of Beam to Column Rigid Connection in Concrete Filled Tube (CFT) in Presence of Perforated Internal Continuity Plate

Souroosh Yaghoubizadeh,<sup>1</sup> Nader Fanaie<sup>2</sup>

### Abstract

A hollow-section concrete-filled steel column (CFT) is a cost-effective option for designing medium and tall buildings. However, the inability to construct internal continuity plate in a manner similar to conventional continuity plate in moment resisting frames, due to the presence of concrete within the steel column cross-section, weakens the panel zone. Lack of standards and code for design and construction of CFT column connections with internal perforated continuity plate to allow concrete to pass through has been a challenge for engineers. In Chapter 9 of CIDECT Code No. 9, design relationships are presented for external continuity plates. Also, AISC code does not provide any guidance on the design of internal continuity plate in CFT columns. The proposed solution in this research work is to cut square or diamond shaped perforation with the aim of passing concrete. As a result of drilling the continuity plate, the stress distribution in the plate is changed and as a result its strength and stiffness decreases. The factors affecting on stress distribution in the continuity plate include the shape and dimension of the hole and the thickness of the continuity plate. In this study, using ABAQUS modeling, sensitivity analysis is performed on the influence of the size and shape of the perforated plate and the stress distribution of the continuity plate is investigated and it is concluded that the diamond shape is more suitable than the square hole. Finally, in this study, some relationships are presented to determine the strength of diamond and square shaped perforated plates.

### Keywords:

Concrete Filled Column, Rigid beam-to-column connection, Internal Perforated Continuity Plate, Square-shaped hole, Diamond-shaped hole

<sup>1</sup>. Graduate of Structural Engineering, K. N. University of Technology, sosh19632@gmail.com

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, fanaie@kntu.ac.ir

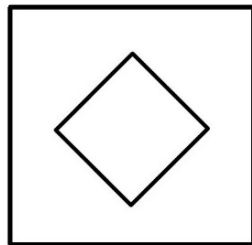


## ۱- مقدمه

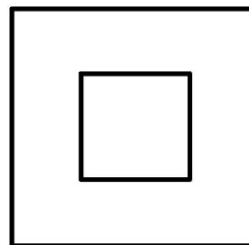
در طراحی سازه، انتخاب نوع مصالح مصرفی در سازه امر بسیار مهمی است که این تصمیم تابع مسائل مختلفی مانند نوع سازه، وضعیت اقتصادی پروژه، تجربه و مهارت طراح می‌باشد. هدف اصلی طراح، طراحی سازه به صورت اقتصادی و درعین حال با عملکرد مطلوب می‌باشد. بتن و فولاد، مصالح پرکاربرد در ساخت ساختمان‌ها هستند. از مزایای بتن می‌توان به سختی بالا و مقاومت مناسب در برابر آتش‌سوزی اشاره کرد. همچنین فولاد مصالحی با شکل‌پذیری بالا و نسبت مقاومت به وزن زیاد می‌باشد. اعضای مختلط در ساختمان به اعضای اطلاق می‌گردد که از ترکیب مقاطع فولادی با بتن ساده یا مسلح حاصل می‌گردد که در آن فولاد و بتن به صورت یکپارچه در توزیع نیروی اعمالی مشارکت می‌کنند [۱]. در سال‌های اخیر مقاطع فولادی جعبه‌ای به علت بازدهی بالا در برابر فشار و پیچش بسیار پرطرفدار شده‌اند. پر کردن مقطع فولادی با بتن به علت جلوگیری از کماتش موضعی، مقاومت و سختی مقطع را بالا می‌برد. از مزایای دیگر مقاطع پر شده با بتن می‌توان به مقاومت مناسب در برابر آتش‌سوزی و پاسخ بهتر اتصالات آن در برابر بارهای جانبی اشاره کرد [۲]. ستون فولادی با مقطع توخالی پر شده با بتن (CFT)، گزینه‌ای مطلوب و اقتصادی برای طراحی ساختمان‌های با ارتفاع متوسط و بلند می‌باشد. با این وجود، عدم امکان اجرای ورق پیوستگی داخلی مانند قاب‌های خمشی متداول به علت وجود بتن درون مقطع ستون فولادی، باعث ضعیف شدن چشمه اتصال می‌شود. راهکار تأمین سختی در اتصالات ستون CFT، استفاده از ورق پیوستگی داخلی سوراخ شده جهت ایجاد امکان عبور بتن می‌باشد. مشکل اصلی در به کار بردن ورق پیوستگی داخلی، عدم وجود یک آئین نامه معتبر جهت طراحی و تعیین مقاومت و تعیین اندازه شکل و اندازه سوراخ ورق پیوستگی می‌باشد. راهکار پیشنهادی در این کار تحقیقاتی، بریدن ورق‌های پیوستگی داخلی در ستون‌های پر شده با بتن به شکل مربعی یا لوزی شکل (شکل ۱) با هدف عبور بتن می‌باشد. استفاده از ورق پیوستگی سوراخ شده داخلی به جای استفاده از ورق پیوستگی خارجی، به علت مطابقت با روند ساخت و اجرای ستون قوطی در کشور و عدم اشغال فضا در خارج از ستون و عدم مزاحمت برای اجرای دیوارها و سیستم نما مورد توجه می‌باشد. باید به این نکته توجه داشت که در اثر سوراخکاری ورق پیوستگی، توزیع تنش در این ورق نسبت به حالت بدون سوراخ، تغییر کرده و مقاومت آن کاهش می‌یابد. عوامل مؤثر در توزیع تنش در ورق پیوستگی، شامل شکل و بعد سوراخ می‌باشد که در ادامه بررسی خواهد شد.

## ۲- روش تحقیق

به منظور بررسی اثر وجود سوراخ مربعی و لوزی در ورق پیوستگی (شکل ۱) و بررسی نحوه توزیع تنش در اتصالات صلب ستون پر شده با بتن، از مدل‌سازی اجزا محدود در نرم‌افزار آباکوس ۶،۱۴ استفاده شده است. در صورت مدل‌سازی دقیق، رعایت شرایط مرزی و تعیین رفتار صحیح مصالح، نرم‌افزار آباکوس نتایج دقیقی ارائه خواهد داد. حال به بررسی مدل فولاد، مدل بتن، ابعاد مدل، بارگذاری نمونه‌ها، المان‌های اجزاء محدود و مش بندی و صحت سنجی می‌پردازیم.



(ب)



(الف)

شکل ۱ - شماتیک شکل برش ورق‌ها (الف) مربع (ب) لوزی



## ۱-۲ فولاد

در مصالح با تغییر شکل الاستیک، تغییرات تنش برحسب کرنش با قانون هوک بیان می‌شود و در مصالحی که تغییر شکل پلاستیک دارند، قانون جریان، جایگزینی برای قانون هوک می‌باشد. در مدل‌سازی کار تحقیقاتی انجام شده، تغییر شکل‌های بزرگ و رفتار غیرخطی مصالح در نظر گرفته شده است تا دقت مدل‌سازی بالاتر رود. روابط غیرخطی تنش-کرنش باعث می‌شوند که سختی سازه در سطوح مختلف بارگذاری دچار تغییر شود. اگر بخواهیم رفتار مصالح را تحت اثر بارگذاری مدل‌سازی کنیم، به مشخصات الاستیک مصالح، شامل مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و نسبت پواسون نیاز داریم. در این کار تحقیقاتی برای تعریف تنش تسلیم، تنش نهایی و کرنش نهایی در نرم‌افزار آباکوس از مقادیر تنش و کرنش ارائه شده در مقالات انتخاب شده برای صحت‌سنجی استفاده شده است که مطابق مقادیر ارائه شده در جدول ۱ می‌باشد. قابل ذکر است که مدول الاستیسیته فولاد برابر ۲۰۰ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است و نسبت پواسون فولاد نیز ۰٫۳ می‌باشد.

جدول ۱ - مشخصات فولاد مورد استفاده در تحقیقات ریکلز و همکاران [۳]

فولاد	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	درصد افزایش طول
بال تیر	۲۸۲	۴۵۶	۲۷
جان تیر	۳۲۵	۴۷۳	۲۶
بال ستون	۳۵۲	۴۶۹	۲۹
جان ستون	۳۸۸	۵۰۳	۲۹
ورق پیوستگی	۲۸۰	۴۶۳	۲۴

## ۲-۲ بتن

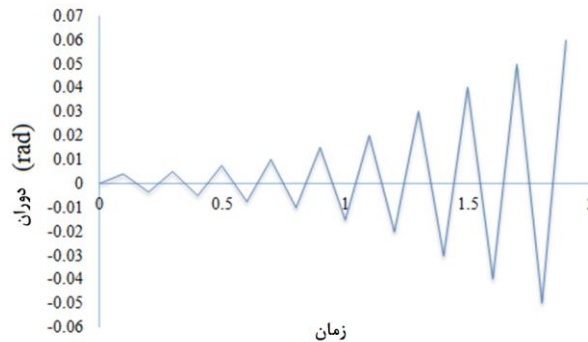
در این کار تحقیقاتی، مدل‌سازی بتن در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از مدل پلاستیسیته بتن آسیب‌دیده انجام شده است. این مدل در نرم‌افزار آباکوس برای مدل‌سازی بتن و دیگر مواد مشابه آن به کار می‌رود. این مدل از ترکیب کشش ایزوتروپیک و فشار پلاستیک جهت نمایش رفتار غیرخطی بتن استفاده می‌کند. همچنین در این مدل، کاهش سختی با در نظر گرفتن کرنش پلاستیک در کشش و فشار تعریف می‌شود. این مدل در حالت آسیب‌دیده به صورت پیوسته و بر اساس رفتار پلاستیک می‌باشد و مکانیسم خرابی مدل‌سازی شده در آن، ترک‌خوردگی در کشش و خردشدگی در فشار می‌باشد. [۴]

## ۳-۲ ابعاد مدل

از آنجا که طول رایج برای ستون در ساختمان‌ها برابر با سه تا چهار متر است، در این مدل نیز طول ستون مرکب با توجه به این امر و مدل‌های صحت‌سنجی شده برابر ۳٫۶ متر در نظر گرفته شده است تا به شرایط واقعی نزدیک بوده و نتایج حاصل شده از این مدل‌ها قابل استناد باشد. همچنین طول دهانه بین دو ستون ۵٫۶ متر در نظر گرفته شده است.

## ۴-۲ تاریخچه بارگذاری

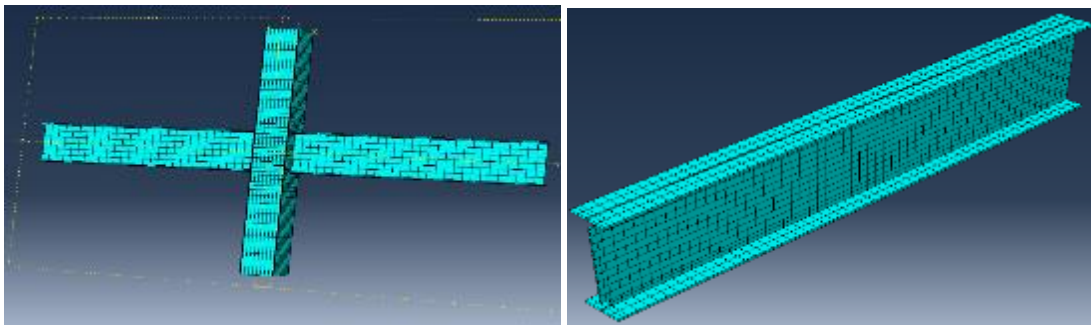
بارگذاری به صورت چرخه‌ای و بر اساس شرایط پروتکل SAC [۵] اعمال شده است و برای هر دامنه بارگذاری، یک چرخه در نظر گرفته شده است. بارگذاری اعمالی در لبه تیر می‌باشد و نمودار این نوع بارگذاری در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل- ۲ بارگذاری چرخهای استفاده شده در تحلیل اجزاء محدود بر اساس پروتکل SAC [۵]

### ۲-۵ المان‌های اجزاء محدود و مش بندی

برنامه آباکوس دارای المان‌های متعددی بوده که دارای قابلیت‌های مختلفی هستند. در مدل سازی اجزاء محدود انجام شده در این تحقیق از المان‌های solid استفاده شده است. در تمام موارد المان‌های Solid این توانایی را دارند که میزان تنش را به طور دقیق تعیین کنند. همچنین در این المان‌ها، مؤلفه‌های تنش و کرنش برحسب جهات محورهای اصلی تعیین می‌شوند. همه المان‌های فولادی و بتنی در مدل آباکوس به صورت Solid مدل شده‌اند. المان‌های مکعبی C3D20R در بخش‌های پیچیده‌تر مدل برای دقت بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است و این المان سه‌بعدی، یکی از جامع‌ترین المان‌های موجود در آباکوس می‌باشد [۴]. برای مدل سازی بتن از المان‌های مکعبی C3D8R استفاده شده است. مطابق شکل ۳ در ساخت مدل، برای جداره فولادی، المان مکعبی با انتگرال کاهش یافته بیست گرهی (المان C3D20R) و برای هسته بتنی ستون کامپوزیت، المان مکعبی با انتگرال کاهش یافته هشت گرهی مورد استفاده قرار گرفته است (المان C3D8R). ابعاد مش در این مدل سازی بر اساس تحقیقات ریکلز برای ستون فولادی و مقطع بتنی به صورت متغیر ۲۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده و برای دیافراگم داخلی از المان گوه با ۱۵ گره استفاده شده است (المان C3D15). ابعاد مش بندی برای این مقطع ۲۵ میلی‌متر می‌باشد. علت مش بندی به این صورت، محدودیت سیستم پردازشی کامپیوتر و افزایش سرعت پردازش مدل می‌باشد.



(ب)

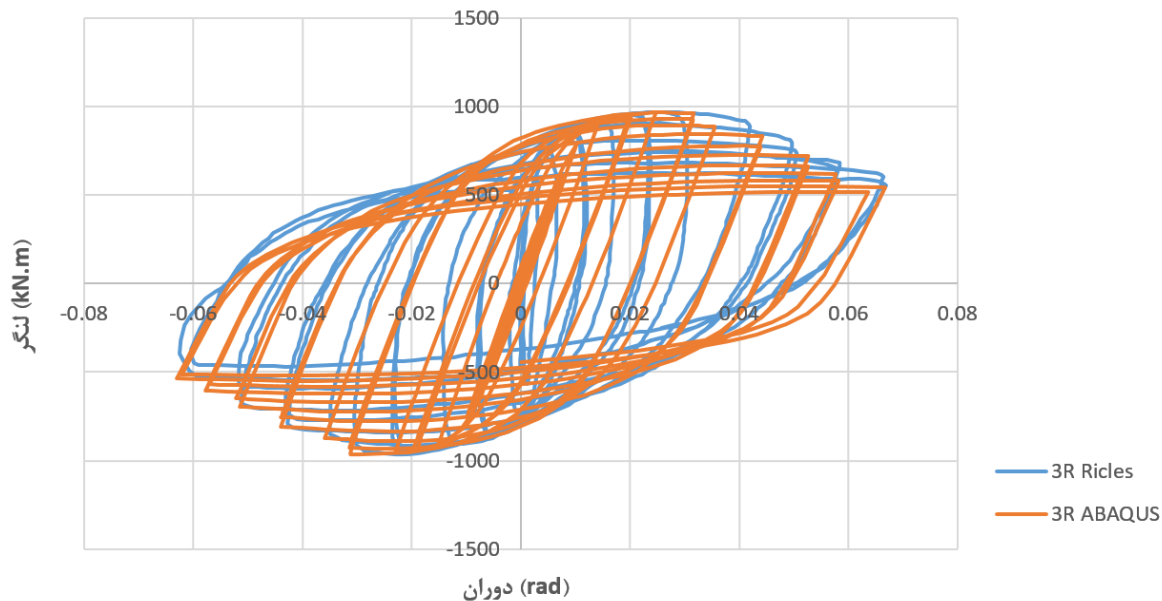
(الف)

شکل ۳ - الف - مش بندی تیر در نمونه‌های تحلیلی در آباکوس بر اساس تحقیقات ریکلز و همکاران ب - مش بندی تیر و ستون جهت عملیات صحت سنجی



## ۲-۶ صحت سنجی

به منظور اطمینان از صحت نتایج تحلیل عددی، مدل اجزاء محدود در این مطالعه با توجه به پاسخ چرخه‌ای اتصال که توسط ریکلز و همکاران [۳] به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده شده بود، صحت سنجی گردید. با توجه به نمونه‌های ارائه شده توسط ریکلز و همکاران، مدل R۳ جهت صحت سنجی و مدل سازی انتخاب شد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از مدل سازی از نظر انرژی تلف شده و سطح زیر نمودار توسط اتصال مدل شده در مقایسه با اتصال واقعی همخوانی دارد.



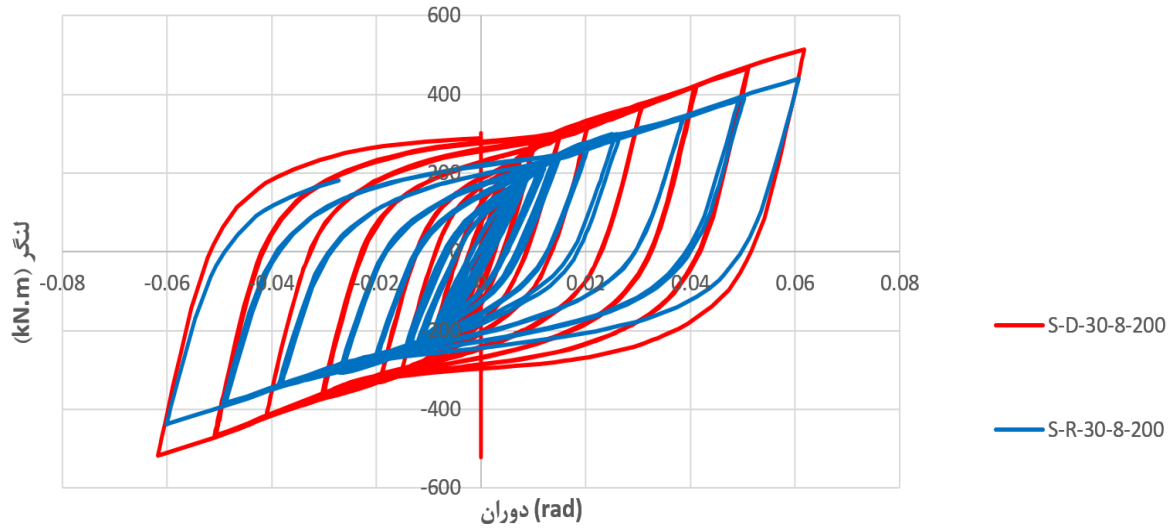
شکل- ۴ مقایسه نتایج حاصل از نرم افزار آباکوس و نتایج آزمایشگاهی نمونه R۳ ریکلز و همکاران

## ۳- بحث روی نتایج مدلسازی

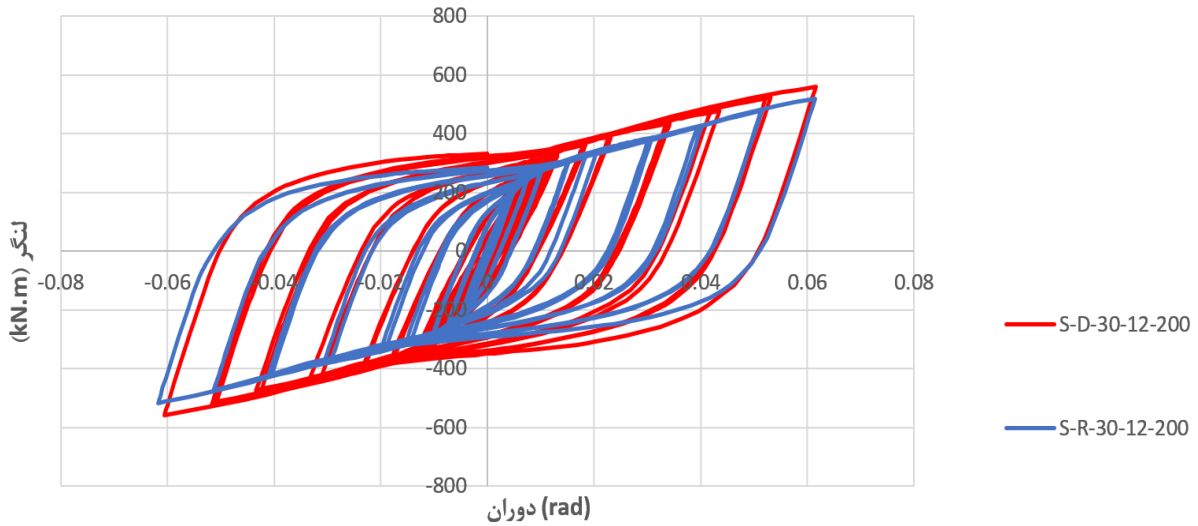
با توجه به نمودار لنگر - دوران شکل ۵ مشخص می‌شود که میزان باربری نمونه لوزی شکل با ضخامت ورق ۸ میلی‌متر و ۱۲ میلی‌متر در دوران ۰/۰۲، ۰/۰۴ و ۰/۰۶ رادیان بیشتر می‌باشد؛ این روند مطابق شکل ۶ برای ورق با ضخامت ۱۲ میلی‌متر نیز تکرار می‌شود. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ که نتایج حاصل از مدل سازی برای نمونه‌های با ضخامت ۸ میلی‌متر و ۱۲ میلی‌متر بدون بتن می‌باشد، شاهد روند اختلاف میان مقاومت نمونه لوزی و مربعی می‌باشیم. همچنین در تمامی نمونه‌ها شاهد افزایش مقاومت در چرخه‌های بارگذاری هستیم. به عبارتی میزان مقاومت نمونه‌های لوزی و مربع شکل با ضخامت ۸ میلی‌متر در دوران ۰/۰۴ رادیان به ترتیب برابر ۴۱۷ kN.m و ۳۸۲ kN.m می‌باشد. میزان سختی اولیه اتصال در نمونه مربعی، ۱۵ درصد کمتر از نمونه لوزی شکل می‌باشد. میزان مقاومت در نمونه لوزی شکل، ۱۰ درصد بالاتر از نمونه مربعی شکل می‌باشد که نشان دهنده توزیع بهتر تنش در نمونه لوزی شکل می‌باشد (شکل-۵). با بررسی شکل ۹ نیز مشخص می‌شود که میزان توزیع تنش در نمونه لوزی شکل بهتر از نمونه مربعی شکل می‌باشد. همچنین میزان تمرکز کرنش در نمونه مربعی با توجه به شکل ۱۰ که نشان دهنده میزان PEEQ می‌باشد بیشتر از نمونه دیگر است. کرنش مؤثر یا کرنش پلاستیک معادل نامیده می‌شود که یک پارامتر اسکالر است. این پارامتر فاقد مؤلفه بوده و همیشه بزرگ‌تر یا مساوی صفر می‌باشد. پارامتر PEEQ که در مواد شکل‌پذیر برای مشخص شدن میزان تسلیم شدن ماده استفاده می‌شود، در هر نقطه



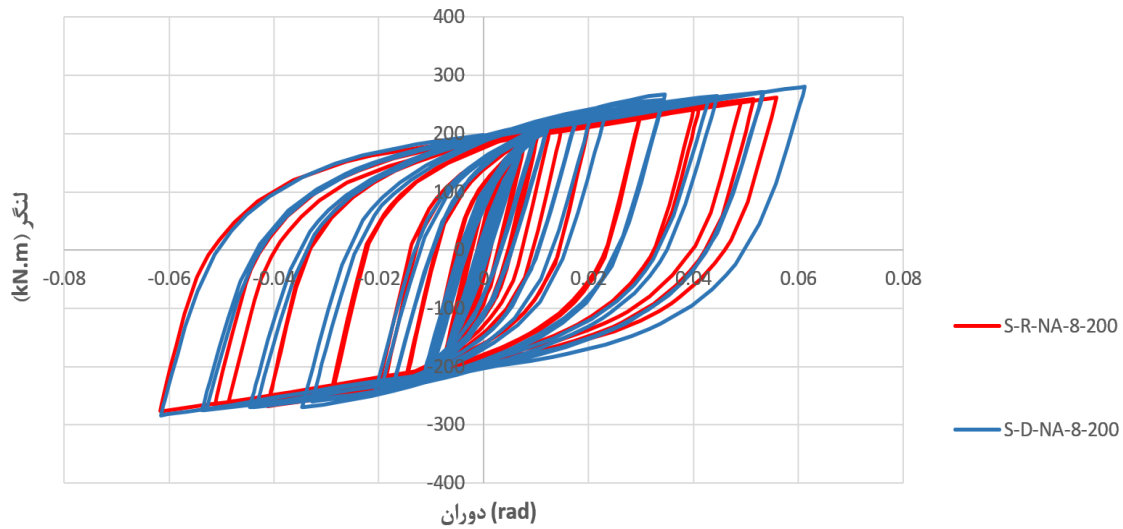
بزرگ‌تر از صفر باشد یعنی ماده وارد حالت پلاستیک شده است.



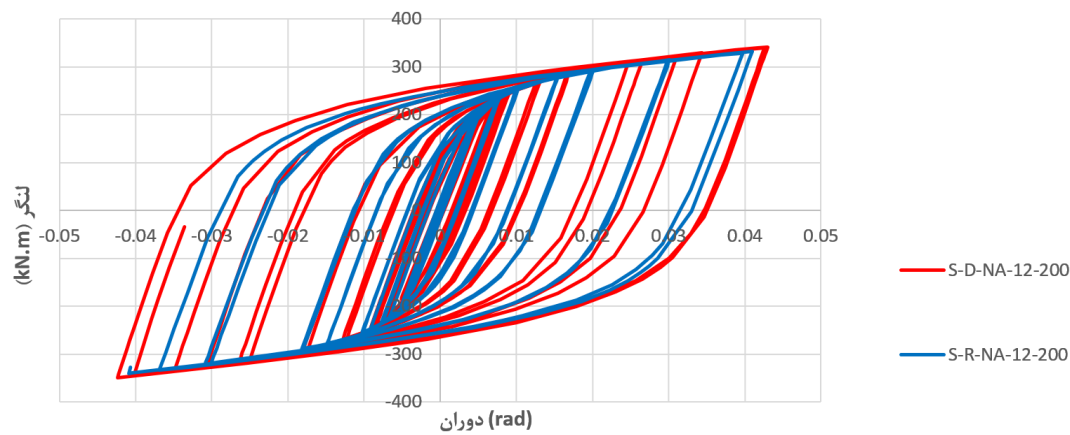
شکل - ۵ مقایسه نمودار لنگر- دوران نمونه‌های لوزی (S-D-30-8-200) و مربعی (S-R-30-8-200) شکل با ضخامت ورق پیوستگی ۸ میلی‌متر



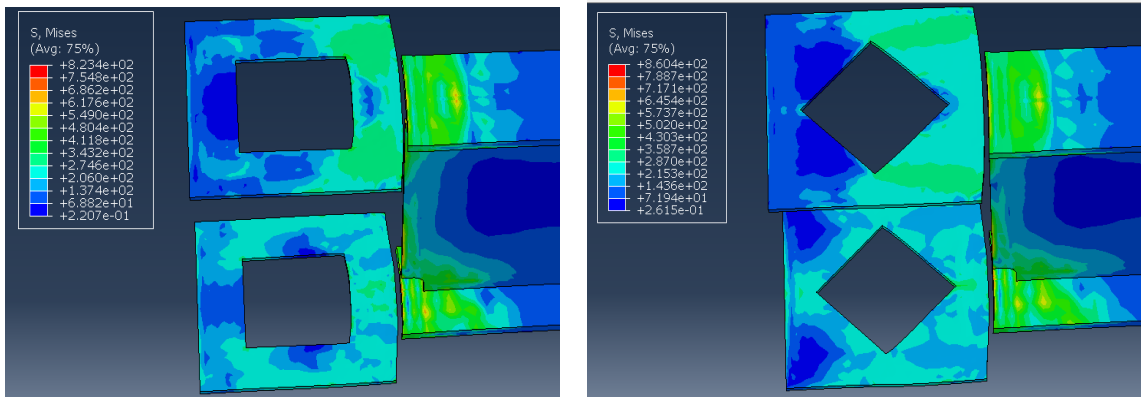
شکل - ۶ مقایسه نمودار لنگر- دوران نمونه‌های لوزی (S-D-30-12-200) و مربعی (S-R-30-12-200) شکل با ضخامت ورق پیوستگی ۱۲ میلی‌متر



شکل ۷ - مقایسه نمودار لنگر- دوران نمونه‌های لوزی (S-D-NA-8-200) و مربعی (S-R-NA-8-200) شکل با ضخامت ورق پیوستگی ۸ میلی‌متر بدون بتن در ستون

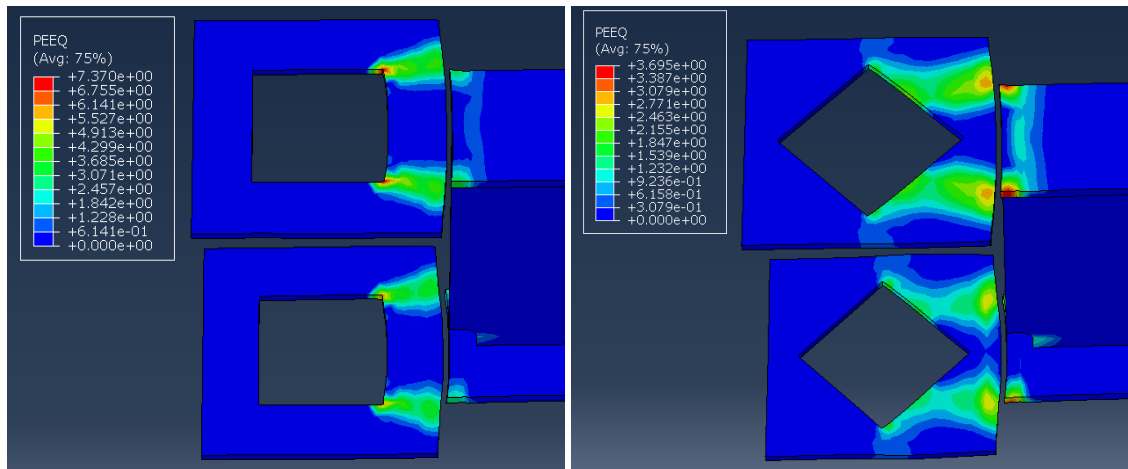


شکل ۸ - مقایسه نمودار لنگر- دوران نمونه‌های لوزی (S-D-NA-12-200) و مربعی (S-R-NA-12-200) شکل با ضخامت ورق پیوستگی ۱۲ میلی‌متر بدون بتن در ستون



شکل ۹ - مقایسه میزان توزیع تنش فون میسز در نمونه‌های لوزی (S-D-30-8-200) و مربعی (S-R-30-8-200) شکل با ضخامت ورق پیوستگی ۸ میلی‌متر





شکل - ۱۰ مقایسه میزان توزیع کرنش پلاستیک معادل در نمونه‌های لوزی (S-D-30-8-200) و مربعی (S-R-30-8-200) شکل با ضخامت ورق پیوستگی ۸ میلی‌متر

#### ۴- نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج مدل سازی برای ضخامت و بعد متفاوت ورق پیوستگی در اتصال صلب تیر به ستون پر شده با بتن، مشخص می‌شود که ورق با سوراخ مربعی دارای حداکثر تنش حدود ۲۰ درصد بالاتر نسبت به ورق با سوراخ لوزی شکل می‌باشد؛ همچنین به علت افزایش حداکثر تنش، ورق پیوستگی با سوراخ مربعی شکل نسبت به حالت سوراخ لوزی شکل به میزان ۱۰ درصد کاهش مقاومت از خود نشان می‌دهد. کرنش پلاستیک معادل در لبه نمونه‌های با سوراخ مربعی، دارای بیشترین مقدار در مقایسه با حالت لوزی شکل بوده است و با افزایش ضخامت باز هم این روند ادامه دارد. بنابراین با توجه به نتایج حاصل مشخص می‌شود که رفتار نمونه لوزی شکل جهت سوراخ کاری ورق پیوستگی، بهتر از نمونه مربعی بوده و نمونه لوزی شکل دارای رفتاری بهینه‌تر برای استفاده در چشمه اتصال می‌باشد. اتصال با ورق پیوستگی داخلی با سوراخ لوزی شکل به علت بهبود توزیع تنش و راحتی نصب و اجراء، جزو یکی از بهترین گزینه‌ها برای اتصالات صلب در قاب خمشی با ستون CFT می‌باشد.

#### منابع

- [1] ANSI/AISC 360-10, 2010. "Specification for Structural Steel Buildings". Chicago (IL): American Institute of Steel Construction, Inc.
- [2] J.W. Park, A.M. Kang, S.C. Yang, 2005. "Experimental Studies of Wide Flange Beam to Square Concrete-Filled Tube Column Joints with Stiffening Plates Around the Column" Journal of Structural Engineering Vol. 131, Issue 12 pp. 1866-1876.
- [3] J. M. Ricles, M.ASCE; S. W. Peng; and L. W. Lu, M.ASCE, 2004. "Seismic Behavior of Composite Concrete Filled Steel Tube Column-Wide Flange Beam Moment Connections". Journal of Structural Engineering, Vol. 130, No. 2, pp. 223-232.
- [4] D. Hibbit, B. Karlsson, P. Soensen; "ABAQUS: User information Manual", Revision 6.14, 2014, Dassault Systèmes.
- [5] FEMA 350, 2000. "Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings". SAC Joint Venture.