

بررسی اثر نیروی محوری ستون بر رفتار خمشی اتصال پیش‌ساخته‌ی فولادی دارای ورق‌های میان‌گذر در چشمه‌ی اتصال تحت بارگذاری یکنوا

هادی عسکریان^۱، محمدرضا سهرابی^{۲*}، سید مرتضی کاظمی^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد کاشمر، دانشگاه آزاد اسلامی، کاشمر

* زاهدان، صندوق پستی ۹۸۱۶۷-۵۸۴۵، Sohrabi@hamoon.usb.ac.ir

چکیده

در قاب‌های خمشی فولادی، اتصال تیر به ستون تحت هر زاویه و به هر تعداد همچنان با دشواری‌های زیادی روبه‌رو است. در این پژوهش، به عنوان یک نوآوری، یک اتصال خمشی فولادی پیش‌ساخته با ورق‌های میان‌گذر در چشمه‌ی اتصال که توانایی اتصال تیر به ستون به صورت خمشی تحت هر زاویه‌ی و تعداد دلخواه را دارا است پیشنهاد شده است. سپس، اثر نیروی محوری وارد بر ستون بر روی رفتار این اتصال تحت بارگذاری یکنوا در دو حالت چشمه‌ی اتصال با چهار و شش ورق میان‌گذر، به عنوان هدف این پژوهش، مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار، نخست به منظور راستی‌آزمایی روند مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS، یک اتصال پیش‌ساخته‌ی فولادی که مشابهت خوبی با اتصال پیشنهادی دارد و نتایج آزمایشگاهی آن نیز موجود است، در نرم‌افزار ABAQUS مدل شده و نتایج آزمایشگاهی و عددی با یکدیگر مقایسه شدند. پس از راستی‌آزمایی، رفتار اتصال در حالت‌هایی که نیروی محوری وارد بر ستون اصلی (ستون متصل به ستون کوتاه) برابر با ۱۰ تا ۶۰ درصد ظرفیت آن باشد با گام‌های ۱۰ درصدی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی نمونه‌ها، مفصل پلاستیک در خارج از اتصال و پس از ورق‌های بالاسری و زیرسری اتصال روی می‌دهد. همچنین، ستون کوتاه که به عنوان چشمه اتصال عمل می‌نماید در هیچ نمونه‌ای تسلیم نشده و دارای عملکرد مناسبی است. افزون بر این، با افزایش نیروی محوری تا حدود ۲۰ درصد ظرفیت ستون، در تمامی نمونه‌ها تغییری در سختی اولیه‌ی اتصال ایجاد نمی‌شود.

واژگان کلیدی

اتصال پیش‌ساخته‌ی فولادی، چشمه‌ی اتصال با ورق‌های میان‌گذر، بارگذاری یکنوا، ABAQUS

Investigating the effect of column axial force on the flexural behavior of prefabricated steel moment connection with through-plate panel zone system under monotonic loading

H. Askarian, M.R. Sohrabi, S.M. Kazemi

Abstract

In steel moment frames, there are still many challenges in connecting a beam to a column at any angle and in any number. In this study, as the innovation of the research, a prefabricated steel moment connection with through-plate panel zone system was proposed, which can connect a beam to a column as a moment connection at any desired angle with any number of beams. Then, the effect of column axial force on the behavior of this connection was investigated as the main objective of the study, under monotonic loading in two cases of connection zone with four and six through plates. To verify the modeling procedure in ABAQUS, a prefabricated steel connection with available experimental results with good similarity to the proposed connection was modeled using ABAQUS and the experimental and numerical results were then compared. Afterward, the connection behavior in cases where the axial force on the column is equal to 10 to 60 percent of its axial capacity was evaluated with 10 percent iterations. The results indicated that in all models, the plastic hinge formed outside the connection area and beyond the top and bottom plates. Furthermore, the short column that acts as a connection zone did not yield in any models and had acceptable performance. It was also observed that by increasing the axial force up to 20 percent of the column axial capacity, the initial connection stiffness doesn't change.

Keywords

Prefabricated steel connection, Through-plate panel zone system, Monotonic loading, ABAQUS

سرم‌بندی اتصال و ماژول‌بندی قاب فولادی از نظر اجرایی ساده‌تر صورت گرفته و از جوش کارگاهی تا حد امکان پرهیز گردد. با همهی این تلاش‌ها، از آنجایی که به دلایل اقتصادی و اجرایی، در ساختار عمده‌ی سازه‌ها همواره چهار تیر به یک ستون وصل می‌شود، هیچ‌گونه اتصال مدولار پیش‌ساخته‌ی خمشی فولادی که توانایی نصب بیش از چهار تیر را در چشمه‌ی اتصال خود داشته باشد تاکنون پیشنهاد نشده است. کاربرد این اتصال زمانی پررنگ می‌شود که در سازه به دلایل مختلفی همچون محدودیت‌های معماری، نیاز باشد تا بیش از ۴ تیر به یک ستون متصل گردد. اتصال پیشنهادی این پژوهش این امکان را فراهم کرده است. در ادامه، شماری چند از پژوهش‌های نزدیک به پژوهش کنونی آورده شده است.

Yang و همکارانش رفتار لرزه‌ای اتصال ConXL را تحت خمش دوماحوره مورد مطالعه قرار داده و از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS جهت مدل‌سازی استفاده کردند [۴]. نتایج آن‌ها نشان داد که رفتار لرزه‌ای این اتصال بر اساس آیین‌نامه‌ی AISC341 قابل‌قبول بوده و چشمه‌ی اتصال تسلیم نمی‌شود. همچنین، Rezaeian و همکارانش رفتار لرزه‌ای اتصال ConXL را در حالتی که ستون فولادی از بتن پر نشده مورد مطالعه قرار دادند [۵]. در این پژوهش، مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام شد. نتایج نشان داد که اتصال با تیر معمولی قادر به تحمل ۰/۰۴ رادیان دوران است و ستون دچار کماتش موضعی نمی‌گردد. شکل (۱) نمایی از اتصال ConXL را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از اتصال ConXL

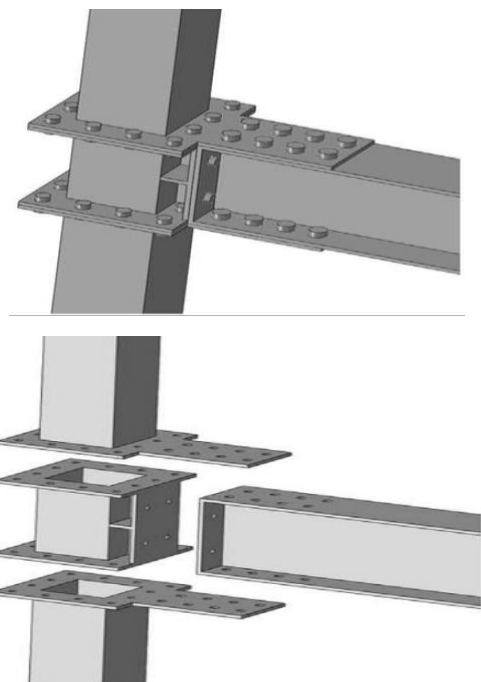
نوع جدیدی از اتصالات فولادی با الهام از ایده‌ی اتصالات بتنی پیش‌ساخته‌ی پس‌کشیده، توسط Ricles و همکارانش در سال ۲۰۰۱ معرفی شد. در اتصال پیشنهادی آن‌ها، از کابل برای ایجاد مقاومت خمشی، برشی و نیروی بازگرداننده و از نبشی

عوامل مختلفی بر تعیین پیکره‌بندی و طرح کالبد یک سازه اثر می‌گذارند که به مواردی پلان داخلی، روش اجرا، نوع مواد، معماری و شکل خارجی ساختمان، نوع و مقدار بارهای خارجی و ارتفاع ساختمان اشاره نمود [۱]. یکی از ساختارهایی که پیکره‌ی یک سازه را شکل می‌دهد، بارهای ثقلی و جانبی را تحمل می‌کند و امروزه بسیار مورد توجه طراحان قرار گرفته، قاب‌های خمشی فولادی است. در این فرم سازه‌ای، لنگر خمشی انتهای تیر به‌صورت کامل به ستون منتقل شده و زاویه چرخش بین تیر و ستون در محل اتصال، ثابت باقی می‌ماند. در این قاب‌ها، ستون‌ها به‌صورت تیر-ستون عمل می‌نمایند.

تیر-ستون‌ها اعضایی هستند که همزمان تحت نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی قرار دارند. با توجه به اینکه معمولاً تحلیل بر اساس شکل اولیه‌ی سازه صورت می‌پذیرد، جهت طراحی این اعضا باید نتایج حاصل از تحلیل به دلیل نیروهای فشاری اصلاح گردد. بنابراین، طراحی این اعضا به دو صورت تحلیل مرتبه‌ی اول و دوم انجام می‌شود. در تحلیل مرتبه‌ی اول، محاسبه‌ی تلاش‌ها در کلیه‌ی نقاط بر اساس وضعیت اولیه و تغییرشکل نیافته‌ی سازه صورت می‌گیرد. در این روش، آثار مرتبه‌ی دوم تحلیل مانند لنگرهای خمشی در اثر اعمال نیروهای محوری فشاری و خروج از مرکزیت بارهای محوری اثری بر روند تحلیل ندارند. با این همه، در تحلیل مرتبه‌ی دوم، تلاش‌های داخلی اعضا بر اساس وضعیت تغییرشکل‌یافته‌ی آن‌ها تعیین می‌گردد. پژوهشگران برای سال‌ها است می‌کوشند روش‌های طراحی و تحلیل الاستیک کنونی را به‌منظور مدل‌سازی پدیده‌هایی که بر پایداری عضو و سیستم به طور مستقیم در چارچوب تحلیل مرتبه دوم الاستیک اثر می‌گذارند، بهبود دهند. برای همین، روش‌هایی پیشنهاد شده است که با در نظر گرفتن عواملی مانند نواقص هندسی اولیه و لنگرهای خمشی در اثر اعمال نیروهای محوری در یک تحلیل مرتبه‌ی دوم، بدون نیاز به ضرایب طول موثر، پاسخ‌های دقیق‌تری فراهم شود [۲ و ۳].

پس از زمین‌لرزه‌ی نورث‌ریچ، اتصالات خمشی فولادی مختلفی توسط نهادها، مراکز پژوهشی و پژوهشگران مختلف پیشنهاد شد که معروف‌ترین این اتصالات را می‌توان اتصالات از پیش‌تأیید شده نامید که جای خود را در آیین‌نامه‌های مختلف باز کردند. در کنار این موضوع، برای دهه‌ها است که اتصالات نوآورانه و نوپدید توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است. در دسته‌ای از این اتصالات تلاش شده است تا نحوه‌ی

پیشنهادی خود پرداختند. در پژوهش نخست، رفتار لرزه‌ای این اتصال ارزیابی گردید [۱۸]. در پژوهش دوم اثر استفاده از یک قطعه به شکل هرم بر روی ورق انتهایی ستون اتصال جهت سهولت نصب بررسی شد [۱۹]. در سال ۲۰۱۹، این پژوهشگران بر مطالعه‌ی اثر پارامترهایی مختلف بر روی رفتار اتصال با مقاطع مختلف برای تیرها تمرکز کردند [۲۰] و در پژوهش چهارم به ارائه‌ی روابط ریاضی جهت طراحی اجزا اتصال پرداختند [۲۱]. در نوآوری دیگر، رفتار یک اتصال فولادی با ورق‌های میان‌گذر و ستون‌های قوطی شکل توسط **Torabian** و همکارانش بررسی شد. در این اتصال، جهت اجرای ورق‌های میان‌گذر بایستی نخست دو ضلع از ستون‌های قوطی شکل به صورت **L** شکل به یکدیگر جوش داده شوند. سپس، ورق‌های میان‌گذر در محل خود قرار داده شده و سایر اضلاع مربوط به ستون جوشکاری و نصب گردد که اجرای اتصال را تا حدودی با دشواری‌هایی روبه‌رو می‌کند [۲۲].



شکل ۲- نمایی از اتصال پیش‌ساخته‌ی مدولار **Liu** و همکارانش [۱۷]

در این پژوهش، اتصال مورد بررسی ترکیبی از اتصال ارائه شده توسط **لئو** و همکاران و **ترابیان** و همکاران است. در این اتصال، دو کاستی موجود در قاب‌های خمشی فولادی که نبود امکان اتصال تیر به ستون با هر زاویه‌ی دلخواه همچنین اتصال هر تعداد تیر به صورت صلب به ستون قوطی شکل است برطرف شده، که این را می‌توان از نوآوری‌های اتصال پیشنهادی دانست.

برای افزایش ظرفیت اتلاف انرژی و کنترل تغییرشکل پلاستیک در اعضای اصلی استفاده شد [۶]. پس از آن، پژوهشگرانی همچون **Christopoulos** و همکارانش [۷] **Rojas** و همکارانش [۸] و **Kim** و **Christopoulos** [۹] مطالعاتی را بر روی این اتصال انجام داده‌اند.

یکی دیگر از اتصالات جدیدی که پس از زلزله‌ی نورث‌ریچ جهت برطرف کردن مشکلات اتصالات خمشی رایج آن زمان مطرح شد، اتصال گیردار با صفحات کناری است. این اتصال در ابتدا توسط **سابل** و **انگلهارت** به صورت چهار ورق کناری مجزا در تراز بال بالایی و پایینی تیر ارائه شد [۱۰]. همچنین، پس از این زلزله، پژوهش‌های وسیعی جهت دور کردن مقطع بحرانی از سطح مشترک تیر و ستون انجام شد [۱۱]. در این راستا، اقداماتی همچون استفاده از سیستم‌های جداگر پایه یا وسایل الحاقی میراگر و تغییر در پیکربندی اتصال پیشنهاد شد. مورد دوم به دو صورت تقویت کردن اتصال یا ضعیف کردن تیر انجام می‌پذیرد. بر این اساس، روش‌های تقویت‌سازی اتصال همچون استفاده از ورق روسری^۱ [۱۰]، ورق لچکی^۲ [۱۲] یا صاف، پشت‌بندقائم^۳ [۱۳]، پشت‌بند طولی^۴ [۱۴] و ورق‌های کناری ارائه گردید.

در این میان، یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در زمینه‌ی افزایش بهره‌وری در صنعت ساختمان اثرگذار است، امکان استفاده از روش‌های نوین ساخت‌وساز است. اتصال پیش‌ساخته‌ی مدولار فولادی که توسط **Liu** و همکارانش پیشنهاد و مورد بررسی قرار گرفت یکی از تحولات صورت گرفته در زمینه‌ی صنعتی‌سازی سازه‌ها و اتصالات جدید خمشی فولادی است. در این اتصال، از یک ستون کوتاه در محل اتصال ستون‌های طبقات استفاده شده است. جهت اتصال ستون کوتاه به ستون‌های طبقات از ورق‌هایی در آغاز و انتهای ستون‌های طبقات و ستون کوتاه استفاده می‌شود (شکل (۲)). **Liu** و همکارانش در پژوهش نخست خود به بررسی مدل جوشی و در پژوهش دوم به بررسی مدل پیچی این اتصال با تمرکز بر پارامترهایی از جمله اندازه‌ی مقطع نبشی‌های استفاده شده در تیرها، نحوه‌ی اتصال تیر به ستون کوتاه و مشخصات ورق‌ها و پیچ‌های اتصال تحت بارگذاری یکنوا پرداختند [۱۵ و ۱۶]. در مطالعه‌ی سال ۲۰۱۷ این پژوهشگران بر روی این اتصال نیز رفتار لرزه‌ای این اتصال به صورت آزمایشگاهی و عددی تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۷].

همچنین، **Kazemi** و همکارانش در چهار پژوهش متمایز به بررسی همه‌جانبه‌ی اتصال پیش‌ساخته‌ی مدولار فولادی

همکارانش در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده و پس از مقایسه‌ی نتایج نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی به‌منظور راستی-آزمایی، اثر بار محوری بر رفتار اتصال در دو حالت بر روی نمونه‌ی اتصال چهار تیر و نمونه‌ی اتصال شش تیر به ستون قوطی‌شکل تحت بارگذاری یکنوا بررسی می‌شود [۱۷]. بدین منظور، نمونه‌هایی با ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ ظرفیت ستون تحت بار محوری مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

۲- راستی‌آزمایی

به‌منظور بررسی درستی روند مدل‌سازی صورت گرفته، نمونه‌ی آزمایشگاهی SJ-1 اتصال لئو و همکاران با شرایط مرزی، خواص مصالح و نحوه‌ی بارگذاری کاملاً یکسان در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی گردید [۱۷]. به دلیل تشابه زیاد مدل پژوهش Liu و همکارانش و مدل توسعه‌ی یافته‌ی پژوهش کنونی، جزئیات بیشتری از مدل‌سازی در بخش ۳ آورده شد و برای توضیحات بیشتر می‌توان به پژوهش Liu و همکارانش رجوع کرد. با این همه، به‌طور کلی، ستون اتصال از مقطع قوطی مربعی ۲۰۰×۱۲ به طول ۳۱۵۰ میلی‌متر از فولاد Q345B و تیر از مقطع بال‌پهن ۳۰۰×۲۰۰×۸×۱۲ از فولاد Q235B ساخته شده است. مصالح بقیه‌ی بخش‌های اتصال نیز از رده‌ی فولاد Q235B بود و قاعده‌ی ستون قوی - تیر ضعیف کنترل شد. پیچ‌های استفاده شده در صفحه‌ی انتهایی و بال ستون کوتاه از نوع M14 با نیروی پیش‌تندگی ۷۶ کیلونیوتن و پیچ‌های استفاده شده در بخش توسعه یافته‌ی ورق روسری و زیرسری از نوع M20 با نیروی پیش‌تندگی ۱۵۵ کیلونیوتن بود. بار محوری به میزان ۰/۱۹ نسبت فشاری محوری ستون به آن برای شبیه‌سازی بارهای طبقات بالایی اعمال گردید [۱۷]. شکل (۴) نمایی از جزئیات هندسی اتصال پژوهش لیو و همکاران را نشان می‌دهد. شکل (۵) منحنی بار- تغییر مکان این اتصال را در دو حالت آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین نتایج مدل آزمایشگاهی و عددی وجود دارد به‌طوری‌که اختلاف تغییر مکان در انتهای بارگذاری در دو حالت کمتر از ۲ درصد است. با توجه به راستی‌آزمایی صورت گرفته، در ادامه، اتصال پیشنهادی در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- ساخت مدل توسعه یافته

مشخصات نمونه‌های مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ABAQUS شامل نوع مصالح، نوع بارگذاری، مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS و ابعاد و اجزا اتصال در ادامه آورده شده است.

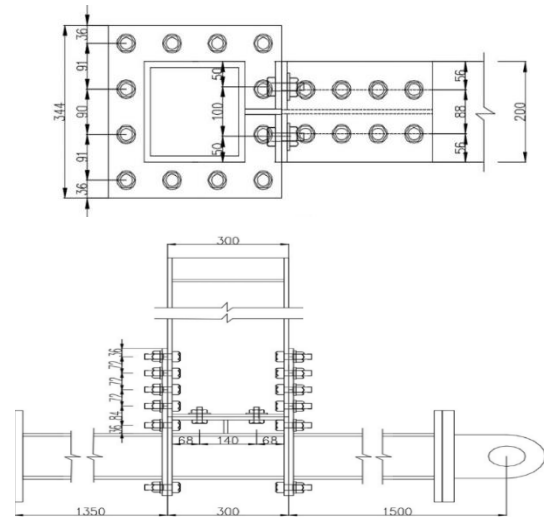
این اتصال شامل یک ستون کوتاه میان ستون‌های طبقات است که با توجه به تعداد تیرهای متصل به ستون به شکل چهار، پنج یا شش ضلعی است. همچنین، با توجه به تعداد تیرهای متصل به ستون، ورق‌های میان‌گذر در داخل ستون کوتاه قرار گرفته است که اتصال جان تیر به ستون کوتاه توسط این ورق‌ها صورت می‌گیرد. اتصال تیر به ستون با استفاده از ورق‌های بالا و پایین و جهت انتقال نیروی برشی به ستون، از ورق برشی جان استفاده شده است. شکل (۳) اجزای این اتصال را برای حالت اتصال شش تیر به ستون قوطی به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد. شایان ذکر است که نمونه‌ی آزمایشگاهی مدل اتصال پژوهش کنونی ساخته شده است که در شکل (۳) دیده می‌شود. تجربه‌ی ساخت آن نشان داد که اجرای چنین اتصالاتی چندان دشوار نیست. Askarian و همکارانش در پژوهشی به بررسی رفتار این اتصال تحت بارگذاری تناوبی و یکنوا پرداختند و نتایج حاصل بیانگر عملکرد مناسب این اتصال است [۲۳]. تفاوت اصلی میان پژوهش گذشته‌ی عسکریان و همکاران و پژوهش کنونی بر روی این اتصال در اعمال بار محوری به ستون است. بر این اساس، بحث ناکاملی اولیه در مدل‌سازی درگیر شده و اثر آن بر رفتار خمشی اتصال به دست آمده است.



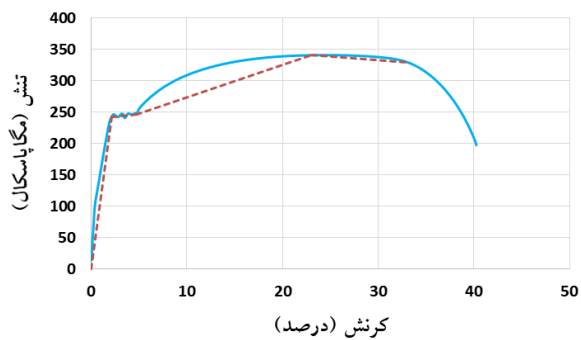
شکل ۳- ماکت اجزا اتصال برای حالت اتصال شش تیر به ستون قوطی در این پژوهش، نخست، نمونه‌ی آزمایشگاهی اتصال Liu و

جدول ۱- مشخصات مربوط به مصالح مصرفی در اتصال

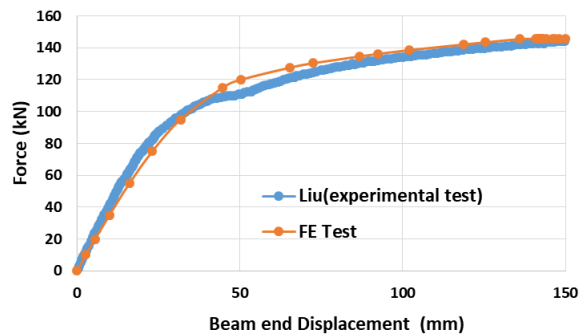
| مصلح | مقطع | تنش تسلیم (MPa) | کرنش |
|------|---------------------------|-----------------|---------|
| St37 | تیر، ستون و ورق‌های اتصال | ۲۴۲ | ۰/۰۲ |
| | | ۲۴۶ | ۰/۰۴۷ |
| | | ۳۴۱ | ۰/۲۳ |
| A490 | پیچ‌ها | ۷۹۴ | ۰/۰۰۳۸۶ |
| | | ۱۰۳۵ | ۰/۰۱۳۵ |
| | | ۱۰۳۵ | ۰/۰۳۰۹ |
| | | ۱۰۴۸ | ۰/۲ |



شکل ۴- نمایی از جزئیات هندسی اتصال پژوهش Liu و همکارانش [۱۷]

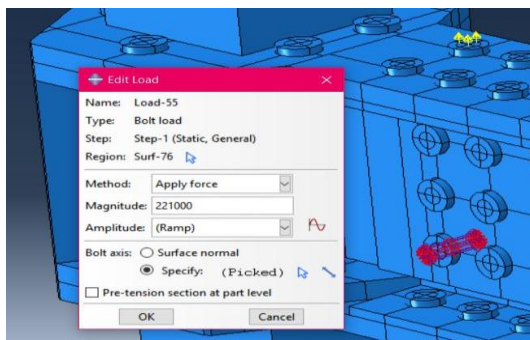


شکل ۶- نمودار تنش - کرنش فولاد رده‌ی St37



شکل ۵- مقایسه‌ی منحنی بار- تغییر مکان اتصال Liu و همکاران با مدل اجزای محدود پژوهش کنونی برای راستی‌آزمایی مدل‌سازی

جان پیچ‌ها اعمال گردید. مدل‌سازی و تحلیل اتصال درست همانند آن چه که در واقعیت صورت می‌گیرد برای تمام مدل‌ها به صورت پیش‌تینده بررسی شد. شکل (۷) نحوه‌ی اعمال پیش-تیندگی پیچ‌ها در نرم‌افزار ABAQUS را نشان می‌دهد. در این مدل‌سازی، از سه نوع پیچ M14، M16، و M20 به ترتیب در جان تیر، بال ستون کوتاه و بخش توسعه یافته‌ی ورق روسری و زیرسری استفاده شد. نیروی پیش‌تیندگی پیچ‌های M14، M16 و M20 به ترتیب ۲۲۱، ۲۵۷ و ۳۳۴ کیلو نیوتن بود.



شکل ۷- نحوه‌ی اعمال پیش‌تیندگی پیچ‌ها در نرم‌افزار ABAQUS

۱-۳- نوع مصالح

در این اتصال، از دو نوع مصالح استفاده شده است که کلیه‌ی مقاطع شامل تیر، ستون‌ها، ورق‌های اتصال و ستون کوتاه از نوع فولاد St37 و تمامی پیچ‌ها از نوع پرمقاومت A490 است که مشخصات مربوط به آن‌ها در جدول (۱) قابل مشاهده است [۲۵]. شکل (۶) نیز نمودار تنش - کرنش فولاد رده‌ی St37 به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

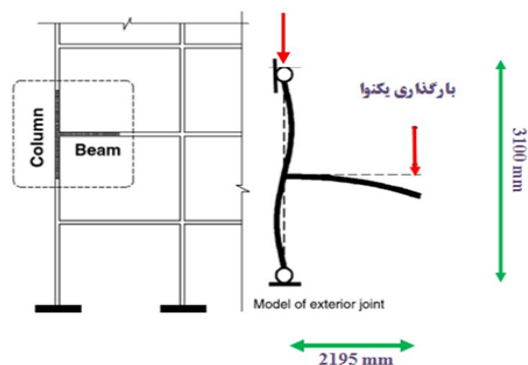
۲-۳- بارگذاری

بارگذاری انجام شده در نمونه‌ها شامل دو مرحله است. در مرحله‌ی نخست، با توجه به نوع و اندازه‌ی پیچ‌ها، نیروی پیش‌تیندگی به پیچ‌ها اعمال شد [۲۶]. مقدار این نیرو از رابطه‌ی $0.55f_u A_{bolt}$ ذکر شده در مبحث دهم محاسبه شد. در این جا، f_u مقاومت نهایی پیچ و A_{bolt} مساحت جان پیچ است. نیروی پیش‌تیندگی در نرم‌افزار ABAQUS به صورت بار پیچ^۰ به میانه‌ی

انتگرال‌گیری عددی، اثر مستقیمی بر دقت جواب‌های ایجاد شده در یک تحلیل دارد. عبارت انتگرال‌گیری کامل به تعداد نقاط گاوس مورد نیاز برای انتگرال‌گیری چندجمله‌ای‌های موجود در ماتریس سختی یک المان با گوشه‌های راست بازمی‌گردد. المان‌های خطی انتگرال‌گیری کامل از دو نقطه‌ی انتگرال‌گیری در هر جهت و المان‌های مرتبه‌ی دو از سه نقطه‌ی انتگرال‌گیری در هر جهت بهره می‌برند. این المان‌ها در کاربردهای خمشی و تحلیل مودال، سختی بیشتری از خود نشان می‌دهند که منجر به مشکلاتی در حل عددی می‌شود. این مشکل با نام قفل‌شدگی برشی شناخته شده و برای رفع این مشکل باید از المان با نقاط انتگرال‌گیری کاهش‌یافته استفاده نمود. المان‌های کاهش یافته به شکل گسترده‌ای در نرم‌افزارهای اجزای محدود به کار گرفته شده‌اند. المان‌های مرتبه‌ی اول مکعبی از یک نقطه‌ی انتگرال‌گیری و المان‌های مرتبه‌ی دوم مکعبی تنها از ۸ نقطه‌ی انتگرال‌گیری بهره می‌برند در حالی که در حالت انتگرال‌گیری کامل این اعداد به ترتیب ۸ و ۲۷ خواهد بود [۲۷ و ۲۸].

در این پژوهش، برای مدل‌سازی قطعات و پیچ‌ها از المان هشت‌گره‌ای مکعبی سه‌بعدی دارای رابطه‌بندی کاهش‌یافته^۶ استفاده شده است که پدیده‌ی ساعت‌شنی را کنترل می‌کند. همچنین، قطعات به صورت جداگانه ترسیم و سپس در موارد مورد نیاز با استفاده از تماس نوع Tie به یکدیگر متصل شده‌اند. تماس بین پیچ‌ها و جداری صفحات به صورت General contact و از نوع Penalty با ضریب اصطکاک ۰/۳۵ در نظر گرفته شده است. به دلیل سنگینی مدل و پیچیدگی مش‌بندی در نقاطی که احتمال بیشترین ایجاد تنش و بهم‌ریختگی مش‌ها^۷ پیش‌بینی می‌شد، به‌ویژه در نواحی حفره‌ها و پیچ‌ها، مقدار مش به کمک روش‌های موجود در نرم‌افزار ABAQUS ریزتر انتخاب شد و در نواحی دیگر اندازه‌ی مش‌بندی بزرگتر اختصاص یافت تا حجم محاسبات و زمان حل کاهش یافته و سرعت همگرایی پاسخ‌ها افزایش یابد. با توجه به هندسه‌ی پیچیده‌ی مدل، روشن است که آزادی عمل چندانی در انتخاب اندازه‌ی مش وجود ندارد و از این روی تحلیل حساسیتی بر روی مش نمی‌تواند انجام گیرد. بر این اساس، اندازه‌ی مش‌ها به گونه‌ای انتخاب شد که از بهم‌ریختگی المان‌ها جلوگیری شود. همچنین، اندازه‌ی مش‌ها به میزانی زیاد نشود که سبب کاهش سرعت همگرایی و افزایش زمان حل گردد. شایان ذکر است که مدل‌ها توسط رایانه با مشخصات Intel (R)Core (TM)i7-7700K CPU@4.20GHz و ۶۴ بیتی با رم ۱۶ گیگ مورد پردازش قرار گرفت. اندازه‌ی مش‌ها پس از بررسی چندین نمونه به صورتی انتخاب شد که

هم‌زمان با پیش‌تنیده کردن پیچ‌ها، نیروی محوری به ستون نیز وارد می‌گردد. نیروی وارد شده به ستون بر اساس درصدی از ظرفیت ستون ($Ag \times F_y$) است. در مرحله‌ی دوم، پس از اتمام پیش‌تنیده نمودن پیچ‌ها و اعمال بار محوری بر ستون، به انتهای تیر یک نیروی متمرکز وارد می‌شود. مقدار بار وارده به انتهای تیر به گونه‌ای در نظر گرفته شده که لنگر وارده بر اتصال حدوداً ۲۰ درصد بیشتر از لنگر طراحی ($1.1R_y M_p$) مربوط به حالت شکل‌پذیری معمولی قاب باشد. (در این رابطه، M_p لنگر پلاستیک تیر و R_y نسبت تنش تسلیم مورد انتظار به حداقل تنش تسلیم مصالح تیر و برابر با ۱/۲ است). ضریب R_y در محاسبات برابر با ۱/۲ انتخاب شد زیرا مقاطع از ورق ساخته شده بودند. در مورد ضریب C_{pr} نیز علت انتخاب ۱/۱ به جای ۱/۲ این بود که مقدار بار وارده در مدل‌سازی به گونه‌ای تعیین شد که لنگر اتصال حدوداً ۲۰ درصد بیشتر از لنگر طراحی $1.1R_y M_p$ مربوط به حالت شکل‌پذیری قاب باشد. چنانچه قبل از رسیدن بار به این مقدار بخشی از اتصال دچار گسیختگی شود، بارگذاری متوقف می‌گردد [۲۱]. از آنجایی که حجم خروجی‌های پژوهش بسیار گسترده بود و تحلیل مدل‌ها به دلیل سنگینی حجم محاسبات آن‌ها زمان زیادی برده است، ارزیابی رفتار اتصال پژوهش کنونی تنها برای بارگذاری یکنوا انجام گرفت و انجام بارگذاری چرخه‌ای به همراه بار محوری به‌عنوان ایده‌ای به‌منظور بررسی رفتار خمشی این اتصال در پژوهش‌های آینده دنبال خواهد شد. شکل (۸) نحوه‌ی اعمال بار، طول تیر و ستون مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۸- نحوه‌ی اعمال بار و طول تیر و ستون

۳-۳- انتخاب مش و مدل‌سازی

هر گروه از المان‌های موجود در ABAQUS از یک رابطه‌بندی ویژه‌ای برخوردار اند و حل اجزای محدود را بر اساس آن انجام می‌دهند. مرتبه‌ی المان (خطی یا مرتبه‌ی دو) و نحوه‌ی

پژوهش‌های آینده واگذاشته شد.

۴- بررسی نتایج

۴-۱- بررسی نتایج اتصال با چهار ورق میان‌گذر

مشخصات مربوط به منحنی‌ها و کانتورهای تنش‌های فون میسز برای اتصال با چهار ورق میان‌گذر ارائه شده است. شایان ذکر است از آنجایی که نرم‌افزار ABAQUS یکا ندارد، خروجی نرم‌افزار بر اساس یکایی است که در آغاز برای مدل‌سازی انتخاب می‌شود. این یکا برای ابعاد هندسی مدل بر حسب میلی‌متر و برای نیروها بر حسب نیوتن انتخاب شد که بر این اساس، کانتورهای تنش بر حسب مگاپاسکال هستند. شکل (۹) تا شکل (۲۰) منحنی بار - تغییر مکان، لنگر - دوران و کانتورهای تنش نمونه‌های اتصال با چهار ورق میان‌گذر را نشان می‌دهد.

منحنی‌های بار - تغییر مکان و جدول (۴) نشان می‌دهند که، با افزایش مقدار نیروی وارده بر ستون تا حدود ۴۰ درصد، تغییر چشمگیری در سختی اولیه و تغییر مکان لحظه‌ی جاری شدن و مقاومت اتصال مشاهده نمی‌شود در صورتی که پس از آن، به دلیل افزایش نیروی وارده و افزایش تنش‌ها در ستون، سختی اتصال کاهش پیدا می‌نماید به طوری که در نمونه‌های S6C4P50 و S7C4P60، اتصال قادر به تحمل نیروی ۱۵۰ کیلونیوتن نیست. همچنین، با افزایش نیروی محوری وارد بر ستون حتی به میزان ۲۰ درصد ظرفیت آن، تغییر مکان انتهای تیر در پایان بارگذاری افزایش می‌یابد. همان‌طور که در منحنی‌های لنگر - دوران مشاهده می‌شود، تمامی نمونه‌ها قادر به تحمل لنگر پلاستیک تیر بوده بدون آنکه گسیختگی در عضو ایجاد شود یا منحنی لنگر - دوران دچار افت گردد. در نمونه‌هایی که نیروی محوری وارد بر ستون بیشتر از ۵۰ درصد ظرفیت آن است به دلیل جاری شدن ستون، حداکثر لنگر قابل تحمل اتصال کاهش می‌یابد. با توجه به کانتورهای تنش فون میسز مشاهده می‌شود که در تمامی نمونه‌ها، مفصل پلاستیک در تیر، به دور از چشمه‌ی اتصال و پس از ورق‌های بالاسری و پایین‌سری تشکیل می‌شود و نحوه‌ی ایجاد آن به این گونه است که مفصل پلاستیک از بال بالا و پایین تیر تشکیل شده و به سوی جان تیر به گونه‌ای که به هم برسند کشیده می‌شود. افزون بر این، ورود به فاز پلاستیک در تیرها از بال‌های بالایی و پایینی آغاز شده و سپس با جاری شدن تارهای میانی جان تیر، مفصل پلاستیک بعد از ورق‌های بالایی و پایینی تشکیل می‌گردد. در تمامی نمونه‌ها، مفصل پلاستیک در خارج از ستون اتفاق می‌افتد. همچنین، با افزایش

بر روی نتایج به دست آمده اثرگذار نباشد و سرعت اجرای مدل نیز بهینه کند. اندازه‌ی مش‌ها در نقاطی مانند ناحیه‌ی حفاظت شده اتصال، چشمه‌ی اتصال و ورق‌های اتصال که دارای تمرکز تنش بیشتری بوده نصف ضخامت قطعه انتخاب گردید. در سایر نقاط مانند نواحی نزدیک به نقطه‌ی اعمال بار به تیر، که تمرکز تنش کمتری دارند، مش‌ها درشت‌تر شده‌اند. لازم به ذکر است برای هرچه منظم‌تر شدن مش‌ها از تکنیک پارتیشن‌بندی استفاده شده است. شرایط تکیه‌گاهی مدل به این صورت است که اتصال ستون پایین به صورت مفصلی و اتصال ستون بالا به صورت غلتکی است. معیار توقف حل در نرم‌افزار ABAQUS برای این پژوهش بر اساس بارگذاری تا رسیدن به ۳۰ درصد بیشتر از لنگر پلاستیک انتخاب شد. دلیل انتخاب این معیار به نحوه‌ی محاسبه‌ی لنگر طراحی برمی‌گردد. افزون بر این، از آنجایی که مدل‌سازی به روش اجزای محدود و در نرم‌افزار ABAQUS صورت گرفت و به این دلیل که این نرم‌افزار تحلیل‌ها را به صورت گام به گام و نموی انجام می‌دهد، تحلیل مرتبه‌ی اول در هنگام شبیه‌سازی رعایت شده است.

۳-۴- ابعاد اجزا اتصال

در ادامه، ابعاد و اندازه‌ی اجزای اتصال مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که تمامی ابعاد مقاطع و پیچ‌ها نخست بر اساس روابط موجود طراحی و سپس مدل‌سازی انجام شده است [۲۶]. مقطع ستون به شکل قوطی با ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ و ضخامت ۱۲ میلی‌متر، مقطع تیر به صورت تیرورق با ابعاد ۱۲×۲۰۰ و ابعاد جان ۲۷۶×۸ میلی‌متر و ابعاد سایر مقاطع در جدول (۲) ارائه شده است. نحوه‌ی چیدمان پیچ‌ها همچنین تعداد و قطر پیچ‌ها بر اساس روابط مبحث دهم محاسبه و طراحی گردید.

در ادامه، نام‌گذاری و مشخصات نمونه‌های مدل‌سازی بیان می‌شود و سپس نتایج مربوط به هر نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد. جدول (۳) نام‌گذاری و مشخصات نمونه‌های مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد. نام‌گذاری بدین صورت انجام شده که حرف S در آغاز کلمه به معنی نمونه و عدد پس از آن شماره‌ی نمونه مدل‌سازی است. حرف C ابتدای کلمه بیانگر اتصال و عدد بعد از آن مشخص می‌کند که نوع اتصال برای حالت ۴ تیر یا ۶ تیر است. حرف P و عدد بعد از آن درصد بار محوری وارد به ستون را نشان می‌دهد. این اتصال می‌تواند با ۵ ورق میان‌گذر برای اتصال ۵ تیر به یک ستون نیز اجرا شود. با این همه، به دلیل حجم بالای یافته‌ها، بررسی نوع ۵ تیر آن به

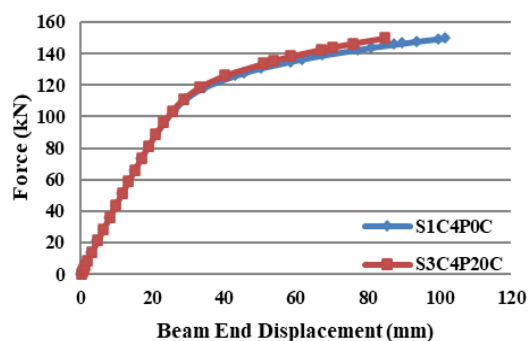


جدول ۲- ابعاد مقاطع اتصال

| ستون کوتاه | مؤلفه‌های ستون کوتاه مربعی با ورق‌های میان‌گذر | ورق اتصال افقی ستون کوتاه |
|------------|--|---------------------------|
| | | |
| | ورق اتصال جان | |
| | | |
| | مؤلفه‌های ستون کوتاه شش‌جبهی با ورق‌های میان‌گذر | ورق اتصال افقی ستون کوتاه |
| ستون کوتاه | ورق اتصال افقی ستون کوتاه | ورق اتصال افقی ستون کوتاه |
| | | |

جدول ۳- ابعاد مقاطع اتصال

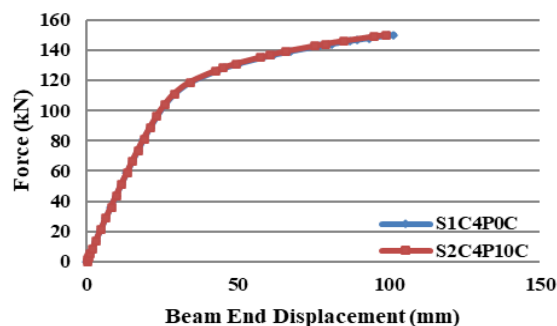
| مقدار بار محوری ستون (kN) | درصد بار محوری ستون | نوع اتصال | نمونه‌ها |
|---------------------------|---------------------|----------------|----------|
| ۰ | بدون بار | ۴ ورق میان‌گذر | S1C4P0 |
| ۲۱۶/۵ | ۱۰ درصد ظرفیت ستون | ۴ ورق میان‌گذر | S2C4P10 |
| ۴۳۳/۱ | ۲۰ درصد ظرفیت ستون | ۴ ورق میان‌گذر | S3C4P20 |
| ۶۴۹/۵ | ۳۰ درصد ظرفیت ستون | ۴ ورق میان‌گذر | S4C4P30 |
| ۸۶۶ | ۴۰ درصد ظرفیت ستون | ۴ ورق میان‌گذر | S5C4P40 |
| ۱۰۸۲/۵ | ۵۰ درصد ظرفیت ستون | ۴ ورق میان‌گذر | S6C4P50 |
| ۱۲۹۹ | ۶۰ درصد ظرفیت ستون | ۴ ورق میان‌گذر | S7C4P60 |
| ۰ | بدون بار | ۶ ورق میان‌گذر | S8C6P0 |
| ۲۱۶/۵ | ۱۰ درصد ظرفیت ستون | ۶ ورق میان‌گذر | S9C6P10 |
| ۴۳۳/۱ | ۲۰ درصد ظرفیت ستون | ۶ ورق میان‌گذر | S10C6P20 |
| ۶۴۹/۵ | ۳۰ درصد ظرفیت ستون | ۶ ورق میان‌گذر | S11C6P30 |
| ۸۶۶ | ۴۰ درصد ظرفیت ستون | ۶ ورق میان‌گذر | S12C6P40 |
| ۱۰۸۲/۵ | ۵۰ درصد ظرفیت ستون | ۶ ورق میان‌گذر | S13C6P50 |
| ۱۲۹۹ | ۶۰ درصد ظرفیت ستون | ۶ ورق میان‌گذر | S14C6P60 |



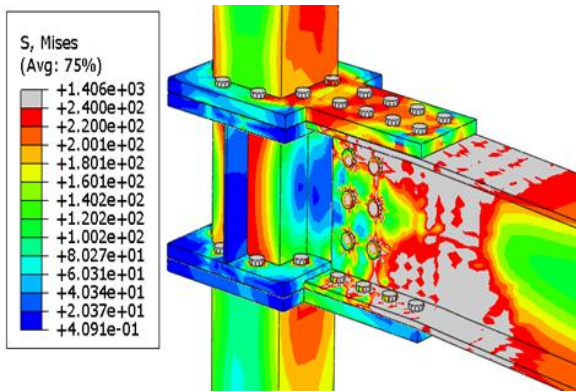
شکل ۱۰- منحنی بار - تغییر مکان نمونه‌های S1C4P0 و S3C4P20

شکل (۱۷) نشان می‌دهد که چنانچه نیروی محوری وارد بر ستون افزایش چشمگیری داشته باشد، مفصل پلاستیک از تیر به سمت ستون حرکت می‌نماید که مطلوب نبوده و جهت برطرف نمودن این مشکل بایستی مقطع ستون افزایش یابد. توزیع تنش در ستون ابتدا از محل اتصال ستون به ورق‌های اتصال شروع شده و با افزایش بارگذاری در طول ستون گسترش می‌یابد. در تمامی نمونه‌ها، تنش فون میسر در ستون کوتاه با ورق‌های میان‌گذر که به‌عنوان چشمه‌ی اتصال عمل می‌نمایند، کمتر از تنش تسلیم بوده و هیچ قسمتی از آن جاری نشده و عملکرد مطلوبی را نشان می‌دهند. همچنین، ستون کوتاه در انتقال نیروی محوری از ستون بالا به ستون پایین رفتار مناسبی از خود نشان

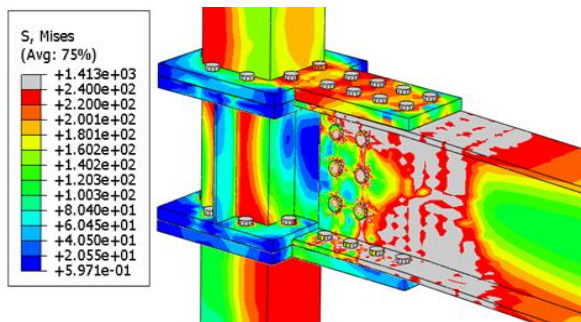
نیروی محوری و مقدار لنگر وارده بر ستون ناشی از بار انتهای تیر، مقدار تنش فون میسر در ستون افزایش می‌یابد. با توجه به منحنی‌های بار- تغییر مکان و کانتورهای تنش مشاهده می‌شود که با افزایش نیروی محوری و رسیدن آن به ۵۰ درصد حداکثر ظرفیت ستون ($0.5f_y A_g$)، در آغاز ستون تسلیم شده و سپس بخش‌هایی از تیر دچار تسلیم می‌شود. در نتیجه، در انتهای بارگذاری، مفصل پلاستیک در تیر به‌صورت کامل تشکیل نشده و بخش‌های زیادی از ستون در محل اتصال به ورق‌های اتصال دچار تسلیم می‌شود. با توجه به این که ستون زودتر دچار تسلیم می‌شود، مقادیر تغییر مکان تسلیم، نیروی شروع تسلیم و لنگر نهایی کاهش می‌یابند.



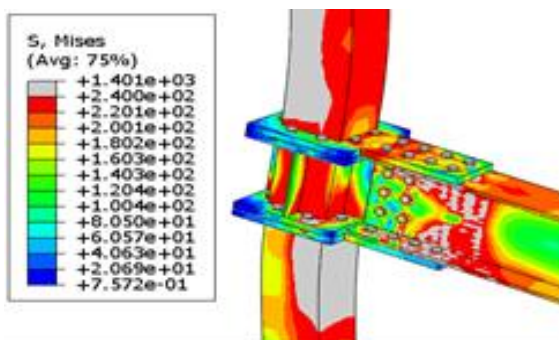
شکل ۹- منحنی بار - تغییر مکان نمونه‌های S1C4P0 و S2C4P10



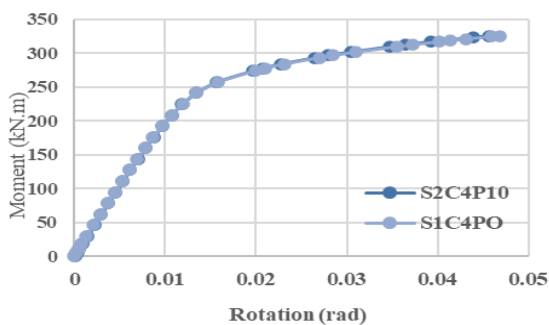
شکل ۱۵- کانتور تنش فونمیسز نمونه‌ی S1C4P0



شکل ۱۶- کانتور تنش فونمیسز نمونه‌ی S4C4P30

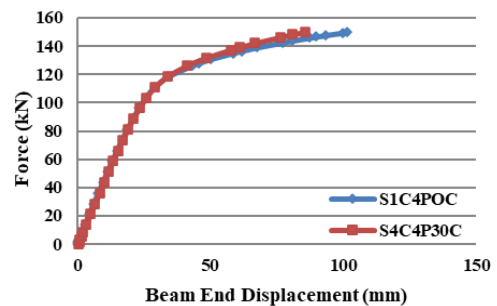


شکل ۱۷- کانتور تنش فونمیسز نمونه‌ی S7C4P60

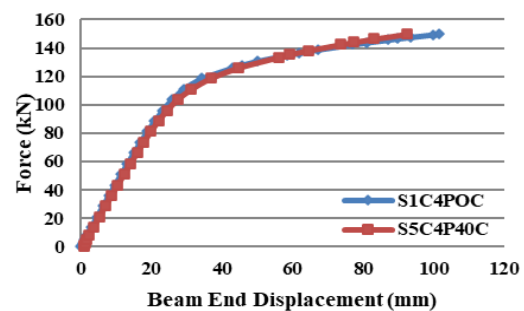


شکل ۱۸- منحنی لنگر - دوران نمونه‌های S2C4P10 و S1C4P0

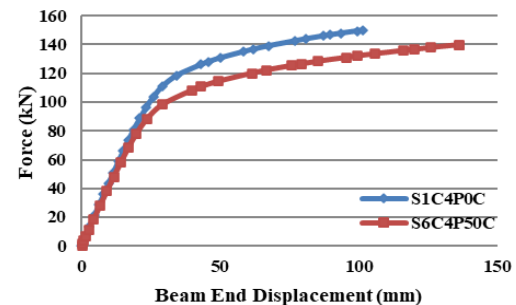
داده است. توزیع تنش نیز در ورق‌های بالا و پایین اتصال از محل سوراخ‌های منتهی به ستون شروع شده و به سمت ابتدای ورق‌های اتصال حرکت می‌نماید.



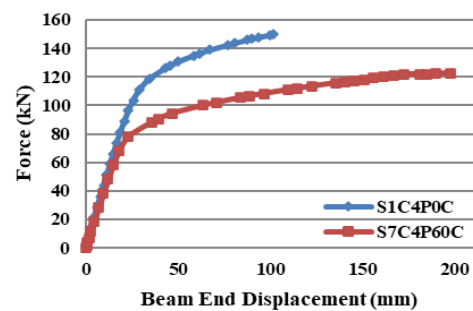
شکل ۱۹- منحنی بار - تغییر مکان نمونه‌های S1C4P0 و S4C4P30



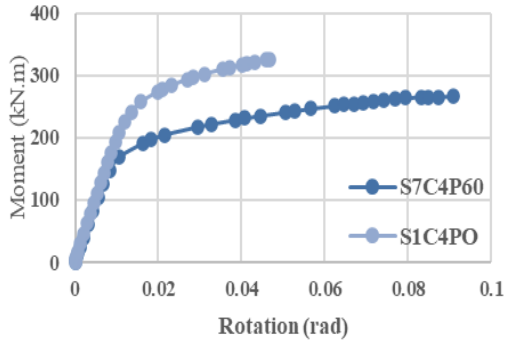
شکل ۲۰- منحنی بار - تغییر مکان نمونه‌های S1C4P0 و S5C4P40



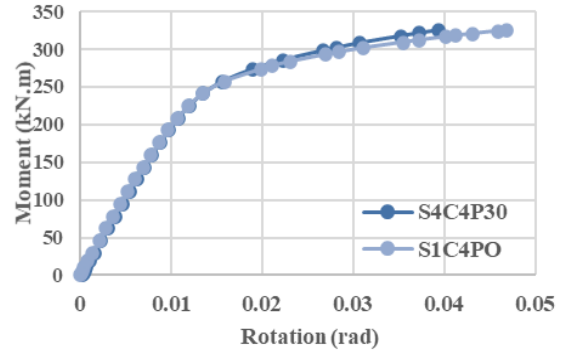
شکل ۲۱- منحنی بار - تغییر مکان نمونه‌های S1C4P0 و S6C4P50



شکل ۲۲- منحنی بار - تغییر مکان نمونه‌های S1C4P0 و S7C4P60



شکل ۲۰- منحنی لنگر - دوران نمونه‌های S7C4P60 و S1C4P0

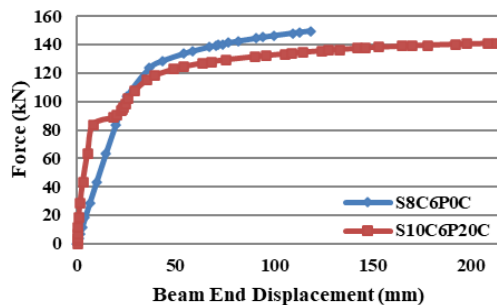


شکل ۱۹- منحنی لنگر - دوران نمونه‌های S4C4P30 و S1C4P0

جدول ۴- مقادیر نیرو و تغییر مکان نمونه‌های مختلف در لحظه شروع جاری شدن بخشی از اتصال و انتهای بارگذاری

| نمونه | جابه‌جایی انتهایی تیر در نقطه‌ی تسلیم (mm) | نیروی اعمالی به انتهای تیر در نقطه‌ی تسلیم (kN) | جابه‌جایی انتهایی تیر در انتهای بارگذاری (mm) | نیروی اعمالی به انتهای تیر در انتهای بارگذاری (kN) |
|----------|--|---|---|--|
| S1C 4P0 | ۲۸/۰۷ | ۱۰۸/۲۵ | ۱۰۱/۵۷ | ۱۵۰ |
| S2C 4P10 | ۲۷/۷۷ | ۱۰۸/۲۳ | ۹۹/۰۸ | ۱۵۰ |
| S3C 4P20 | ۲۷/۶۰ | ۱۰۸/۲ | ۸۴/۷۳ | ۱۵۰ |
| S4C 4P30 | ۲۷/۱۴ | ۱۰۸/۱۶ | ۸۵/۵۰ | ۱۵۰ |
| S5C 4P40 | ۲۷/۱ | ۱۰۸/۱ | ۹۲/۶۴ | ۱۵۰ |
| S6C 4P50 | ۲۵/۵۴ | ۸۸/۲۵ | ۱۳۶/۱۴ | ۱۳۹ |
| S7C 4P60 | ۲۴/۰۸ | ۶۸/۲۵ | ۱۷۵/۹۶ | ۱۲۲/۳۱ |

مقدار بار وارده‌ی کمتری دچار تسلیم شده و در نتیجه تغییر مکان جاری شدن و تغییر مکان انتهای بارگذاری زیاد می‌شود. در نمونه‌هایی با بار محوری زیاد (بیشتر از ۲۰ درصد ظرفیت ستون) قبل از آن که بار وارده بر انتهای تیر به ۱۵۰ کیلونیوتن برسد بخشی از اتصال دچار گسیختگی شده و بارگذاری متوقف می‌گردد. شکل (۲۹) تنش فون میسر در پیچ‌های اتصال، در نمونه S4C4P30 را به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد.

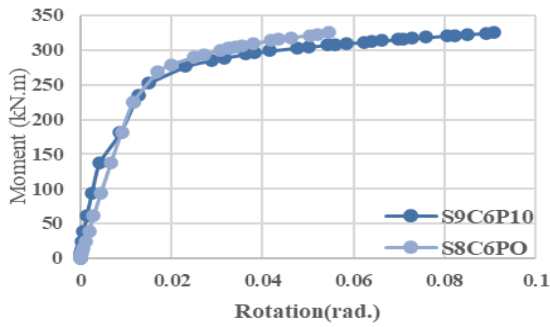


شکل ۲۱- منحنی بار - تغییر مکان S10C6P20 و S8C6P0

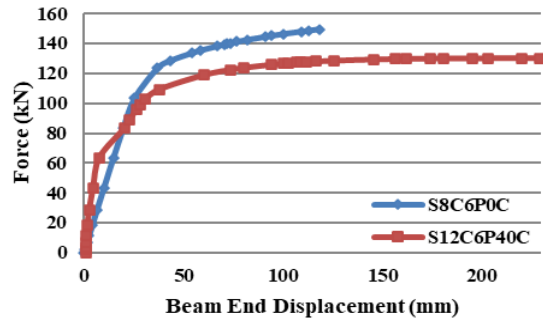
۴-۱- بررسی نتایج اتصال با شش ورق میان‌گذر
 شکل (۲۱) تا (۲۸) منحنی بار - تغییر مکان، منحنی لنگر - دوران و کانتورهای تنش‌های فون میسر برای اتصال با شش ورق میان‌گذر را نشان می‌دهند.

همان‌طور که در شکل (۲۱) تا (۲۸) مشاهده می‌شود، با توجه به سختی زیاد ستون کوتاه شش ضلعی، هنگامی که مقدار بار وارده بر ستون کمتر از ۵۰ درصد ظرفیت آن باشد، این بار سبب افزایش سختی اولیه‌ی اتصال می‌گردد که با افزایش نیروی محوری وارده، سختی اولیه نیز کاهش می‌یابد. با افزایش نیروی محوری وارد بر اتصال، حداکثر لنگر خمشی قابل تحمل کاهش می‌یابد. این کاهش لنگر در نمونه S14C6P60 به دلیل آنکه بخشی از ستون نیز دچار تسلیم می‌گردد بیشتر است.

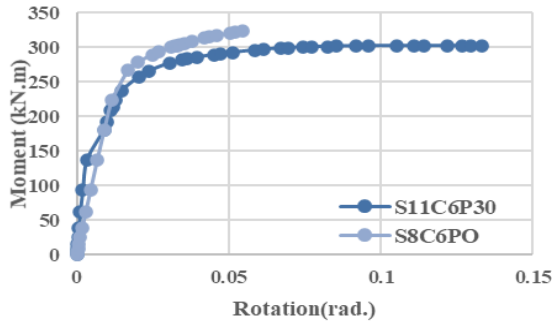
با توجه به داده‌های جدول (۵) مشاهده می‌شود، هنگامی که مقدار نیروی محوری وارد بر ستون کم باشد (حدود ۲۰ درصد)، اثری بر مقادیر تغییر مکان و نیروی لحظه‌ی جاری شدن اتصال ندارد. با این همه، با افزایش نیروی محوری در ستون، تیر در



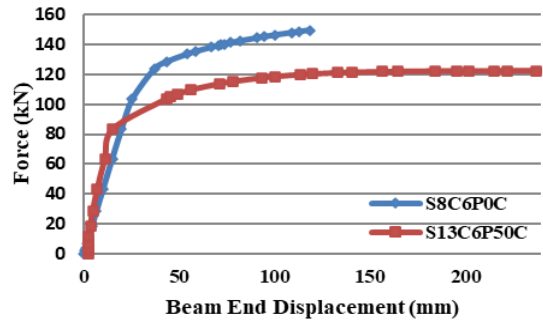
شکل ۲۶- منحنی لنگر - دوران S9C6P10 و S8C6P0



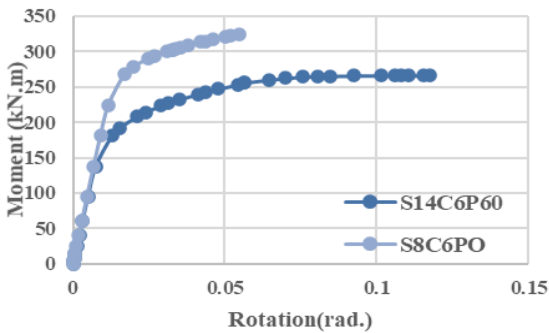
شکل ۲۲- منحنی بار - تغییر مکان S12C6P40 و S8C6P0



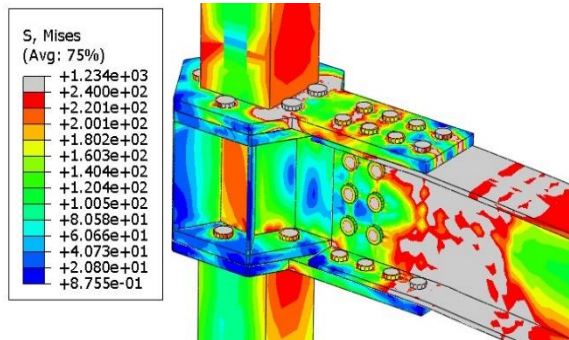
شکل ۲۷- منحنی لنگر - دوران S11C6P30 و S8C6P0



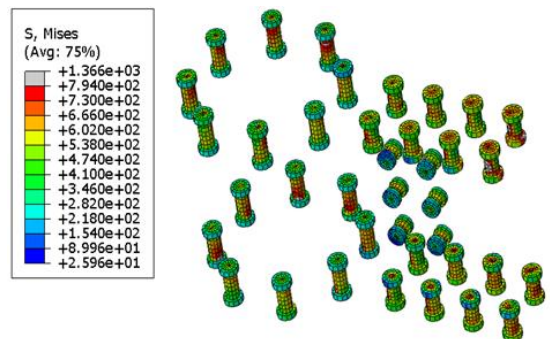
شکل ۲۳- منحنی بار - تغییر مکان S13C6P50 و S8C6P0



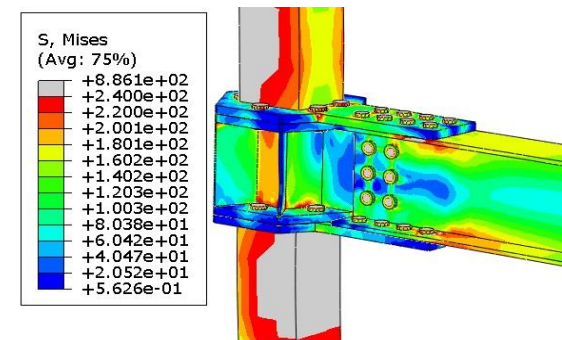
شکل ۲۸- منحنی لنگر - دوران S14C6P60 و S8C6P0



شکل ۲۴- کانتور تنش فون میسر S9C6P10



شکل ۲۹- تنش فون میسر در پیچ‌های اتصال



شکل ۲۵- کانتور تنش فون میسر S14C6P60

جدول ۵- مقادیر تغییر مکان و نیروی وارده در لحظه جاری شدن و انتهای بارگذاری در سر تیر

| نمونه | جابه‌جایی انتهایی تیر در نقطه‌ی تسلیم (mm) | نیروی اعمالی به انتهای تیر در نقطه‌ی تسلیم (kN) | جابه‌جایی انتهایی تیر در انتهای بارگذاری (mm) | نیروی اعمالی به انتهای تیر در انتهای بارگذاری (kN) |
|-----------|--|---|---|--|
| S8C 6P0 | ۲۵/۳۸ | ۱۰۳/۵۶ | ۱۱۸/۴۶ | ۱۵۰ |
| S9C 6P10 | ۲۵/۵۹ | ۱۰۳/۵۶ | ۱۹۷/۱۸ | ۱۵۰ |
| S10C 6P20 | ۲۲/۵۶ | ۸۸/۵۶ | ۲۱۳/۲۷ | ۱۴۰/۸۸ |
| S11C 6P30 | ۲۱/۴۹ | ۸۸/۵۶ | ۲۲۸/۶۶ | ۱۳۹/۲۷ |
| S12C 6P40 | ۲۰/۵۵ | ۸۳/۵۶ | ۲۲۹/۴۴ | ۱۳۰/۲۰ |
| S13C 6P50 | ۱۵/۲۵ | ۸۳/۵۶۲ | ۲۳۷/۲۰ | ۱۲۲/۴۷ |
| S14C 6P60 | ۱۶/۲۵ | ۶۳/۵۶ | ۲۵۵/۲۳ | ۱۲۲/۴ |

با توجه به شکل (۳۰)، دوران چشمه اتصال وابسته به مقادیر تغییر مکان بالا و پایین ستون کوتاه است. بر این اساس، با افزایش مقدار نیروی محوری در ستون، اثر بار- تغییر مکان $(P - \Delta)$ بیشتر شده و در نتیجه مقادیر تغییر مکان بالا و پایین ستون کوتاه که توسط ورق‌های اتصال به انتهای ستون‌ها متصل شده است بیشتر می‌شود. مقادیر جدول (۶) نیز نشان می‌دهد که در هر دو حالت، با افزایش مقدار نیروی فشاری ستون، دوران چشمه‌ی اتصال افزایش پیدا می‌کند.

جدول ۶- مقادیر دوران در چشمه‌ی اتصال

| نمونه | دوران چشمه‌ی اتصال (rad) | نمونه | دوران چشمه‌ی اتصال (rad) |
|----------|--------------------------|-----------|--------------------------|
| S1C 4P0 | ۰/۰۰۷۸ | S8C 6P0 | ۰/۰۰۹۱ |
| S2C 4P10 | ۰/۰۰۸۱ | S9C 6P10 | ۰/۰۲۲۰ |
| S3C 4P20 | ۰/۰۰۸۷ | S10C 6P20 | ۰/۰۵۸۱ |
| S4C 4P30 | ۰/۰۰۹۲ | S11C 6P30 | ۰/۰۶۹۸ |
| S5C 4P40 | ۰/۰۱۶۵ | S12C 6P40 | ۰/۰۸۵۶ |
| S6C 4P50 | ۰/۰۴۵۳ | S13C 6P50 | ۰/۰۹۳۸ |
| S7C 4P60 | ۰/۰۷۰۹ | S14C 6P60 | ۰/۱۲۳۱ |

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نخست یک اتصال خمشی پیش‌ساخته‌ی فولادی با سیستم چشمه‌ی اتصال میان‌گذر ارائه گردید که دارای مزایایی همچون قابلیت اتصال چندین تیر به صورت خمشی به یک ستون و نیز اتصال خمشی تیر به ستون با هر زاویه‌ی دلخواه است. سپس، راستی‌آزمایی مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS با استفاده از یک اتصال مشابه که نتایج آزمایشگاهی آن موجود بود

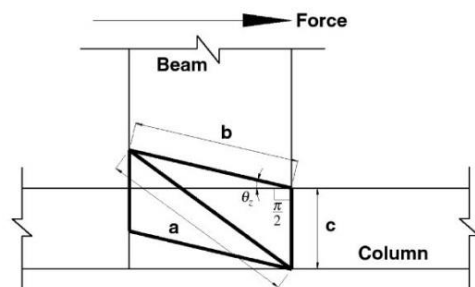
همان‌گونه که در شکل (۲۹) دیده می‌شود، پیچ‌های جان کمترین تنش را تجربه می‌کنند و بیشترین تنش‌ها در پیچ‌های اطراف ستون همچنین بالا و پایین تیر به‌ویژه پیچ‌های انتهایی ورق‌های بالاسری و پایین‌سری (دورترین پیچ‌ها نسبت به ستون) مشاهده شدند. این شکل همچنین نشان دهنده‌ی وجود تنش‌هایی حاصل از پیش‌تنیدگی پیچ‌ها است.

۵- دوران چشمه اتصال

با توجه به شکل (۳۰)، می‌توان دوران مربوط به چشمه‌ی اتصال را محاسبه نمود [۲۹]. دوران چشمه‌ی اتصال (θ_z) از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود.

$$\theta_z = \cos^{-1} \left(\frac{a^2 - b^2 - c^2}{2bc} \right) - \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

در این جا a ، b و c به ترتیب طول قطر، عمق و عرض چشمه‌ی اتصال تغییرشکل یافته است که در شکل (۳۰) دیده می‌شود. این مقادیر از جابه‌جایی‌های استخراج شده از نرم‌افزار محاسبه شدند [۲۹]. جدول (۶) مقادیر مربوط به دوران چشمه‌ی اتصال تمامی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳۰- نحوه‌ی محاسبه دوران چشمه اتصال [۲۹]

- با افزایش نیروی محوری وارد بر ستون، مقدار دوران چشمه‌ی اتصال نیز در همه‌ی مدل‌ها افزایش می‌یابد.
- همه‌ی نمونه‌ها قادر به تحمل لنگر پلاستیک تیر هستند بدون آن که بخشی از اتصال دچار گسیختگی شده یا منحنی لنگر- دوران کاهش یابد. همچنین، با افزایش نیروی محوری وارد به ستون، حداکثر لنگر قابل تحمل اتصال کاهش می‌یابد.

۷- مراجع

- [1] Smith, J., Coull, A. and Structures, T.B. (1991), "Analysis & Design", Wiley and sons, New York.
- [2] Surovek-Maleck, A.E. and White, D.W. (2004), "Alternative approaches for elastic analysis and design of steel frames.I: Overview", Journal of Structural Engineering, Vol. 130, pp. 1186-1196.
- [3] Surovek-Maleck, A.E. and White, D.W. (2004), "Alternative approaches for elastic analysis and design of steel frames. II: Verification studies", Journal of structural engineering, Vol. 130, pp. 1197-1205.
- [4] Yang, C., Yang, J.F., Su, M.Z. and Liu, C.Z. (2016), "Numerical study on seismic behaviours of ConXL biaxial moment connection", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 121, pp. 185-201.
- [5] Rezaeian, A., Jamal-Omidi, M. and Shahidi, F. (2014), "Seismic behavior of ConXL rigid connection in box-columns not filled with concrete", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 97, pp. 79-104.
- [6] Ricles, J.M., Sause, R., Garlock, M.M. and Zhao, C. (2001), "Posttensioned seismic-resistant connections for steel frames", Journal of Structural Engineering, Vol. 127, pp. 113-121.
- [7] Christopoulos, C., Filiatrault, A., Uang, C.M. and Folz, B. (2002), "Posttensioned energy dissipating connections for moment-resisting steel frames", Journal of Structural Engineering, Vol. 128, pp. 1111-1120.
- [8] Rojas, P., Ricles, J.M. and Sause, R. (2005), "Seismic performance of post-tensioned steel moment resisting frames with friction devices", Journal of structural engineering, Vol. 131(4), pp. 529-540.
- [9] Kim, H.J. and Christopoulos, C. (2008), "Friction damped posttensioned self-centering steel moment-resisting frames", Journal of Structural Engineering, Vol. 134, pp. 1768-1779.
- [10] Engelhardt, M.D. and Sabol, T.A. (1998), "Reinforcing of steel moment connections with cover plates: benefits and limitations", Engineering structures, Vol. 20, pp. 510-520.
- [11] Mahin, S.A. (1998), "Lessons from damage to steel buildings during the Northridge earthquake", Engineering structures, Vol. 20, pp. 261-270.
- [12] Chi, B., Uang, C.M. and Chen, A. (2006), "Seismic rehabilitation of pre-Northridge steel moment connections: A case study", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 62, pp. 783-792.
- [13] Popov, E.P. and Tsai, K.C. (1989), "Performance of large seismic steel moment connections under cyclic loads", Engineering Journal, Vol. 26.
- [14] Chen, C.C., Lee, J.M. and Lin, M.C. (2003), "Behaviour of steel moment connections with a single flange rib",

انجام پذیرفت. در ادامه، به بررسی اثر نیروی محوری وارد بر ستون بر رفتار اتصال تحت بارگذاری یکنوا در دو حالت اتصال با چهار ورق میان‌گذر و شش ورق میان‌گذر پرداخته شد. روشن است که انجام پژوهش‌ها به کمک رویکرد عددی و در نرم‌افزارهای اجزای محدود همچون ABAQUS دارای محدودیت‌هایی است. اصلی‌ترین محدودیتی که در این زمینه به چشم می‌آید، ناتوانی این نرم‌افزارها در بررسی مدل‌های سنگین سه‌بعدی است و از این روی باید مدل‌سازی تا حد امکان ساده‌سازی گردد. از این روی، اتصال پیشنهادی پژوهش کنونی تنها در حالت اتصال یک تیر به ستون بررسی گردید. به‌عنوان پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده می‌توان به مواردی همچون ارائه‌ی مدل‌های ریاضی برای ارزیابی رفتار این اتصال به روش مؤلفه‌ای، اعمال روش‌های بهبود لرزه‌ای اتصالات با افزایش سختی یا شکل‌پذیری، بررسی رفتار اتصالات تحت خرابی پیش‌رونده و ارزیابی مقاومت آن در برابر آتش‌سوزی و استخراج نمودارهای لنگر - دمای اتصال اشاره کرد. در پایان، مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده به‌صورت خلاصه ارائه می‌گردد.

- در تمامی نمونه‌ها، مفصل پلاستیک بعد از ورق‌های اتصال ستون و در تیر تشکیل گردید که مطلوب است.
- در نمونه‌های با چهار ورق میان‌گذر، چنانچه مقدار نیروی محوری وارد به ستون کمتر از ۴۰ درصد ظرفیت آن باشد، اثر چشم‌گیری بر سختی اولیه‌ی اتصال و تغییر مکان جاری شدن آن ندارد. با این همه، با افزایش نیروی محوری وارد به دلیل آن که مقادیر تنش‌های ستون‌ها در محل اتصال ستون به ورق اتصال افزایش پیدا می‌کند، عملکرد ستون‌ها ضعیف گردیده و سختی اولیه اتصال کاهش می‌یابد.
- در تمامی نمونه‌ها، ستون کوتاه که در این اتصال نقش چشمه‌ی اتصال را دارا است، تا انتهای بارگذاری دچار تسلیم نشده و قادر است نیروی برشی وارد از ورق‌های اتصال و نیز نیروی محوری وارد از ستون را تحمل نماید و عملکرد مناسبی داشته باشد.
- در کلیه‌ی پیچ‌ها در نمونه‌ها، عملکرد مناسبی از آن‌ها مشاهده شد و در هیچ موردی پیچ‌ها دچار گسیختگی نشدند که نشان دهنده عملکرد مناسب و طراحی درست آن‌ها است.
- در همه‌ی مدل‌ها، توزیع تنش ستون‌ها از محل اتصال ستون به ورق‌های اتصال بوده که با افزایش بار، توزیع تنش در طول آن گسترش پیدا می‌کند.



- [22] Torabian, S., Mirghaderi, S.R. and Keshavarzi, F. (2012), "Moment-connection between I-beam and built-up square column by a diagonal through plate", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 70, pp. 385-401.
- [23] Askarian, H., Sohrabi, M.R. and kazemi, S.M. (2021), "Investigating the behavior of a modular prefabricated steel moment connection with the through-plate panel zone system", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 80, pp. 433-442.
- [24] Liu, X.C., Pu, S.H., Zhang, A.L. and Zhan, X.X. (2017), "Performance analysis and design of bolted connections in modularized prefabricated steel structures", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 133, pp. 360-373.
- [25] Gerami, M., Saberi, H., Saberi, V. and Daryan, A.S. (2011), "Cyclic behavior of bolted connections with different arrangement of bolts", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67, pp. 690-705.
- [26] Salmon, C.G. and Johnson, J.E. (1996), "Steel structures: design and behavior: emphasizing load and resistance factor design", Prentice hall.
- [27] Mohamed, O.A., Byrd, D.E. and Dow, J.O. (2005), "Improved modeling capabilities with reduced-order integration", *Journal of engineering mechanics*, Vol. 131, pp. 2-11.
- [28] Kidger, D.J. and Smith, I.M. (1992), "Eigenvalues and eigenmodes of 8-node brick elements", *Communications in applied numerical methods*, Vol. 8, pp. 193-205.
- [29] Yang, C.M. and Kim, Y.M. (2007), "Cyclic behavior of bolted and welded beam-to-column joints", *International journal of mechanical sciences*, Vol. 49, pp. 635-649.
- [15] Liu, X.C., Xu, A.X., Zhang, A.L., Ni, Z., Wang, H.X. and Wu, L. (2015), "Static and seismic experiment for welded joints in modularized prefabricated steel structure", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 112, pp. 183-195.
- [16] Liu, X.C., Pu, S.H., Zhang, A.L., Xu, A.X., Ni, Z., Sun, Y. and Ma, L. (2015), "Static and seismic experiment for bolted-welded joint in modularized prefabricated steel structure", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 115, pp. 417-433.
- [17] Liu, X.C., Yang, Z.W., Wang, H.X., Zhang, A.L., Pu, S.H., Chai, S.T. and Wu, L. (2017), "Seismic performance of H-section beam to HSS column connection in prefabricated structures", *Journal of constructional steel research*, Vol. 138, pp. 1-16.
- [18] Kazemi Torbaghan, M., Sohrabi, M.R. and Haji Kazemi, H. (2018), "Investigating the behavior of specially prefabricated steel moment connection under cyclic loading", *Adv Steel Constr*, Vol 14(3), pp. 412-23.
- [19] Kazemi, S.M., Sohrabi, M.R. and Haji kazemi, H. (2018), "Evaluation the behavior of pre-fabricated moment connection with a new geometry of pyramidal end block under monotonic and cyclic loadings", *Steel and Composite Structures*, Vol. 29, pp. 391-404.
- [20] Kazemi, S.M., Sohrabi, M.R. and Haji kazemi, H. (2019), "The effect of beam section property on the behavior of modular prefabricated steel moment connection", *Steel and Composite Structures*, Vol. 32, pp.769-778.
- [21] Kazemi, S.M., Sohrabi, M.R. and Haji kazemi, H. (2021), "Design equations for prefabricated steel moment connections", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 80, pp. 313-321.

پی نوشت

- ¹ Cover plate
- ² Gusset plate
- ³ Vertical rib plate
- ⁴ Longitudinal rib plate
- ⁵ Bolt load
- ⁶ C3D8R
- ⁷ Distortion