

## Investigation of Cyclic Behavior on Types of Reduced Beam Section Moment Connections in Flange

Hamid Saberi<sup>1\*</sup>, Vahid Saberi<sup>1</sup>, Mohammadreza Yazdaninejad<sup>2</sup>, Abbasali Sadeghi<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Eyvanekey University, Semnan, Iran

2- M. Sc, Department of Civil Engineering, Eyvanekey University, Semnan, Iran

3- PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

### ABSTRACT

Nowadays, the use of innovative methods such as cross-sectional reduction method in designing moment connections of steel structures has become widespread among designers. The method of reducing the cross section by deliberately weakening the beam in a part close to the connection of the beam and column reduces the plastic strains of the joint and the formation of a plastic hinge in the beam. In this paper, the effect of reduced beam section (RBS) on joint strength by removing the plastic hinge from the column and also the optimal performance of various reduced beam section shapes through different indicators such as hysteresis curve, pushover diagram, energy dissipation of connection and ... are checked. In this research, modelling and nonlinear analysis of 10 examples of reduced beam section with and without beam section reduction using ABAQUS software has been investigated under cyclic loading. The results showed that all models with reduced beam section have the ability to transfer the place of formation of plastic strains or the same plastic hinge into the beam and away from the column. Among all the methods of reducing the cross-section, the method of reducing flange beam section with uneven holes and enlarging inward to the beam has shown a better performance than other samples. The energy dissipation of this method is increased 68% versus the reference sample without reduced section. The flexural capacities of sample with reducing flange beam section with uneven holes and enlarging inward to the beam has shown better cyclic performance. The values of flexural capacity in the mentioned sample is decreased 33% versus the reference sample without reduced section. This subject causes plasticization faster and as a result, more energy dissipation is obtained versus other samples.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 26 March 2021

**Revise Date:** 03 July 2021

**Accept Date:** 03 November 2021

**Keywords:** Moment Connection, Reduced Beam Section, Cyclic Loading, Plastic Hinge, Energy Dissipation, ABAQUS Software.

doi: 10.22065/JSCE.2021.278416.2401

\*Corresponding author: Hamid Saberi.

Email address: saberi.hamid@gmail.com

## بررسی رفتار چرخه‌ای انواع اتصالات خمشی تیر با مقطع کاهش یافته در بال

حمید صابری<sup>۱\*</sup>، وحید صابری<sup>۱</sup>، محمدرضا یزدانی نژاد<sup>۲</sup>، عباسعلی صادقی<sup>۳</sup>

- ۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه غیرانتفاعی ایوانکی، سمنان، ایران  
 ۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه غیرانتفاعی ایوانکی، سمنان، ایران  
 ۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

### چکیده

امروزه در طراحی اتصالات خمشی سازه‌های فولادی استفاده از روش‌های نوآورانه‌ای همچون روش کاهش مقطع در میان طراحان رواج فراوانی یافته است. روش کاهش مقطع با تضعیف عمدی تیر در قسمتی نزدیک به محل اتصال تیر و ستون باعث کاهش کرنش‌های پلاستیک اتصال و تشکیل مفصل پلاستیک در تیر می‌شود. در این تحقیق، تأثیر کاهش مقطع بال تیر (RBS) در مقاومت اتصال از طریق دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون و همچنین عملکرد بهینه‌ی اشکال مختلف کاهش مقطع در بال تیر از طریق شاخص‌های مختلف نظیر منحنی هیستریزس، نمودار بارافزون، استهلاک انرژی توسط اتصال و ... مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، مدل‌سازی و تحلیل غیرخطی ۱۰ نمونه‌ی کاهش مقطع بال تیر بعلاوه یک نمونه بدون کاهش مقطع تیر با استفاده از نرم افزار اجزا محدودی آباکوس تحت بارگذاری چرخه‌ای صورت گرفته است. نتایج نشان داد، تمام مدل‌های دارای کاهش مقاطع، توانایی انتقال محل تشکیل کرنش‌های پلاستیک یا همان مفصل پلاستیک را به داخل تیر و دورتر از بر ستون دارند. در میان همه‌ی روش‌های کاهش مقاطع، روش کاهش مقطع بال تیر با سوراخ‌های نابرابر و بزرگ شونده رو به داخل تیر عملکرد بهتری را نسبت به سایر نمونه‌ها از خود نشان داده است. میزان استهلاک انرژی در نمونه‌ی حاوی این روش کاهش مقطع نسبت به نمونه‌ی مرجع بدون کاهش ۶۸ درصد افزایش داشته است که اختلاف قابل توجهی نسبت به سایر نمونه‌ها داشته است. ظرفیت خمشی نمونه‌ی دارای کاهش مقطع بال تیر با سوراخ‌های نابرابر و بزرگ شونده رو به داخل تیر، عملکرد چرخه‌ای مناسب‌تری را نشان داده است، مقادیر ظرفیت خمشی در نمونه‌ی مذکور نسبت به نمونه‌ی مرجع بدون کاهش ۳۳ درصد کاهش یافته است. این موضوع باعث پلاستیک شدگی زودتر و اتلاف انرژی بیشتر نسبت به سایر نمونه‌ها می‌شود.

کلمات کلیدی: اتصال خمشی، کاهش مقطع بال تیر، بارگذاری چرخه‌ای، مفصل پلاستیک، اتلاف انرژی، نرم‌افزار آباکوس.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.278416.2401	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/JSCE.2021.278416.2401	۱۴۰۱/۴/۰۱	۱۴۰۰/۸/۱۲	۱۴۰۰/۸/۱۲	۱۴۰۰/۴/۱۲	۱۴۰۰/۱/۰۶
				حمید صابری <sup>*</sup>		نویسنده مسئول:
				saberi.hamid@gmail.com		پست الکترونیکی:

## ۱- مقدمه

اتصالات قاب خمشی برای مقاومت در برابر نیروهای خمشی و همچنین استهلاک انرژی زلزله در حرکات رفت و برگشتی، طراحی می‌شوند. قبل از زلزله نورث‌ریج در سال ۱۹۹۴، قاب‌های فولادی مقاوم در برابر خمش با اتصالات جوشی رواج یافتند. در این قاب‌ها از اتصالات گیردار جان پیچی و بال با جوش نفوذ کامل استفاده می‌شد. در زلزله‌ی نورث‌ریج، اتصالات خمشی در قاب‌های فولادی تحمل شکست‌های ترد غیر منتظره‌ای در محل ناحیه‌ی اتصال تیر به ستون شدند. بعد از زلزله‌ی نورث‌ریج، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام شد [۱-۳]. هدف از این تحقیقات یافتن علتی برای عملکرد ضعیف و نامناسب اتصالات خمشی فولادی قبل از زلزله‌ی نورث‌ریج و دستیابی به نقاط ضعف و قوت جهت یافتن جزئیات اتصال جدید و یا اصلاح شده بود. بررسی‌ها در این زمینه نشان داد که عملکرد نامناسب ناشی از عواملی نظیر: تنش‌های پسماند حرارتی جوشکاری، تمرکز تنش، تنش‌های چند محوره و درخواست نیرو در آن محل، ناهماهنگی اتصال پیچی جوشی به دلیل عملکرد صلب قسمت جوشی و نیمه صلب قسمت پیچی که مجموع این موارد سبب آسیب‌پذیری اتصال در شکل‌پذیری‌های بالا می‌شد. یک راه حل برای این مشکل کاهش در خواست نیرو در محل اتصال و ملایم کردن مسیر تنش است. بعد از زلزله‌های اخیر قاب‌های خمشی فولادی بدون لحاظ تمهیدات ویژه دچار ضعف‌های اساسی در عملکرد خود شدند که این ضعف عملکرد به دو طریق ظهور می‌یافت. اول اینکه شکست‌های ترد در محل اتصال تیر به ستون در دوران‌های کم و قبل از ایجاد مفصل پلاستیک در تیر رخ می‌داد و دیگری ایجاد مفصل پلاستیک در ستون‌ها بود. بنابراین دو اصل کلی برای رفع این دو مشکل پیشنهاد شد که اولی اتصال قوی و تضعیف تیر است. به این معنا که ظرفیت اتصال بالاتر از اعضای متصل شونده باشد و دیگری اصل ستون قوی و تیر ضعیف ارائه شده است تا مقاومت ستون بیش از تیر باشد و مفصل پلاستیک در تیرها و در نقطه دلخواه با فاصله از بر ستون تشکیل گردد و از ایجاد مفصل پلاستیک در ستون‌ها که باعث ناپایداری در سازه می‌گردد، جلوگیری شود [۴].

برای دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون اولین راه حلی که به ذهن می‌رسد تقویت اتصال است که به وسیله‌ی ورق‌های کناری، زیر سری یا ... می‌تواند صورت بپذیرد، اما روش دیگری نیز برای دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون وجود دارد که نسبت به روش قبل کمی نوآورانه‌تر است و آن بریدن قسمتی از بال تیر به منظور تضعیف عمدی تیر جهت حرکت مفصل پلاستیک از بر ستون به داخل تیر است. روش بریدن قسمتی از بال تیر یا به اصطلاح کاهش مقطع (*RBS*)<sup>۱</sup> اولین بار توسط پلومیر پیشنهاد شده است که اساس آن کاهش مقطع تیر به منظور دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون می‌باشد [۵]. برای برش در بال تیر الگوی گوناگونی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به برش ثابت، برش مخروطی و برش شعاعی اشاره کرد. پس از زلزله نورتریج آمریکا در سال ۱۹۹۴ و زلزله کوبه ژاپن در سال ۱۹۹۵ که منجر به تحولی بنیادین در عرصه طراحی اتصالات شد و با جدی‌تر گرفته شدن روش کاهش مقطع ابتدا اتصالاتی که با نام استخوان‌های مستقیم شناخته می‌شدند در سال ۱۹۹۶ ابداع شدند، این نام‌گذاری به دلیل شباهت ظاهری تیرهای حاوی این نوع کاهش مقطع بود و سپس شکل آن‌ها با توجه به نمودار لنگر، تحت اثر بارهای جانبی تصحیح گشت و استخوان‌های خطی بوجود آمد. بعد از آن به خاطر مشکل تمرکز تنش در لبه‌های برش خورده‌ی بال نواحی انتقالی هموار و شعاعی گشتند و مدل استخوان‌های خطی شعاعی در سال ۱۹۹۸ مطرح شدند. از طرفی باز هم یک مشکل وجود داشت و آن صعوبت فرم برش بال‌ها بود، لذا اتصالات استخوانی شعاعی پا به عرصه ظهور گذاشتند [۶]. در پروژه‌های بزرگ با تعداد برش‌های بالا در بال تیر جهت اجرای کاهش مقطع و همچنین با پیچیده شدن مدل‌های پیشنهادی پژوهشگران کار برای مجریان جهت اجرای درست و دقیق کاهش مقاطع دشوار شد، در نتیجه به منظور کاهش هزینه‌های ساخت و همچنین اجرای ساده‌تر در اتصالات *RBS*، محققان دست به کار یافتن روشی شدند که این نقصان را جبران کند. یانگ و پوپوف دانشمندانی بودند که پیشنهاد کردند برای کاهش مقطع تیر از سوراخ‌هایی در بال تیر بهره‌گیری شود که روش کار گشایی بود [۷]. در ابتدا از سوراخ‌هایی با قطر برابر برای کاهش مقاطع بال تیر استفاده می‌شد اما مطالعات متعدد نشان دادند که استفاده از سوراخ‌های با قطر برابر نمی‌تواند ضوابط قاب‌های خمشی با شکل‌پذیری ویژه را برآورده نماید و باید از روشی دیگر استفاده کرد. در سایر مطالعات، روش جدیدی که بر مبنای ایجاد سوراخ‌هایی با قطر نابرابر و دارای چیدمان خاص سوراخ‌ها بود، مورد استفاده قرار گرفت. در تحقیق مذکور، مدل‌های آزمایشگاهی و همچنین نرم افزاری ساخته شد و با نمونه‌های قبلی که دارای سوراخ‌های یکسان بود مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این مطالعات نشان داد که این نوع اتصالات توانایی

<sup>1</sup> Reduced Beam Section

برآورده ساختن شرایط قاب‌های خمشی را دارا می‌باشند [۸]. ویلکیسن و همکاران، نوع جدیدی از اتصال با جان کاهش یافته را معرفی و به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. مقطع این اتصال به شکل تیری است که یک مقطع گوه شکل از جان آن برداشته و بال دوباره به آن متصل گردیده است. از مزایای این اتصال جدید نسبت به اتصال استخوانی این است که این اتصال حالت پلاستیک بهتری داشته و فشردگی بیشتری پیدا می‌کند [۹]. نوع جدیدی از اتصال *RBS* با عنوان اتصال با جان موج دار با بکارگیری ورق موج دار در ناحیه مفصل پلاستیک تیر توسط میر قادری و همکاران، پیشنهاد شده است. در این اتصال، جان صاف در مقاطعی در محل مفصل پلاستیک با ورق‌های موج دار جایگزین می‌شود. به علت شکل هندسی و رفتار آکاردئونی ورق‌های موج دار، جان موج دار جایگزین شده در تیر در تحمل تنش‌های محوری ناشی از خمش سهم‌ناچیزی داشته و به میزان کمی در مقاومت خمشی ناحیه‌ی تضعیف شده مشارکت می‌نماید و در نتیجه تیر از نظر خمشی تضعیف می‌شود در حالی که ظرفیت برشی آن بدون تغییر باقی مانده است [۱۰]. جلالی و همکاران، به ارزیابی لرزه‌ای احتمالی اتصالات همراه با ورق جانبی در قاب‌های خمشی فولادی پرداخته‌اند [۱۱]. صنیعی نیا و همکاران، به ارزیابی چشمه اتصال در اتصالات قاب‌های خمشی فولادی که به صورت مستقیم به ستون با مقاطع جعبه‌ای متصل هستند و از دو جهت مختلف تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند، پرداخته‌اند [۱۲]. اونجاکاسار و همکاران، به بررسی رفتار لرزه‌ای چشمه اتصال تیر به ستون پرداخته‌اند [۱۳]. ژانگ و همکاران، توزیع نیرو در قاب‌های خمشی فولادی مورد بررسی قرار داده‌اند که اتصالات آن با استفاده از میراگرهای بازویی بهسازی شده است [۱۴]. کیم و یو، با استفاده از مدل‌سازی ریاضی به بررسی رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی که دارای اتصالات ستون-درختی بودند، پرداختند [۱۵]. هان و همکاران، در مطالعه‌ی عددی به روش اجزاء محدود به بررسی اثر سخت‌کننده‌های چدنی بر اتصالات قاب‌های خمشی فولادی به منظور جلوگیری از خرابی پیش‌رونده در آن‌ها پرداختند [۱۶]. بایو و همکاران، در مطالعات خود به بررسی اندرکنش نیروی فشاری و لنگر خمشی در اتصالات جوشی قاب‌های خمشی فولادی پرداختند [۱۷]. یان و همکاران، با استفاده از مدل‌سازی اجزاء محدود و انجام یک مطالعه‌ی پارامتری گسترده به بررسی رفتار هیستریزس اتصالات فولادی پرمقاومت *T* شکل پرداختند که در آن از ورق‌های قابل تعویضی استفاده شده که نقش کنترل فیوضی اتصال را بر عهده داشتند [۱۸]. صابری و همکاران، به بررسی تأثیر جنس، ضخامت و سوراخدار بودن صفحات کناری بر عملکرد چرخه‌ای اتصال خمشی پرداخته‌اند. برای این منظور علاوه بر استفاده از صفحات کناری از جنس فولاد نرمه (*ST37*) و فولاد پر مقاومت کم آلیاژ (*ST52*)، از آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیکل-تیتانیوم نیز استفاده شده است تا اثر فوق الاستیک این آلیاژ بر عملکرد اتصال نیز مورد بررسی قرار گیرد. مشخص گردید که می‌توان ضخامت‌های بهینه‌ای را برای صفحات کناری انتخاب نمود تا بدین‌صورت بیشترین شکل‌پذیری ممکن در اتصال ایجاد گردد و از تشکیل مفصل پلاستیک جلوگیری شود [۱۹]. صادقی و همکاران، به بررسی اثر زوال سختی و مقاومت المان‌های سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه بر اساس نتایج مدل‌های آزمایشگاهی پرداخته‌اند و ظرفیت فروریزش آن‌ها را به صورت احتمالاتی بررسی نموده‌اند [۲۰].

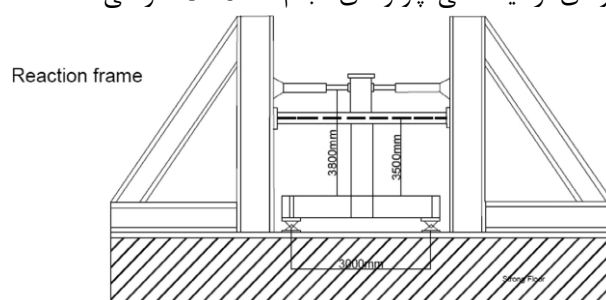
امروزه استفاده از روش کاهش مقطع به عنوان روشی نوین در طراحی سازه‌های فولادی مورد توجه فراوان قرار گرفته است. مزیت‌های استفاده از روش کاهش مقطع، سرعت و سهولت اجرای بالا، کاهش قابل توجه هزینه‌ها، افزایش انرژی‌های هدر رفته ناشی از زلزله در قاب، پایداری بیشتر سازه‌ها از طریق انتقال تنش‌ها و کرنش‌های پلاستیک از ستون به داخل تیر و ... می‌باشد. استفاده از این روش منجر به کاهش آسیب‌های سازه اصلی در هنگام وقوع زلزله گردیده و دارای مزیت فراوان اقتصادی می‌باشد. در میان انواع مختلف روش‌های کاهش مقطع، روش کاهش مقطع به وسیله‌ی سوراخ‌های نابرابر به دلیل سهولت و هزینه کم اجرا، قابلیت اطمینان بالا و اتلاف انرژی مناسب از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. طراحی سازه‌ها به صورتی که برای مقابله با زلزله‌های شدید رفتار کاملاً الاستیک داشته باشند از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد. در این روش برخی از اعضای سازه‌ای خسارت‌هایی را در هنگام زلزله‌های شدید متقبل می‌شوند تا بدین وسیله تنش‌های وارد بر اعضای اصلی سازه مانند ستون‌ها کاهش یافته و از این طریق سازه از آسیب‌های اقتصادی عمده در امان باشد. استفاده از روش مناسب کاهش مقطع به دلیل هدایت تنش‌ها و کرنش‌های پلاستیک به قسمتی خاص و مورد انتظار در تیر و اتلاف انرژی زیاد یکی از روش‌های موثر در کنترل غیر فعال سازه می‌باشد. به منظور طرح بهینه کاهش مقاطع نیاز به بررسی شکل‌های مختلف کاهش مقاطع و پارامترهای موثر بر رفتار لرزه‌ای آن‌ها می‌باشد. در این تحقیق، تلاش شده است به عنوان نوآوری ضمن معرفی اتصالات نوین با مقطع کاهش یافته، به بررسی میزان کارایی آن‌ها با یکدیگر و ارائه‌ی مدل‌های پیشنهادی پرداخته شود و همچنین مدلی بهینه در این زمینه معرفی گردد. از ادغام روش کاهش مقطع با سوراخ‌های نابرابر و روش باریک شونده رو به داخل تیر که عملکرد مناسبی برای فاصله

دادن مفصل پلاستیک از بر ستون داشته است، روش کاهش مقطع با سوراخ‌های نابرابر که قطر سوراخ‌ها رو به داخل افزایش یافته است، به وجود می‌آید که با هم پوشانی نقاط قوت و ضعف یکدیگر عملکرد بسیار خوبی را به نمایش می‌گذارد. روش کاهش مقطع بال تیر با سوراخ‌های نابرابر و بزرگ شونده رو به داخل تیر که به عنوان مدل پیشنهادی در این تحقیق ارائه شده است بیشترین اتلاف انرژی و کمترین کمانش خارج از صفحه را دارا می‌باشد.

## ۲- روش تحقیق

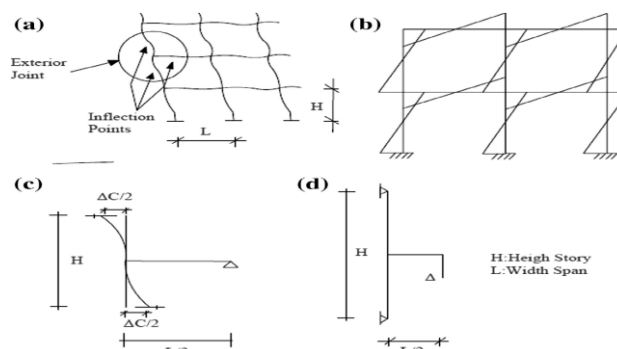
### ۲-۱- صحت‌سنجی

مطالعه‌ی تحلیلی در این آزمایش شامل مدل اجزاء محدود اتصالات به منظور تخمین اثر پارامترهای مختلف بر رفتار اتصالات کاهش مقطع یافته و مقایسه آنها با یکدیگر به منظور یافتن بهترین عملکرد در میان اتصالات ذکر شده است. مدل اجزاء محدود غیرخطی و سه بعدی از ۱۰ نمونه با کاهش مقطع یافته و یک نمونه مرجع بدون کاهش مقطع به وسیله‌ی نرم‌افزار *ABAQUS* [۲۱] ساخته شده است. هندسه‌ی نمونه ساده اولیه بر مبنای نمونه‌ی آزمایشگاهی چو و لای انجام شد [۲۲]، طراحی شده است که در شکل ۱ قابل مشاهده است.



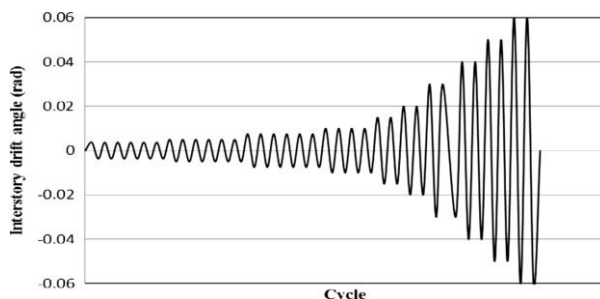
شکل ۱: نمونه‌ی آزمایشگاهی اتصال مورد مطالعه توسط چو و لای [۲۲]

از جابجایی جانبی بال‌های تیر در فاصله‌ی ۳/۵ متری از بر ستون جلوگیری شده است. شکل ۲ دیاگرام لنگر خمشی و تغییرشکل قاب خمشی تحت بار جانبی را نشان می‌دهد [۲۳]. همانطور که دیده می‌شود، لنگر خمشی در میان تیر و ستون صفر و همچنین نقطه‌ی میان تیر و ستون تحت بار جانبی انحناست اما میزان نیروی برشی در نقطه‌ی انحنا صفر نیست. برای اتصال تیر و ستون و سایر قطعات در نمونه‌ها از جوش استفاده شده است، به همین دلیل در مدل عددی در نرم افزار آباکوس با استفاده از قید (*Tie*) به یکدیگر متصل می‌شوند. تیرها پس از اعمال کاهش مقطع، مورد تحلیل قرار گرفت تا نتایج اعمال اشکال مختلف کاهش مقطع مورد بررسی قرار گیرد. به دلیل بزرگی نمونه آزمایشی و زیاد بودن مدت زمان تحلیل نرم‌افزاری از روش خاصی برای تحلیل نمونه‌ها استفاده شده است، به این صورت که با توجه به تقارن موجود در مقطع اتصال تیر به ستون تنها نیمی از مقطع را مورد تحلیل قرار می‌دهیم و نتایج را به مقطع کامل تعمیم می‌دهیم. این روند جهت کاهش زمان تحلیل برای همه‌ی نمونه‌ها اجرا شد. از آنجا که انرژی هدر رفته وابسته به سطح مقطع نمونه‌ها است و نمونه‌های شبیه سازی شده تنها نیمی از مقطع را تحلیل کرده‌اند خروجی‌های انرژی برای نیمی از سطح مقطع نمونه‌ها بوده است و باید دو برابر عدد بدست آمده لحاظ شود.



شکل ۲: (a) نمودار تغییرشکل قاب خمشی، (b) نمودار لنگر، (c) اتصال بیرونی که از انحنا باز داشته شده، (d) ساختار اعمال شده [۲۳]

در بارگذاری مدل اجزاء محدود از جابجایی چرخه‌ای با توجه به پروتکل بارگذاری SAC [۲۴] استفاده شده است. مکان این بارگذاری در انتهای تیر و در فاصله ۳/۸ متری از بر ستون می‌باشد. قید (*Tie*) برای تعریف اندرکنش بین جوش تیر، جوش ستون و جان تیر ورق برشی استفاده می‌شود. با اعمال جابجایی چرخه‌ای بر اساس پروتکل بارگذاری SAC، یک بار کنترل جابجایی در قسمت فوقانی تیر اعمال شد. جابجایی قسمت فوقانی تیر مربوط به زاویه‌ی تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای ۰/۰۱ رادیان معادل ۳۸ میلی‌متر بوده است. در شکل ۳ جزئیات الگوی بارگذاری چرخه‌ای ارائه شده است. ضمناً تعداد سیکل‌ها و زاویه‌ی تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای مطابق الگوی بارگذاری در جدول ۱ ارائه شده است.

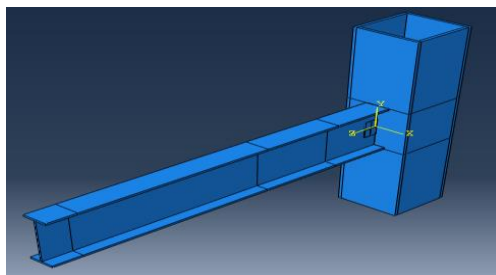


شکل ۳: الگوی بارگذاری چرخه‌ای بر مبنای پروتکل بارگذاری SAC [۲۴]

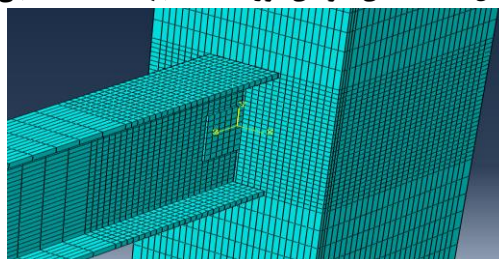
جدول ۱: تعداد چرخه‌ها و زاویه‌ی تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای مطابق الگوی بارگذاری

شماره	زاویه تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای (رادیان)	جابجایی تیر (میلی‌متر)	تعداد چرخه بارگذاری
۱	۰/۰۰۲۵	-، + ۰/۰۰۹۵	۶
۲	۰/۰۰۵	-، + ۰/۰۱۹	۶
۳	۰/۰۰۷۵	-، + ۰/۰۲۸۵	۶
۴	۰/۰۱	-، + ۰/۰۳۸	۴
۵	۰/۰۱۵	-، + ۰/۰۵۷	۲
۶	۰/۰۲	-، + ۰/۰۷۶	۲
۷	۰/۰۳	-، + ۰/۱۱۴	۲
۸	۰/۰۴	-، + ۰/۱۵۲	۲
۹	۰/۰۵	-، + ۰/۱۹	۲
۱۰	۰/۰۶	-، + ۰/۲۲۸	۲

در ادامه برای اعتبار سنجی، مدل نرم افزاری نمونه جهت شبیه‌سازی رفتار مدل آزمایشگاهی در نرم افزار آباکوس با هندسه و مشخصات یکسان با مدل آزمایشگاهی ساخته شد. مطابق شکل ۴، برای مدل‌سازی اجزای تیر و ستون، سخت کننده‌ها و ورق‌های امتدادی از المان‌های پیوسته *Solid* استفاده شد. تمامی قسمت‌ها با استفاده از عناصر *C3D8* مدل‌سازی شده‌اند. این المان دارای ۸ گره و ۳ درجه‌ی آزادی در هر گره می‌باشد. با ۳ المان از طریق ضخامت بال ستون و ۵ و ۶ المان به ترتیب از طریق بال و جان تیر استفاده شده است. از مش‌بندی بهتر برای مدل‌سازی ناحیه‌ی اتصال و ناحیه‌ی تیر و ستون در مجاورت منطقه متصل شده استفاده گردیده است. از آنجایی که نبشی‌ها به تیر و ستون جوش شده‌اند، تماس بین آنها به صورت تماس ایده آل یا بدون عیب در نظر گرفته شده است. شرط مرزی به کف تیر به صورت گیردار اعمال و همچنین بارگذاری به تیر به صورت سیکل رفت و برگشتی با پروتکل خاص اعمال شده است. استفاده از مش بندی ریز و مناسب می‌تواند تاثیر خوبی در دقت نتایج خروجی داشته باشد. مطابق شکل ۵، در محل اتصال تیر به ستون به دلیل تمرکز تنش‌ها از مش‌بندی ریزتری نسبت به سایر نقاط استفاده شده است. از الگوهای بارگذاری مشابه که برای نمونه‌ها بکار رفته‌اند نیز برای بارگذاری مدل‌های عددی استفاده شد. سخت شوندگی مصالح با استفاده از نرم افزار آباکوس، سخت شوندگی سینماتیک و ایزوتروپیک (*combined*) تعریف شده‌اند.

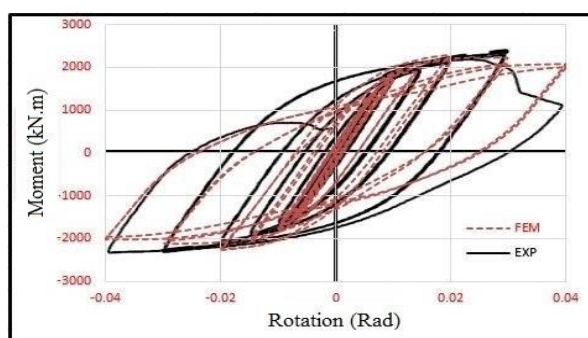


شکل ۴: هندسه‌ی نمونه‌ی مورد مطالعه جهت صحت سنجی



شکل ۵: مدل اجزا محدودی نمونه‌ی مورد مطالعه

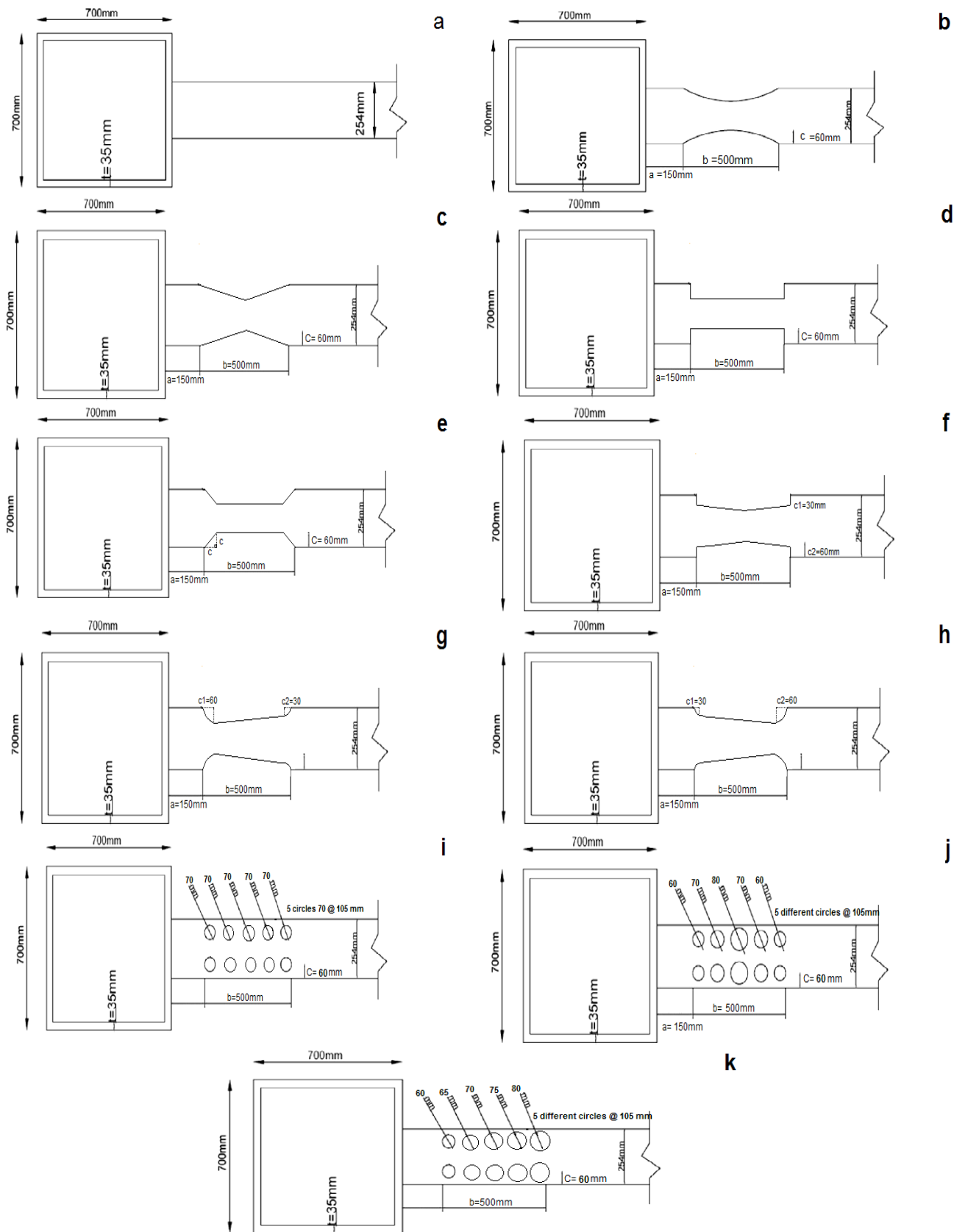
برای صحت سنجی، مدل بدون کاهش مقطع چو و لای [۲۲] انتخاب شد، مدل گفته شده تحت بار چرخه‌ای با پروتکل ذکر شده شبیه‌سازی شد. تمام مشخصات مصالح بر اساس نمونه‌ی آزمایشگاهی اختصاص یافت. نتایج به دست آمده مطابق شکل ۶، از مدل نرم افزاری با مدل آزمایشگاهی مطابقت داده شده است. بین تیر و ستون در نمونه‌ی آزمایشگاهی و مدل اجزا محدود قابل تشخیص است که مقادیر آنها به ترتیب  $2210 \text{ kN.m}$  و  $2288 \text{ kN.m}$  به دست آمده است، که اختلافی در حدود  $3/4\%$  را نشان می‌دهد که اختلاف قابل قبولی است.



شکل ۶: مقایسه‌ی منحنی هیستریزس نمونه‌های اجزا محدودی و آزمایشگاهی

## ۲-۲- مدل‌سازی نمونه‌های مورد مطالعه

مطالعه تحلیلی شامل ایجاد مدل اجزا محدودی اتصالات به منظور ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار اتصال است. مدل اجزاء محدود غیرخطی و سه بعدی از ۱۰ نمونه با مقطع کاهش یافته و یک نمونه مرجع بدون کاهش مقطع به وسیله نرم افزار آباکوس ساخته شده است. برای اعمال کاهش مقاطع در بال تیرها در نرم افزار آباکوس از گزینه‌ی *cut > extrude* که در ماژول *shape* می‌باشد، استفاده شد. در این تحقیق، سطح مقطع بال‌های تیر به چند شکل کاهش پیدا کرده‌اند که مطابق شکل ۷ نشان داده شده‌اند و مشخصات آنها در جدول ۲ قابل مشاهده است. نام‌گذاری به سبب سهولت با حروف انگلیسی انجام شده است.



شکل ۷: مدل‌های دارای کاهش مقاطع



در این تحقیق، مقطع ستون و تیر در تمام نمونه‌های عددی به ترتیب  $BOX\ 700\ X\ 700\ X\ 35$  و  $H\ 702\ X\ 254\ X\ 16\ X\ 28$  می‌باشد. از دو ورق سخت کننده در امتداد بال‌های تیر در جان ستون با ابعاد  $PL\ 630\ X\ 630\ X\ 28$  استفاده و از دو ورق با ابعاد  $PL\ 500\ X\ 150\ X\ 15$  به عنوان سخت کننده در دو طرف جان تیر در محل اتصال تیر به ستون استفاده شده است. ارتفاع ستون  $H=3000\ mm$ ، طول تیر  $Lb=3800\ mm$  و طول مهار  $L0=3500\ mm$  می‌باشد. مؤلفه‌ی  $b=500\ mm$  که طول برش بال تیرها است برای همه‌ی نمونه‌ها ثابت است، همچنین مؤلفه‌ی  $a=150\ mm$  که فاصله‌ی محل اعمال کاهش مقطع از بر ستون است نیز در همه‌ی نمونه‌ها ثابت است. مؤلفه‌ی  $c$  عمق برش است که در نمونه‌های مختلف متفاوت است. مقدار آن برای هر نمونه در جدول ۲ بیان شده است. مقطع  $(a)$  مدل خام و بدون کاهش مقطع است که با نام  $ORC$  شناخته می‌شود. این نمونه مقطع پایه‌ای است که کاهش مقاطع بر آن اعمال می‌شود و بدین ترتیب سایر نمونه‌ها در واقع از کاهش مقطع یافتن این نمونه ساخته می‌شوند. مقطع  $(b)$  که در بالا نمایش داده شده است کاهش مقطع با برش شعاعی به عرض  $500$  میلی‌متر و عمق  $60$  میلی‌متر که در فاصله  $150$  میلی‌متر از بر ستون است. مقاطع  $(h)$  و  $(g)$  و دارای دو مقدار برای پارامتر  $c$  هستند. کمان‌های موجود در شکل بخشی از دایره‌هایی با شعاع‌های  $c_1$  و  $c_2$  هستند که به وسیله‌ی خطی به یکدیگر متصل می‌شوند، این مدل کاهش مقاطع به باریک شونده معروف هستند که به دو شکل باریک شونده رو به بر ستون و باریک شونده رو به تیر اجرا شده‌اند. مقاطع  $(i)$  و  $(j)$  و  $(k)$  دارای ۵ سوراخ موازی و متقارن در هر بال تیر هستند، که در مقطع  $(i)$  سوراخ‌ها با قطر برابر و در  $(j)$  نابرابر هستند، همچنین در مقطع  $(k)$  سوراخ‌ها به شکل بزرگ شونده رو به تیر طراحی شده‌اند که از ادغام دو روش سوراخ‌های با قطر نابرابر و روش باریک شونده رو به تیر طراحی شده است. پارامتر  $c$  در این مقاطع فاصله مرکز دایره از کنار بال تیر هستند. دایره در محل مورد انتظار برای مفصل پلاستیک (ناحیه‌ی  $b$ ) قرار دارد. فاصله‌ی مراکز دایره از هم برابر با  $105$  میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۲: جزئیات مدل‌های دارای کاهش مقطع

ID	Model	A (mm)	b (mm)	$c_1$ (mm)	$c_2$ (mm)	Reduce Parameters (mm)
a	ORC	-	-	-	-	
b	RBS-01	150	500	60	-	
c	RBS-02	150	500	60	-	
d	RBS-03	150	500	50	-	
e	RBS-04	150	500	60	-	
f	RBS-05	150	500	30	60	
g	RBS-06	150	500	30	60	
h	RBS-07	150	500	30	60	
i	RBS-08	150	500	60	-	Five circle with $d = 70@105$ on right and left sides
j	RBS-09	150	500	60	-	Five circle that increase gradually $d= 60$ & $70$ & $80$ & $70$ & $60$ on right and left sides
k	RBS-10	150	500	60	-	Five circle that increase gradually $d= 60$ & $65$ & $70$ & $75$ & $80$

مشخصات مصالح مورد استفاده برای اختصاص به نمونه‌های ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس و شبیه‌سازی همه‌ی نمونه‌های ذکر شده در شکل ۷ به تفصیل در جدول ۳ بیان شده است. برای همه‌ی ستون‌ها، ورق‌های برشی و سخت‌کننده‌ها که در امتداد بال تیر درون باکس ستون قرار گرفته‌اند، از فولاد  $ASTM-572$  و برای تیرها از فولاد  $ASTM-A36$  و همچنین از مصالح ER70S-6 برای الکترود جوش استفاده شده است.

جدول ۳: مشخصات مصالح مصرفی در نمونه‌های مورد مطالعه [۲۰]

Material	Application	Yield Stress (MPa)	Strain
ASTM-A572-Gr50	Column, Stiffness, Shear Plate	391	0/02
		525	0/06
		470	0/12

ASTM-A36	Beam	۳۹۱	۰/۲۴
		۲۸۸	۰/۱۳
		۴۹۵	۰/۰۶
		۳۹۰	۰/۱۲
ER70S-6	Weld	۲۸۸	۰/۲۴
		۴۶۹	۰/۰۲۵
		۵۶۳	۰/۱۲۵
		۵۱۰	۰/۲۴۵
		۴۶۹	۰/۳۶

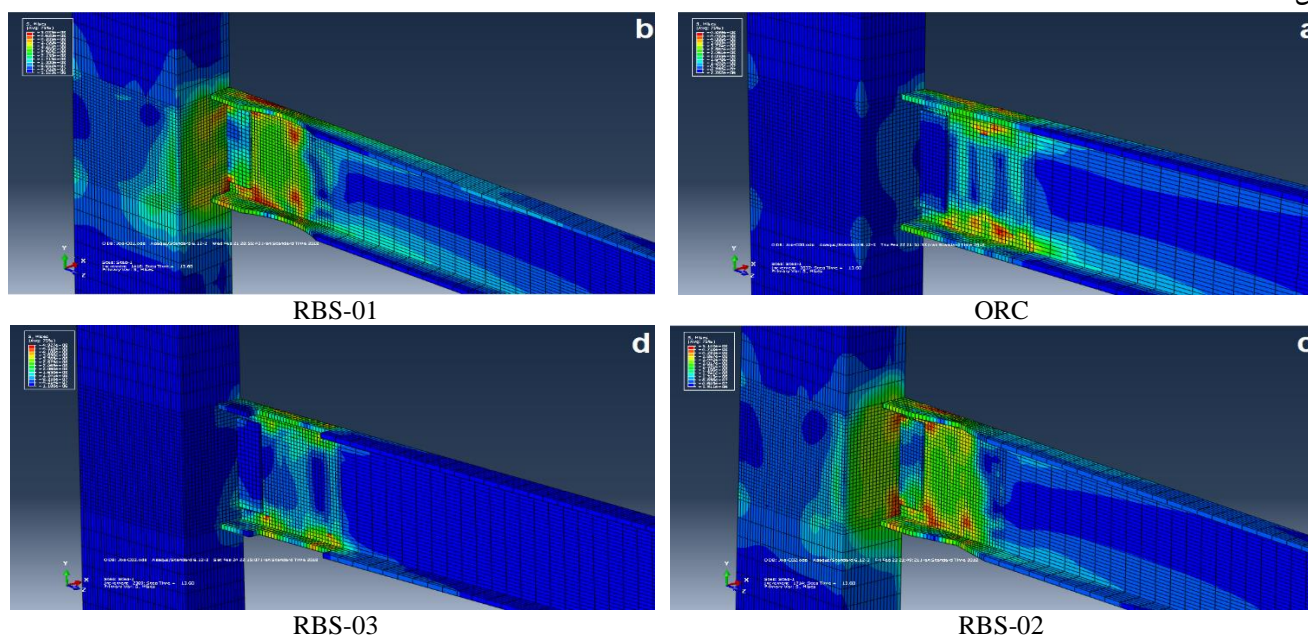
از سخت‌شدگی کینماتیک و سینماتیک به‌طور مشترک که به اصطلاح *combined* نامیده می‌شود، به‌همراه معیار تسلیم فون میسر برای شبیه‌سازی تغییر شکل پلاستیک تحت بارگذاری چرخه‌ای استفاده شده است. این روش برای شبیه‌سازی حالت پلاستیک فولاد تحت بار چرخه‌ای بسیار مناسب است.

### ۳- ارائه‌ی نتایج تحلیل‌ها

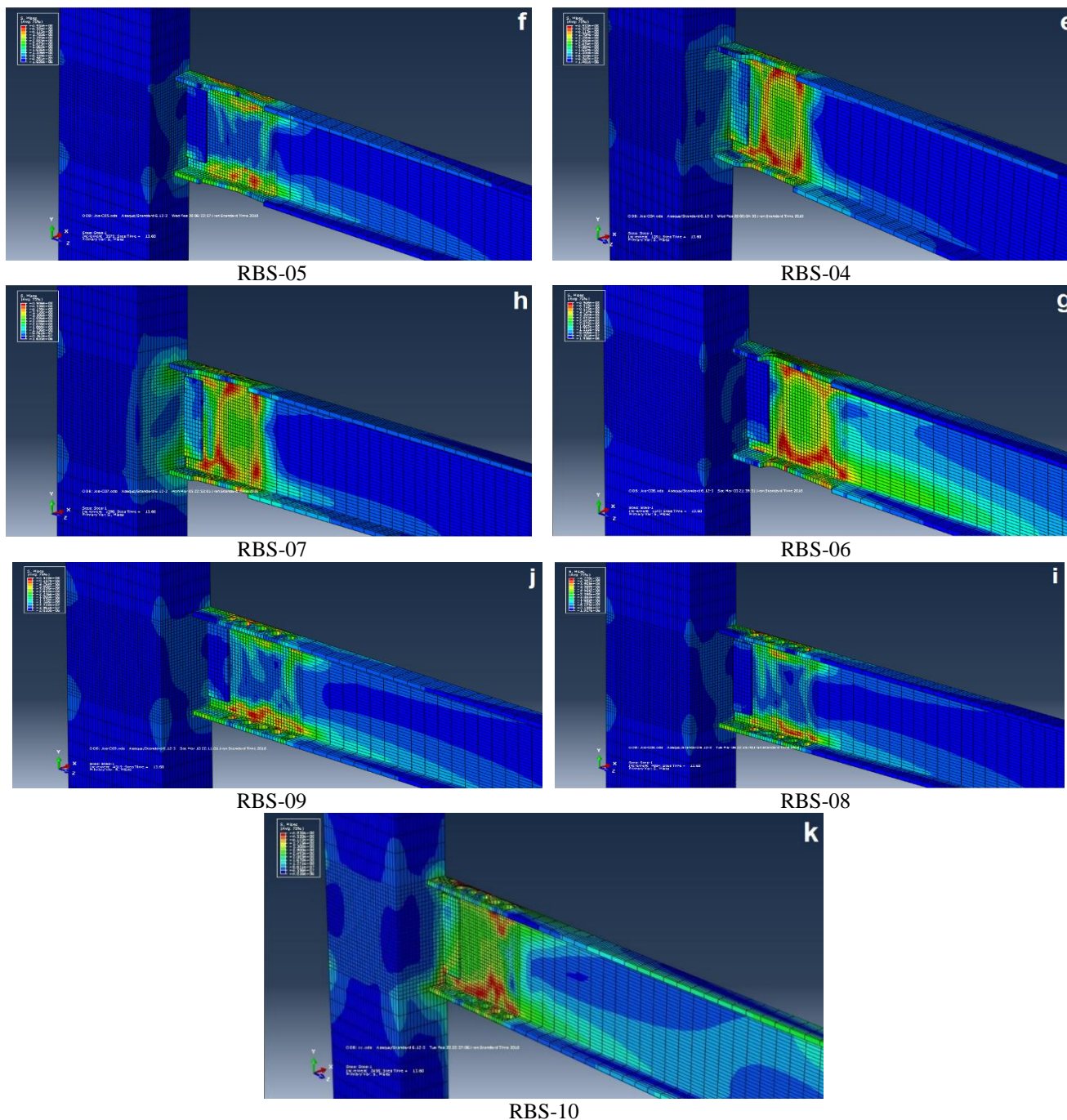
در این مطالعه، نه‌اتصال خمشی با شکل متفاوت بال تیر کاهش یافته با استفاده از برنامه رایانه‌ای *ABAQUS* مدل‌سازی شده و سپس عملکرد آن‌ها با نمونه‌ی مرجع بدون بال تیر کاهش یافته در طی رفتار چرخه‌ای مقایسه می‌گردد. نتایج به‌دست آمده بر اساس شاخص‌های مختلفی نظیر گسترش تنش فون میسر، کرنش‌های پلاستیک (*PEEQ*)، نمودارهای هیسترزیس، بارافزون و استهلاک انرژی توسط اتصال با کاهش مقطع در ادامه قابل مشاهده است.

#### ۳-۱- مدهای خرابی

در این تحقیق، توزیع تنش در نمونه‌ها مطابق شکل ۸، کرنش‌های پلاستیک و همچنین محل تشکیل مفاصل پلاستیک مطابق شکل ۹، قابل مشاهده است.



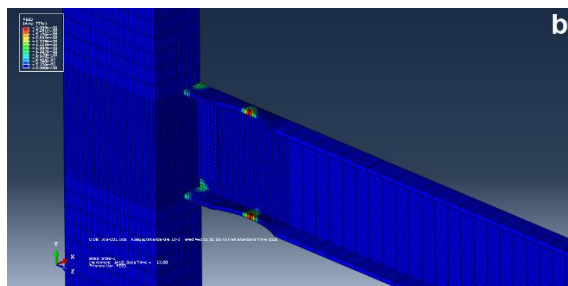
<sup>2</sup> Plastic Equivalent Strain



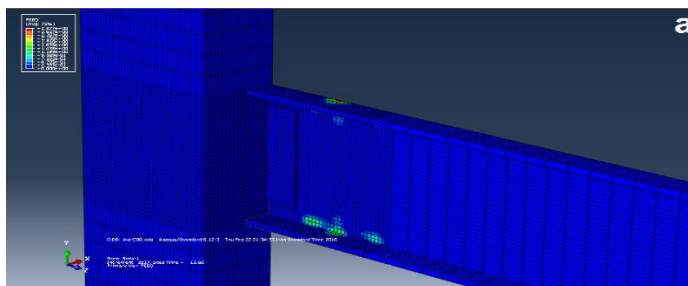
شکل ۸: توزیع تنش فون میسز در نمونه‌های مورد مطالعه

مطابق شکل ۸، توزیع تنش در اکثر نمونه‌ها در قسمت مشخص شده در تیر است و این امر عملکرد درست کاهش مقاطع را نشان می‌دهد. در نمونه‌های (b) و (c) تنش به قسمتی از ستون نیز سرایت کرده است، ویژگی مقاطع در کاهش کمانش خارج از صفحه باعث گسترش تنش در آن نقاط شده‌اند. نمونه‌هایی نظیر (a)، (d) و (f) که گسترش تنش در جان مقطع کاهش یافته در آن‌ها کم‌تر دیده می‌شود، دچار کمانش در قسمت کاهش یافته شده‌اند. نمونه‌ی (k) که سوراخ‌های بزرگ شونده رو به داخل تیر است، عملکرد مناسبی در انتقال تنش‌ها به محل کاهش مقطع و عدم کمانش خارج از صفحه از خود نشان داده‌اند. همه‌ی نمونه‌ها عملکرد مناسبی در ایجاد مفصل پلاستیک در تیر از خود نشان داده‌اند. به دلیل قوی بودن مقطع پیشنهادی نمونه‌هایی که مدل کاهش مقطع آنها طوری باشد که بیش‌تر کاهش سطح مقطع آن‌ها در یک محل و با عمق بیشتر متمرکز باشد می‌تواند کرنش‌های پلاستیک را به آن نقطه جمع کند. نمونه‌های (i) و (j) هر دو نمونه‌های

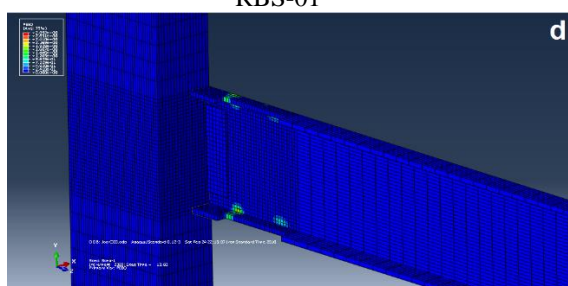
سوراخ‌دار هستند. نمونه‌ی (j) سوراخ‌های نا برابر دارد و به همین دلیل کاهش مقطع آن در نقطه‌ی وسط بیش از نمونه (i) است که سوراخ‌های یکسان دارد، به همین دلیل عملکرد بهتری از خود ارائه داده است.



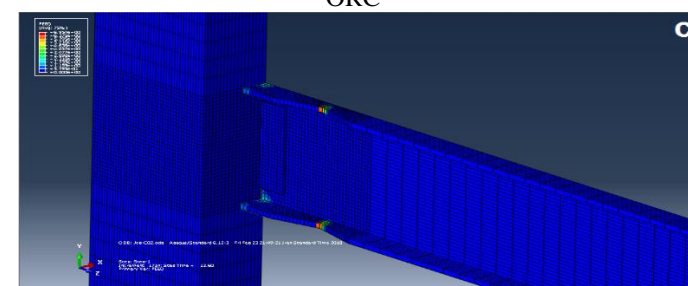
RBS-01



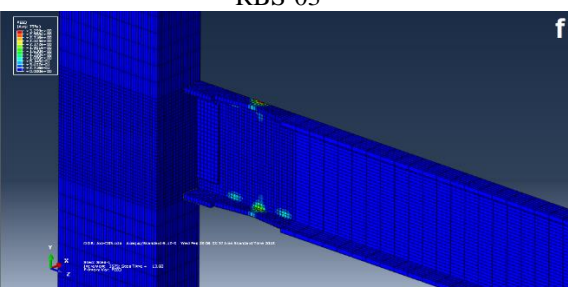
ORC



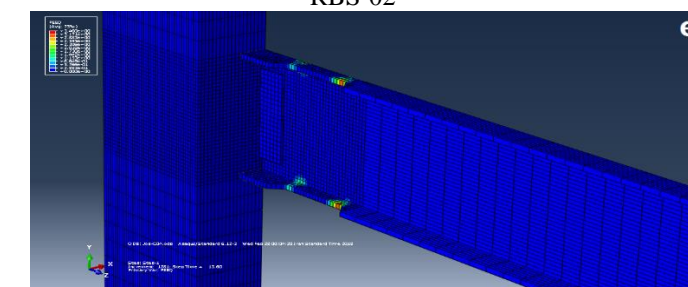
RBS-03



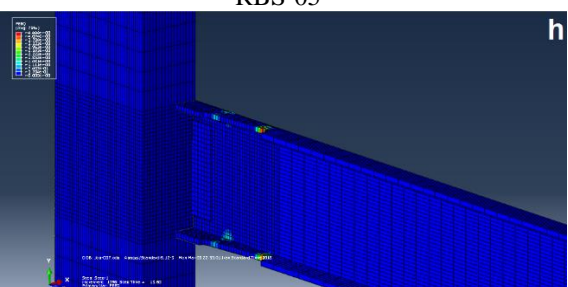
RBS-02



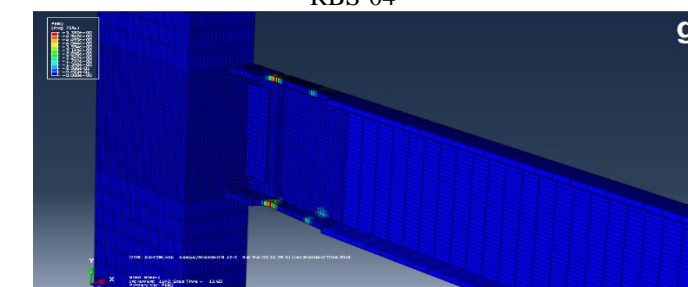
RBS-05



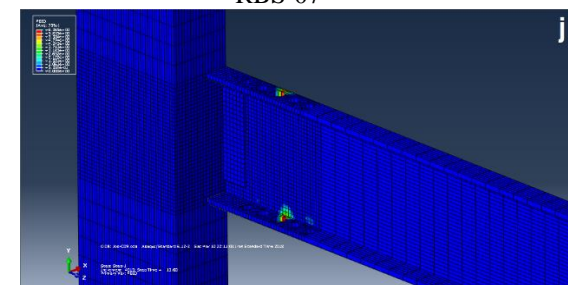
RBS-04



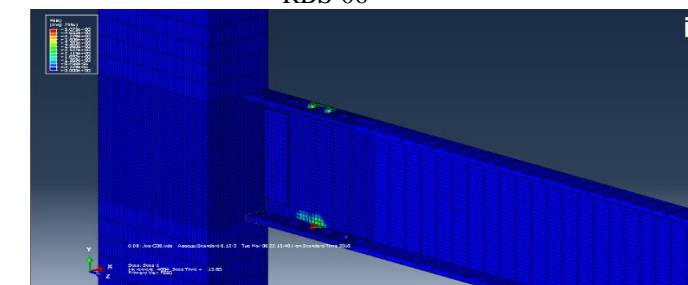
RBS-07



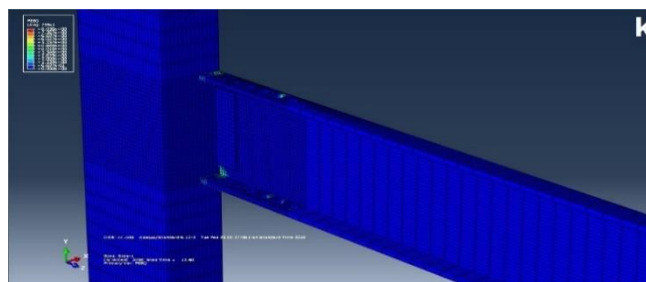
RBS-06



RBS-09



RBS-08



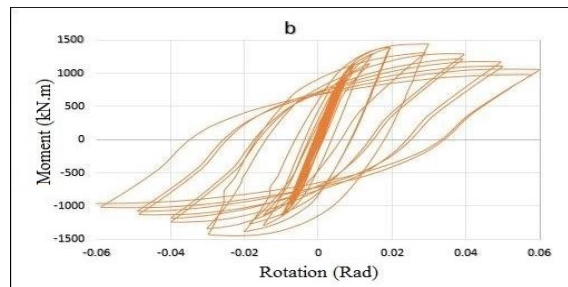
RBS-10

شکل ۹: توزیع کرنش‌های پلاستیک ( $PEEQ$ ) در نمونه‌های مورد مطالعه

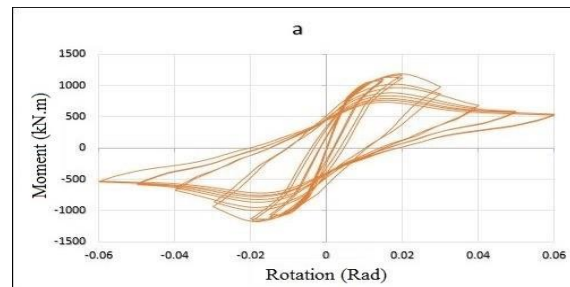
مطابق شکل ۹، تمامی نمونه‌ها عملکرد مناسبی در ایجاد مفصل پلاستیک در تیر از خود نشان داده‌اند. به دلیل قوی بودن مقطع پیشنهادی نمونه‌هایی که مدل کاهش مقطع آن‌ها طوری باشد که بیش‌تر کاهش سطح مقطع آن‌ها در یک محل و با عمق بیش‌تر متمرکز باشد، می‌تواند کرنش‌های پلاستیک را به آن نقطه جمع کند. نمونه‌های ( $i$ ) و ( $j$ ) هر دو نمونه‌های سوراخ دار هستند. نمونه‌ی ( $i$ ) دارای سوراخ‌های نابرابر است و به همین دلیل کاهش مقطع آن در نقطه‌ی وسط بیش از نمونه‌ی ( $i$ ) است که سوراخ‌های یکسان دارد، به همین دلیل عملکرد بهتری از خود نشان داده است. با بررسی نتایج مشخص شد در اتصال  $RBS$  با سوراخ‌های متنوع تعبیه شده، تغییر شکل پلاستیک به طور قابل توجهی در تیر اتفاق می‌افتد بنابراین از آسیب به ستون خودداری می‌شود. همچنین چشمه‌ی اتصال در تمامی مدل‌های دارای مقطع تیر کاهش یافته، به صورت الاستیک باقی می‌ماند.

### ۲-۲- منحنی‌های هیستریزیس

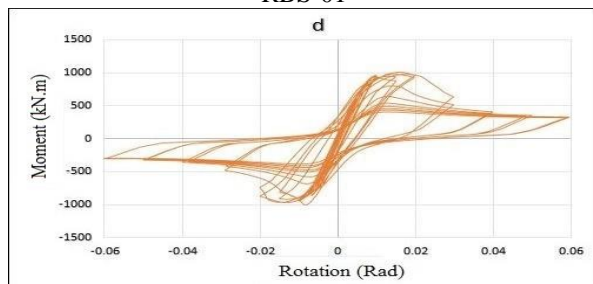
منحنی‌های هیستریزیس لنگر-دوران پلاستیک تمام نمونه‌ها مطابق شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. لنگر در بر ستون اندازه‌گیری شد و دوران تمام تیر از طریق تقسیم جابجایی کلی تیر به فاصله از بر ستون محاسبه گردید.



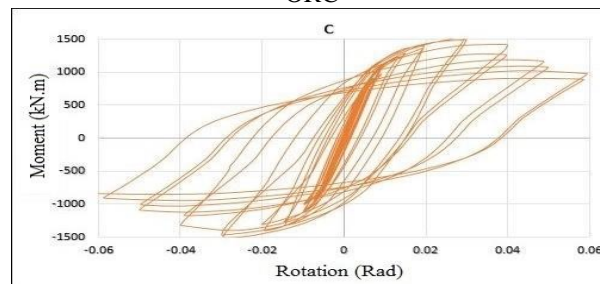
RBS-01



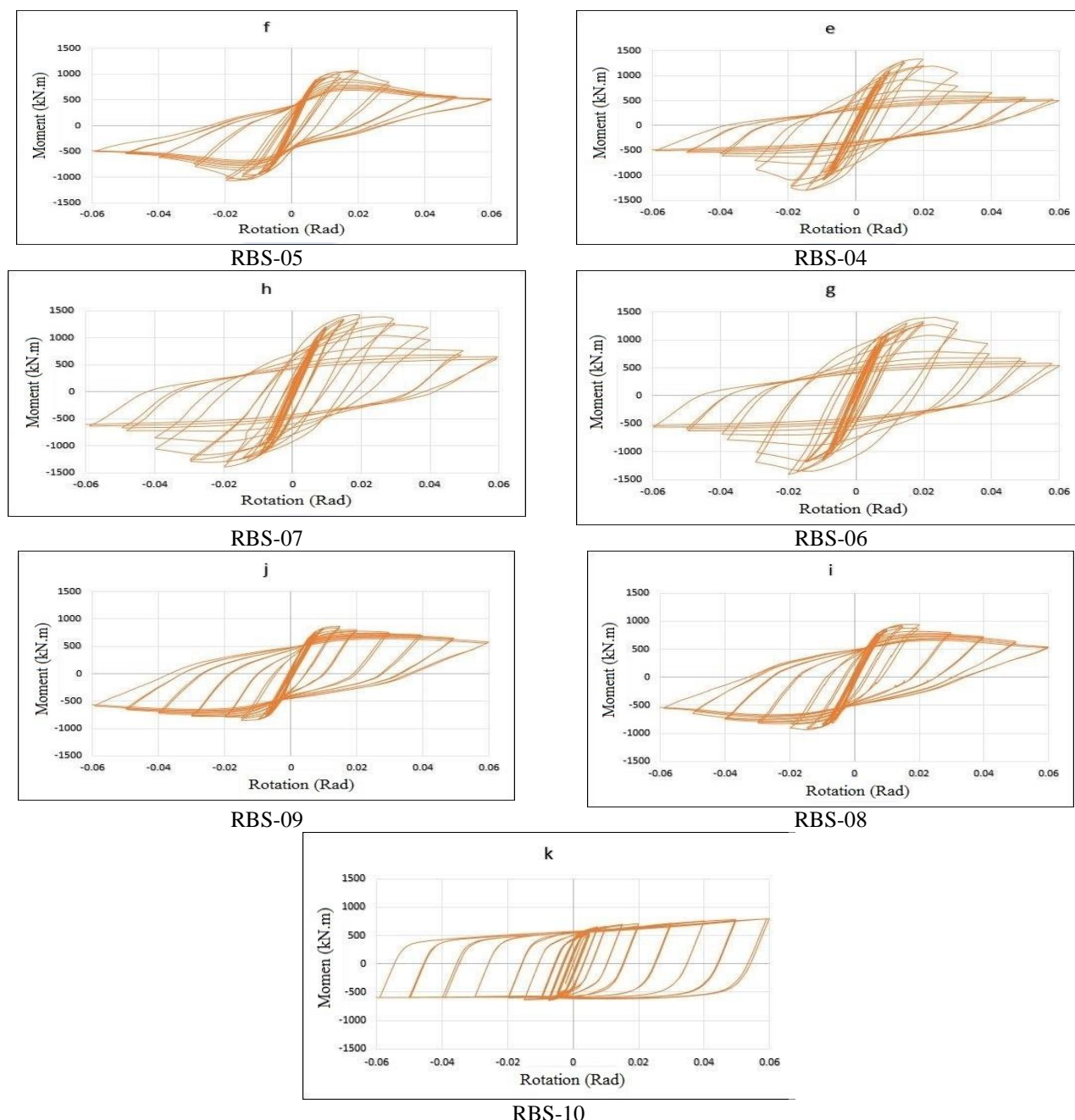
ORC



RBS-03



RBS-02



شکل ۱۰: منحنی‌های هیستریزس لنگر - دوران نمونه‌های مورد مطالعه

همانطور که مشاهده می‌شود رفتار هیستریزس بیشتر نمونه‌ها مناسب است. نتایج نشان می‌دهد که ابتدا مقاومت به دلیل رفتار سخت‌شوندگی افزایش یافته اما در نهایت، سختی (شیب منحنی) و مقاومت در اثر رفتار نرم‌شوندگی دچار کاهش شده‌اند و به اصطلاح، منحنی‌ها نسبت به حالت اولیه اندکی خوابیده‌تر شده‌اند. همچنین مشخص شد که هرچه تقارن منحنی تحت بارهای کششی و فشاری بیشتر باشد، نشان دهنده‌ی یکنواختی رفتار عضو تحت بارگذاری‌های متناوب می‌باشد. مطابق شکل ۱۰، مقاومت اتصال به دلیل کمانش موضعی تیر کاهش یافته است. به هر حال این کاهش مقاومت چندان اهمیتی ندارد، زیرا تا بعد از وقوع کمانش مقاومت اتصال در اکثر نمونه‌ها هنوز بیش از ظرفیت لنگر پلاستیک تیر است. بنابراین بیشتر نمونه‌ها می‌توانند در طبقه‌بندی اتصالات خمشی با شکل‌پذیری ویژه قرار گیرند. همانطور که در منحنی‌های هیستریزس لنگر - دوران نمونه‌ها مطابق شکل ۱۰ قابل مشاهده است، تمام مدل‌های کاهش مقطع یافته به جز نمونه‌های (d)، (e)، (f) و (g) به دوران  $0.04$  رادیان رسیده‌اند در حالی که مقاومت این اتصالات در دوران  $0.04$  رادیان بیش از ۸۰ درصد ظرفیت

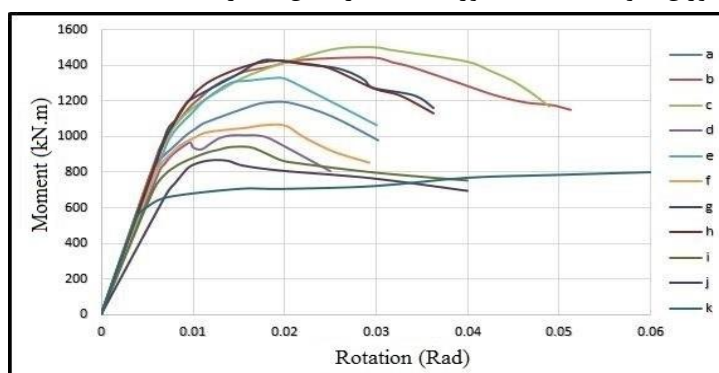
لنگر پلاستیک تیر است. بدین ترتیب تمامی اتصالات به جز موارد ذکر شده، ضوابط لرزه‌ای *AISC (2010)* [۲۵] را برای قاب خمشی ویژه تأمین می‌کند. از سایر اتصالات به دلیل تحمل دوران  $0.03-0.02$  رادیان در قاب خمشی‌های معمولی می‌توان استفاده کرد. همچنین نمونه‌های (d)، (e) و (f) دارای اثر باریک‌شدگی هستند که باعث کاهش جذب انرژی در اتصال می‌شوند. این موضوع به خوبی در شکل ۱۰ که استهلاک انرژی نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد، قابل مشاهده است. ظرفیت خمشی نمونه‌های مورد مطالعه بر اساس نتایج بدست آمده از منحنی‌های هیستریزیس به تفکیک در جدول ۴ قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه‌ی (c) با  $1520 \text{ kN.m}$  بیش‌ترین و نمونه‌های (i)، (j) و (k) به ترتیب با مقادیر ۹۳۶، ۸۷۰ و  $789 \text{ kN.m}$  کم‌ترین ظرفیت خمشی را دارند. همچنین به دلیل استفاده از مقطع تیر کاهش یافته، در اتصال خمشی، دوران چشمه‌ی اتصال تقریباً ۲ تا ۳ درصد دوران کلی می‌باشد. بنابراین رفتار دورانی کاملاً مستقل از مشارکت چشمه‌ی اتصال می‌باشد.

جدول ۴: ظرفیت خمشی نمونه‌های مورد مطالعه

نمونه‌ها	ظرفیت خمشی (kN.m)
a	۱۱۸۴/۴۵۲
b	۱۴۳۸/۷۴۱
c	۱۵۱۹/۹۰۱
d	۱۰۱۱/۳۷۸
e	۱۳۳۶/۳۰۸
f	۱۰۶۷/۱۷۷
g	۱۳۹۸/۳۷۷
h	۱۴۲۶/۴۲۱
i	۹۳۶/۱۲۲۴
j	۸۶۹/۸۸۸۴
k	۷۸۸/۸۱۹۲

### ۳-۳- منحنی‌های بارافزون

منحنی‌های بارافزون لنگر - دوران نمونه‌های عددی مورد مطالعه در شکل ۱۱ ارائه شده‌اند.



شکل ۱۱: مقایسه‌ی منحنی‌های بارافزون لنگر - دوران نمونه‌های مورد مطالعه

از میان منحنی‌های بارافزون لنگر - دوران آن دسته از منحنی‌هایی که دارای شیب کمتری هستند، سختی دوران اولیه‌ی بیش‌تری دارند. منحنی بارافزون نمونه‌ی (b) که کاهش مقطع شعاعی است به خوبی توانسته بهبود سطح عملکرد اتصال را نسبت به مدل بدون کاهش مقطع نشان می‌دهد. نمونه‌ی (d) با رسیدن به جابه‌جایی ۶ سانتی‌متر با نیروی ۲۵۰ کیلونیوتن دچار کمانش شده و باربری‌اش به صورت ناگهانی کاهش می‌یابد که عملکرد نامطلوبی است. بر اساس نمودارهای بارافزون، نمونه‌ی (k) عملکرد بسیار خوبی را نسبت به سایرین از خود نشان داده است، در این نمونه پیش از تسلیم در ناحیه‌ی خطی و پس از آن با ورود به ناحیه‌ی پلاستیک هیچ گونه کاهش مقاومتی به چشم

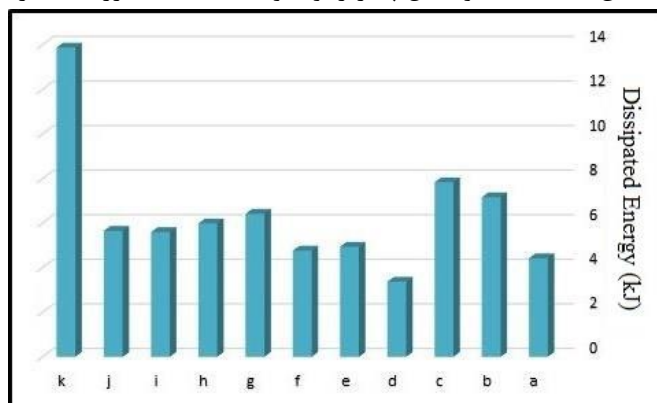
نمی‌خورد. با توجه به منحنی‌های بارافزون لنگر - دوران در شکل ۱۱، سختی دورانی نمونه‌ها بدست آمده و در جدول ۵ ارائه شده است. از مقایسه‌ی نتایج مشخص می‌شود که بیش‌ترین سختی دورانی اولیه مربوط به نمونه‌ی (a) با مقدار  $(kN.m/rad)$  ۱۶۸۶۵۸ و کم‌ترین سختی دورانی اولیه نیز مربوط به نمونه‌ی (d) با مقدار  $(kN.m/rad)$  ۱۳۰۸۰۰ می‌باشد. کاملاً مشخص است نمونه‌ی بدون کاهش مقطع سختی بیشتری نسبت به نمونه‌های کاهش مقطع یافته از جمله نمونه‌ی (d) دارد.

جدول ۵: سختی دورانی نمونه‌های مورد مطالعه

نمونه‌ها	سختی دوران اولیه (kN.m/rad)
a	۱۶۸۶۵۸
b	۱۴۷۳۵۰
c	۱۵۱۹۱۷
d	۱۳۰۸۰۰
e	۱۳۷۹۴۳
f	۱۴۳۶۷۶
g	۱۴۵۹۹۳
h	۱۴۷۵۸۳
i	۱۵۱۶۰۹
j	۱۵۲۴۹۶
k	۱۴۴۹۳۶

#### ۴-۲- انرژی‌های مستهلک شده

در این تحقیق، انرژی مستهلک شده نمونه‌های مورد مطالعه در طول یک دوران کامل  $0.06$  رادیان در شکل ۱۲ نشان داده شده است. سطح زیر نمودار یا به عبارتی سطح محصور شده‌ی بین نمودارهای هیستریزس نشان دهنده‌ی انرژی مستهلک شده توسط عضو است. هرچه این سطح بزرگ‌تر باشد نشان دهنده‌ی این است که عضو شکل پذیرتر بوده و قابلیت جذب انرژی بیشتری دارد.



شکل ۱۲: انرژی‌های مستهلک شده در نمونه‌های مورد مطالعه

نمونه‌ی (k) در مقایسه با سایر اتصالات دارای مقطع کاهش یافته، قابلیت استهلاک انرژی بیش‌تری از خود نشان داده است. دلیل این امر دستیابی به حلقه‌های هیستریزس بزرگ‌تر و کامل‌تر و همچنین استفاده از ظرفیت پلاستیک‌شدگی تیر و تشکیل مفصل پلاستیک در تیر است. دلیل جذب انرژی کم در برخی نمونه‌ها نظیر نمونه‌ی (a) که بدون کاهش مقطع است، پلاستیک‌شدگی کم تیر و گسیختگی زود هنگام در آن‌هاست. در میان نمونه‌های دارای کاهش مقطع سوراخ‌دار بیش‌ترین جذب انرژی مربوط به نمونه‌ی (k) و پس از آن به ترتیب مربوط به نمونه‌های (j) (مدل سوراخ‌های نابرابر) و (i) (مدل سوراخ‌های یکسان) است. اعمال کاهش مقطع در تمامی مقاطع به جز نمونه‌ی (d) باعث افزایش انرژی جذب شده توسط اتصال شده است، که حاکی از عدم کارایی این مدل کاهش مقطع است گسترش تنش در نمونه‌ها در شکل



۸، کرنش‌های پلاستیک و همچنین محل تشکیل مفاصل پلاستیک در شکل ۹ قابل مشاهده است. گسترش تنش در اکثر نمونه‌ها در قسمت مشخص شده در تیر است و این امر عملکرد درست کاهش مقاطع را نشان می‌دهد. در نمونه‌های (b) و (c) تنش به قسمتی از ستون نیز سرایت کرده است، ویژگی مقاطع در کاهش کمانش خارج از صفحه باعث گسترش تنش در آن نقاط شده‌اند. نمونه‌هایی نظیر (a)، (d) و (f) که گسترش تنش در جان مقطع کاهش یافته در آن‌ها کم‌تر دیده می‌شود دچار کمانش در قسمت کاهش یافته شده‌اند. نمونه‌ی (k) که سوراخ‌های بزرگ شونده رو به داخل تیر است، عملکرد مناسبی در انتقال تنش‌ها به محل کاهش مقطع و عدم کمانش خارج از صفحه از خود نشان داده است.

جدول ۶: جذب انرژی نمونه‌های مورد مطالعه

نمونه‌ها	جذب انرژی (kJ)
a	۴/۴۲۷۱۴
b	۷/۱۶۸۰۸
c	۷/۸۳۷۵
d	۳/۳۷۳۳
e	۴/۹۴۴۷
f	۴/۷۷۲
g	۶/۴۲۷۱۶
h	۵/۹۸۹۶
i	۵/۶۰۰۴
j	۵/۶۵۶۵
k	۱۳/۸۸۱۸

مطابق جدول ۶، جذب و استهلاک انرژی در نمونه‌های (d)، (e) و (f) به دلیل اثر باریک‌شدگی کم‌تر از سایر روش‌های کاهش مقطع است. نمونه‌ی (k) در مقایسه با سایر اتصالات مقطع کاهش یافته قابلیت استهلاک انرژی بیش‌تری از خود نشان داده است. دلیل این امر دستیابی به حلقه‌های هیستریزیس بزرگ‌تر و کامل‌تر و همچنین استفاده از ظرفیت پلاستیک‌شدگی تیر و تشکیل مفصل پلاستیک در تیر است. دلیل جذب انرژی کم در برخی نمونه‌ها نظیر نمونه‌ی (a) که بدون کاهش مقطع است، پلاستیک‌شدگی کم تیر و گسیختگی زود هنگام در آن‌هاست. در میان نمونه‌های کاهش مقطع سوراخ‌دار بیش‌ترین جذب انرژی مربوط به نمونه (k) و پس از آن به ترتیب مربوط به نمونه‌های (j) (مدل سوراخ‌های نابرابر) و (i) (مدل سوراخ‌های یکسان) است. اعمال کاهش مقطع در تمامی مقاطع به جز نمونه‌ی (d) باعث افزایش انرژی جذب شده توسط اتصال شده است، که حاکی از عدم کارایی این مدل کاهش مقطع است. مطابق نتایج به دست آمده در زمینه، میزان جذب انرژی در نمونه‌ی دارای روش کاهش مقطع بال تیر با سوراخ‌های نابرابر و بزرگ شونده رو به داخل تیر نسبت به نمونه‌ی مرجع معادل ۶۸ درصد افزایش یافته است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف بررسی مدل‌های مختلف کاهش مقاطع و یافتن مدل بهینه از طریق بررسی رفتار هیستریزیس، نمودارهای بارافزون، تغییرات توزیع تنش در اجزاء مختلف قاب و انرژی‌های اتلاف شده در اتصالات انجام گردیده است. همانطور که مشاهده گردید هر کدام از مدل‌های کاهش مقطع دارای نقاط قوت و ضعفی هستند که با در نظر گرفتن آن‌ها می‌توان دست به طراحی زد. بر اساس نتایج بدست آمده در این پژوهش روش کاهش مقطع با سوراخ‌های نابرابر و بزرگ شونده رو به داخل تیر عملکرد مناسبی نسبت به سایر مدل‌ها داشته است. نتایج این تحقیق به شرح ذیل خلاصه می‌شود:

- در این مطالعه، نه اتصال خمشی با شکل متفاوت بال تیر کاهش یافته با استفاده از برنامه رایانه‌ای ABAQUS مدل سازی شده و سپس عملکرد آن‌ها با نمونه‌ی مرجع بدون بال تیر کاهش یافته تحت بارگذاری چرخه‌ای مقایسه می‌گردد. نتایج بدست آمده از این مطالعه

- نشان می‌دهد که با استفاده از سوراخ‌های متنوع، مقطع تیر کاهش یافته شکل پذیری بیشتری دارد و بیش از سایر اتصالات باعث اتلاف انرژی می‌شود.
- هر کدام از مدل‌های کاهش مقطع ارائه شده بر اساس توانایی خود توانستند کانتورهای تنش را به محل اعمال کاهش مقطع دور تر از بر ستون هدایت کنند.
  - مدل‌های مختلف کاهش مقطع در انتقال کرنش‌های پلاستیک به محل اعمال کاهش مقطع عملکرد مناسبی داشته‌اند، که بدین ترتیب محل تشکیل مفصل پلاستیک به خوبی از بر ستون فاصله گرفته است.
  - اتصال کاهش مقطع با سوراخ‌های نابرابر عملکرد بهتری نسبت به کاهش مقطع با سوراخ‌های یکسان داشته است.
  - از ادغام روش کاهش مقطع با سوراخ‌های نابرابر و روش باریک شونده رو به داخل تیر که عملکرد مناسبی برای فاصله دادن مفصل پلاستیک از بر ستون داشته است، روش کاهش مقطع با سوراخ‌های نابرابر که قطر سوراخ‌ها رو به داخل افزایش یافته است، به وجود می‌آید که با هم پوشانی نقاط قوت و ضعف یکدیگر عملکرد بسیار خوبی را به نمایش می‌گذارند.
  - تمامی روش‌های کاهش مقطع باعث افزایش اتلاف انرژی در اتصال شده‌اند.
  - اتصال با کاهش مقطع بال تیر با سوراخ‌های نابرابر و بزرگ شونده رو به داخل تیر بیش‌ترین اتلاف انرژی و کم‌ترین کمانش خارج از صفحه را دارا می‌باشد.
  - بر اساس کاهش مقاطع اعمال شده می‌توان مشاهده کرد محل اتصال تیر به ستون تقریباً در تمام نمونه‌ها الاستیک باقی‌مانده است.

## مراجع

- [1] Federal Emergency Management Agency. (2007). Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components, FEMA Report 461, Washington.
- [2] Richards P., Uang CM. (2006). Testing protocol for short links in eccentrically braced frames, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineer, 132(8):1183-1191.
- [3] Krawinkler H., Parisi F., Ibarra L., Ayoub A. Medina, R. (2001). Development of a testing protocol for wood frame structures, *CUREE-Caltech Wood frame Project Report*, Final Report, Stanford University, CA.
- [4] Engelhardt MD., Husain AS. (1993). Cyclic-loading performance of welded flange-bolted web connection. *J Struct Eng* 119.
- [5] Plumier A. (1994). Behaviour of connections. *J Constr Steel Res* 29: 95-119.
- [6] Tsai KC., Shun W., Popov E. (1995). Experimental performance of seismic steelbeam\_column moment joints. *J Struct Eng* 121(6): 925-31.
- [7] Gerami M., Saberi H., Saberi V., Saedi Daryan A. (2011). Cyclic behavior of bolted connections with different arrangement of bolts, *Journal of Constructional Steel Research* 67(4): 690-705.
- [8] Popov EP., Yang T., Chang S. (1998). Design of steel MRF connections before and after 1994 Northridge earthquake. *Eng Struct* 20(12):1030-8.
- [9] Wilkinson S., Hurdman G., Crowther A. (2006). A moment resisting connection for earthquake resistant structures, *Journal of Constructional Steel Research*, 62(3): 295-302.
- [10] Mirghaderi SR., Torabian S., Imanpour A. (2010). Seismic performance of the accordionwebRBS connection, *J. Constr. Steel Res* 66: 277-288.
- [11] Jalali SA., Banazadeh M., Abolmaali, A., Tafakori E. (2012). Probabilistic seismic demand assessment of steel moment frames with side-plate connections, *Scientia Iranica*, 19: 27-40.
- [12] Saneei Nia Z., Ghassemieh M., Mazroi A. (2014). Panel zone evaluation of direct connection to box column subjected to bidirectional loading, *Structural design of tall and special buildings*, 23(11): 833-853.
- [13] Anuj Kasar A., Goswami R., Bharti SD. Shrimali MK. (2015). Influence of joint panel zone on seismic behaviour of beam-to-column connections, *Advances in Structural Engineering* 73, 933-943.
- [14] Zhang L., Marzano G., Sasaki Y., Kurata M. Skalomenos K. (2018). Force redistribution of steel moment-resisting frame retrofitted with a minimal disturbance arm damper, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 114, 159-173.
- [15] Kim T., Yu E. (2019). Seismic analysis of steel moment frames with column-tree connections, *Journal of Constructional Steel Research*.
- [16] Han Q., Li X., Liu M. Spencer Jr., BF. (2019). Performance analysis and macromodel simulation of steel frame structures with beam-column joints using cast steel stiffeners for progressive collapse prevention, *Thin-Walled Structures* 140, 404-415.
- [17] Bayo E., Gracia J., Jönsson J. (2020). Axial-moment interaction for 2D welded steel joints using FEA: An initial investigation, *Journal of Constructional Steel Research* 168.
- [18] Yan JB., Chen Y., Lin X. (2020). Finite element analysis and parametric studies on hysteretic behaviours of high strength steel T-joints with damage-control fuses, *ThinWalled Structures* 148.
- [19] Saberi V., Saberi H., Mazaheri O., Sadeghi A. (2020). Numerical Investigation of Shape Memory Alloys and Side Plates Perforation Effect on Hysteresis Performance of Connections. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*.
- [20] Sadeghi A., Hashemi S., Mehdizadeh K. (2020). Probabilistic Assessment of Seismic Collapse Capacity of 3D Steel Moment-Resisting Frame Structures. *Journal of Structural and Construction Engineering*.
- [21] ABAQUS/standard, Version 6.11. (2012). ABAQUS, Inc., Pawtucket, R.I.
- [22] Chou CC., Lai YJ. (2010). Seismic rehabilitation of welded steel beam-to-box column connections utilizing internal flange stiffeners. *Earthquake spectra*, 26(4): 927-50.
- [23] Rahnavard R., Hassanipour, A., Siahpolo N. (2014). Analytical study on new types of reduced beam section moment connections affecting cyclic behavior. *Case Stud. Struct. Eng.*, 3: 33-51.
- [24] Clark P., Frank K., Krawinkler H., Shaw R. (1997). Protocol for Fabrication, Inspection, Testing, and Documentation of Beam-Column Connection Tests and Other Experimental Specimens, *SAC Steel Project Background Document*. October, Report No. SAC/BD97/02.
- [25] AISC, (2010). Specification for Structural Steel Buildings. *American Institute of Steel Construction*, Chicago, IL.