

بررسی عددی رفتار لرزه ای اتصال تیر به ستون پیشنهادی در سازه - های فولادی سریع الاحداث با قابلیت جمع و نصب مجدد

سید حامد خلیل پور^{۱*}، روح الله امیرآبادی^۲

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم

h.khalilpour@stu.qom.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹

چکیده

در زمان وقوع بلایای طبیعی مانند سیل و زلزله، اهمیت فاکتورهایی همچون فراهم کردن اسکان موقت و دائم، سرعت احداث، افزایش مقاومت و کاهش هزینه‌ها، توجه به انتخاب سیستم‌های باربر قائم و جانبی سازه را یکی از ضروریات صنعت ساختمان می‌داند. نیاز به هر ساختمان در هر منطقه‌ای، وابسته به شرایطی متنوعی است که ممکن است در یک بازه زمانی خاص به وجود آمده و در زمان دیگری از بین برود. در این پژوهش برای اولین بار در کشور ابتدا به معرفی یک سازه‌های فولادی سریع‌الاحداث (موقت و دائمی) با قابلیت جابه‌جایی و جمع و نصب مجدد پرداخته و در ادامه به بررسی رفتار لرزه‌ای اتصال تیر به ستون آن برای کاربرد در قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری معمولی پرداخته می‌شود. به منظور بررسی سه مشخصه سختی، مقاومت و شکل‌پذیری اتصال پیشنهادی، از تحلیل غیرخطی در نرم افزار ABAQUS/6.14.2 استفاده شده و ارزیابی رفتار لرزه‌ای اتصال نیز مطابق ضوابط فصل B- بند ۴ آیین‌نامه فولاد آمریکا صورت گرفته است. مطابق نتایج، مشخصات هندسی مقطع تیر، طول تیر، ضخامت ورق انتهایی، محل و قطر پیچ‌ها و همچنین محل سخت‌کننده‌های ورق انتهایی، از پارامترهای تأثیرگذار بر سختی و مقاومت اتصال فلنجی تیر به ستون هستند. در بین این پارامترها، ضخامت ورق انتهایی و قطر پیچ‌ها و به تناسب آن مقدار نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر سختی اتصال می‌باشند. بررسی‌ها نشان داد که اتصال پیشنهادی با داشتن سختی کافی، توانایی تحمل کل لنگر پلاستیک تیر را دارد. در این اتصال، مفصل پلاستیک در خارج از ناحیه اتصال تشکیل می‌شود و مد خرابی حاکم بر آن کماتش موضعی پلاستیک بال فشاری تیر است. ویژگی‌های مذکور باعث می‌شود که اتصال مذکور به عنوان یک اتصال گیردار کامل از لحاظ سختی و مقاومت، قابلیت کاربرد در سیستم قاب خمشی معمولی پیشنهادی را دارا باشد.

واژگان کلیدی: سازه پیش‌ساخته، اتصال فولادی، جمع و نصب مجدد، اسکان موقت و دائم، قابلیت جابه‌جایی

۱- مقدمه

این خود ضرورت اجرای برنامه بحران را روشن می‌سازد [1-2].

اصولا بحران وضعیتی است که طی آن روش‌های معمول و متداول مواجهه با مشکلات و مسائل، فاقد کارایی باشند [3]. در

یکی از نواحی که در صورت وقوع بلایا به‌ویژه زلزله، آسیب‌های جدی را متحمل می‌شود، فضاها و مسکونی و درمانی هست که

پی وقوع فاجعه‌ها ایجاد فضاهای اسکان موقت (و در صورت امکان دائمی) و فضاهای درمانی سریع الاحداث، تنها در صورتی می‌تواند جان آسیب دیدگان را نجات دهد که ظرف چند ساعت بتوان آن را در محل زمین‌لرزه برپا کرد [4]. با توجه به تغییر و توسعه فناوری‌های نوین ساختمانی در ابعاد گوناگون، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بررسی رفتار سیستم‌های نوین ساختمانی با لحاظ بحث‌هایی مانند ۱) برپایی سریع سازه پس از وقوع زلزله، ۲) عدم نیاز به نیروی متخصص برای نصب و برپایی سازه، ۳) عدم نیاز به تجهیزات خاص برای نصب و برپایی سازه، ۴) مقاومت در برابر پس‌لرزه‌ها، ۵) عدم محدودیت دهانه در بعضی از فضاها و ۶) قابلیت برچیدن و انتقال سریع پس از رفع نیاز انجام شده است.

سازه‌های فولادی بدلیل وزن کم و قابلیت ماشین‌کاری بالا برای صنعتی‌سازی بسیار مناسب هستند. این کارایی به همراه امکان ایجاد اتصالات با پیچ‌های مقاومت بالا، این سازه‌ها را به انتخابی بهینه برای سازه‌های پیش‌ساخته تبدیل کرده است. در تکنولوژی سازه‌های پیش‌ساخته، نکات بسیاری از جمله دسترسی راحت به مصالح، نصب آسان و همچنین دارا بودن ویژگی‌های سازه‌ای مناسب از لحاظ مقاومت، سختی و شکل-پذیری باید رعایت شود [5-6]. استفاده از سازه‌های پیش‌ساخته منجر به کاهش زمان ساخت، کاهش هدر رفت منابع، افزایش ایمنی و کیفیت ساخت سازه‌ها در صنعت ساختمان خواهد شد. بدین منظور، با توجه به مزایای قابل توجه این سازه‌ها، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه سیستم‌های سازه‌ای، اتصالات و روش‌های تحلیل و طراحی آن‌ها انجام شده است [7]. در این سازه‌ها، اتصالات اعضا نقش اساسی در ایجاد یکپارچگی بین مدول‌ها را برعهده دارند. بنابراین، سختی، مقاومت و شکل‌پذیری اتصالات تاثیر قابل توجهی بر رفتار کلی سازه دارد. در این حالت، پارامتر سختی چگونگی توزیع نیروها را تعیین کرده و پارامتر شکل-پذیری نیز ایمنی کلی سازه را تامین می‌کند. در بین اتصالات تیر به ستون در سازه‌های مدولار نیز، اتصال با ورق انتهایی، ورق

انتهایی سخت شده، اتصالات جوشی و اتصال فلنجی کاربرد زیادی داشته‌اند [7-10].

در سال ۲۰۱۰، ولجو و همکاران [11] به صورت آزمایشگاهی به بررسی رفتار لرزه‌ای سازه سریع‌الاحداث یک طبقه جدیدی با سیستم باربر جانبی قاب ساده به همراه مهاربند پرداختند. در این تحقیق، روند ارزیابی اتصالات و رفتار کلی یک سازه کاملاً تشریح شده است. ترابیان و همکاران [12] با اشاره به مشکلات اجرایی در تامین ورق پیوستگی اتصال تیر به ستون باکس، یک اتصال جدید^۱ پیشنهاد نموده و به کمک شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی، رفتار چرخه‌ای اتصال و مسیر انتقال بار از تیر به ستون را بررسی نمودند. مطابق نتایج، اتصال پیشنهادی قادر به تحمل دوران نسبی ۰/۰۶ رادیان می‌باشد که با داشتن سختی، مقاومت و شکل‌پذیری لازم برای کاربرد در قاب خمشی ویژه توصیه شده است. در سال ۲۰۱۲، هان و همکاران [13] به بررسی ظرفیت دوران تیر با مقطع بال کاهش یافته پرداخته و در ادامه رابطه تجربی برای تخمین مقدار دوران تیر ارائه دادند. علاوه بر این، در این تحقیق، روند جدیدی برای طراحی اتصال برای دستیابی به ظرفیت دورانی حداقل ۲ درصد ارائه شد. در سال ۲۰۱۵، لیو و همکاران [14] یک اتصال پیچی جدید برای اتصال تیر به ستون در سازه پیش‌ساخته فولادی چند طبقه مدولار پیشنهاد داده و به صورت عددی و آزمایشگاهی به بررسی رفتار لرزه‌ای اتصال شامل سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و جذب انرژی پرداختند. در سازه مدولار پیشنهادی، تیرها به صورت اعضای خرپایی هستند و سیستم سقف به همراه تیرها در کارخانه ساخته شده و به صورت یکپارچه در کارگاه به ستون‌ها متصل می‌شود. این محققین در سال ۲۰۱۷ نیز به بررسی عملکرد اتصال پیشنهادی پرداختند و ادعا کردند که این اتصال قابلیت کاربرد در ایجاد اتصال خرپا به ستون و ستون به ستون تحت بارهای لرزه‌ای کم را دارد [15]. در سال ۲۰۱۶، فریدمهر و همکاران [16] به صورت آزمایشگاهی به بررسی مقاومت، سختی و شکل‌پذیری اتصالات نیمه‌صلب تیر به ستون با ورق انتهایی^۲ پرداختند. مطابق نتایج، مقدار ضخامت ورق انتهایی و بال ستون تاثیر قابل توجهی

سکانتی در بارهای سرویس، $K_s = M_s / \theta_s$ ، به عنوان شاخص ارزیابی سختی اتصال^۲ در نظر گرفته می‌شود. که در این رابطه M_s و θ_s به ترتیب لنگر و دوران اتصال تحت بارهای سرویس خواهند بود. مطابق این شاخص، اگر در یک اتصال $K_s L / EI \geq 20$ باشد، اتصال مذکور به عنوان اتصال گیردار کامل (FR) لحاظ می‌شود و با ارضای این شرط، اتصال مذکور توانایی حفظ زاویه اولیه اتصالات را خواهد داشت. از طرفی، اگر $K_s L / EI \leq 2$ باشد، اتصال مذکور به عنوان اتصال مفصلی لحاظ شده و قادر به ایجاد دوران بدون تحمل لنگر قابل توجه خواهد بود. همچنین، اتصالاتی با سختی مابین دو حد مذکور در فوق، به عنوان اتصالات نیمه‌گیردار^۳ (PR) تلقی خواهند شد. نمونه‌هایی از منحنی لنگر-دوران اتصالات مفصلی (ساده)، نیمه‌گیردار و گیردار کامل در شکل (۱) نشان داده شده است. در این شکل، پارامتر M_n ماکزیمم لنگر قابل تحمل و θ_u ماکزیمم دوران اتصال خواهد بود.

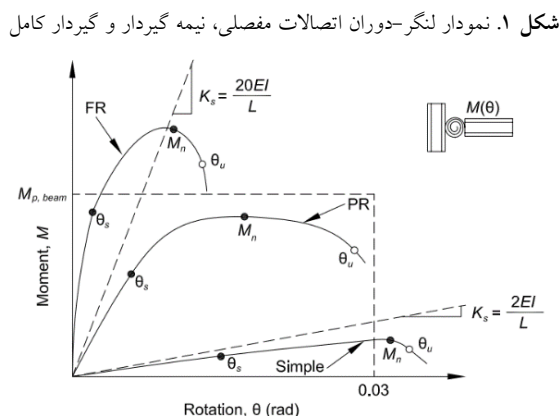


Fig. 1. Moment-rotation response of hinge, partially restrained and fully restrained connections

۱-۲-۱- روش تعیین مقاومت اتصال

مطابق شکل (۱)، مقاومت یک اتصال برابر با ماکزیمم لنگر قابل تحمل توسط آن اتصال، M_n ، خواهد بود. اتصالاتی که حداکثر ۲۰ درصد لنگر پلاستیک تیر متصل به آن را در دوران ۰/۰۲ انتقال می‌دهند را می‌توان به عنوان اتصال مفصلی و بدون لنگر لحاظ نمود. از طرفی، یک اتصال گیردار کامل می‌تواند مقاومت خمشی کمتر یا بیشتری نسب به مقاومت خمشی تیر متصل به

بر مقدار سختی اولیه اتصال دارد. صادقی و همکاران [17] به کمک شبیه‌سازی عددی به بررسی رفتار لرزه‌ای اتصال جدید تیر به ستون باکس^۱ و مقایسه آن با نتایج اتصالات متداول تیر به ستون پرداختند. در این تحقیق، با بررسی تاثیر پارامترهای هندسی مختلف بر رفتار لرزه‌ای اتصال، مقادیر بهینه ابعاد قطعات معرفی شد. در سال ۲۰۱۹، ژانک و همکاران [18] به صورت عددی و آزمایشگاهی به بررسی رفتار چرخه‌ای^۴ نوع اتصال تیر به ستون پرداختند و پارامترهایی شامل مد خرابی، سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و میزان جذب انرژی را بررسی کردند. مطابق نتایج، وجود سوراخ در جان تیر در لبه اتصال تیر به ستون منجر به کاهش ناچیز پارامتر سختی و مقاومت و افزایش قابل توجه شکل‌پذیری و جذب انرژی اتصال می‌شود.

با وجود انجام تحقیقات گسترده در زمینه سازه‌های سریع الاحداث، کاستی مهمی در این تحقیقات وجود دارد. مهمترین ضعف این سیستم‌ها، تحویل آنها به صورت اسکان موقت و عدم امکان تغییر کاربری این سازه‌ها به اسکان دائمی است که این امر هزینه زیادی به سیستم اقتصادی کشور اعمال می‌کند. بنابراین، نویسندگان مقاله حاضر سعی در تولید سازه‌های فولادی سریع الاحداث مدولار (ماژولار) دارند که اسکلت ساختمان و اتصالات آن علاوه بر زلزله سطح بهره‌برداری، قادر به تحمل زلزله طرح استاندارد ۲۸۰۰ هستند و همزمان قابلیت کاربرد در سازه‌های موقت و دائمی را داشته باشد.

۱-۱- روند ارزیابی رفتار لرزه‌ای اتصالات

در این بخش روند ارزیابی آیین‌نامه فولاد آمریکا [19] و منابع [23-20, 18-16, 12] برای طبقه‌بندی رفتار لرزه‌ای اتصال تیر به ستون آورده شده است. در ادامه پژوهش از این روند برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای اتصال پیشنهادی استفاده می‌شود.

۱-۱-۱- روش تعیین سختی اتصال

به منظور بررسی سختی اتصالات، آیین‌نامه فولاد آمریکا [19] مطابق تئوری Beam-Line بر اساس نمودار لنگر-دوران به تقسیم بندی اتصالات می‌پردازد. در این آیین‌نامه [19]، سختی

3. Partially Restrained (PR) Connection

1. Modular hybrid fabricated column connection

2. Index Property of Connection Stiffness

آن داشته باشد. ولی، در هر صورت باید مقاومت اتصال پاسخگوی بارهای طراحی باشد.

۱-۳- روش تعیین شکل پذیری اتصال

در صورتی که مقاومت خمشی یک اتصال بیش از لنگر پلاستیک تیر متصل به آن باشد، شکل پذیری سازه توسط تیر کنترل شده و رفتار اتصال می تواند به صورت الاستیک فرض شود. ولی در صورتی که مقاومت خمشی تیر بیش از مقاومت خمشی اتصال باشد، تغییر شکل های غیرخطی می تواند در اتصال متمرکز شود. شکل پذیری لازم برای هر اتصال کاملاً به نوع سیستم سازه ای و محل ساخت آن از لحاظ لرزه خیزی بستگی دارد. در شکل بالا، Θ_u می تواند به عنوان مقدار دورانی تعریف شود که در آن نقطه مقاومت خمشی اتصال به ۸۰ درصد مقاومت خمشی ماکزیمم ($0.8M_n$) کاهش پیدا میکند و یا در آن نقطه دوران به 0.03 رادیان می رسد. قابل ذکر است که حد دوران 0.03 ، برابر با کمترین ظرفیت قابل قبول برای دوران اتصال در قاب های خمشی ویژه می باشد.

۱-۲- اهداف پژوهش

در پژوهش حاضر به بررسی رفتار اتصال تیر به ستون پیشنهادی برای کاربرد در سازه های فولادی سریع الاحداث با قابلیت جمع و نصب مجدد پرداخته می شود. اتصال مذکور برای اتصال گیردار کامل تیر به ستون در یک قاب خمشی فولادی با شکل پذیری معمولی ارائه شده است. برای ارزیابی سه مشخصه سختی، مقاومت و شکل پذیری اتصال از ضوابط فصل B- بند ۴ آیین نامه فولاد آمریکا [19] و روند منابع [12, 16, 18, 20-23] استفاده می شود. همچنین به منظور بررسی مقاومت خمشی و سختی دورانی اتصال، از منحنی لنگر-دوران حاصل از تحلیل غیرخطی در نرم افزار ABAQUS/6.14.2 استفاده می شود.

۲- مواد و روش ها

در این بخش، ابتدا به معرفی مشخصات هندسی و چگونگی تحلیل، طراحی، ساخت و اجرای یک سازه های فولادی سریع الاحداث (موقت و دائمی) با قابلیت جابه جایی و جمع و نصب

مجدد پرداخته می شود. سپس، روش تحلیل و مدلسازی عددی شامل نرم افزار اجزاء محدود بکار رفته، انتخاب نوع المان، چگونگی مش بندی، شیوه ساخت هندسه سازه، بارگذاری و شرایط مرزی، تعریف مشخصات مصالح و معیار تسلیم مصالح ارائه می شود.

۲-۱- مشخصات هندسی اسکلت پیش ساخته پیشنهادی

اتصال مورد بررسی در این پژوهش جزء اتصال تیر به ستون در یک سازه پیش ساخته فولادی سریع الاحداث بوده که قابلیت جمع و نصب مجدد با در نظر گرفتن حداقل امکانات را دارد. روش ساخت اسکلت پیشنهادی به نسبت سازه های موجود در کشور ساده تر بوده و به امکانات خیمکاری، برشکاری و جوشکاری زیادی نیاز ندارد. برای به کمتر رساندن عملیات نصب سازه، جوشکاری فقط در محل کارخانه انجام گرفته و در محل کارگاه اعضا با اتصالات پیچ و مهره ای به یکدیگر متصل می شوند.

در شکل (۲) پلان ستون گذاری ساختمان پیش ساخته شده است. بیشترین فاصله ستون ها ۴ متر و ارتفاع طبقه حدود ۲/۸ متر در نظر گرفته شده است. به کمک سیستم پیشنهادی اتصال تیر به ستون، جعبه اتصال جدای از سایر اجزا بوده و با استفاده از ورق انتهایی (فلنجی) به تیر به ستون متصل می شود. همچنین سقف سازه از نوع شیروانی با دو شیب متغیر طرح شده است.



Fig. 2. Column plan of the proposed prefabricated building

اتصالات ضروری است. دیتایل پیشنهادی اتصال تیر به ستون در اتصال تیر IPE120 مطابق شکل‌های (۴ و ۵) است که با لحاظ امکانات دسترسی و افزودن قابلیت باز و بسته شدن طراحی شده است.

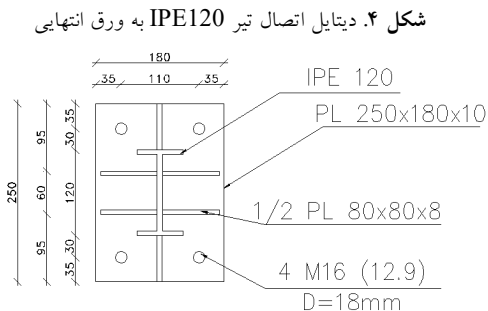
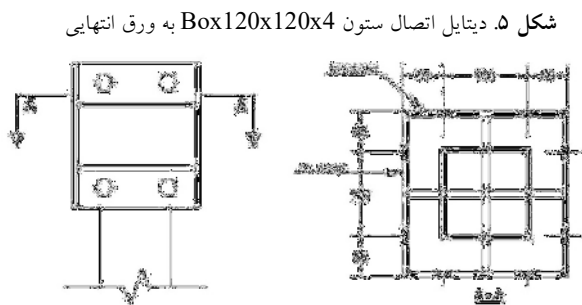


Fig. 4. Beam-to-end plate connection detail of IPE120



شکل ۵. دیتایل اتصال ستون Box120x120x4 به ورق انتهایی

پس از طراحی اسکلت در نرم‌افزار SAP2000، به منظور اطمینان از عدم ایجاد مشکل در پروسه ساخت، مطابق شکل‌های (۶ و ۷) اسکلت اصلی به همراه تمامی جزئیات در نرم‌افزار تکلا مدل شد. سرانجام پس از تولید نقشه‌های کارگاهی، مطابق شکل‌های (۸ تا ۱۳) نمونه‌ای از اسکلت با اتصال تیر به ستون پیشنهادی و قابلیت جمع و نصب مجدد ساخته و اجرا شد.

شکل ۶. مدلسازی سه بعدی اسکلت ساختمان در نرم‌افزار تکلا

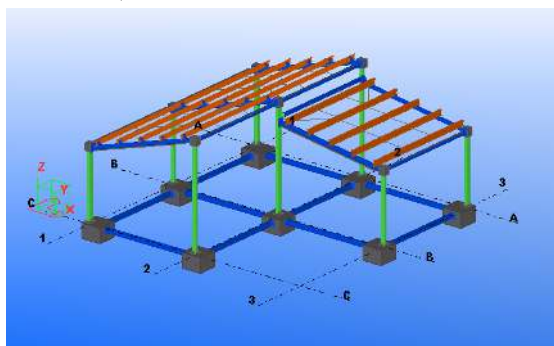


Fig. 6. Three-dimensional modeling of the building in Tekla software

اسکلت اصلی دارای سیستم باربر جانبی قاب خمشی معمولی در هر دو جهت بوده و به روش حالت حدی ضریب بار و مقاومت و تحلیل استاتیکی معادل بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [24]، آیین‌نامه AISC-341 [25]، استاندارد ۲۸۰۰ [26]، مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [27] و آیین‌نامه ASCE-7 [28] و به کمک نرم‌افزار SAP2000 و مشابه مراجع [29-30] تحلیل و طراحی شده است. قابل ذکر است که در محاسبه پارامترهای لرزه‌ای، منطقه با خطرپذیری نسبی خیلی زیاد و خاک نوع ۴ با کاربری ساختمان مسکونی در نظر گرفته شده است. همچنین بار مرده و زنده سقف به ترتیب برابر ۵۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع لحاظ شده و ضریب رفتار طراحی برای سیستم‌های قاب خمشی معمولی برابر ۳/۵ می‌باشد. مطابق نتایج موجود در شکل (۳)، تیرها با استفاده از مقاطع IPE120 و IPE140 و ستون‌ها نیز با مقطع Box120x120x4 طراحی شده‌اند.

شکل ۳. نمونه‌ای از نتایج طراحی ساختمان پیش‌ساخته پیشنهادی در نرم‌افزار SAP2000

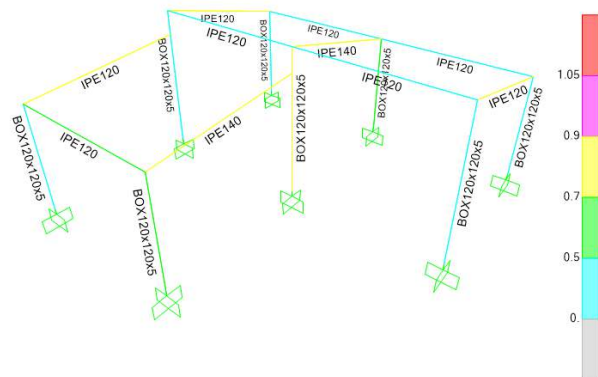


Fig. 3. Sample of design results of the proposed prefabricated building using SAP2000 software

با توجه به اینکه قاب خمشی مورد استفاده در این پروژه از نوع قاب معمولی می‌باشد، نیازی به ارضای ضوابط اتصالات پیش‌تایید مطابق بند ۱۰-۳-۱۳ مبحث دهم و یا ضوابط AISC 358-16 [31] نیست و برای این اتصال از ورق انتهایی و پیچ (اتصال فلنجی) استفاده می‌شود. همچنین با توجه به ماهیت لرزه‌بر اتصالات، استفاده از پیچ با رفتار اصطکاکی در طرح

شکل ۷. نمایی نزدیک از اتصال تیر به ستون در نرم افزار تکلا

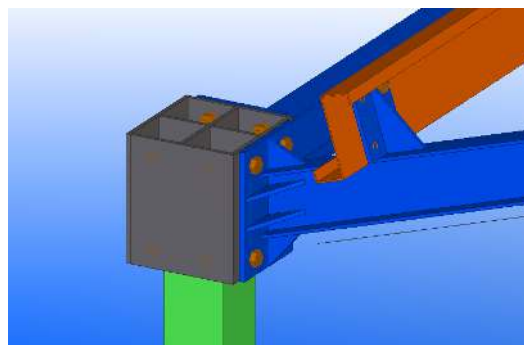


Fig 7. A close-up view of the beam-to-column connection in Tekla software

شکل ۸. نمایی نزدیک از نمونه ساخته شده اتصال تیر به ورق انتهایی



Fig 8. A close-up view of the fabricated beam-to-end plate connection

شکل ۹. نمایی از مراحل نصب اسکلت: مرحله نصب ستون و تیر



Fig. 9. A view of the frame installation process: Installation stage of the beams and columns

شکل ۱۰. نمایی از مراحل نصب اسکلت: مرحله تکمیل نصب اسکلت



Fig. 10. A close-up view of the frame installation process: Complete installation stage of the skeleton

شکل ۱۱. نمایی نزدیک از نمونه ساخته شده اتصال پیشنهادی



Fig. 11. A close-up view of the fabricated proposed beam-to-column connection

شکل ۱۲. نصب دیوارهای پیرامونی



Fig. 12. Installation of the perimeter walls

شکل ۱۳. تکمیل ساختمان پیش‌ساخته پیشنهادی با قابلیت جمع و نصب مجدد



Fig. 13. The completed proposed pre-fabricated building with the assemble and disassemble abilities

۲-۲- روش مدلسازی و بررسی رفتار اتصال پیشنهادی

به منظور بررسی رفتار اتصال، فقط اجزای تیر و ستون در ناحیه چشمه اتصال در نظر گرفته شده است. انواع سازه‌های قابل مدلسازی در نرم‌افزار در شکل (۱۴) نشان داده شده است. زیرسازه مورد استفاده در این تحقیق حالت (ب) خواهد بود. به منظور تعیین دوران خالص اتصال تیر به ستون برای ترسیم منحنی لنگر-دوران، طول ستون به اندازه‌ای انتخاب شده است که تاثیر قابل اغماضی در مقدار دوران نسبی بین تیر و ستون داشته باشد. به عبارتی، با انتخاب طول کوتاه برای ستون، فرض اصلی بر این هست که دوران ایجاد شده در محل اتصال تیر به ستون فقط ناشی از دوران خود اتصال بوده و به دوران ستون ربط ندارد. در این اتصال، ستون با مقطع Box120x120x4 و طول ۵۰۰ میلی‌متر در بالا و پایین چشمه اتصال و تیر با مقطع IPE120 و طول ۱۰۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۴. انواع زیرسازه‌های قاب برای مدلسازی در نرم‌افزار

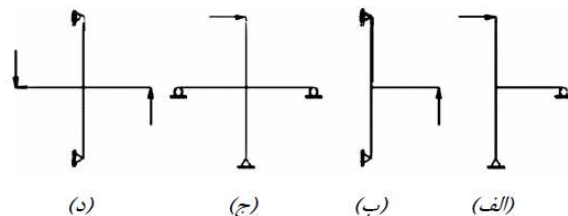


Fig. 14. Types of frame's sub-structures for modeling

۳-۲- روند تحلیل اجرای محدود در نرم‌افزار ABAQUS

در این پژوهش به منظور تحلیل رفتار خطی و غیرخطی اتصال از نرم‌افزار آباکوس [32] استفاده می‌شود. در تحلیل‌ها هر دو رفتار غیرخطی مصالح^۱ و غیرخطی هندسی^۲ مد نظر قرار خواهد گرفت. در تحلیل خطی، به منظور بررسی مقاومت کماتش الاستیک از روش تحلیل مقادیر ویژه و همچنین جهت بررسی مقاومت نهایی اتصال، در تحلیل‌های غیرخطی از روش تحلیل Riks نرم‌افزار آباکوس، که قادر به شناسایی کامل مسیر تعادل سازه می‌باشد، استفاده می‌شود. در روش تحلیل Riks چنانچه سازه به صورت ایده‌آل و بدون نقص هندسی اولیه^۳ مدلسازی شود، احتمال دارد که در حین تحلیل پدیده کماتش در اعضای سازه مشاهده نشده و سیستم تحت بارگذاری دچار تسلیم شود. بر این اساس نقص هندسی اولیه‌ای کوچک به ورق‌ها اعمال می‌شود. از روش‌های متداول مدلسازی نقص هندسی اولیه در ورق‌ها، شبیه‌سازی شکل نقص با موج سینوسی و یا استفاده از شکل مود کماتش ورق تحت بارگذاری مورد نظر است. عموماً شکل احتمالی نقص هندسی اولیه به صورت ضریبی از مود اول کماتش در نظر گرفته می‌شود [33-36]. بنابراین، در این پژوهش، جهت اعمال نقص هندسی اولیه به اجزای اتصال از شکل مود اول کماتشی حاصل از تحلیل مقدار ویژه استفاده شده است. قابل ذکر است که در صوتی که شکل مود اول به صورت خمش کلی بخشی از اتصال باشد، با توجه به رفتار آن می‌توان این نقص را در مدل اعمال نکرد.

۴-۲- انتخاب نوع المان و نحوه مش‌بندی

از المان C3D8R برای مدلسازی اجزای اتصال و تیر و ستون استفاده می‌شود. این المان، یک المان ۸ گره‌ای مکعبی یا آجری شکل، سه بعدی، دارای فرمول‌بندی کاهش یافته با قابلیت کنترل پدیده ساعت شنی یا Hourglass بوده و از پرکاربردترین المان‌های مورد استفاده در آباکوس است [32]. انتخاب ابعاد مش نیز بر مبنای آنالیز حساسیت بوده که در بخش‌های مختلف اتصالات و بسته به حساسیت محل المان از مش‌بندی با ابعاد ۴ میلی‌متر تا ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است. قابل ذکر است که

شکل ۱۸. مش بندی ورقهای سوراخدار اتصال با مش به ابعاد ۴ میلیمتر



Fig. 18. Mesh pattern of the perforated plates with an element size of 4 mm

شکل ۱۹. نمونه ای از مش بندی بولتهای اتصال با مش به ابعاد ۳ میلیمتر

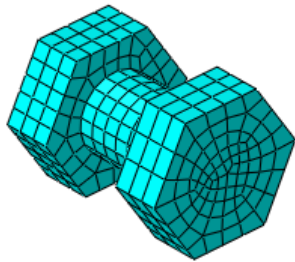


Fig. 19. Mesh pattern of the bolts with an element size of 3 mm

۲-۵- بارگذاری و شرایط مرزی

بارگذاری و شرایط مرزی اتصال در شکل (۲۰) نشان داده شده است. برای اعمال لنگر خمشی در اتصال، از روش اعمال جابه جایی در در نوک تیر و روش کنترل جابه جایی استفاده می شود. به منظور حذف تمرکز تنش در نقاط تکیه گاهی و محل بار به ترتیب از اعمال شرایط مرزی و جابه جایی در یک نقطه مرجع (Reference point) به کمک دستور Rigid body/Tie نرم افزار آباکوس استفاده شده است. همچنین، برای حذف امکان رخداد پدیده کماتش جانبی-پیچشی، تمامی نقاط اطراف بال ها در جهت عمود بر صفحه جان (جهت Z) مقید شده است. برای اعمال نیروی پیش تنیدگی بولتهای اتصال از قابلیت Bolt load نرم افزار و با اعمال نیروی پیش تنیدگی به اندازه $T_b = 0.55 F_u \cdot A_b$ مطابق مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان استفاده شده است. که در آن F_u و A_b به ترتیب تنش نهایی مصالح بولت و مساحت آن خواهد بود.

تعیین ابعاد مش بر اساس حساسیت سنجی در مورد دقت مورد نیاز و سرعت تحلیل در منابع بسیاری مورد تاکید می باشد [37]. شمای کلی مدل اجزای محدود اتصال در شکل (۱۵) و نمونه ای از چگونگی مش بندی اجزای مختلف آن در شکل های (۱۶) تا (۱۹) نشان داده شده است. همچنین، از تأثیر تنش پسماند در تحلیل های عددی به دلیل تأثیر ناچیز آن در اهداف پژوهش حاضر صرف نظر شده است [33-36].

شکل ۱۵. مدل اجزای محدود اتصال در نرم افزار ABAQUS

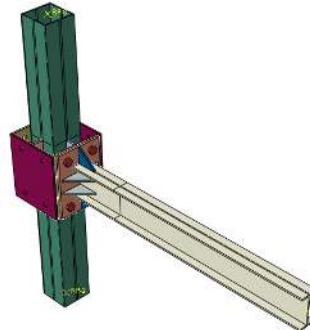


Fig. 15. Finite element model of the connection in ABAQUS software

شکل ۱۶. چگونگی مش بندی مقطع تیر با مش به ابعاد ۱۰ میلیمتر

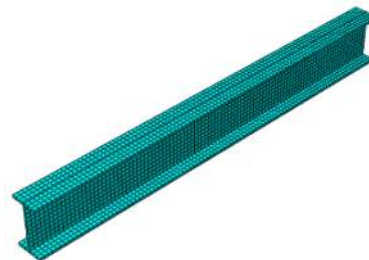


Fig. 16. Mesh pattern of the beam with an element size of 10 mm

شکل ۱۷. چگونگی مش بندی مقطع ستون با مش به ابعاد ۸ میلیمتر

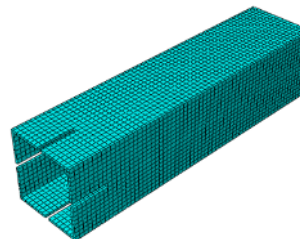


Fig. 17. Mesh pattern of the column with an element size of 8 mm

شکل ۲۰. چگونگی اعمال بارگذاری و شرایط مرزی مدل اجزای محدود اتصال در نرم افزار ABAQUS

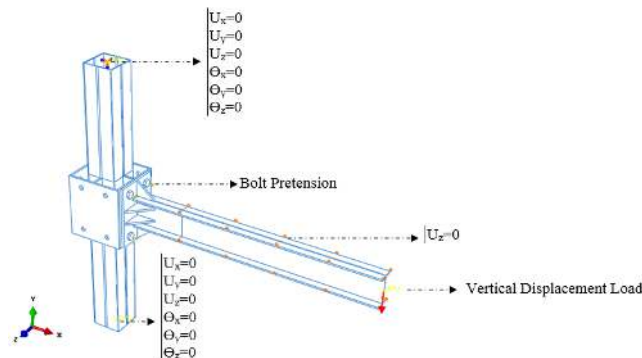


Fig. 20. Loading and boundary conditions of the finite element model in ABAQUS software

۲-۶- مشخصات مصالح و معیار تسلیم

مصالح اعضای فولادی از نوع ST.37 و با مشخصات مذکور در جدول (۱) لحاظ شده است. ضریب R_y نسبت تنش تسلیم مورد انتظار به تنش تسلیم تعیین شده فولاد است که طبق جدول (۱۰-۲-۳-۱) مبحث دهم مقررات ملی انتخاب می شود. همچنین بولتهای اتصال از نوع ۱۲.۹ بوده و دارای تنش تسلیم و تنش نهایی به ترتیب برابر ۱۰۸۰ و ۱۲۰۰ مگاپاسکال هستند. به منظور بررسی تسلیم یا عدم تسلیم یک نقطه از سازه، معیار تسلیم ون مایسز^۱ به کار گرفته شده است. این معیار یکی از پرکاربردترین معیارهای تسلیم در بررسی رفتار فلزات شکل پذیر بوده و دارای پشتوانه آزمایشگاهی مناسب می باشد. همچنین، به منظور شبیه سازی پدیده سخت شوندگی کرنشی مصالح، از سخت شوندگی ایزوتروپیک استفاده شده است که در آن سطح تسلیم ماده به صورت یکنواخت بزرگتر می شود. قابل ذکر است که این نوع سخت شوندگی برای بررسی رفتار سازه های فولادی تحت بار مونوتونیک استفاده می شود.

جدول ۱: مشخصات مصالح تیر و ستون و اجزای اتصال

parameter	value
Yield stress F_y	2400 (kg/cm ²)
Ultimate tension F_u	3600 (kg/cm ²)
R_y (beam)	1.2
R_y (column)	1.25
density	7850 (kg/m ³)
Modulus of elasticity E	2e6 (kg/cm ²)
poisson's ratio ν	0.3

Fig. 4. Specifications of beam and column materials and connection components

۳-۱- ارائه نتایج و بحث

۳-۱- بررسی نمودار لنگر-دوران اتصال پیشنهادی

نمودار لنگر-دوران اتصال پیشنهادی و همچنین نمودار لنگر-دوران تیر به ترتیب در شکل های (۲۱ و ۲۲) ترسیم شده است. به منظور تعیین مقدار زاویه دوران اتصال، از اختلاف تغییرشکل نقطه انتهایی لچکی فوقانی و لبه تحتانی تیر IPE120 استفاده شده است. با توجه به تغییر شکل موضعی قابل اغماض ورق ستون، مقدار زاویه دوران اتصال مطابق شکل (۲۳) تعیین می شود. از طرفی به منظور تعیین مقدار زاویه دوران تیر نیز از نسبت تغییرشکل کلی تیر (Δ) به طول آن (L) استفاده می شود. مطابق شکل های (۲۱ و ۲۲) مشاهده می شود که در ابتدای بارگذاری رفتار اتصال حدوداً خطی است و با افزایش لنگر وارد شده، رفتار غیرخطی بر اتصال حاکم می شود. طبق نتایج مدل اجزای محدود، مقدار مقاومت خمشی نهایی برابر ۱۴.۵۶ kN.m است که حدوداً برابر مقدار لنگر پلاستیک تیر IPE120 (۱۴.۵۷ kN.m) است. دلیل این امر تشکیل مفصل پلاستیک و تمرکز تغییرشکل های غیرخطی در تیر می باشد. مطابق شکل (۲۴) مد خرابی حاکم بر رفتار تیر؛ کمانش موضعی پلاستیک ورق فشاری بال تیر در لنگر نهایی خواهد بود.

۳-۲- بررسی سختی اتصال پیشنهادی

به منظور بررسی سختی اتصال از نمودار لنگر-دوران اتصال در شکل (۲۱) استفاده می شود. همان گونه که در بخش مقدمه ذکر شد، به منظور بررسی سختی اتصالات از ضوابط آیین نامه AISC360-16 استفاده می شود. در این آیین نامه، سختی سکانتی در بارهای سرویس، $K_s = M_s / \theta_s$ ، به عنوان شاخص ارزیابی سختی اتصال در نظر گرفته می شود. مطابق این شاخص ارزیابی، اگر در یک اتصال $K_s L / EI \geq 20$ باشد، اتصال مذکور به عنوان اتصال گیردار کامل (FR) از لحاظ سختی لحاظ می شود. از طرفی، اگر $K_s L / EI \leq 2$ باشد، اتصال مذکور به عنوان اتصال مفصلی لحاظ شده و قادر به ایجاد دوران؛ بدون تحمل لنگر قابل توجه خواهد بود.

با فرض مدول الاستیسیته 200000 N/mm^2 ، ممان اینرسی 3180000 mm^4 و طول تیر 4000 میلیمتر، مقدار پارامتر $EI/L = 15900000$ تعیین می شود. مطابق شکل (۲۱) در حالتی که لنگر تحت بارهای سرویس برابر لنگر پلاستیک تیر باشد، مقدار سختی سکانتی اتصال تحت بارهای سرویس با لنگر $14/57$ کیلو نیو تن-متر و دوران $0/0045$ رادیان برابر 323777778 (نیوتن-میلیمتر بر رادیان) خواهد بود که مقدار $K_s L / EI = 20.36$ را نتیجه می دهد. به عبارتی، اتصال مذکور جزء اتصالات گیردار کامل برای سازه پیشنهادی خواهد بود.

۳-۳- بررسی مقاومت اتصال پیشنهادی

همان گونه که در بخش مقدمه ذکر شد، به منظور بررسی مقاومت اتصالات از نمودار لنگر-دوران و ضوابط آیین نامه AISC360-16 استفاده می شود. مطابق این آیین نامه، اتصالاتی که حداکثر 20 درصد لنگر پلاستیک تیر متصل به آن را در دوران $0/02$ انتقال میدهند را می توان به عنوان اتصال مفصلی و بدون لنگر لحاظ نمود. مطابق شکل ۲۲ مشاهده می شود که اتصال مذکور توانایی تحمل کل لنگر پلاستیک تیر را داشته و جزء اتصالات گیردار از لحاظ مقاومتی (Full Strength) برای سازه پیشنهادی لحاظ خواهد شد.

شکل ۲۱. نمودار لنگر-دوران اتصال پیشنهادی

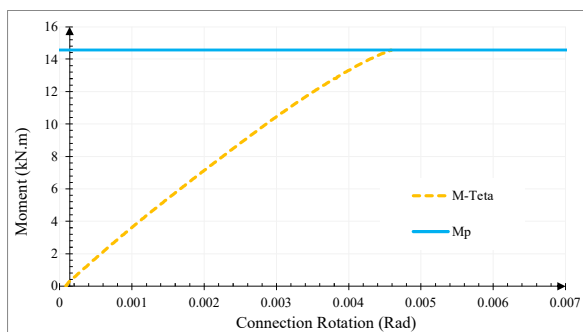


Fig. 21. Moment-rotation response of the proposed connection

شکل ۲۲. نمودار لنگر-دوران تیر

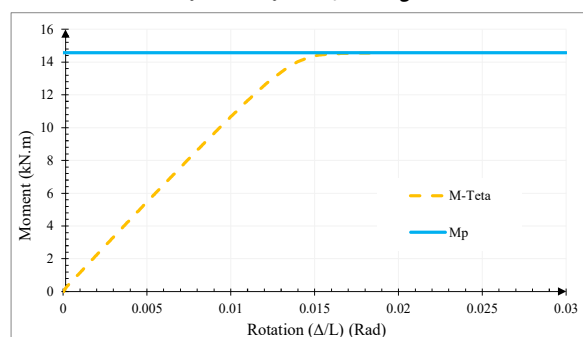


Fig. 22. Moment-rotation response of the beam

شکل ۲۳. نحوه تعیین دوران اتصال تحت لنگر خمشی

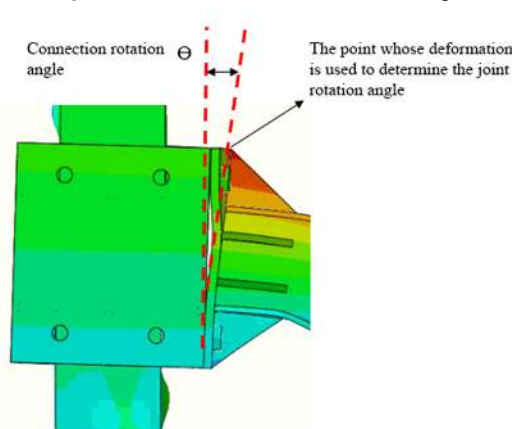


Fig. 23. The determination method of the connection rotation under bending moment

شکل ۲۴. مد خرابی اتصال پیشنهادی

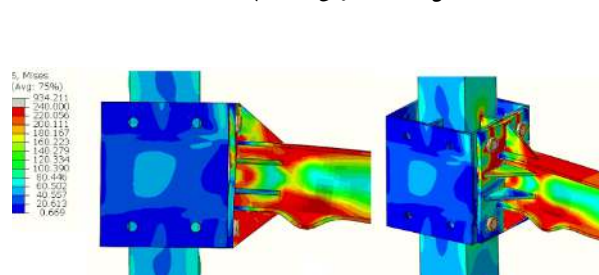


Fig. 24. The failure mode of the proposed connection

۴- نتیجه گیری

هدف اصلی مقاله حاضر، بررسی سختی خمشی و مقاومت اتصال پیشنهادی برای کاربرد در ساختمان سریع‌الاحداث پیشنهادی با قابلیت جمع و نصب مجدد بود. اتصال مذکور برای اتصال گیردار کامل تیر به ستون در یک قاب خمشی فولادی با شکل پذیری معمولی و با ابعاد دهانه‌های مذکور در مقاله حاضر ارائه شده است. برای دستیابی به اهداف پژوهش، از تحلیل غیرخطی در نرم افزار ABAQUS/6.14.2 استفاده شده و ارزیابی رفتار اتصال نیز مطابق ضوابط فصل B- بند ۴ آیین‌نامه فولاد آمریکا [۱۹] و روند منابع [20, 18-23, 12, 16] روند صورت گرفته است. نتایج مهم مقاله به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱- اتصال تیر به ستون پیشنهادی به عنوان یک اتصال گیردار کامل از لحاظ سختی برای سازه مدولار بررسی شده محسوب می‌شود که قابلیت حفظ زاویه اولیه اتصال در یک سیستم قاب خمشی را دارد.

۲- اتصال تیر به ستون پیشنهادی توانایی تحمل کل لنگر پلاستیک تیر متصل به آن را داشته و جزء اتصالات گیردار از لحاظ مقاومتی لحاظ خواهد شد.

۳- مقدار دوران مانند تغییر مکان نسبی طبقه در اتصال پیشنهادی حدود ۰/۰۲ است که برای یک اتصال با کاربرد قاب خمشی معمولی مناسب خواهد بود.

۵- منابع

- [4] Kari B., Ahmadi R. Light steel frame system, *Building and Housing Research Center*, Tehran. (In Persian).
- [5] Jaillon, L. and Poon, C.S., (2009). The evolution of prefabricated residential building systems in Hong Kong: A review of the public and the private sector. *Automation in construction*, 18(3), pp.239-248.
- [6] Dao, T.N. and van de Lindt, J.W., (2013). Seismic performance of an innovative light-frame cold-formed steel frame for midrise construction. *Journal of Structural Engineering*, 139(5), pp.837-848.
- [7] Chen, Z., Khan, K., Khan, A., Javed, K. and Liu, J., (2021). Exploration of the multidirectional stability and response of prefabricated volumetric modular steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 184, p.106826.
- [8] Lawson, P.M., Byfield, M.P., Popo-Ola, S.O. and Grubb, P.J., (2008). Robustness of light steel frames and modular construction. *Proceedings of the institution of civil engineers-structures and buildings*, 161(1), pp.3-16.
- [9] Hawxwell, D.A. and Tsavdaridis, K.D., (2019), June. Beam-to-beam eccentric end plate connections-Experimental comparison to fin plate and partial-depth end plate connections. In *Structures* (Vol. 19, pp. 411-423). Elsevier.
- [10] Jeyarajan, S., Liew, J.R. and Koh, C.G., (2015). Enhancing the robustness of steel-concrete composite buildings under column loss scenarios. *International Journal of Protective Structures*, 6(3), pp.529-550.
- [11] Velchev, K., Comeau, G., Balh, N. and Rogers, C.A., (2010). Evaluation of the AISI S213 seismic design procedures through testing of strap braced cold-formed steel walls. *Thin-Walled Structures*, 48(10-11), pp.846-856.
- [12] 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*, 70, pp.385-401.
- [13] Han, S.W., Moon, K.H., Hwang, S.H. and Stojadinovic, B., (2012). Rotation capacities of reduced beam section with bolted web (RBS-B) connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 70, pp.256-263.
- [14] 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*, 115, pp.417-433.
- [1] Ministry of Interior, Deputy for coordination of civil affairs. Comprehensive plan for crisis management, Volume i: Comprehensive explanatory report on the structure of the plan, tehran. (in persian).
- [2] Hosseini S. B. Design in the crisis of field medical centers, First edition, Foundation for the preservation of relics and publication of sacred defense values. (In Persian).
- [3] Nateghi Elahi F. Earthquake crisis management in super cities: With the approach of Tehran earthquake crisis management program, *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran. (In Persian).

- [26] Iran earthquake design regulation (Standard 2800 - Version 4). (In Persian)
- [27] Iran national building regulations, code 6 (Edition 1392). (In Persian)
- [28] ASCE 7, Minimum design loads for buildings and other structures [ASCE/SEI 7-16].
- [29] Gholhaki, M., Pachideh, G. and Javahertarash, A., 2020, August. Capacity spectrum of SPSW using pushover and energy method without need for calculation of target point. *Structures* (Vol. 26, pp. 516-523). Elsevier.
- [30] Gholhaki, M., Pachideh, G., Rezaeefar, O. and Ghazvini, S., 2019. Specification of response modification factor for steel plate shear wall by Incremental Dynamic Analysis Method [IDA], *Journal of Structural and Construction Engineering* 6 (2), 211-224. (In Persian)
- [31] AISC (2016), ANSI/AISC 358-16. Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications including supplement No. 1, *American Institute of Steel Construction, Inc.*, Chicago, IL.
- [32] Abaqus 6.14. (2017). ABAQUS analysis user's manual, ABAQUS Inc.
- [33] Broujerdian V., Mahyar P., Ghadami A. (2015). Effect of curvature and aspect ratio on shear resistance of unstiffened plates. *Journal of Constructional Steel Research*.112 (1) 263-270.
- [34] Amani M., Alinia M.M., Fadakar M. (2013). Imperfection sensitivity of slender/stocky metal plates. *Thin-Walled Structures*. 73 (1) 207-215.
- [35] Raquibul Hossain M., Ashraf M., Albermani F. (2011). Numerical modelling of yielding shear panel device for passive energy dissipation, *Thin-Walled Structures*. 49 (8) 1032-1044.
- [36] Broujerdian V., Ghamari A., Ghadami A. (2016). An investigation into crack and its growth on the seismic behavior of steel shear walls. *Thin-Walled Structures*. 101 (1) 205-212.
- [37] Gholhaki, M., Karimi, M. and Pachideh, G., (2019). Investigation of subpanel size effect on behavior factor of stiffened steel plate shear wall, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5 (4), 73-87. (In Persian)
- [15] 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*, 133, pp.360-373.
- [16] Faridmehr I., Tahir Mamood Md ., Lahmer T. (2016). Classification system for semi-rigid beam-to-column connections. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13 (11) 2152-2175.
- [17] Sadeghi, S.N., Heidarpour, A., Zhao, X.L. and Al-Mahaidi, R., (2018). A comparative numerical study on the innovative I-beam to thin-walled hybrid fabricated column connection. *Thin-Walled Structures*, 127, pp.235-258.
- [18] Zhang, X., Zheng, S. and Zhao, X., (2019). Seismic performance of steel beam-to-column moment connections with different structural forms. *Journal of Constructional Steel Research*, 158, pp.130-142.
- [19] ANSI/AISC 360-16. (2016). Specification for Structural Steel Buildings, American. Inst. Steel Constr. 1-612.
- [20] da-Silva J. G. S., de lima L. R. O., da S. Vellasco P.C.G., de Andrade S.A.L., de Castro R.A.(2008). Nonlinear Dynamic Analysis of Steel Portal Frames with SemiRigid Connections. *Engineering Structures*, 30 (9) 2566-2579.
- [21] Mirghaderi S. R., Dehghani Renani, (2008). The Rigid Seismic Connection of Continuous Beams to Column. *Journal of Constructional Steel Research*, 64 (12) 1516-1529.
- [22] Pirmoz A., Seyed Khoei A., Mohammadrezapour E., Saedi Daryan A. (2009). Moment-rotation behavior of bolted top-seat angle connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 65 (4) 973-984.
- [23] Wheeler A. T., Clarke, M. J., Hancock G. J. (2000). FE modeling of four-bolt, Tubular moment end-plate connections. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 126 (7) 816-822.
- [24] Iran national building regulations, code 10, (Edition 1392). (In Persian)
- [25] ANSI/AISC 341-10 2005 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (Including Supplement No. 1) Am. Inst. Steel Constr.

Numerical Investigation on the Seismic Behavior of Proposed Beam-to-Column Connection in Rapid-Construction Steel Structures with the Assemble and Disassemble Abilities

Seyed Hamed Khalilpour¹, Rouhollah Amirabadi²

1. PhD Candidate, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran

h.khalilpour@stu.qom.ac.ir

Abstract

The importance of some factors, including providing temporary and permanent habitation, construction speed, increasing the material strength and decreasing the construction cost, have made the attention to choice of vertical and lateral load-bearing systems as one of the necessities of the construction industry in the event of natural disasters such as floods and earthquakes. The need for any building in any area depends on a variety of conditions that may arise at one time and disappear at another. In this study, for the first time in Iran, firstly, a rapid-fabricated steel structure with both temporary and permanent habitation ability, and the capability of moving, assembling and disassembling is introduced, and then the seismic behavior of its beam-to-column connection is evaluated for using in ordinary steel moment frames. In order to evaluate the three characteristics of stiffness, strength and ductility of the proposed connection, nonlinear analysis is done using ABAQUS/6.14.2 software, and the evaluation of the seismic behavior of the connection is conducted in accordance with the criterias of chapter B of ANSI/AISC 360-16. According to the results, section properties and length of the beam, end-plate thickness, location and diameter of the bolts, and the location of the stiffeners on the end-plate are the effective parameters on the stiffness and strength of the proposed connection. Among all parameters, end-plate thickness and diameter of the bolts are two important factors that mostly affect the stiffness of the connection. Investigations show that the proposed connection, by having the sufficient stiffness and strength, is able to withstand the entire plastic moment capacity of the beam. Also, the plastic hinge is occurred outside of the connection region and the final failure mode of the system is the plastic local buckling of the compression flange of the beam. The mentioned abilities make it possible to use the proposed beam-to-column connection in ordinary moment frames as a fully restrained and fully strength connection.

Keywords: Pre-fabricated structure; Steel connection; Assemble and Disassemble; Temporary and permanent habitation; Portability