

Performance Evaluation of Bolted Moment Frame with Reduced Beam Section

Mohammad-Amin Jalali¹, Amin Rafiee^{2*}

1- Master of Science in Civil-Structural Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran
2- Assistant Professor of Civil-Structural Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

ABSTRACT

The lateral-torsional buckling of beam is a disadvantage for connections with reduced beam section (RBS). One effective method for preventing such buckling is to reduce web section (RWS) instead of flange. This, not only eliminates the disadvantage of RBS, but also, provides better behavior and more ductility. This paper investigates the effect of longitudinal and transverse web/flange slits on the behavior of bolted steel moment frames. The investigated frames include: frame with full beam section and frames with beams reduced by: radial cut in flange, longitudinal slits in flange, transverse slits in flange, longitudinal slits in web, transverse slits in web, mixed web slits, and, cruciform web slits. These one-story one-bay frames are analyzed using nonlinear finite-elements method with shell elements of type S4R and solid elements of type C3D8R in ABAQUS. The quasi-static cyclic loading according to Supplemental Access Control protocol is applied to the frames. The results show that by using RWS beams, the location of plastic hinge can move from column face to an appropriate distance at the reduction region. According to the results, the maximum rupture index (RI) occurs in frame with full (not reduced) section; while, the minimum RI belongs to RWS frame with longitudinal web slits. The larger the RI, the greater is the probability of rupture at low drifts. The hysteresis curves of frames show that the strength of frames with longitudinal or transverse flange slits decreases at final step of loading, i.e. at the last two cycles with greatest rotation angles. The frame with longitudinal web slits with 31.8% more load-carrying capacity and 30.9% more energy dissipation, shows better performance compared to the other RWS or RBS frames.

ARTICLE INFO

Receive Date: 28 April 2023
Revise Date: 13 August 2023
Accept Date: 03 September 2023

Keywords:

Bolted moment frame
Reduced beam section
Cyclic loading
Nonlinear finite-elements
Ductility

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.393962.3098>

*Corresponding author: Amin Rafiee.
Email address: a.rafiee@maragheh.ac.ir

ارزیابی عملکرد قاب خمشی با اتصالات پیچی دارای تیر با مقطع کاهش یافته

محمدامین جلالی^۱، امین رفیعی^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران-سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

چکیده

از معایب اتصالات کاهش یافته در بال، احتمال وقوع پدیده کمانش جانبی-پیچشی در تیر است. یک روش موثر در جلوگیری از بروز این پدیده، کاهش مقطع جان به جای کاهش مقطع بال تیر است که ضمن مرتفع نمودن معایب اتصال کاهش یافته در بال، رفتار بهتر و شکل پذیری بیشتری را فراهم می‌کند. هدف تحقیق حاضر، بررسی تأثیر استفاده از روش کاهش مقطع تیر با تعبیه شیارهای طولی و عرضی بر رفتار قاب‌های خمشی فولادی با اتصالات پیچی می‌باشد. نمونه‌های مورد مطالعه عبارتند از: قاب با تیر با مقطع کامل، و قاب‌های با تیر با مقطع کاهش یافته به روش‌های: برش شعاعی در بال، شیار طولی در بال، شیار عرضی در بال، شیار طولی در جان، شیار عمودی در جان، شیار ترکیبی در جان و شیار صلیبی در جان. این قاب‌های یک طبقه-یک دهانه، به روش اجزاء محدود با اجزای پوسته چهار گرهی S4R و جامد هشت گرهی C3D8R در نرم‌افزار ABAQUS با فرض رفتار غیرخطی تحلیل شده‌اند. بارگذاری چرخه‌ای شبه-استاتیکی، طبق پروتکل کنترل دسترسی الحاقی، به قاب‌ها اعمال شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد ایجاد تیر با مقطع کاهش یافته می‌تواند سبب انتقال مفصل پلاستیک از بر ستون به فاصله مناسب در محل مقطع کاهش یافته شود. همچنین، بیشترین اندیس شکست در قاب با تیر با مقطع کامل رخ داده و کمترین اندیس مربوط به قاب با شیار طولی در جان تیر است. اندیس بزرگ احتمال وقوع پارگی در تغییر مکان‌های نسبی پایین را افزایش می‌دهد. نتایج منحنی چرخه‌ای قاب‌ها نشان می‌دهد قاب با شیار طولی در بال تیر و قاب با شیار عرضی در بال تیر در گام نهایی بارگذاری، یعنی در دو چرخه‌ی آخر با بیشترین زاویه دوران، دچار تنزل مقاومت می‌شوند. همچنین، قاب با شیار طولی در جان تیر با ۳۱/۸ درصد ظرفیت باربری بیشتر و ۳۰/۹ درصد استهلاک انرژی بیشتر در مقایسه با سایر قاب‌های با تیر با مقطع کاهش یافته عملکرد بهتری دارد.

کلمات کلیدی: قاب خمشی پیچی، تیر با مقطع کاهش یافته، بارگذاری چرخه‌ای، اجزاء محدود غیرخطی، شکل پذیری.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.393962.3098	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2023.393962.3098	۱۴۰۲/۰۲/۳۱	۱۴۰۲/۰۶/۱۲	۱۴۰۲/۰۶/۱۲	۱۴۰۲/۰۵/۲۲	۱۴۰۲/۰۲/۰۸
امین رفیعی a.rafi@maragheh.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

در مناطقی که خطر لرزه‌خیزی بالایی دارند، یکی از راه‌کارهای مناسب جهت بهبود عملکرد ساختمان‌ها در مقابل زلزله، استفاده از قاب‌های خمشی مقاوم می‌باشد. این سیستم مقاوم لرزه‌ای تا قبل از سال ۱۹۹۴، کاربرد گسترده‌ای در صنعت ساختمان‌سازی در نواحی لرزه خیز داشته است. پس از رخ دادن زلزله‌های سال ۱۹۹۴ نورث‌ریج آمریکا و سال ۱۹۹۵ کوبه ژاپن، بسیاری از اتصالات تیر به ستون که در قاب-های مقاوم لرزه‌ای ساختمان‌ها استفاده شده بودند، عملکرد ضعیفی داشتند و برآورده نکردن شکل‌پذیری مورد انتظار، باعث وقوع شکست ترد در نواحی اتصالات و آسیب‌دیدگی آن‌ها شد [۱-۳].

یکی از انواع اتصالات جدید با مقطع کاهش یافته تیر که در سال‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است، اتصالات پیچی با تیر با مقطع کاهش یافته است که این نوع اتصال، یکی از اقتصادی‌ترین و کاربردی‌ترین انواع اتصال برای استفاده در قاب‌های مقاوم لرزه‌ای است. در یک اتصال پیچی با مقطع کاهش یافته تیر، پس از رخ دادن زلزله، با تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه کاهش یافته تیر، این ناحیه مانند یک فیوز عمل کرده و با خراب شدنش، از خرابی محل اتصال تیر به ستون جلوگیری می‌کند [۴-۶].

تا کنون مطالعات زیادی جهت افزایش مقاومت کمانش جانبی-پیچشی تیر کاهش یافته در بال (RBS)^۱ و نیز افزایش ظرفیت چرخش پلاستیک اتصال در قاب خمشی ویژه انجام شده است [۷-۱۰]. صابری^۲ و همکاران [۱۱]، تاثیر سخت کننده‌های افقی و قائم بر بهبود رفتار چرخه‌ای اتصالات RBS را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در حالت استفاده از ترکیب دو سخت کننده افقی و دو سخت کننده قائم، مقاومت اولیه و نهایی اتصال در مقایسه با اتصال بدون سخت کننده به ترتیب ۶/۲ و ۲۶/۱ درصد افزایش می‌یابد. در پژوهشی دیگر صابری و همکاران [۱۲]، تاثیر کاهش مقطع بال تیر در مقاومت اتصال و عملکرد بهینه‌ی اشکال مختلف کاهش مقطع در بال تیر از طریق شاخص‌های مختلف نظیر منحنی هیستریزیس، نمودار بارافزون و استهلاک انرژی توسط اتصال را مطالعه کردند.

از آنجا که مهمترین نقطه ضعف اتصال RBS به ستون فولادی، باربری کم ستون فولادی در مقایسه با ستون بتنی است؛ لذا به منظور برطرف نمودن این عیب، بابائی‌نژاد^۳ و همکاران [۱۳] با ترکیب اتصال RBS با اتصال مرکب تیر فولادی به ستون بتنی، اتصال جدیدی را پیشنهاد نمودند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد به طور کلی، جایگزینی تیر با مقطع کاهش یافته به جای تیر معمولی در اتصال مرکب، باعث بهبود عملکرد اتصال می‌گردد. به علاوه، یکی از نقدهای مطرح شده به اتصالات RBS، تخریب تیر بعد از وقوع زلزله، دشواری و مقرون به صرفه نبودن تعویض آن می‌باشد. به همین منظور، ایده استفاده از اتصالات دارای میراگر شکاف‌دار، که موجب استهلاک انرژی و تشکیل مفصل پلاستیک در مکانی غیر از اعضای اصلی سازه‌ای می‌گردد، مطرح شد. به منظور بهبود عملکرد این اتصال با قابلیت استفاده در قاب‌های خمشی ویژه، ذبیحی‌سامانی^۴ و همکاران [۱۴] افزایش ضخامت و تعداد نوارها و نیز کاهش ارتفاع میراگر را پیشنهاد کردند.

در سال‌های اخیر، با هدف ایجاد سهولت در تعویض عضو آسیب دیده پس از وقوع زلزله، ایده استفاده از ناحیه لینک در اتصال فولادی مطرح شده است. در همین راستا، زرفام^۵ و همکاران [۱۵] ایده استفاده از قطعه پیوند قوطی شکل در محل تشکیل مفصل پلاستیک را مطرح و توسعه دادند. همچنین در همین سال‌ها، یکی از روش‌های ساخت‌وساز رایج در ایران، استفاده از سازه‌های فولادی با اتصالات تیر به ستون خرجینی بوده است. اما رفتار ساختمان‌های فولادی با این نوع اتصال در زمین‌لرزه‌هایی مانند منجیل ۱۳۶۹ و بم ۱۳۸۲ نشان‌دهنده خرابی اتصالات قبل از خرابی تیرها و ستون‌ها بوده، و لذا به منظور افزایش مقاومت سازه‌های فولادی در برابر زلزله، گنجی‌مراد^۶ و همکاران [۱۶] اتصال خرجینی صلب جدیدی را با مقاطع تیر کاهش یافته، ارائه نمودند. به علاوه، عملکرد اتصالات RBS تحت شرایط آتش‌سوزی، نیز اخیراً توسط حقیقت^۷ و همکاران [۱۷] مطالعه شده است.

¹ Reduced Beam Section

² Saberi

³ Babaeenezhad

⁴ Zabihi Samani

⁵ Zarfam

⁶ GanjiMorad

⁷ Haghghat

در مقایسه با اتصالات RBS، تحقیقات نسبتاً کمتری بر روی اتصالات با تیر کاهش یافته در جان (RWS)^۸، انجام شده است. هدایت و سلیکاژ^۹ [۱۸]، تأثیر وجود دو شکاف موازی در جان تیر را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که کاهش مقطع جان به روش ایجاد دو شکاف موازی می‌تواند تمرکز تنش را کاهش دهد و نیز موجب دورتر شدن مفصل پلاستیک از بر ستون شود. پراسادا رائو و ساتیش کومار^{۱۰} [۱۹]، به بررسی یک اتصال با جان برش خورده مستطیلی شکل پرداختند. آن‌ها بر اساس مطالعات عددی اجزاء محدود، روابطی را برای تعیین پارامترهای موثر بر عملکرد این نوع اتصال ارائه کردند.

ژانگ و ریکلز^{۱۱} [۲۰]، نشان دادند که اتصالات RWS قابلیت دوران پلاستیک بزرگ‌تر از ۰/۰۵ رادیان را بدون افت قابل ملاحظه در استهلاک انرژی دارا می‌باشند. بر اساس نتایج تحقیق کنستانتینوس و تئودور^{۱۲} [۲۱]، عملکرد اتصالات RWS تحت بارگذاری چرخه‌ای مناسب بوده و دارای رفتاری قابل اعتماد می‌باشند. شین^{۱۳} و همکاران [۲۲]، چقرمگی لرزه‌ای و مکانیزم شکست تیرهای RWS را مورد بررسی قرار دادند. بیشتر نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق رفتار چرخه‌ای پایداری تا تقریباً ۶٪ تغییر مکان نسبی طبقه نشان دادند. همچنین، بوشه‌ری^{۱۴} و همکاران [۲۳]، با توجه به مطالعات عددی که بر روی رفتار لرزه‌ای اتصالات RWS به ستون‌های عمیق با مقاطع اروپایی انجام دادند، یک روند طراحی گام به گام برای این اتصالات پیشنهاد دادند.

همچنین، از میان پژوهش‌های اخیر که به موضوع مطالعه رفتار تیرها، اتصالات و قاب‌های RWS پرداخته‌اند، می‌توان به پژوهش‌های [۲۴ تا ۳۰] اشاره کرد. به علاوه، بر اساس مطالعات داورپناه^{۱۵} و همکاران [۳۱ و ۳۲]، به منظور استفاده از متغیرهای ناحیه کاهش یافته پیشنهادی توسط آیین‌نامه AISC^{۱۶} [۳۳] در پروفیل‌های فولادی رایج در ایران، نیاز به تحقیقات بیشتر وجود دارد. هدف از تحقیق حاضر، بررسی تأثیر استفاده از روش کاهش مقطع تیر با تعبیه شیارهای طولی و عرضی در رفتار قاب‌های خمشی فولادی با اتصالات پیچی می‌باشد، موضوعی که، همان‌طور که از مرور فوق بر پژوهش‌های پیشین آشکار است، تاکنون به آن پرداخته نشده است.

۲- صحت‌سنجی

در این بخش، به منظور صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی اجزاء محدود، نمونه آزمایشگاهی نظرعلیزاده^{۱۷} و همکاران [۳۴] مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه جزئیات کاملی از نمونه‌ها شامل: مشخصات هندسی، خواص مصالح، پروتکل بارگذاری، پیکربندی و چیدمان طرح آزمایشگاهی تشریح شده است. چگونگی چیدمان، شرایط مرزی و تجهیزات نمونه‌های مورد آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل‌های ۲ و ۳ مشخصات هندسی نمونه‌های اتصال کاهش یافته در جان با شیار قائم (RWS-VS)^{۱۸} و اتصال کاهش یافته در بال با برش شعاعی (RBS-RC)^{۱۹} را نشان می‌دهند.

⁸ Reduced Web Section

⁹ Hedayat & Celikag

¹⁰ Prasada Rao & Satish Kumar

¹¹ Zhang & Ricles

¹² Konstantinos & Theodore

¹³ Shin

¹⁴ Boushehri

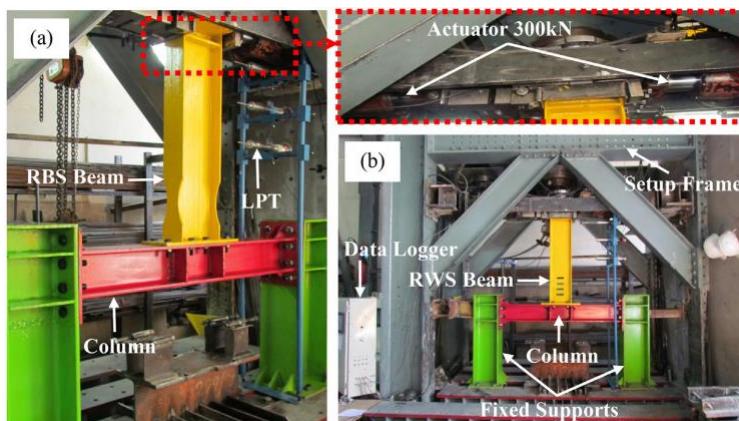
¹⁵ Davarpanah

¹⁶ American Institute of Steel Construction

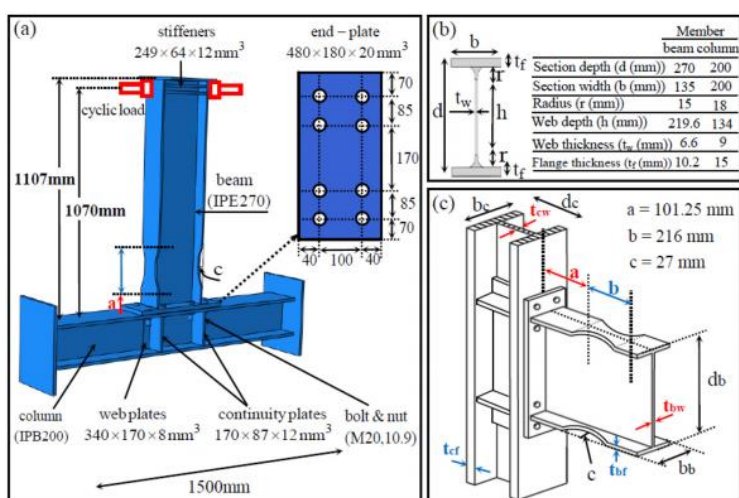
¹⁷ Nazaralizadeh

¹⁸ Vertical-Slit Reduced Web Section

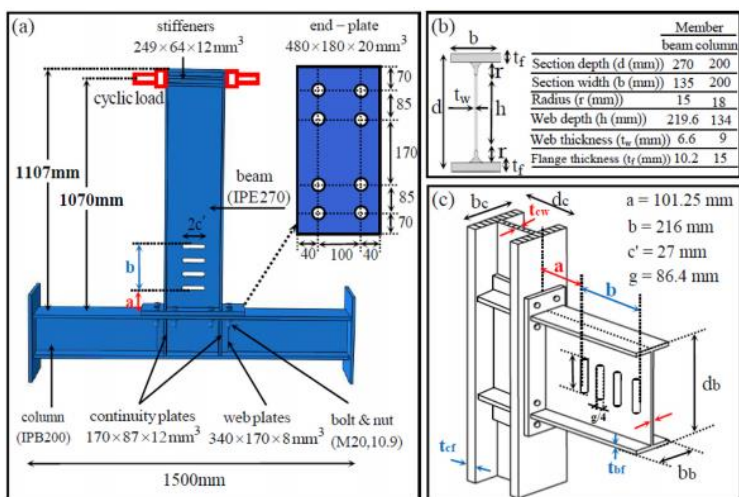
¹⁹ Radial-Cut Reduced Beam Section



شکل ۱: پیکربندی نمونه‌های آزمایشگاهی [۳۴].



شکل ۲: جزئیات اتصالات با تیر با مقطع کاهش یافته اتصال RC-RBS [۳۴].



شکل ۳: جزئیات اتصالات با تیر با مقطع کاهش یافته اتصال VS-RWS [۳۴].

۲-۱ مدل سازی نمونه‌ها در ABAQUS

در اتصالات پیچی با مقطع تیر کاهش یافته، افزون بر مشخصات هندسی تیر، عوامل دیگری همچون خصوصیات مواد، نیروی پیش-تندگی در پیچ، نحوه تعریف اتصال اجزاء به همدیگر در مدل عددی نرم‌افزاری، نوع اجزای محدود، تغییر سختی، تغییر مقاومت و نیز پدیده

باریک شدگی در اثر لغزش، بر روی شکل و حلقه‌های منحنی هیستریزس اتصال و در نتیجه بر روی سایر نتایج حاصله موثر هستند. بر همین اساس، نتایج مطالعات نظری به تنهایی نمی‌تواند مورد استناد قرار گیرد و لذا برای حصول اطمینان از نتایج مطالعات پارامتری با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود، یک نمونه آزمایشگاهی بایستی بررسی شده و با صحت‌سنجی نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی، از صحت مدل‌سازی و نتایج آن، اطمینان حاصل گردد. از همین روی، در این تحقیق، پیش از انجام تحلیل پارامتری، ابتدا نمونه‌های آزمایشگاهی مرجع، با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS مدل‌سازی عددی شدند و سپس مقایسه و صحت‌سنجی‌های لازم انجام شد.

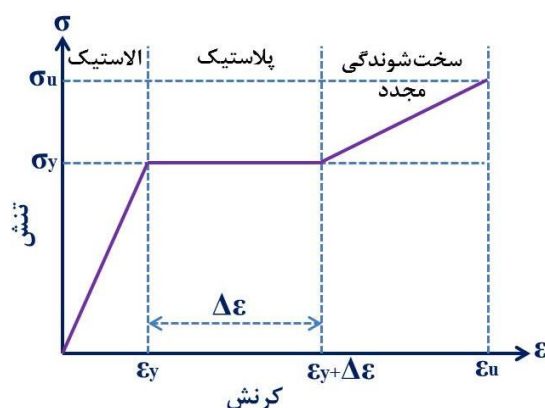
در مدول قطعه ۲۰ در ABAQUS، به منظور مدل‌سازی اتصالات، کلیه اجزای اتصال، دقیقاً طبق هندسه نمونه آزمایشگاهی مرجع، مدل شدند. در واقع، جهت مدل‌سازی تیر از اجزای پوسته‌ای^{۲۱} دوبعدی ۴ گرهی نوع S4R با ۶ درجه آزادی در هر گره استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی صفحه انتهایی، ستون و پیچ‌ها، اجزای مکعبی ۸ گرهی جامد^{۲۲} از نوع اجزای سه‌بعدی C3D8R با ۱۲ درجه آزادی در هر گره به کار گرفته شده است (جدول ۱). شایان ذکر است، هر دو نوع جزء مذکور، قابلیت لحاظ کردن اثر غیرخطی هندسی و تغییرشکل‌های بزرگ را دارا هستند.

جدول ۱: نوع اجزای هر بخش از اتصال

جزء S4R	جزء C3D8R
تیر (بال و جان)	ستون (بال و جان)
سخت‌کننده	صفحه انتهایی
	صفحه پیوستگی
	صفحه جان

پیچ

در مدول خصوصیات^{۲۳} در ABAQUS، برای مدل‌سازی رفتار فولاد مطابق شکل ۴ از منحنی تنش-کرنش سه‌خطی استفاده شده است. ضریب پواسن ۰.۳، مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال و چگالی جرمی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نرم‌افزار لحاظ شده است. به منظور مدل‌سازی هر چه دقیق‌تر رفتار چرخه‌ای، سخت‌شوندگی از نوع ترکیبی ایزوتروپیک و سینماتیک از نوع داده‌های نیم‌چرخه در نظر گرفته شده است. این نوع سخت‌شوندگی، دقیق‌ترین نتایج را برای رفتار چرخه‌ای سازه‌های فولادی ارائه می‌دهد. بعد از سرهم‌بندی کردن اجزای مختلف اتصالات در مدول سرهم‌بندی^{۲۴} در ABAQUS، شکل ۵ مدل سرهم‌بندی شده اتصالات را به همراه اجزای مختلف آن، (طبق نمونه‌های آزمایشگاهی)، در حالت مش‌بندی شده، نشان می‌دهد.



شکل ۴: منحنی سه خطی تنش - کرنش فولاد.

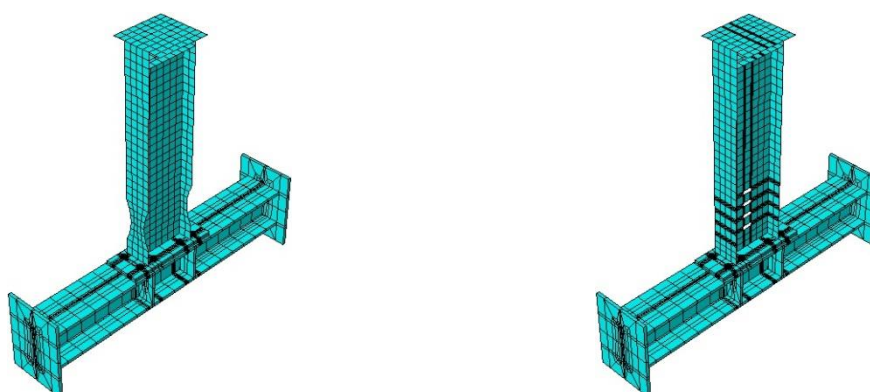
20 Part

21 Shell

22 Solid

23 Property

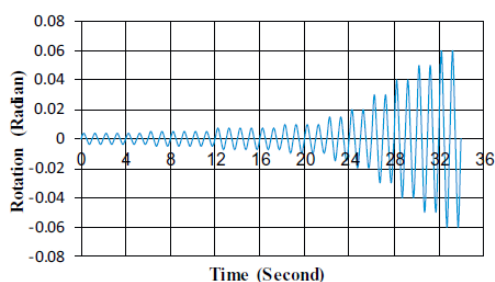
24 Assembly



شکل ۵: مدل‌های اجزاء محدود ساخته شده برای اتصالات مورد مطالعه
الف) اتصال کاهش یافته در جان با شیار قائم (VS-RWS) ب) اتصال کاهش یافته در بال با برش شعاعی (RC-RBS)

در مدول گام^{۲۵} در ABAQUS، نوع تحلیلی، استاتیکی عمومی^{۲۶} و در دو مرحله (گام) با در نظر گرفتن اثر غیرخطی هندسی انجام شده است. گام ۱ برای اعمال نیروی پیش‌تنیدگی در پیچ‌ها (با دوره زمانی^{۲۷} یک ثانیه)، و گام ۲ برای اعمال بارگذاری چرخه‌ای (با دوره زمانی ۳۶ ثانیه)، در نظر گرفته شده است. همچنین، پدیده لغزش معمولاً در سازه‌های با اتصالات پیچی رخ می‌دهد. برای حصول یک مدل دقیق‌تر، باید پدیده لغزش نیز در اتصالات پیچی مدل‌سازی شود. برای این کار، در مدول اندرکنش^{۲۸} در ABAQUS، با پارتیشن‌بندی مناسب، تماس بین قسمت‌های مختلف اتصال تعریف شد. در اندرکنش ۱، رفتار تماسی بین سطح ستون با صفحه انتهایی به صورت سطح-به-سطح و از نوع جریمه^{۲۹}، با ضریب اصطکاک ۰.۲ با رفتار نرمال از نوع تماس سخت لحاظ شد. همچنین، در اندرکنش ۲، رفتار تماسی بین سطح بدنه پیچ‌ها با سوراخ‌های ستون و صفحه انتهایی از نوع بدون اصطکاک تعریف شد. از قید بند^{۳۰} نیز برای تعریف اتصال بین سر پیچ‌ها و صفحه انتهایی، بین سطح دایره‌ای مهره‌ها و سطح بال ستون و در محل بستن پیچ‌ها، بین صفحه انتهایی و سطح ستون استفاده شد.

در مدول بار^{۳۱} در ABAQUS، نیروی پیش‌تنیدگی بر اساس نمونه آزمایشگاهی به اندازه ۱۷۲۷۸۷ کیلونیوتن به پیچ‌ها اعمال شد. شرایط تکیه‌گاهی دو انتهای ستون به صورت گیردار لحاظ و انتهای تیر به صورت جابجایی-کنترل بر اساس پروتکل کنترل دسترسی الحاقی (SAC)^{۳۲} [۳۲] مطابق شکل ۶ و جدول ۲ تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه-استاتیکی قرار گرفت.



شکل ۶: بارگذاری چرخه‌ای بر اساس پروتکل [۳۲]

²⁵ Step

²⁶ Static, General

²⁷ Time Period

²⁸ Interaction

²⁹ Penalty

³⁰ Tie

³¹ Load

³² Supplemental Access Control

جدول ۲: جزئیات بارگذاری چرخه‌ای

گام بارگذاری	زاویه دوران (رادیان)	تعداد چرخه‌ها
۱	۰.۰۰۳۷۵	۶
۲	۰.۰۰۵	۶
۳	۰.۰۰۷۵	۶
۴	۰.۰۱	۴
۵	۰.۰۱۵	۲
۶	۰.۰۲	۲
۷	۰.۰۳	۲
۸	۰.۰۴	۲
۹	۰.۰۵	۲
۱۰	۰.۰۶	۲

شایان ذکر است، مش‌بندی با ایجاد پارتیشن‌های مناسب در مدول مش^{۳۳} در ABAQUS انجام و پس از تحلیل‌های همگرایی بر روی مقادیر بهینه‌ی متغیر اندازه مش، سائز مش‌ها برای پیچ‌ها ۵ میلی‌متر و برای سایر اجزای اتصال ۱۵ میلی‌متر انتخاب شد. جدول ۳ جزئیات تحلیل همگرایی و بهینه‌سازی اندازه مش را نشان می‌دهد. در نهایت، مدل‌ها در مدول شغل^{۳۴} در ABAQUS ارسال^{۳۵} و تحلیل شدند.

جدول ۳: جزئیات تحلیل همگرایی و بهینه‌سازی اندازه مش

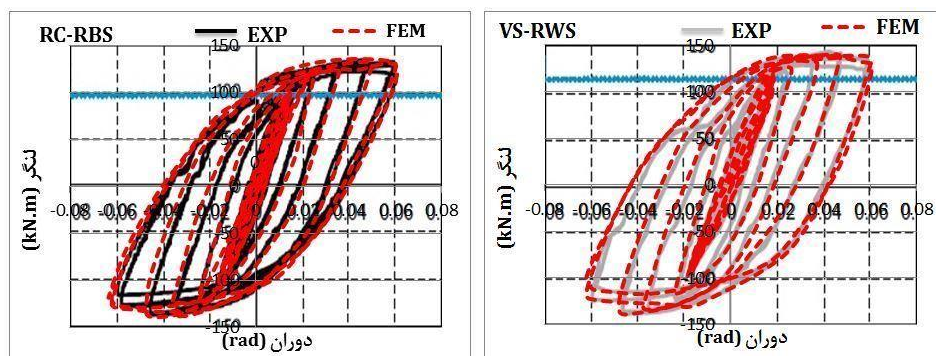
بیشینه تنش فون-میزز (پاسکال)	اندازه مش (میلی‌متر)	
	سایر اجزای اتصال	پیچ‌ها
۲.۱۴۹ e۸	۲۰	۱۵
۲.۹۱۲ e۸	۱۵	۱۰
۳.۱۴۱ e۸	۱۵	۵
۳.۱۵۶ e۸	۱۰	۵

در شکل ۷ منحنی چرخه‌ای لنگر - دوران مدل‌های نرم‌افزاری و نمونه‌های آزمایشگاهی برای هر دو اتصال ترسیم شده است. منحنی‌های چرخه‌ای مدل‌سازی اجزاء محدود مطابقت قابل قبولی با منحنی‌های نمونه‌های آزمایشگاهی دارند که با اتکاء بر این صحت‌سنجی در بخش بعدی مطالعات پارامتری انجام خواهند شد. این مطابقت به گونه‌ای است که در مورد اتصال RC-RBS، بیشینه لنگر در مدل عددی و آزمایشگاهی، به ترتیب، ۱۳۴.۱ و ۱۳۰.۴ است. در مورد اتصال VS-RWS نیز این مقادیر به ترتیب ۱۴۵.۸ و ۱۴۲.۳ هستند. یعنی در هر دو اتصال درصد خطای صحت‌سنجی کمتر از ۳ درصد است. از دلایل مهم این تطابق، می‌توان به تعریف مناسب برهم‌کنش‌های بین صفحه انتهایی، بال ستون و پیچ‌ها، تعریف دقیق مشخصات هندسی اتصال و تعریف مشخصات واقعی مصالح بر اساس آزمایش کشش برای مدل‌سازی در نرم‌افزار اشاره نمود. علاوه بر این، پارتیشن‌بندی مناسب اجزای اتصال برای دستیابی به مش‌بندی مطلوب و استفاده از منحنی تنش-کرنش سه‌خطی فولاد یکی دیگر از عوامل مهم مطابقت نتایج آزمایشگاهی و عددی است.

³³ Mesh

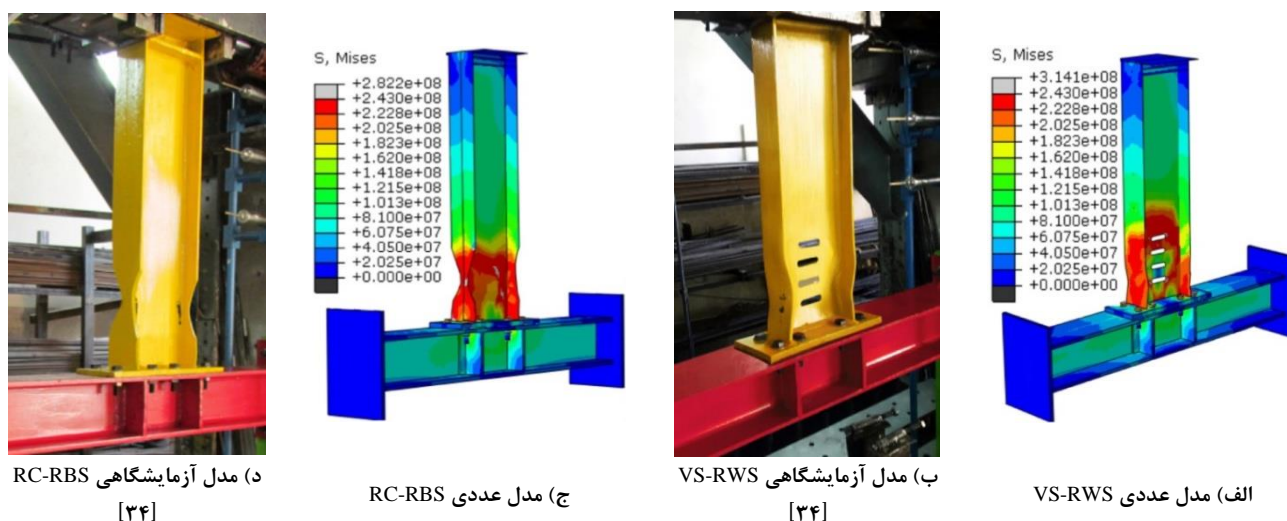
³⁴ Job

³⁵ Submit



شکل ۷: صحت‌سنجی نتایج منحنی لنگر- دوران مدل‌سازی اجزاء محدود با نمونه آزمایشگاهی.

به علاوه، تغییر شکل و توزیع تنش فون-میزرز رخ داده در این اتصالات نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مطابقت خوبی بین نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی [۳۴] وجود دارد.

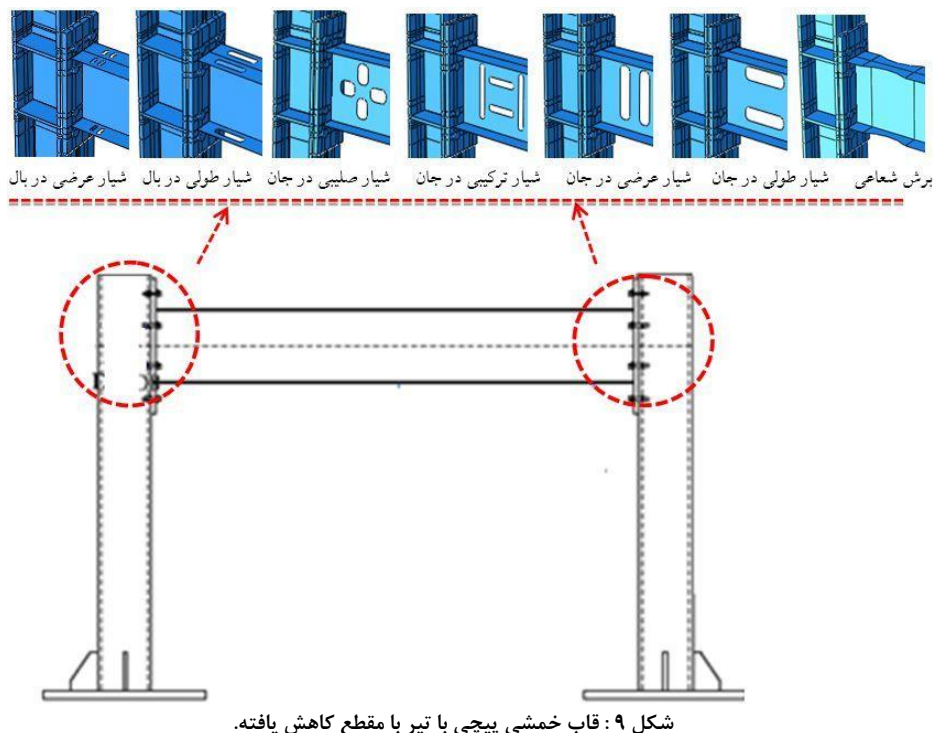


شکل ۸: تغییر شکل و توزیع تنش فون-میزرز رخ داده در اتصالات مورد مطالعه

۳- نمونه‌های پیشنهادی

نمونه‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر عبارتند از: قاب با تیر با مقطع کامل، و قاب‌های با تیر با مقطع کاهش یافته به روش‌های: برش شعاعی در بال، شیار طولی در بال، شیار عرضی در بال، شیار طولی در جان، شیار عمودی در جان، شیار ترکیبی در جان و شیار صلیبی در جان. در این بخش، ابتدا به معرفی جزئیات ابعاد هندسی نمونه‌های مورد مطالعه پرداخته می‌شود. سپس، مشخصات مصالح مورد استفاده در این نمونه‌ها تعریف می‌شوند. در ادامه نیز، شرایط مرزی و نحوه اعمال بارگذاری تشریح می‌گردد.

جزئیات هندسی: ارتفاع قاب‌های مورد مطالعه ۳ متر و طول دهانه آنها ۵ متر می‌باشد. مقطع تیر مورد استفاده IPE 330 و مقطع ستون IPB200 انتخاب شده است. انواع تیرهای با مقطع کاهش یافته مورد بررسی در این تحقیق، در شکل ۹ نشان داده شده‌اند.



مشخصات مصالح: خصوصیات مکانیکی فولاد، پیچ و ورق انتهایی به کار رفته در قاب‌های مورد مطالعه در این پژوهش، در جدول-های ۴ و ۵ ارائه شده است.

جدول ۴: مشخصات هندسی و مکانیکی پیچ

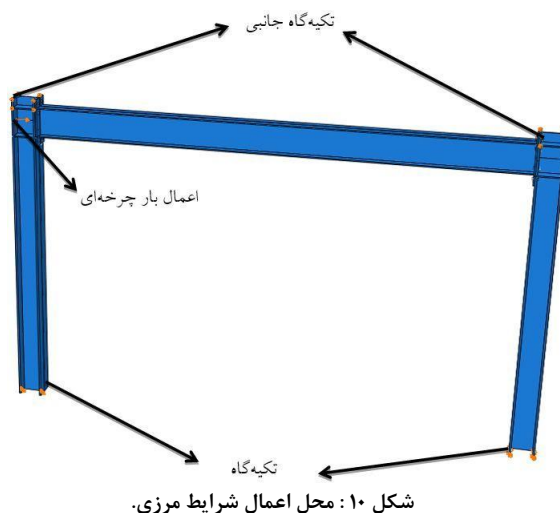
مقدار	مشخصات
۲۰	قطر (میلی‌متر)
۹۰۰	تنش تسلیم (مگاپاسکال)
۱۰۰۰	تنش نهایی (مگاپاسکال)

جدول ۵: مشخصات مکانیکی مدل الاستوپلاستیک برای فولاد

نوع مقطع	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش نهایی (مگاپاسکال)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)
بال تیر	۲۷۷	۴۰۵	۱۸۱
جان تیر	۲۴۳	۳۳۶	۱۷۲
بال ستون	۳۰۱	۴۰۲	۱۹۴
جان ستون	۲۶۸	۳۹۲	۱۹۲
ورق انتهایی	۳۳۰	۴۴۵	۱۹۹

بارگذاری و شرایط مرزی: بارگذاری تغییرمکانی دو طرفه افزایش‌یابنده (چرخه‌ای)، براساس پروتکل بارگذاری [۳۲] مطابق شکل ۶ انجام می‌شود. به منظور بررسی اثر تکرار بارگذاری و باربرداری بر روی مقاومت اتصال این بارگذاری لحاظ می‌گردد. زوال در مقاومت اتصال در اثر تکرار بارگذاری می‌تواند به دو دلیل صورت گیرد: (۱) ایجاد گسیختگی در قسمتی از اتصال، که غالباً در جوش‌ها اتفاق می‌افتد؛ و (۲) ایجاد کماتش‌های ناپایدار در بعضی از اجزای اتصال. نرم‌افزار ABAQUS قابلیت انجام بارگذاری و باربرداری‌های متعدد را دارا می‌باشد. بنابراین می‌توان با استفاده از این نرم‌افزار، تحلیل‌های مربوط به بارگذاری‌های چرخه‌ای را انجام داد.

محل اعمال شرایط مرزی و بارگذاری در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق این شکل، پای ستون‌ها با تکیه‌گاه مفصلی مقید شده است. بارگذاری چرخه‌ای به ستون سمت چپ در امتداد محور مرکزی تیر اعمال می‌شود. همچنین به منظور جلوگیری از تغییرشکل جانبی قاب، تکیه‌گاه جانبی مطابق شکل در نظر گرفته شده است. شکل ۱۱ روندنمای تحقیق را به طور خلاصه بیان می‌کند.



1	• تعریف جزئیات هندسی اجزای قاب و اتصال (بخش ۲-۱ و بخش ۳: شکل ۹ و جدول ۴)
2	• تعریف مشخصات مصالح اجزای قاب و اتصال (بخش ۲-۱ و بخش ۳: جدول ۴ و ۵)
3	• سرهم‌بندی اجزای قاب و اتصالات (بخش ۲-۱)
4	• تعیین نوع تحلیل، اثرات غیرخطی، گام‌های بارگذاری (پیش‌تنیدگی پیچ‌ها و بارگذاری چرخه‌ای)، (بخش ۲-۱)
5	• تعریف اندرکنش‌ها و قیدها (لغزش و تماس بین سطوح مختلف اجزای قاب و اتصال)، (بخش ۲-۱)
6	• تعیین مقدار پیش‌تنیدگی، پروتکل بارگذاری چرخه‌ای و شرایط مرزی (بخش ۲-۱: شکل ۶ و جدول ۲ و بخش ۳: شکل ۱۰)
7	• مش‌بندی اجزاء محدود مدل سرهم‌بندی شده، تحلیل همگرایی و بهینه‌سازی اندازه مش‌ها (بخش ۲-۱: جدول ۳)
8	• تحلیل مدل‌ها، بررسی نتایج تحلیل (توزیع تنش و تغییرشکل و ...)

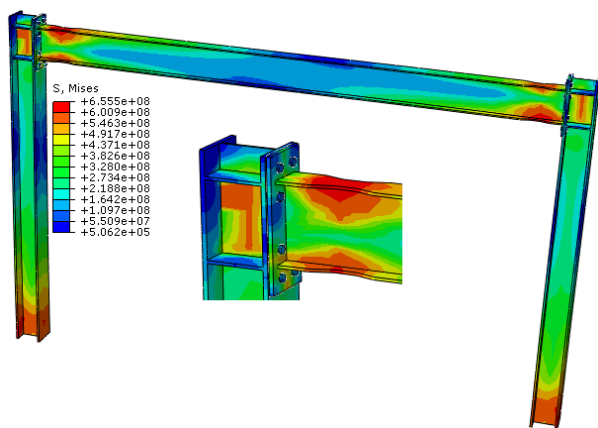
شکل ۱۱: روندنمای تحقیق.

۴- بحث و بررسی نتایج تحلیل

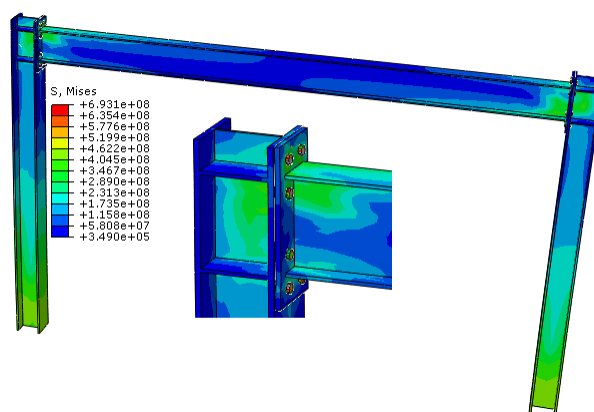
تغییرشکل و توزیع تنش فون-میزز رخ داده در قاب با تیر با مقطع کامل در گام نهایی بارگذاری (دو چرخه‌ی آخر بارگذاری چرخه‌ای با بیشترین زاویه دوران، جدول ۲ و شکل ۶) در شکل (۱۲-الف) ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، بیش‌ترین تنش‌ها در پیچ‌ها و محل اتصال رخ داده است. شکل (۱۲-ب) نیز تغییرشکل و توزیع تنش رخ داده در قاب با تیر کاهش یافته به روش

برش شعاعی در بال را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، بیشترین تنش‌ها در محل تیر با مقطع کاهش یافته رخ داده و تنش‌ها از محلی بحرانی اتصال (بر ستون) دور شده‌اند.

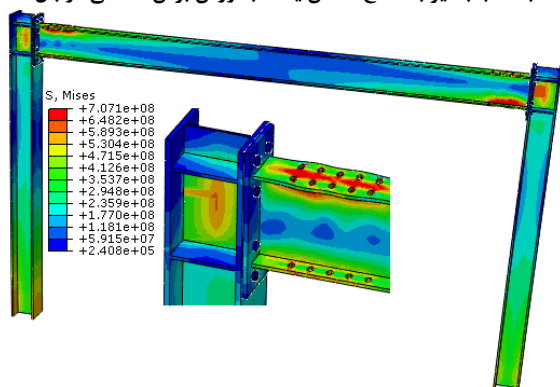
به علاوه، تغییر شکل و توزیع تنش فون-میزر رخ داده در قاب با تیر کاهش یافته به روش شیار طولی در بال در گام نهایی بارگذاری در شکل (۱۲-ج) ارائه شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است بیشترین تنش‌ها در محل تیر با مقطع کاهش یافته رخ داده است. شکل (۱۲-د) نیز تغییر شکل و توزیع تنش رخ داده در قاب با تیر کاهش یافته به روش شیار عرضی در بال را نشان می‌دهد. طبق این شکل نیز بیشترین تنش‌ها در محل تیر با مقطع کاهش یافته رخ داده است.



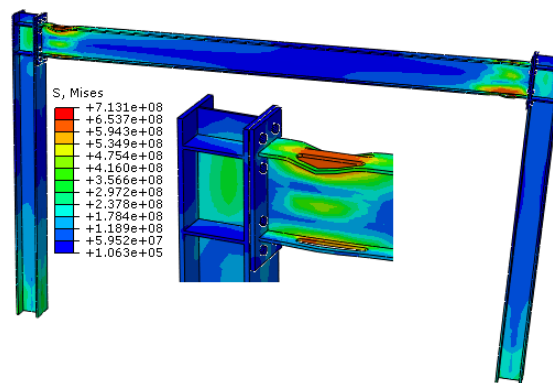
(ب) قاب با تیر با مقطع کاهش یافته به روش برش شعاعی در بال



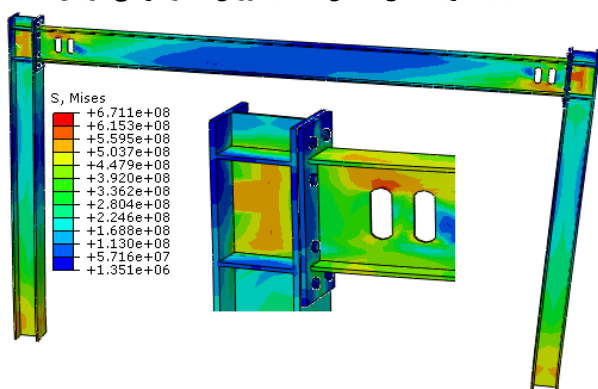
(الف) قاب با تیر با مقطع کامل



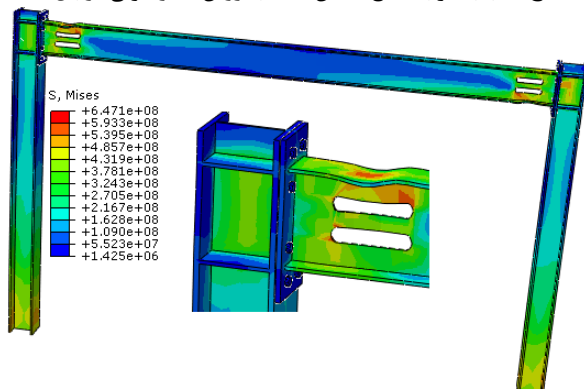
(د) قاب با تیر با مقطع کاهش یافته به روش شیار عرضی در بال



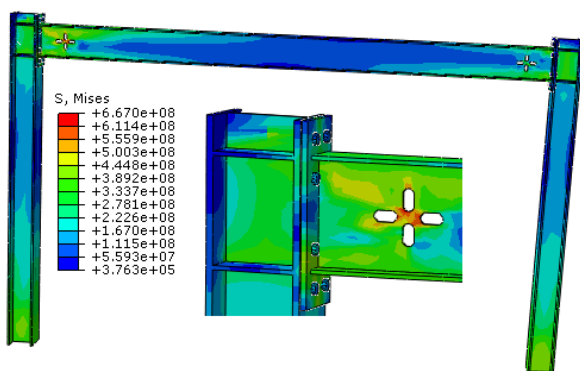
(ج) قاب با تیر با مقطع کاهش یافته به روش شیار طولی در بال



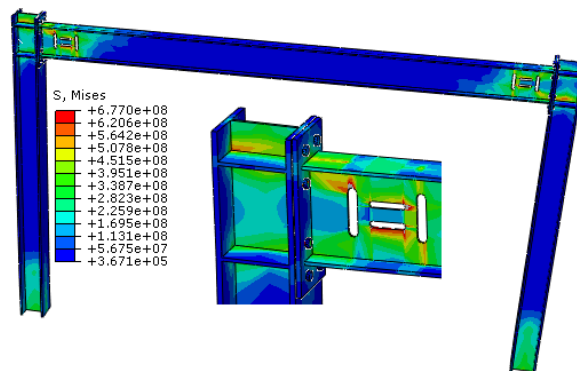
(و) قاب با تیر با مقطع کاهش یافته به روش شیار عمودی در جان



(ه) قاب با تیر با مقطع کاهش یافته به روش شیار طولی در جان



ح) قاب با تیر با مقطع کاهش یافته به روش شیار صلیبی در جان



ز) قاب با تیر با مقطع کاهش یافته به روش شیار ترکیبی در جان

شکل ۱۲: تغییر شکل و توزیع تنش فون-میزز (Pa) رخ داده در قاب‌های مورد مطالعه

تغییر شکل و توزیع تنش فون-میزز رخ داده در قاب با تیر کاهش یافته به روش شیار طولی در جان در گام نهایی بارگذاری در شکل (۱۲-ه) ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، بیش‌ترین تنش‌ها در محل تیر با مقطع کاهش یافته رخ داده است. بیشینه تنش رخ داده در این اتصال ۶۴۷ مگاپاسکال است. شکل (۱۲-و) هم تغییر شکل و توزیع تنش رخ داده در قاب با تیر کاهش یافته به روش شیار عمودی در جان را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، بیش‌ترین تنش‌ها در محل تیر با مقطع کاهش یافته رخ داده است. بیشینه تنش رخ داده در این اتصال نیز ۶۷۱ مگاپاسکال می‌باشد.

همچنین، تغییر شکل و توزیع تنش فون-میزز رخ داده در قاب با تیر کاهش یافته به روش شیار ترکیبی در جان در گام نهایی بارگذاری در شکل (۱۲-ز) ارائه شده است. همان‌طور که این شکل گویا است، بیش‌ترین تنش‌ها در محل تیر با مقطع کاهش یافته رخ داده است. شکل (۱۲-ح) نیز تغییر شکل و توزیع تنش رخ داده در قاب با تیر کاهش یافته به روش شیار صلیبی در جان را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، بیش‌ترین تنش‌ها در محل تیر با مقطع کاهش یافته رخ داده است.

برای ارزیابی شکست شکل‌پذیر دو محل در یک مدل اجزاء محدود و یا بین مدل‌های مختلف در یک محل، اندیس شکست معیار مناسبی است. اندیس شکست (RI^3) از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$RI = \frac{\left(\frac{PEEQ}{\epsilon_y} \right)}{\exp\left(1.5 \frac{p}{q}\right)} \quad (1)$$

که ϵ_y کرنش تسلیم است. نرخ تنش هیدرواستاتیک^{۳۷} به تنش فون-میزز $\left(\frac{p}{q}\right)$ ، نرخ سه محوری^{۳۸} (TR) نامیده می‌شود. همچنین، کرنش پلاستیک معادل^{۳۹} ($PEEQ$) را می‌توان از رابطه ۲ محاسبه کرد:

$$PEEQ = \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij}^{pl} \epsilon_{ij}^{pl}} \quad (2)$$

که در این رابطه، ϵ_{ij}^{pl} مولفه‌های کرنش پلاستیک در راستاهای i و j است.

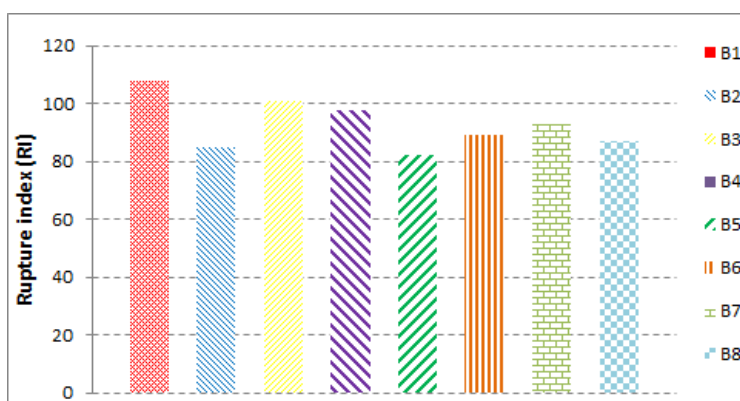
³⁶ Rupture Index

³⁷ Hydrostatic stress

³⁸ Triaxiality Ratio

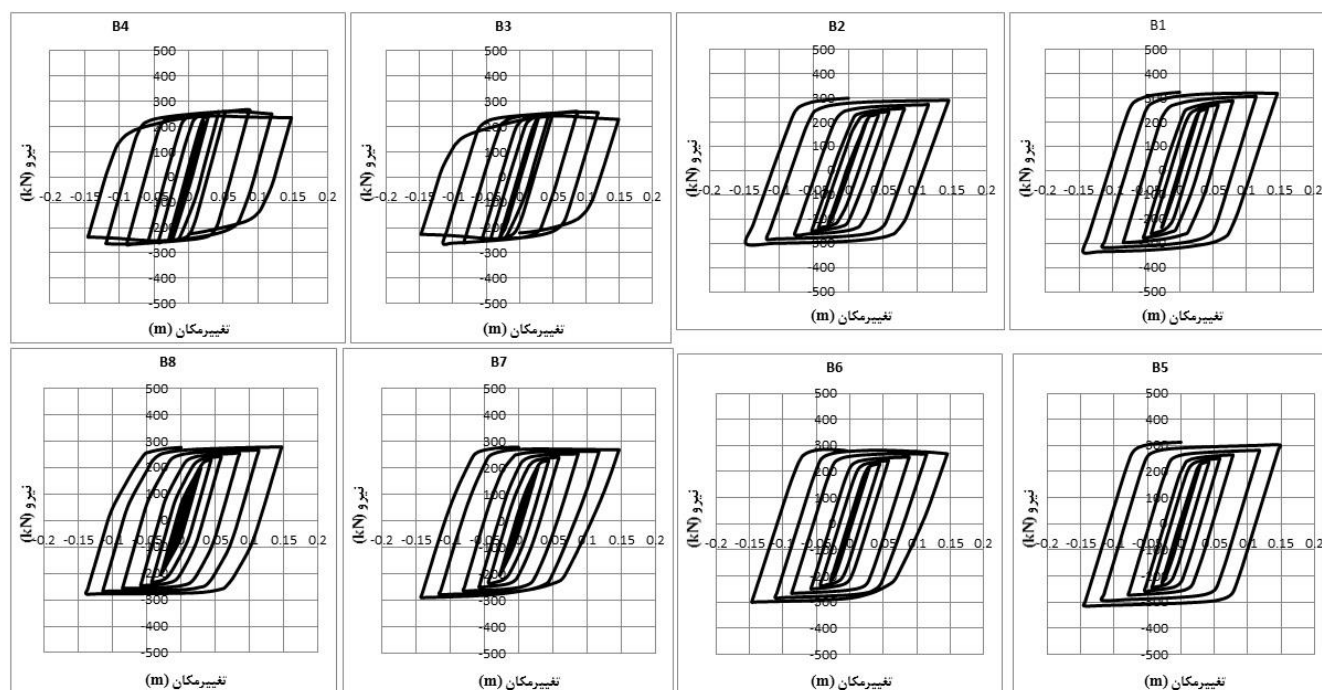
³⁹ Equivalent plastic strain

مقدار اندیس شکست قاب با اتصالات مختلف در شکل ۱۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج این شکل، بیشترین مقدار اندیس شکست به ترتیب در قاب با تیر با مقطع کامل (B1)، قاب با تیر کاهش یافته به روش شیار طولی در بال (B3)، قاب با تیر کاهش یافته به روش شیار عرضی در بال (B4)، قاب با تیر کاهش یافته به روش شیار عمودی در جان (B7)، قاب با تیر کاهش یافته به روش برش شعاعی در بال (B2)، و در جان (B6)، قاب با تیر کاهش یافته به روش شیار صلیبی در جان (B8)، قاب با تیر کاهش یافته به روش شیار طولی در جان (B5) رخ داده است. اندیس شکست بالا احتمال رخ دادن پارگی را در تغییرمکان‌های نسبی پایین افزایش می‌دهد.



شکل ۱۳: اندیس شکست قاب با اتصالات مختلف.

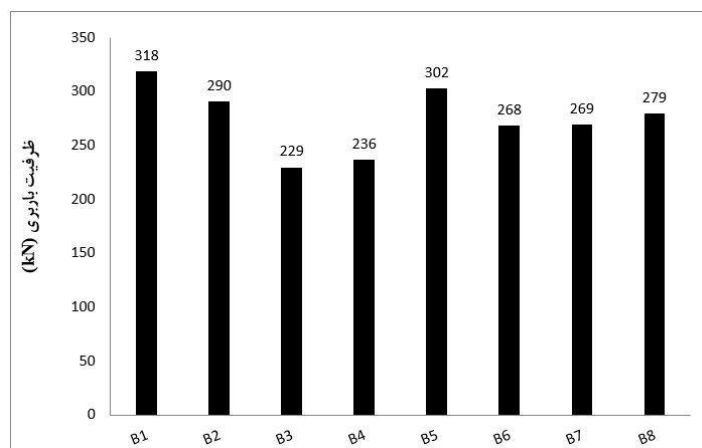
منحنی چرخه‌ای نیرو-تغییرمکان مدل‌ها در شکل ۱۴ ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج این شکل مشخص است، قاب با تیر با مقطع کاهش یافته به روش شیار طولی در بال و قاب با شیار عرضی در بال در گام نهایی بارگذاری دچار تنزل مقاومت شده‌اند. در سایر قاب‌ها تنزل مقاومت قابل ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود.



شکل ۱۴: منحنی چرخه‌ای نیرو-تغییرمکان قاب با اتصالات مختلف.

به منظور ارزیابی ظرفیت باربری قاب‌ها، بیشینه نیروی رخ داده هر منحنی چرخه‌ای در گام نهایی استخراج گردید و سپس نمودار میله‌ای ظرفیت باربری مطابق شکل ۱۵ ترسیم شد. طبق این نمودار با ایجاد تیر با مقطع کاهش یافته به روش‌های برش شعاعی در بال،

شیار طولی در بال، شیار عرضی در بال، شیار طولی در جان، شیار عمودی در جان، شیار ترکیبی در جان و شیار صلیبی در جان ظرفیت باربری قاب‌ها به ترتیب به میزان ۸/۸، ۲۷/۹، ۲۵/۸، ۵، ۱۵/۷، ۱۵/۴ و ۱۲/۲ درصد نسبت به قاب با تیر با مقطع کامل کاهش می‌یابد.

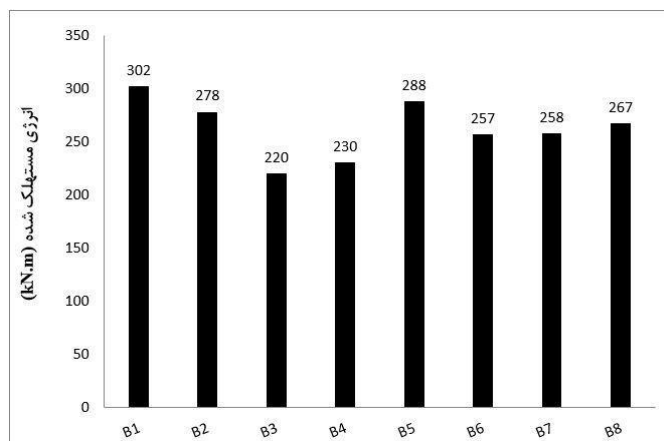


شکل ۱۵: نمودار میله‌ای ظرفیت باربری قاب با اتصالات مختلف.

همچنین، بررسی نتایج تحلیل قاب‌های با تیر با مقطع کاهش‌یافته نشان می‌دهد، قاب با تیر کاهش‌یافته به روش شیار طولی در جان بیشترین شکل‌پذیری و قاب با تیر کاهش‌یافته به روش شیار طولی در بال کمترین شکل‌پذیری را دارد. به علاوه، به لحاظ سختی نیز، اتصالات با شیار طولی یا عرضی در بال بیشترین سختی و اتصالات با شیار طولی یا عرضی در جان کمترین مقادیر را دارد.

میزان بیشینه انرژی مستهلک شده مدل‌ها در نمودار میله‌ای شکل ۱۶ ارائه شده است. بر اساس نتایج این نمودار، با ایجاد تیر با مقطع کاهش یافته به روش‌های برش شعاعی در بال، شیار طولی در بال، شیار عرضی در بال، شیار طولی در جان، شیار عمودی در جان، شیار ترکیبی در جان و شیار صلیبی در جان استهلاک انرژی قاب‌ها به ترتیب به میزان ۷/۹، ۲۷/۱، ۲۳/۸، ۴/۶، ۱۴/۹، ۱۴/۵ و ۱۱/۶ درصد نسبت به قاب با تیر با مقطع کامل کمتر می‌شود.

البته بایستی به این نکته بسیار مهم توجه شود که نتیجه فوق مطلقاً بدین معنی نیست که قاب با تیر با مقطع کامل عملکردی بهتر از عملکرد قاب‌های با تیر با مقطع کاهش‌یافته دارد. به عبارت بهتر، در تحلیل‌های منتج به شکل ۱۶، انرژی تلف شده تا انتهای چرخه‌ها محاسبه شده و لذا طبیعی است که اتصال با تیر با مقطع کامل بیشترین انرژی را مستهلک کند. در واقع، اگر یک مقدار آستانه برای اندیس شکست تعریف شده و انرژی چرخه‌ها تا رسیدن به این مقدار از پیش تعیین شده محاسبه گردد، مشاهده خواهد شد که در این حالت اندیس شکست قاب با تیر با مقطع کامل زودتر از تمام قاب‌های با تیر با مقطع کاهش‌یافته به مرز تعیین شده خواهد رسید. چرا که بیشترین اندیس شکست مربوط به همین قاب است (شکل ۱۳). به همین دلیل هم است که آیین‌نامه‌ها استفاده از تیر با مقطع کاهش‌یافته را تجویز می‌نمایند. در پژوهش حاضر و شکل ۱۶، انرژی تلف شده تا انتهای چرخه‌ها محاسبه شده تا عملکرد قاب‌های با تیر با مقطع کاهش‌یافته در کل فرآیند بارگذاری چرخه‌ای ارزیابی و با هم مقایسه شود و مقایسه نتایج آنها با نتایج قاب با تیر با مقطع کامل صرفاً با هدف مقایسه با یک شاخص کمی مناسب انجام گرفته است.



شکل ۱۶: نمودار میله‌ای انرژی مستهلک شده در قاب با اتصالات مختلف.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج و یافته‌های حاصل از این تحقیق، به طور خلاصه عبارتند از:

۱. در قاب با تیر با مقطع کامل بیش‌ترین تنش‌ها در پیچ‌ها و محل اتصال رخ می‌دهد، با ایجاد تیر با مقطع کاهش یافته تنش‌ها از ناحیه اتصال به محل مقطع کاهش یافته انتقال می‌یابد. بنابراین، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، ایجاد تیر با مقطع کاهش یافته می‌تواند سبب انتقال مفصل پلاستیک از بر ستون به فاصله مناسب در محل کاهش یافته شود.
۲. بر اساس نتایج این تحقیق، بیش‌ترین اندیس شکست به ترتیب در قاب با تیر با مقطع کامل، قاب با تیر کاهش یافته به روش شیار طولی در بال، قاب با تیر کاهش یافته به روش شیار عرضی در بال، قاب با تیر کاهش یافته به روش شیار ترکیبی در جان، قاب با تیر کاهش یافته به روش شیار صلیبی در جان، قاب با تیر کاهش یافته به روش برش شعاعی در بال و قاب با تیر کاهش یافته به روش شیار طولی در جان رخ می‌دهد. اندیس شکست بالا احتمال رخ دادن پارگی در تغییر مکان‌های نسبی پایین را افزایش می‌دهد.
۳. نتایج منحنی چرخه‌ای قاب‌های با اتصالات پیچی نشان می‌دهد قاب با تیر با مقطع کاهش یافته به روش شیار طولی در بال و قاب با شیار عرضی در بال در گام نهایی بارگذاری دچار تنزل مقاومت شده‌اند. در سایر قاب‌ها تنزل مقاومت قابل ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود.
۴. با توجه به نتایج قاب‌های با اتصالات پیچی، با ایجاد تیر با مقطع کاهش یافته به روش‌های برش شعاعی در بال، شیار طولی در بال، شیار عرضی در بال، شیار طولی در جان، شیار عمودی در جان، شیار ترکیبی در جان و شیار صلیبی در جان ظرفیت باربری قاب‌ها به ترتیب به میزان ۸/۸، ۲۷/۹، ۲۵/۸، ۵، ۱۵/۷، ۱۵/۴ و ۱۲/۲ درصد نسبت به قاب با تیر با مقطع کامل کاهش می‌یابد.
۵. به لحاظ استهلاک انرژی نیز قاب با برش شعاعی در بال تیر و قاب با شیار طولی در جان تیر نسبت به سایر قاب‌های با تیر با مقطع کاهش یافته عملکرد مناسب‌تری داشته‌اند.

در پژوهش حاضر، در مدل‌های عددی، نقص اولیه تعریف نشده است؛ با توجه به این‌که این مسئله تاثیر زیادی بر رفتار نمونه در شاخه نزولی دارد، لذا ارزیابی عملکرد قاب خمشی با اتصالات پیچی دارای تیر با مقطع کاهش یافته با در نظر گرفتن تاثیر نقص اولیه می‌تواند عنوان مناسبی برای مطالعات آتی باشد. همچنین، در تحقیق حاضر، امکان ایجاد گسیختگی در مدل‌های عددی لحاظ نشده و صرفاً ایجاد کمانش‌های ناپایدار لحاظ گردیده است. با توجه به اهمیت مدل‌های خرابی (به ویژه در اتصالات جوشی)، در نظرگیری تاثیر گسیختگی در مدل‌های عددی اتصالات، به عنوان موضوعی مناسب برای تحقیق‌های آینده، توصیه می‌گردد.

مراجع

- [1] FEMA. (2000). *Recommended seismic design provisions for new moment frame buildings report. FEMA 350*. Federal Emergency Management Agency, Washington DC, USA.
- [2] Engelhardt, M.D., Sabol, T.A., Aboutaha, R.S. and Frank, K.H. (1995). Testing connections. *Modern Steel Construction. AISC*, 35(5), 36–44.
- [3] Engelhardt, M.D. and Sabol, T.A. (1998). Reinforcing of steel moment connections with cover plates: benefits and limitations. *Eng. Struct.*, 20(4–6), 510–520.
- [4] Shen, J., Kitjasetanphun, T. and Srivanich, W. (2000). Seismic performance of steel moment frames with reduced beam sections. *Eng. Struct.*, 22(8), 968–983.
- [5] Pachoumis, D.T., et al. (2010). Cyclic performance of steel moment-resisting connections with reduced beam sections experimental analysis and finite element model simulation. *Eng. Struct.*, 32, 2683–2692.
- [6] Engelhardt, M. D., Fry, G., Jones, S., Venti, M. and Holliday, S. (2000). *Behavior and design of radius cut reduced beam section connections*. Rep. No. SAC/BD.
- [7] Chia, B., Uang, C.M. and Chen, A. (2006). Seismic rehabilitation of pre-Northridge steel moment connections: A case study. *J. Constr. Steel Res.*, 62, 783–792.
- [8] Jons, S., Fry, G.T. and Enghardt, M.D. (2002). Experimental evaluation of cyclically loaded reduced beam section connections. *J. Struct. Eng.*, 128, 448–451.
- [9] Lee, C.H., Jeon, S.W., Kim, J.H. and Uang, C.M. (2005). Effects of panel zone strength and beam web connection method on seismic performance of reduced beam section steel moment connections. *J. Struct. Eng.*, 131 (12), 1854–1865.
- [10] Deylami, A. and Moslehi-Tabar, A. (2013). Promotion of cyclic behavior of reduced beam section connections restraining beam web to local buckling. *Thin-Walled Structures*, 73, 112–120.
- [11] Saberi, V., Saberi, H., Salimikia, M. and Sadeghi, A. (2022). Investigation the cyclic behavior of rigid RBS connections with horizontal and vertical stiffeners in steel moment- resisting frame. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(4), 1273–1310. doi: 10.22060/ceej.2021.19405.7160.
- [12] Saberi, H., Saberi, V., Yazdaninejad, M. and Sadeghi, A. (2022). Investigation of cyclic behavior on types of reduced beam section moment connections in flange. *J. Struct. Constr. Eng.*, 9(4), 25–43. doi: 10.22065/jsce.2021.278416.2401.
- [13] Babaenezhad, A., Keyvani, A. and Hoveidae, N. (2017). Investigation of the behavior of connection of reduced-beam-section steel beam to reinforced concrete column. *J. Struct. Constr. Eng.*, 4, 148–166.
- [14] Zabihi Samani, M., Abed Ebrahimi, M.H. and Tarighi, P. (2019). Evaluation of slit steel damper & reduced beam section connections under cyclic loading. *J. Struct. Constr. Eng.*, 6, 209–222.
- [15] Zarfam, P., Javadi, P. and Safarizad, B. (2022). Laboratory study of RBS connection using box-shaped replaceable link at the joint formation site. *J. Struct. Constr. Eng.*, 9, 95–113.
- [16] GanjiMorad, S., Oghabi, M. and TahamouliRoudsari, M. (2023). Investigation of rigid saddle connection type II with reduced beam sections and web stiffeners by experimental method. *J. Struct. Constr. Eng.*, DOI: 10.22065/JSCE.2023.394209.3100.
- [17] Haghghat, S., Saberi, H., Saberi, V. and Sadeghi, A. (2022). Numerical investigation of steel moment-resisting frame with RBS connections under fire conditions. *J. Civil Eng. Mater. Appl.*, 6(4), 229–246. doi: 10.22034/jcema.2023.384975.1103.
- [18] Hedayat, A.A. and Celikag, M. (2009). Post-Northridge connection with modified beam end configuration to enhance strength and ductility. *J. Constr. Steel Res.*, 65(7), 1413–1430.
- [19] Prasada Rao, D.V. and Satish Kumar S.R. (2006). RHS beam-to-column connection with web opening-parametric study and design guidelines. *J. Constr. Steel Res.*, 62, 747–756.
- [20] Zhang, X. and Ricles, J.M. (2006). Experimental evaluation of reduced beam section connections to deep columns. *J. Struct. Eng.*, 132(3), 346–357.

- [21] Konstantinos, D.T. and Theodore, P. (2016). A FE parametric study of RWS beam-to-column bolted connections with cellular beams. *J. Constr. Steel Res.*, 116, 92–113.
- [22] Shin, M., Kim, S.P., Halterman, A. and Aschheim, M. (2017). Seismic toughness and failure mechanisms of reduced web-section beams: Phase 1 tests. *J. Eng. Struct.*, 141, 198–216.
- [23] Boushehri, K., Tsavdaridis, K.D. and Cai, G. (2019). Seismic behaviour of RWS moment connections to deep columns with European sections. *J. Constr. Steel Res.*, 161, 416–435.
- [24] Yan, D.D., Zhou, B.L., Guo, X., Lai, F., Wei, X., Xu, Y. P. and Jahanian, M. (2021). Investigation of behavior of interior steel connections with openings in beam web and flange under monotonic loading. *Adv. Steel Constr.*, 17, 340-348.
- [25] Nazaralizadeh, H., Ronagh, H., Memarzadeh, P. and Behnamfar, F. (2022). A practical design approach to bolted end-plate vertical-slits RWS connection. *Bull. Earthq. Eng.*, 2022, 1-40.
- [26] Tsavdaridis, K.D., Lau, C.K. and Alonso-Rodriguez, A. (2021). Experimental behaviour of non-seismical RWS connections with perforated beams under cyclic actions. *J. Constr. Steel Res.*, 183, 106756.
- [27] Almutairi, F.F., Tsavdaridis, K.D., Alonso-Rodriguez, A., Asteris, P.G. and Lemonis, M.E. (2023). Hysteretic behaviour of composite reduced web section (RWS) connections for seismic applications. *J. Earthq. Eng.*, 2023, 1-36.
- [28] Chang, H.Y., Liao, C.T., Kang, S.Y., Ho, S.Y. and Lai, C.M. (2023). Seismic performance of RWS moment connections to steel box-columns and H-beams with general sections. *J. Constr. Steel Res.*, 201, 107691.
- [29] Yu, H. and Li, W. (2021). Comparison of steel frames with RWS and WFP beam-to-column connections through seismic fragility analysis. *Adv. Struct. Eng.*, 24, 1583-1598.
- [30] Tahamouli Roudsari, M., Jamshidi, K.H. and Zangeneh, M.M. (2018). Experimental and numerical investigation of IPE reduced beam sections with diagonal web stiffeners. *J. Earthq. Eng.*, 22, 533-552.
- [31] Davarpanah, M., Ronagh, H., Memarzadeh, P. and Behnamfar, F. (2020). Cyclic behaviour of elliptical-shaped reduced web section connection. *J. Struct. Des.*, 24, 955–973.
- [32] Davarpanah, M., Ronagh, H., Memarzadeh, P. and Behnamfar, F. (2020). Cyclic behavior of welded elliptical-shaped RWS moment frame. *J. Constr. Steel Res.*, 175, 106319.
- [33] ANSI/AISC 358-16. (2016). *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*, vol. 358–16, American Institute of Steel Construction, Chicago, USA.
- [34] Nazaralizadeh, H., Ronagh, H., Memarzadeh, P. and Behnamfar, F. (2020). Cyclic performance of bolted end-plate RWS connection with vertical-slits. *J. Constr. Steel Res.*, 173, 106236.
- [35] Venture, S.J. (1997). *Protocol for Fabrication, Inspection, Testing, and Documentation of Beam-Column Connection Tests and Other Experimental Specimens*, Rep. No. SAC/ BD-97 2.