



راهکارهایی برای بهبود اتصالات ساده پیچی در برابر خرابی پیشرونده ناشی از حذف ستون

مژده شیرین زاده^{۱*}، عباس حق اللهی^۲

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۲- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۳۶-۱۶۷۸۵، mojdeh.shirinzadeh@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۶/۰۲/۱۵، تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۴/۱۵)

چکیده

امروزه پیرو بحث پدافند غیرعامل با افزایش احتمال حملات تروریستی و یا وقوع انفجارهای خرابکارانه نیاز به بررسی ساختمان‌های استراتژیک موجود در برابر پدیده خرابی پیشرونده بیش از پیش احساس می‌شود. در این مورد پتانسیل خرابی پیشرونده در سازه‌های فولادی با اتصالات ساده بسیار بیشتر از سایر سیستم‌های سازه‌ای و نتایج وقوع آن بسیار مخرب تر خواهد بود. لذا در این مقاله پتانسیل خرابی پیشرونده در اتصالات ساده پیچی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این تحقیق ارائه راهکارهایی برای بهبود و تقویت اتصالات ساده پیچی در برابر خرابی پیشرونده ناشی از حذف ناگهانی ستون می‌باشد. برای این منظور، میزان دوران مجاز اتصال ارزیابی شده است. راهکارهای ارائه شده به نحوی در نظر گرفته شده است که سختی و گیرداری اتصال را افزایش ندهد و موجب تغییرات زیاد در مقدار و نوع بار وارده به سایر اعضا نگردد. اتصالات پیچی ساده شامل اتصال تیر به ستون با دابل نبشی جان به عنوان اتصال پایه و شش اتصال پیچی دیگر است که از توسعه اتصال پایه بدست آمده‌اند. نتایج بررسی نشان می‌دهد که بکارگیری کابل به صورت پیشنهاد شده در اتصالات ساده منجر به بهبود در عملکرد اتصالات می‌شود به طوری که تکنیک بکار گرفته شده تغییر مکان قائم اتصالات را در حدود ۵۰٪ کاهش می‌دهد. این مطالعه همچنین روش‌های دیگری را پیشنهاد می‌کند که بدون نیاز به سختی و پیچیدگی زیاد تاثیرگذاری بسیار چشمگیری در این زمینه دارند.

واژگان کلیدی

خرابی پیشرونده، آنالیز دینامیکی، روش اجزای محدود، اتصال ساده

Improvement of Bolted Simple Connections Against Progressive Collapse Caused by Column Removal

M. Shirinzadeh, A. Haghollahi

Abstract

Nowadays, investigation of probability of progressive collapse occurrence in the strategic structures is much more essential than the past by increasing the terrorist attacks and explosions. Potential of the progressive collapse in steel structures with simple connection is more than the other structural systems and results of the occurrence is more destroyer. Therefore, potential of the progressive collapse of simple bolted connections is investigated numerically in this research. Several solutions are proposed for retrofitting the existing simple connections to resist the progressive collapse in case of sudden column removal. In order to investigate potential of the collapse, rotation of the connections is compared with the allowable amount. The proposed methods do not increase hardness and rigidity of the connections, and they almost do not change the size or type of the loads to the other members. The Simple bolted connections include beam-to-column connection with double web angles is considered as a base connection, and there are six other connections that are developed from the base connection. Results present that use of tendons in the connections shows considerable improvement in performance of the models, such that the proposed techniques reduce the vertical displacement of the connection up to 50%. This study also suggests highly effective techniques improve connection behavior results without needing lots of effort.

Keywords

Progressive collapse, Dynamic analysis, Finite element method, Simple connection



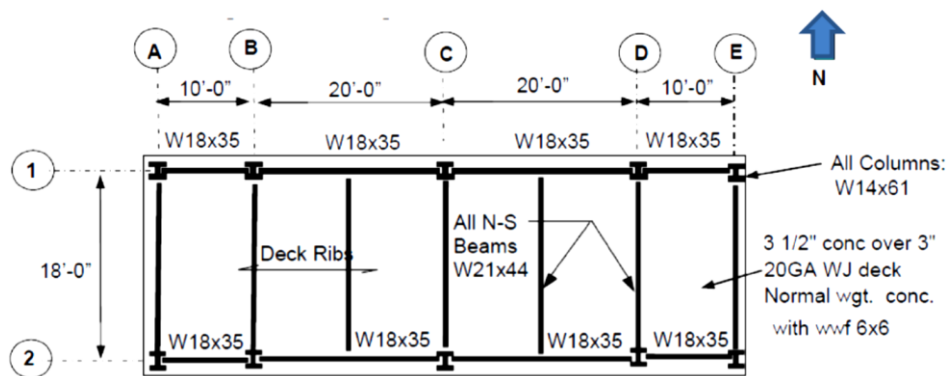
پدیده خرابی پیشرونده توسعه خرابی محلی، از یک المان به المان دیگر است که موجب خرابی ناگهانی کل یا خرابی نامتناسب قسمت بزرگی از سازه می‌شود. در این تحقیق سعی شده است به بررسی دقیق‌تر آسیب پذیرین نوع سیستم سازه‌ای در مقابل انهدام پیشرونده یعنی سیستم سازه‌ای فولادی با اتصالات ساده پرداخته شود. آیین نامه ۲۸۰۰ ایران [۱] استفاده از این سیستم سازه‌ای را تا ارتفاع ۵۰ متر مجاز دانسته است، و هم اکنون بسیاری از ساختمان‌های کوتاه و متوسط با درجه اهمیت زیاد در کشورمان با استفاده از این سیستم طراحی و ساخته شده‌اند. در ساختمان‌هایی که دارای اتصالات مفصلی هستند، در صورت از دست رفتن ناگهانی یکی از ستون‌ها، تیرهای متصل به آن ستون بلافاصله فرو خواهند ریخت و حتی قادر به تحمل وزن خود نمی‌باشند. این سیستم سازه‌ای که به نسبت دارای کمترین درجه نامعینی است بشدت به از دست دادن المان‌های سازه ای مخصوصاً از دست دادن ستون حساس می‌باشد. همچنین با توجه به بحث پدافند غیر عامل و اهداف آن، از جمله کاستن آسیب پذیری نیروی انسانی و تاسیسات و تجهیزات مهم کشور طی حملات مخرب دشمن و استمرار فعالیت‌های حیاتی، نیاز به طراحی مقاوم سازه‌های مهم در برابر انفجار بیش از پیش احساس می‌شود. برای رسیدن به این مهم، طراحی اتصالات به طوریکه در شرایط قطع مسیر انتقال بار قادر به انتقال نیرو از مسیرهای دیگر گردد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

اولین بار پس از واژگونی ساختمان ۲۲ طبقه در رونان پوینت^۱ لندن در سال ۱۹۶۸ پدیده خرابی پیشرونده مورد توجه مهندسان سازه قرار گرفت [۲]. خرابی این ساختمان که بر اثر انفجار گاز در یکی از واحد های طبقه ۱۸م رخ داد منجر به وضع مقررات ساختمانی بریتانیا [۳] برای جلوگیری از خرابی نامتناسب در سازه‌ها گردید. در سال ۱۹۹۵، با انفجار بمب در مقابل ساختمان آلفرد پی مورا^۲ و انهدام ساختمان تجارت جهانی در سال ۲۰۰۱ تحقیقات در این راستا با سرعت بیشتری انجام گرفت. Corley و همکارانش [۴] در سال ۱۹۹۸ عملکرد ساختمان آلفردمورا را در برابر انفجار ارزیابی کردند. در این تحقیق استفاده از سیستم قاب خمشی ویژه نسبت به قاب خمشی معمولی برای مقابله با خرابی پیشرونده ناشی از انفجار موثر تر اعلام شد. در سال ۲۰۰۲ نیز کار آزمایشگاهی توسط

Popov و همکارانش بر روی نمونه های اتصال سپری پیچی انجام شد [۵].

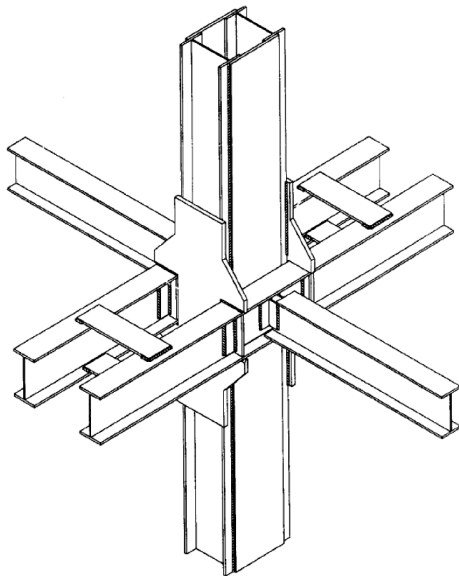
نتایج نشان دهنده استهلاک انرژی مناسب این نوع اتصالات بود. دیتیل اجرایی معرفی شده نیز مناسب در ممانعت از کمانش بال و جان تیر معرفی گردید. در سال ۲۰۰۵، Sabuwala و همکارانش [۶] با مدل‌سازی اتصالات صلب تیر به ستون در نرم افزار Abaqus [۷] کفایت معیارهای ذکر شده در آیین نامه TM5-1300 [۸] را مورد بررسی قرار دادند و نقاط بحرانی این اتصالات را در برابر بار انفجار مشخص کردند. نتایج مدل‌های اجزای محدود نشان داد که معیارهای آیین نامه ذکر شده کفایت نمی‌کند. آستانه اصل در یک کار آزمایشگاهی که در دانشگاه برکلی کالیفرنیا انجام گرفت به بررسی یک نمونه قاب فولادی با اتصالات ساده تیر به ستون و یک دال کامپوزیت پرداخت [۹ و ۱۰] (شکل ۱). اتصالات ساده بررسی شده در این آزمایش به صورت نبشی نشیمن بولت شده به علاوه یک نبشی بولت شده به جان لحاظ گردید. مهمترین هدف در این تحقیق بررسی مقاومت این سیستم در مقابل خرابی پیشرونده در حالت حذف ستون بیان شد. در این آزمایش در سمت شمالی نمونه که قاب فولادی مشابه داشت کابل های کششی داخلی برای بررسی عملکرد زنجیره‌ای^۳ کف در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که به دنبال حذف ستون، ظرفیت نهایی سازه و در نتیجه توان تحمل باربری کششی محوری اتصال تیر به ستون محدود است. عملکرد کششی تیرها با عرشه فولادی برای جلوگیری از خرابی پیشرونده مناسب دیده شد. همچنین گفته شد که اگر اتصال بولتی در کشش نشکند بار کششی بیشتری توسط تیر می‌تواند تحمل کند که منجر به مقاومت در مقابل نیروی عمودی بزرگ‌تری از ستون حذف شده می‌گردد. نتایج آزمایش بر روی قاب شمالی نمونه که دارای کابل‌های کششی بود عملکرد مناسب آن را نشان داد، آسیب ناشی از شکستن دو بولت از چهار بولت اتصال به نبشی نشیمن محدود شد و ترک‌های ریز در دال و کمانش جانبی جان تیر نیز کمتر دیده شد. نبشی نشیمن بولت شده خوب عمل کرد. در طول اولین آزمایش دو بولت در ردیف بالا در نوار عمودی نبشی شکستند و وقتی بار ستون افزایش پیدا کرد دو بولت در ردیف پایین نیز شکستند. در این حال تک نبشی جان به عنوان تنها المان برشی در اتصال باقی ماند.





شکل ۱- پلان نمونه کار شده توسط Astaneh-Asl [۹]

عملکرد آن را در برابر بارهای لرزه‌ای و خرابی پیشرونده بررسی کردند. در این تحقیق عملکرد لرزه‌ای اتصال پیشنهادی مذکور (شکل ۲) براساس زاویه تغییرمکان بین طبقه ای و مقاومت خمشی طبق ضوابط AISC2010 [۱۶] و خرابی پیشرونده براساس ضابطه ظرفیت چرخشی اتصالات در آیین نامه UFC4-023-03 [۱۷] ارزیابی شد. نتایج نشان داد که اتصال پیشنهادی قادر به رسیدن به ظرفیت چرخشی و توسعه ظرفیت غیر الاستیک در تیر می‌باشد. همچنین، رفتار سیکیلیک بسیار مناسبی از این اتصال گزارش شد. در نهایت گفته شد که این اتصال می‌تواند در گروه اتصالات انعطاف پذیر و با مقاومت قرار گیرد.



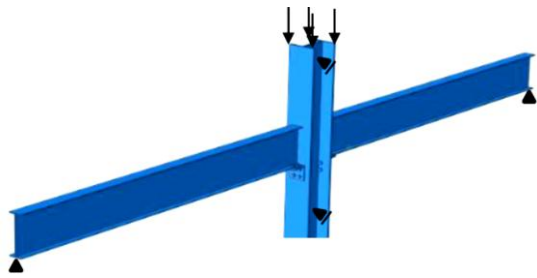
شکل ۲- اتصال فولادی پیشنهادی توسط Faridmehr و

همکارانش [۱۴]

در سال ۲۰۱۶ Wang و همکارانش [۱۸] عملکرد اتصال تیر به ستون باکس را در برابر خرابی پیشرونده مورد بررسی قرار

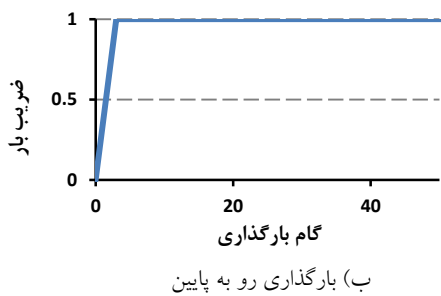
Khandelwal و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۰۸ مقاله‌ای با عنوان بررسی فروپاشی پیشرونده در قابهای فولادی لرزه‌ای مهاربندی شده ارائه دادند. در این تحقیق دو مدل از سیستم ساختمانی مورد بررسی قرار گرفت. ساختمان ده طبقه با مهاربند واگرا در منطقه با خطر لرزه‌ای زیاد و ساختمانی مشابه با مهاربند همگرای ویژه در منطقه با خطر لرزه‌ای متوسط. سپس سناریوهای مختلف برداشت برای هر دو قاب EBF و SCBF انجام و عملکرد آنها با هم مقایسه شد. نتایج نشان دادند قاب‌هایی که بر اساس ضوابط لرزه‌ای طراحی شده‌اند نسبت به قاب‌های غیرلرزه‌ای دارای عملکرد بهتری در برابر فروپاشی پیش رونده می‌باشند به طوریکه هیچکدام از آنها دچار خرابی پیشرونده نشدند. همچنین نتایج حاکی از آن بود که قاب‌های EBF که فاقد ستون ثقلی در پیرامون سازه بودند نسبت به قاب SCBF عملکرد بهتری در مقابل انهدام پیشرونده دارند. در سال ۲۰۱۱، Urgessa و همکارش طی یک تحقیق عددی سه نوع اتصال فولادی (اتصال استاندارد، TA و SideplateTM) را در برابر انفجار مورد بررسی قرار داد [۱۲]. نتایج نشان داد که اتصال با ورق کناری (SideplateTM) در مقایسه با سایر اتصالات رفتار مناسب‌تری دارد. در سال ۲۰۱۴، Manaloor بررسی مقاومت اتصالات در سازه‌های فولادی در برابر خرابی پیشرونده پرداخت [۱۳]. این کار که با نرم افزار اجزای محدود انجام شد شرایط گسیختگی اتصال تیر به ستون با نبشی بالا و پایین بولت شده را بررسی کرد. نتایج نشان دهنده رفتار انعطاف پذیر این اتصال بود. این اتصال در مقابل بارهای افقی زیاد بسیار مقاوم دیده شد که می‌تواند به راحتی با استفاده از عملکرد زنجیره‌ای در مقابل خرابی پیشرونده مقاومت کند. همچنین استفاده از سخت کننده در چشمه اتصال ستون برای بهبود عملکرد اتصال پیشنهاد گردید. در سال ۲۰۱۵، Faridmehr و همکارانش [۱۴ و ۱۵] یک نوع اتصال فولادی پیشنهاد و

کلی از این اتصالات و نحوه قیدهای تکیه گاهی در نظر گرفته شده و محل اعمال بار را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمای کلی از مدل (شرایط بارگذاری و قیدهای تکیه گاهی)

تکیه گاه غلتکی در بالا و پایین ستون و به منظور جلوگیری از چرخش کلی ستون در نظر گرفته شده است. تکیه گاه مفصلی برای جلوگیری از تغییر مکان قائم و افقی در انتهای تیرها قرار داده شد. بار هشت تنی در بالای ستون به صورت نشان داده شده (چهار بار نقطه‌ای ۲ تنی) به گونه‌ای لحاظ شد که حذف ستون در ثانیه اول از بارگذاری اتفاق بیفتد. برای این منظور در نرم افزار دو دامنه بارگذاری تعریف گردید. یکی که از زمان صفر شروع و ظرف مدت یک ثانیه (یک گام بارگذاری) به بیشینه مقدار خود می‌رسد و پس از آن تا پایان تحلیل ادامه دارد و دیگری که از زمان صفر شروع و تا ثانیه یک به بیشینه مقدار خود می‌رسد و یک صدم ثانیه پس از آن به طور ناگهانی مقدار آن مجدداً صفر می‌شود. بارگذاری رو به پایین (جهت اعمال بار رو به پایین) برای دامنه بار اول و بارگذاری رو به بالا (جهت اعمال بار رو به بالا) برای دامنه بار دوم در نظر گرفته شد. شکل (۴) دامنه‌های بارگذاری توصیف شده را نشان می‌دهد. مقدار بار ۸ تن برای تمامی مدل‌ها در نظر گرفته شد. میزان بار وارده بر ستون، طول دهانه و ابعاد تیر و ستون از مدل نرم افزاری یک ساختمان ده طبقه موجود که براساس آیین نامه‌های جاری در کشور ایران طراحی شده است، انتخاب گردید. ابعاد تیر و ستون و میزان بار ستون مربوط به طبقه دهم می‌باشد.

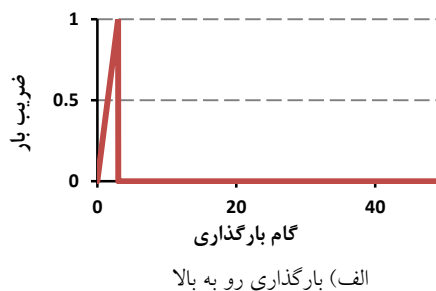


دادند. سه نوع اتصال و سه آزمایش مقیاس کامل روی قاب دو دهانه در معرض حذف ستون میانی انجام گرفت. اتصال بال جوش شده-جان جوش شده با دیافراگم داخلی، اتصال بال جوش شده-جان بولت شده با دیافراگم داخلی و اتصال بال جوش شده-جان بولت شده با دیافراگم عبوری سه نوع اتصال بررسی شده در این تحقیق است. مدل اجزای محدود برای انجام بحث های بیشتر نیز در نظر گرفته شد. نتایج نرم افزاری و آزمایشگاهی نشان دهنده انعطاف پذیری مناسب اتصالات در نظر گرفته شده بود. اگر چه اتصال با دیافراگم عبوری کمترین میزان انعطاف پذیری را در مقابل شروع گسیختگی در نتیجه توزیع نامتقارن تنش در بال تیر نشان داد. نتایج تحلیل نشان داد که وقتی سناریو حذف ناگهانی ستون اتفاق می افتد خرابی پیشرونده ممکن است بر اثر شکستگی اولیه بال پایین تیر در تمام نمونه‌ها اتفاق بیافتد.

در تحقیق حاضر، با مدل سازی اتصالات ساده فولادی با نبشی نشیمن از یک قاب مهاربندی شده به بررسی نقاط ضعف این اتصالات در مقابل خرابی پیشرونده پرداخته شده است. از آنجایی که مبحث بیست و یکم مقررات ملی ساختمان [۱۹] تنها شامل ساختمان‌های جدید در دست احداث می‌باشد لذا سعی شده است علاوه بر ساختمان‌های جدید، راهکارهایی برای بهبود و تقویت ساختمان‌های مهم و استراتژیک موجود دارای دهانه‌هایی با اتصالات ساده ارائه شود. عملکرد اتصالات با ضابطه ظرفیت چرخش پلاستیک اتصالات در آیین نامه UFC4-023-03 [۱۷] ارزیابی شد. طبق این ضابطه، زاویه چرخش پلاستیک اعضای منتهی به این نوع اتصال حداکثر به ۰/۱۱۲۵ رادیان محدود می‌شود.

۲- مدل‌های اجزای محدود

اتصالات ساده با نبشی نشیمن رایج ترین نوع اتصال ساده در کشورمان می‌باشد، لذا سعی شده است طرح‌های پیشنهادی در راستای تقویت این مدل از اتصالات ساده باشد. شکل (۳) نمای



شکل ۴- بارگذاری مربوط به شبیه سازی حذف ناگهانی ستون

مش بندی با تکنیک structured انجام شد و نوع المان solid هشت گره‌ای خطی با نام C3D8R لحاظ گردید. آنالیز دینامیکی explicit برای تحلیل مدل‌ها در نظر گرفته شد و از معیار گسیختگی فون میزز برای بررسی اتصالات‌ها استفاده شده است. در اطلاعات داده شده به نرم افزار برای نیرو واحد کیلوگرم و برای ابعاد میلی‌متر لحاظ شده است. لذا واحد تنش فون میزز کیلوگرم نیرو بر میلی‌متر مربع می‌باشد.

اتصالات پیشنهادی شامل اتصال ساده با دوپل نبشی جان (مدل یک)، اتصال ساده با نبشی نشیمن (مدل دو)، اتصال ساده با نبشی نشیمن بعلاوه دوپل نبشی جان (مدل سه)، اتصال ساده با نبشی نشیمن بعلاوه دوپل نبشی جان کابل کششی (مدل چهار)، اتصال ساده با نبشی دوپل جان و نبشی نشیمن بعلاوه دستک‌هایی در دو طرف اتصال (مدل پنج) و اتصال ساده با نبشی نشیمن و سه ردیف کابل کششی در دو طرف جان تیر که به صورت سرتاسری در طول دهانه اول تا آخر کشیده شده است (مدل شش) به نحوی که در شکل (۵) نمایش داده شده است، می‌باشد. مدل هفت کاملاً مشابه مدل دو می‌باشد بعلاوه دو عدد کابل عمودی که در هر طرف اتصال (شکل (۵-ز)) امتداد می‌یابد. یک طرف از کابل‌های عمودی در این مدل به بال‌های تیر در هر طبقه متصل می‌شود و سمت دیگر به یک خرپا در تراز بالای سازه متصل می‌گردد. در این تحقیق خرابی ذکر شده با توجه به شرایط بارگذاری طبقات و ابعاد قاب طراحی شده است و به صورت شکل (۶) می‌باشد. تمامی اعضای خرپا دارای مقطع باکس $10 \times 10 \times 10$ میلی‌متر است به طوریکه بتواند بار ثقلی ده طبقه را بدون اینکه وارد مرحله پلاستیک شود تحمل کند. سختی این خرپا در حالتی که بار در گره وسط وارد می‌شود، محاسبه گردید. در مدل اجزای محدود (مدل هفت) چهار فنر انتهای کابل‌های عمودی را به یک صفحه صلب ثابت متصل می‌کند که سختی خرابی تعریف شده به این فنرها اختصاص داده شد (شکل (۷)). عملکرد تمامی مدل‌های معرفی شده در بالا به غیر از مدل هفت می‌تواند در حالیکه تنها بار یک طبقه را تحمل می‌کنند بررسی شود، زیرا افزایش تعداد طبقات در عملکرد آنها تاثیر بسیار ناچیزی خواهد داشت. ولیکن عملکرد مدل هفت به تعداد طبقات، مشخصات خرپا، سازه و تعداد کابل کششی عمودی وابسته است. با ثابت در نظر گرفتن تعداد و سازه کابل و مشخصات خرپا به صورت معرفی شده، تعداد طبقات ده طبقه لحاظ گردید. لذا عملکرد مدل هفت در حالیکه بار ده طبقه را تحمل می‌کند بررسی شده است. در راهکارهای ارائه شده برای بهبود اتصالات ساده، استفاده از

دستک در زیر تیر (مدل پنج) درصد کمی گیرداری اتصال را افزایش می‌دهد ولیکن از آنجاییکه سختی سیستم مهاربندی بسیار زیاد است عملاً تغییر چندانی در نوع انتقال نیروها نخواهد داشت. مشخصات مقاطع استفاده شده در جدول (۱) آمده است. در این جدول سازه نبشی نشیمن و نبشی جان مطابق با آنچه در ساختمان موجود طراحی و ساخته شده است می‌باشد. نوع فولاد مشابه مشخصات فولاد st37 در نظر گرفته شد. لذا در نرم افزار اجزای محدود Abaqus برای مشخصات مکانیکی مقاطع فولادی تنش و کرنش تسلیم به ترتیب برابر ۲۴۰ مگاپاسکال و ۱/۵ درصد و تنش و کرنش نهایی به ترتیب برابر ۳۷۰ مگاپاسکال و ۲۰ درصد معرفی گردید.

جدول ۱- مشخصات مقاطع استفاده شده

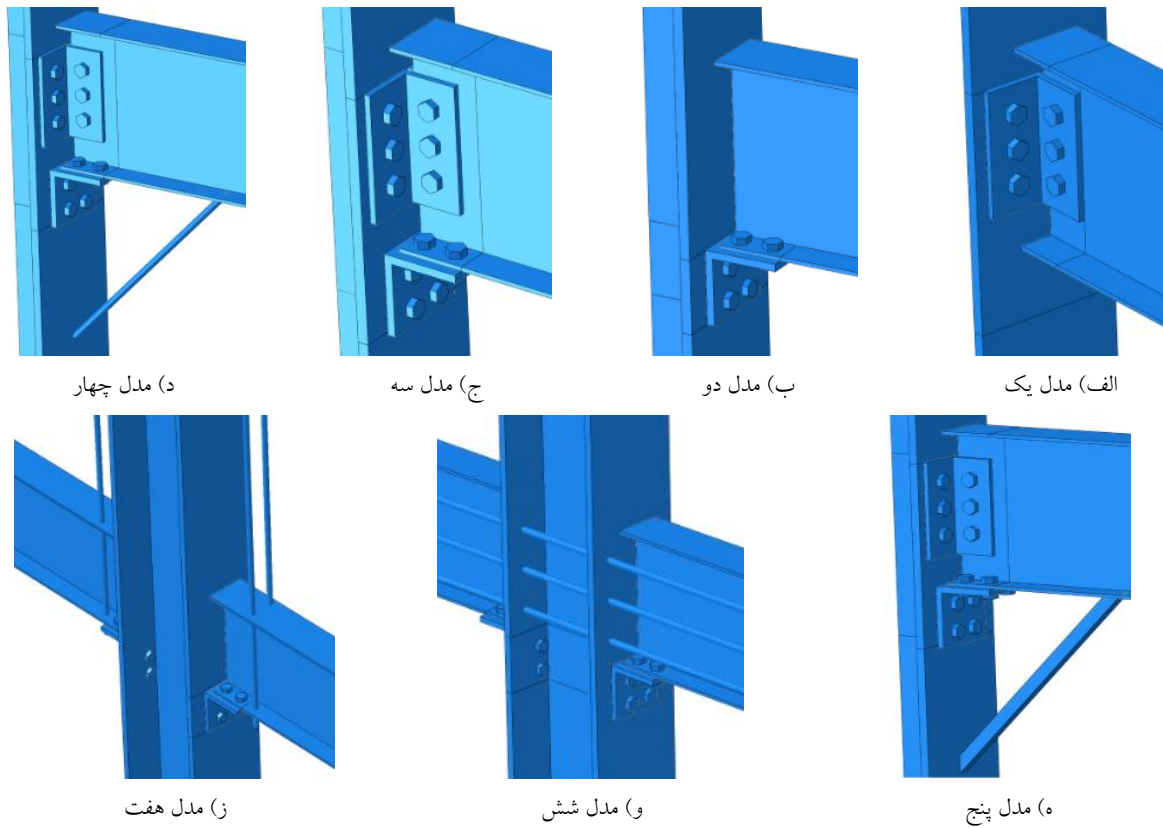
اعضای اتصال	بال (mm)	جان (mm)	طول (mm)
تیر (I-SHAPED)	۱۴۰×۱۰	۳۸۰×۱۰	۴۰۰۰
ستون (IPB360)	۳۰۰×۲۲/۵	۳۱۵×۱۲/۵	---
WEB ANGLE	L۱۲۰×۱۲۰×۱۲	---	۲۵۰
BOT. ANGLE	L۱۶۰×۱۶۰×۱۵	---	۱۶۰
BOX (Under beams)	۵۰×۵۰×۴	---	۵۰۰

در تمامی مدل‌ها بولت نمره ۲۰ از نوع A325، طبق آنچه در ساختمان موجود طراحی و اجرا شده بود در نظر گرفته شد. کابل از نوع ASTM A416Gr270 با تنش تسلیم برابر ۱۷۲۰ مگا پاسکال، تنش نهایی برابر ۱۸۹۰ مگاپاسکال، با قطر ۱۷/۵ و طول ۵۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. مشخصات کابل بگونه‌ای لحاظ گردید که در طول تحلیل در حالت الاستیک باقی بماند.

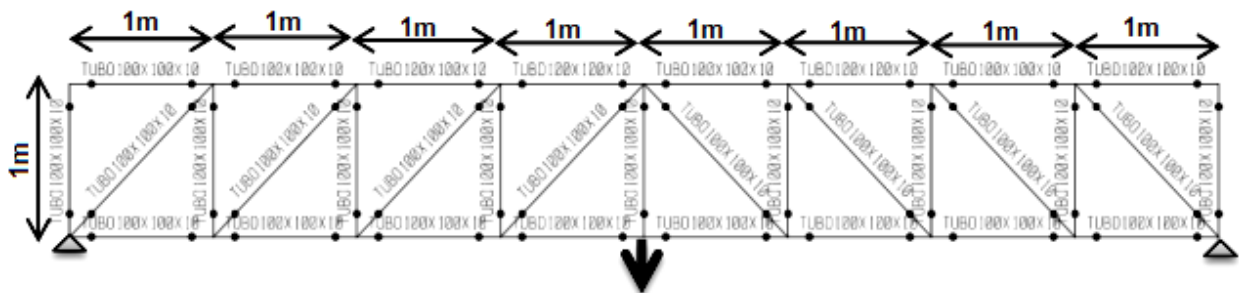
۳- اعتبار سنجی مدل اجزای محدود

به منظور اعتبار سنجی از شیوه مدل سازی از نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی که توسط Astaneh و همکارانش [۲۰] در سال ۱۹۹۸ انجام داده‌اند، استفاده شده است. جزئیات اتصال سه بولته (CST connection) انجام شده توسط Astaneh و همکارانش [۲۰] در جدول (۲) آمده است. نتایج این تحقیق به واحد SI تغییر یافته است. تمامی بولت‌ها نمره ۲۰ و از نوع A325 و بعد جوش ۶ میلی‌متر می‌باشد. در این تحقیق آزمایشگاهی فولاد از نوع ASTM A36 برای اعضای فولادی در



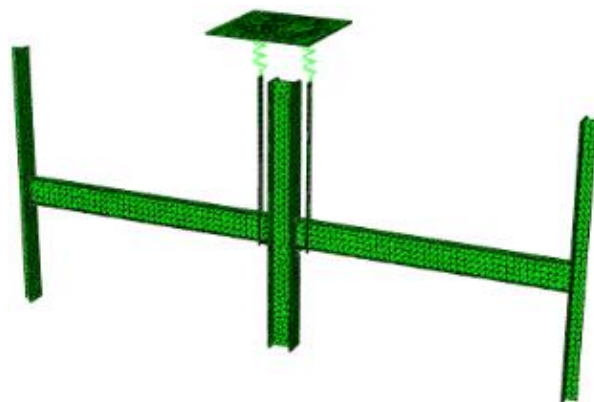


شکل ۵- نمایی از اتصالات مدل شده



شکل ۶- نمایی از خرپای دو بعدی، مقاطع اعضا و ابعاد

نظر گرفته شده است. بارگذاری نمونه آزمایشگاهی توسط دو محرک، یکی در محل اتصال (محرک کنترل نیرو) و دیگری در انتهای تیر (محرک کنترل تغییرمکان) انجام گرفت. بدین ترتیب که محرک کنترل-نیرو برشی را وارد و همزمان محرک کنترل-تغییر مکان زاویه چرخش اتصال را به صورت مطلوب کنترل می‌کند. جزئیات بیشتر در مرجع [۲۰] در دسترس است. از آنجاییکه مدل و بارگذاری متقارن است فقط نیمی از آن مدل سازی شد. شکل (۸) نحوه شکست در مدل اجزای محدود و نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. تغییر شکل بولت‌ها و نحوه گسیختگی برشی به صورت مشابه اتفاق افتاده است. گسیختگی اتصال در نمونه آزمایشگاهی با شکست خط جوش پلیت و

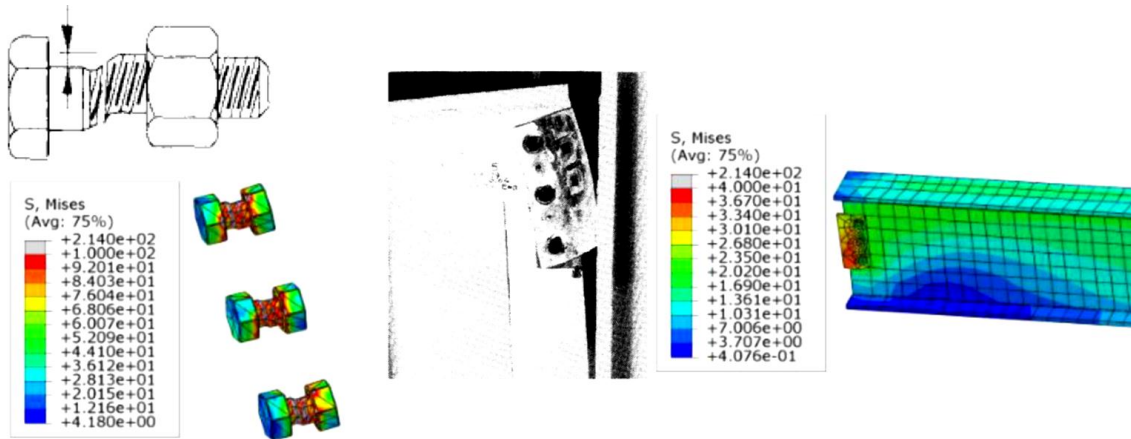


شکل ۷- نمایی از مدل هفت

پلیت جان			اتصال سه بولته	
d (mm)	L (mm)	t (mm)	طول (mm)	اندازه تیر
۲۲۸/۶	۱۰۸	۹/۵	۳	W1۸x۵۵

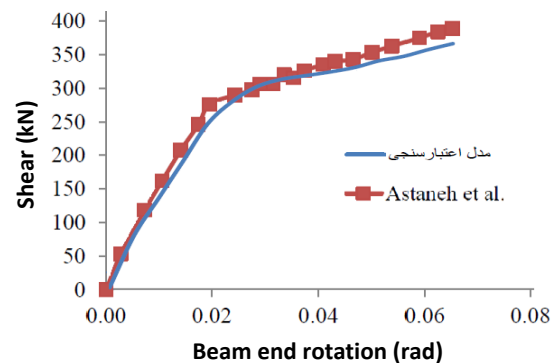
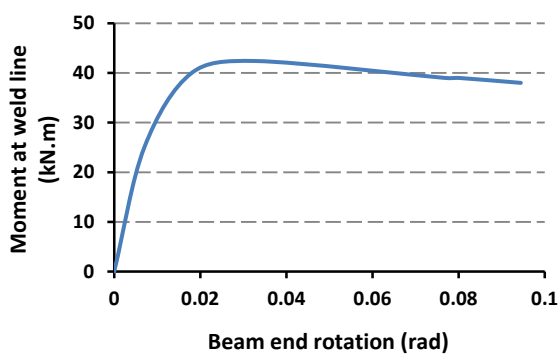
جاری شدن بولت اتفاق می افتد که شکل (۸) کانتور تنش این مدل، شکست برشی در بولت را به وضوح نشان می دهد. شکل (۹) منحنی تنش به دوران انتهای تیر نمونه آزمایشگاهی CST و مدل اعتبارسنجی را نشان می دهد.

جدول ۲- مشخصات مقاطع استفاده شده در نمونه آزمایشگاهی Astaneh و همکارانش [۲۰]



شکل ۸- مقایسه نحوه شکست نمونه آزمایشگاهی CST [۲۰] و مدل اعتبارسنجی

۴۲ کیلونیوتن متر در مدل اعتبارسنجی اتفاق می افتد که نسبت به



شکل ۹- مقایسه ای از منحنی برش-دوران تیر نمونه آزمایشگاهی انجام شده توسط Astaneh و همکارانش [۲۰] و مدل اعتبارسنجی

شکل ۱۰- منحنی ممان در خط جوش-دوران انتهای تیر مدل اعتبارسنجی

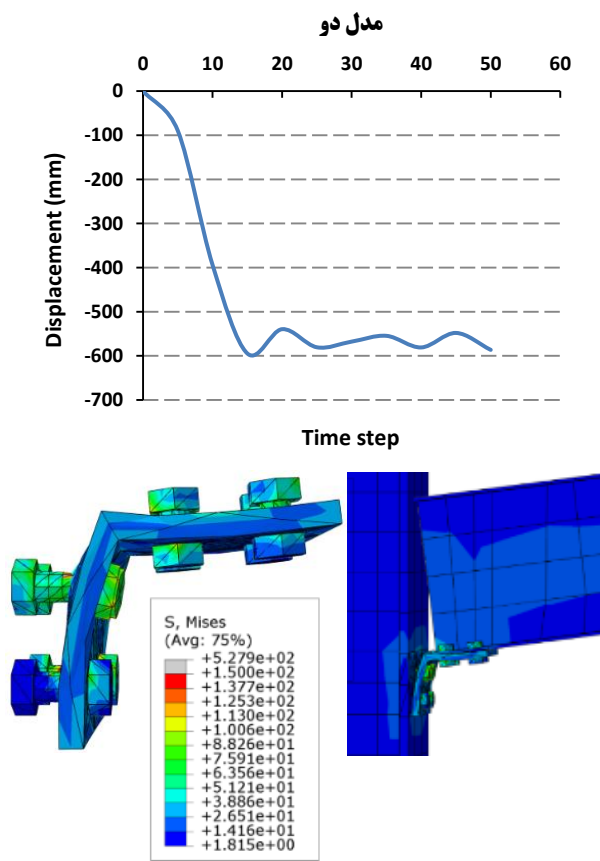
نمونه آزمایشگاهی Astaneh که ماکزیمم ممان حدود ۳۹/۵ کیلونیوتن-متر را تجربه کرده است حدود ۶ درصد اختلاف دارد.

۴- بررسی نتایج تحلیل

شکل (۱۱) نمودار تغییر مکان-زمان مربوط به مدل های اجزای محدود را نشان می دهد. تغییر مکان مربوط به نقطه مرکزی تیر در محل اتصال به ستون می باشد. مقایسه کلی نمودارها

در ناحیه خطی انطباق بسیار خوبی بین دو منحنی وجود دارد و هر دو منحنی تقریباً تا نیروی برشی ۲۶۰ کیلونیوتن با دوران انتهای تیر حدود ۰/۰۱۶۵ رادیان رفتار الاستیک داشته اند. رفتار نسبتاً مشابهی بین دو منحنی پس از نقطه تسلیم دیده می شود هرچند مدل اعتبارسنجی در دوران و نیروی برشی کمتری از نمونه آزمایشگاهی گسیخته می گردد. درصد اختلاف حداکثر یک درصد بین نمونه آزمایشگاهی و مدل تحلیلی بسیار مناسب و قابل قبول می باشد. شکل (۱۰) ممان در خط جوش پلیت را براساس دوران انتهای تیر نشان می دهد. ماکزیمم ممان

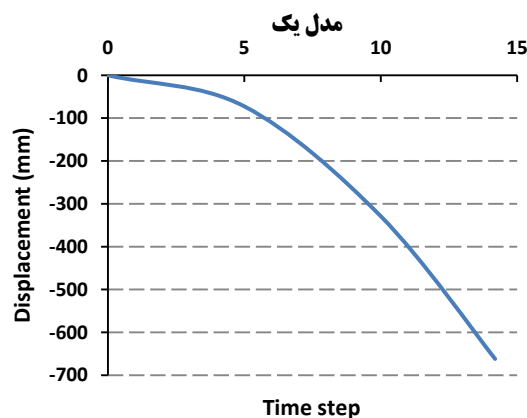
را اقا کند. منحنی تغییر مکان-زمان این مدل نشان می‌دهد که پس از سقوط قائم به میزان ۵۸ سانتیمتر اتصال به حالت پایدار می‌رسد. نبشی نشیمن و بولت‌های اتصال آن تقریباً در جابجایی حدود ۵۰۰ میلی‌متر و در زمان حدود ۱۰ ثانیه به طور کامل پلاستیک شدند. همانطور که شکل (۱۲) نشان می‌دهد بولت‌های اتصال قائم نبشی در ردیف بالا زودتر از سایر بولت‌ها به صورت پلاستیک در آمدند.



شکل ۱۲- نمودار تغییر مکان-زمان مدل دو، منحنی تنش و تغییر شکل نهایی اتصال

مدل سه شامل نبشی نشیمن و دوپل نبشی جان، پس از حذف ناگهانی ستون، حدود ۴۵ سانتیمتر تغییر مکان قائم را تجربه کرد. همانطور که شکل (۱۳) نشان می‌دهد منحنی تغییر مکان-زمان برای این اتصال پس از حدود ۴۵ سانتیمتر سقوط به حالت پایدار می‌رسد. بررسی تغییرات تنش در مدل نشان می‌دهد که نبشی نشیمن از ثانیه پنجم شروع به جاری شدن می‌کند و در ثانیه دهم برخی از المان‌های آن در ناحیه اتصال بولت به ستون وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. اولین جاری شدن در بولت‌های ردیف اول اتصال نبشی نشیمن به ستون و

نشان می‌دهد که میزان سقوط قائم مدل یک (اتصال تیر به ستون با دوپل نبشی جان) بسیار بیشتر از سایر مدل‌ها است و در واقع این مدل در برابر حذف ناگهانی ستون قادر به حفظ ایستایی خود نمی‌باشد. دقت در کانتور تنش این اتصال نشان می‌دهد که شگستگی در بولت پایینی اتصال نبشی به جان تیر اتفاق افتاده است. همچنین پارگی در جان تیر از سمت بولت پایین شروع می‌گردد و به سمت بولت‌های بالایی پیش می‌رود. روال تغییر شکل و منحنی تنش این اتصال نشان داد که پس از بولت پایینی اتصال نبشی به جان تیر، بولت‌هایی بالایی و بولت‌های اتصال به ستون نیز در نواحی مرکزی پلاستیک می‌شوند.

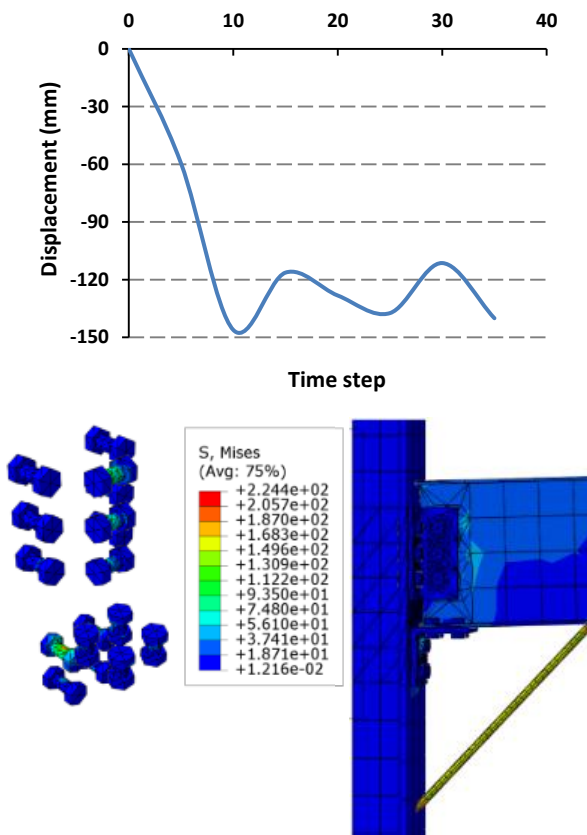


شکل ۱۱- نمودار تغییر مکان-زمان مدل یک، منحنی تنش و تغییر شکل نهایی اتصال

نتایج شکل (۱۲) نشان می‌دهد که مدل دو که اتصال تیر به ستون با نبشی نشیمن است توانایی بیشتری در حفظ پایداری پس از حذف ناگهانی ستون را دارد، ولیکن قادر نیست معیار حداکثر زاویه چرخش مجاز در آیین نامه UFC 4-023-03 [۱۷]

مرحله پلاستیک می‌گردد. در این مرحله است که بولت‌های ردیف بالایی اتصال نبشی نشیمن به ستون نیز جاری می‌شوند.

مدل چهار



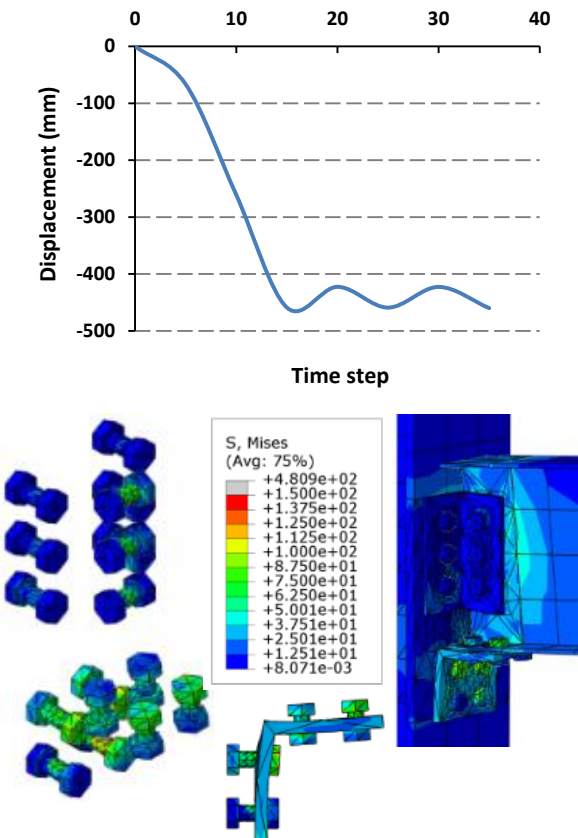
شکل ۱۴- نمودار تغییر مکان-زمان مدل چهار، منحنی تنش و تغییر شکل نهایی اتصال

عملکرد مدل پنج که علاوه بر دابل نبشی جان و نبشی نشیمن دارای دستک در زیر تیر می‌باشد رفتار مناسبی در برابر حذف ناگهانی ستون نشان داد و توانست در محدوده دوران مجاز قرار بگیرد. همانطور که منحنی تغییر مکان-زمان این مدل (شکل ۱۵)) نشان می‌دهد بیشینه تغییر مکان قائم این اتصال حدود ۳۴ سانتیمتر می‌باشد. پروسه خرابی در این مدل مشابه مدل چهار دیده شد، به این ترتیب که در ثانیه پنجم تحلیل ابتدا بولت‌های اتصال دابل نبشی به جان تیر و همچنین خود جان تیر در نواحی محل اتصال دچار خرابی شدند. سپس در ثانیه پانزدهم نبشی نشیمن در بال متصل به ستون دچار پارگی گردید و بولت‌های ردیف بالایی نبشی نشیمن به ستون جاری شدند.

مدل شش نیز که دارای سه کابل قوی سراسری در هر طرف جان تیر می‌باشد عملکرد نسبتاً خوبی نشان داد. این مدل در اثر حذف ستون به میزان ۴۳ سانتیمتر سقوط قائم را تجربه کرد و با این حال در رده دوران مجاز آئین نامہ UFC 4-023-03 [۱۷]

بولت‌های دابل نبشی جان به تیر اتفاق می‌افتد و پس از آن بولت‌های اتصال نبشی نشیمن به تیر وارد مرحله پلاستیک می‌گردند. گسیختگی در جان تیر به صورت عمودی و در مقطعی بلافاصله پس از نبشی جان اتفاق افتاد. این مدل توانست ضابطه حداکثر تغییر شکل مجاز UFC 4-023-03 [۱۷] را اکتفا کند.

مدل سه

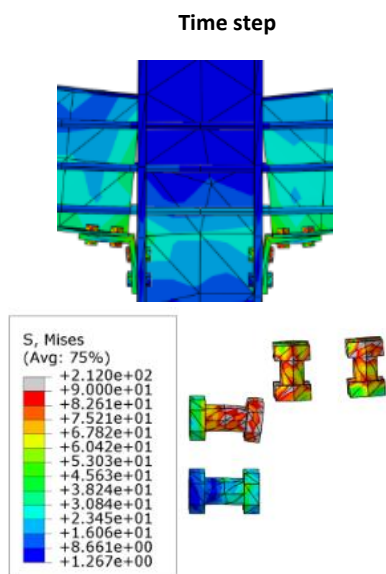
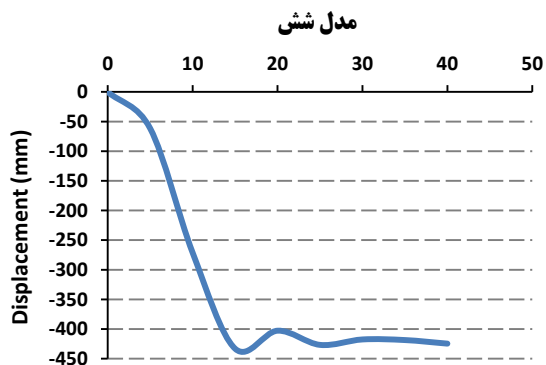


شکل ۱۳- نمودار تغییر مکان-زمان مدل سه، منحنی تنش و تغییر شکل نهایی اتصال

مدل چهار که علاوه بر نبشی نشیمن و دابل نبشی جان، دارای کابل قوی به صورت مایل در زیر تیر می‌باشد توانست عملکرد بسیار مناسبی در برابر خرابی حذف ناگهانی ستون و خرابی پیشرونده داشته باشد. همانطور که نمودار تغییر مکان-زمان این مدل در شکل (۱۴) نشان می‌دهد حداکثر سقوط قائم این مدل در محدوده دوران مجاز براساس ضوابط UFC 4-023-03 [۱۷] قرار می‌گیرد. بررسی منحنی تنش این مدل نشان می‌دهد که در ثانیه پنجم تحلیل قسمت‌هایی از جان تیر در ناحیه اتصال دابل نبشی و بولت‌های اتصال دابل نبشی به جان تیر جاری می‌شوند. در ثانیه دهم تحلیل کابل کششی از نواحی نزدیک به محل اتصال وارد

UFC 4-023-03 [۱۷] این اتصال عملکرد بسیار مناسبی در برابر

خرابی ناشی از حذف ستون خواهد داشت. رویه خرابی این مدل مشابه مدل شش مشاهده شد. به طوریکه نبشی نشیمن و همچنین نواحی از جان تیر در نزدیکی محل اتصال به نبشی در ثانیه پنجم بارگذاری جاری شدند. پس از آن بولت های اتصال نبشی به ستون و در ادامه بولت های اتصال نبشی به بال تیر وارد مرحله پلاستیک و گسیخته شدند.

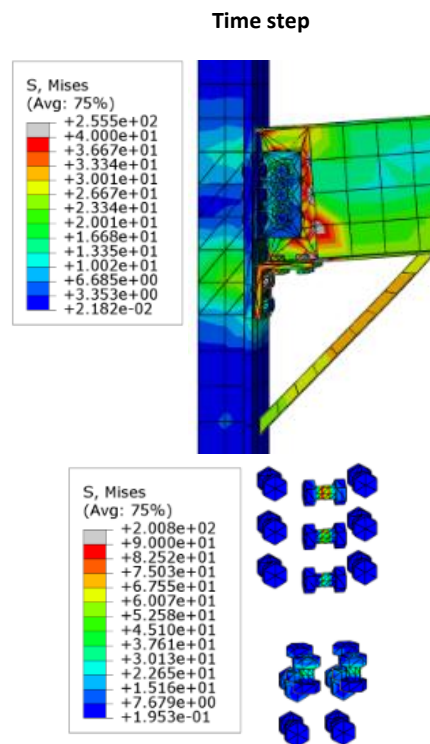
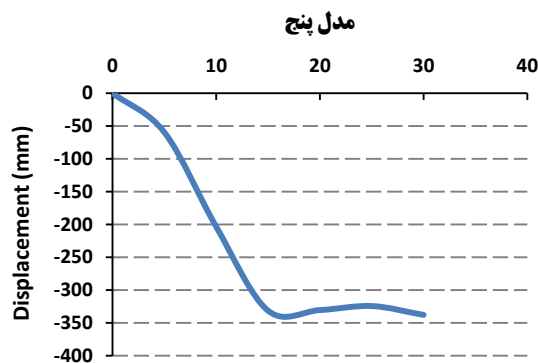


شکل ۱۶- نمودار تغییر مکان-زمان مدل شش، منحنی تنش و تغییر شکل نهایی اتصال

۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر راهکار هایی برای تقویت سازه های فولادی موجود که دارای دهانه هایی با اتصالات ساده می باشند ارائه شده است. اتصالات ساده دارای نبشی نشیمن و دوپل نبشی جان با استفاده از کابل های افقی سراسری در

قرار گرفت. خرابی در این مدل از ثانیه پنج شروع می شود و در ابتدا در نبشی نشیمن و سپس قسمت انتهایی بال و جان تیر در محل اتصال به نشیمن اتفاق می افتد. سپس بولت های ردیف اول اتصال نبشی به ستون و بولت های اتصال نبشی به بال تیر جاری و گسیخته می شوند. شکل (۱۶) نمودار تغییر مکان-زمان و منحنی تنش این مدل را نشان می دهد.



شکل ۱۵- نمودار تغییر مکان-زمان مدل پنج، منحنی تنش و تغییر شکل نهایی اتصال

مدل هفت شامل دو کابل عمودی در هر طرف اتصال توانایی بسیار خوبی در حفظ یکپارچگی اتصال پس از حذف ناگهانی ستون داشت. همانطور که نمودار تغییر مکان-زمان در شکل (۱۷) نشان می دهد، این مدل پس از بیشینه تغییر مکان برابر ۱۸ سانتیمتر به تعادل رسید. براساس آئین نامه

طول تیر، دستک و همچنین کابل مورب در زیر تیر تقویت

■ اتصال ساده با نبشی نشیمن و دوبل نبشی جان که دارای یک دستک در زیر تیر بود در مقام سوم توانست یکپارچگی خوبی را در برابر حذف ناگهانی ستون داشته باشد. این اتصال با تجربه کردن ۳۴ سانتیمتر سقوط قائم به خوبی معیار حداکثر زاویه چرخش آیین نامه UFC را اکتفا کرد.

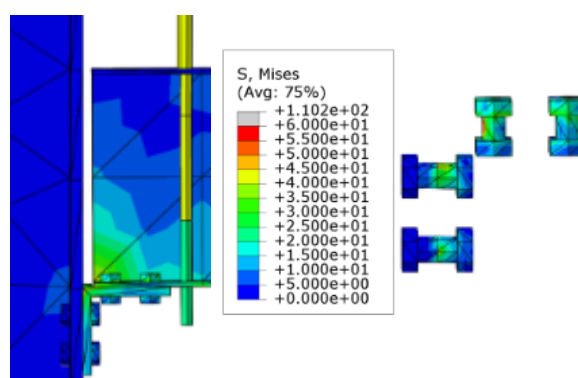
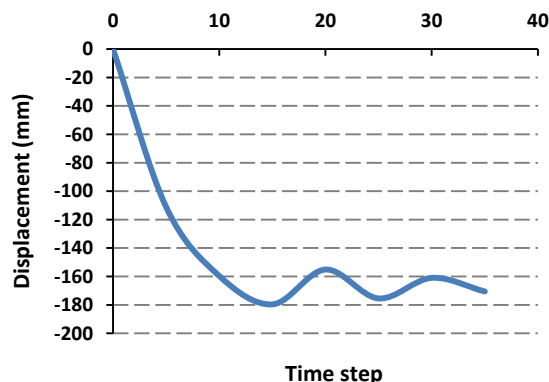
■ اتصال ساده با کابل‌های افقی سراسری با تغییر مکان قائم حدود ۴۳ سانتیمتر براساس آیین نامه UFC عملکرد قابل قبولی را ارائه داد.

۶- مراجع

[۱] آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ویرایش سوم.

- [2] Griffiths, H., Pugsley, A. and Saunders, D. (1968), "Collapse of Flats at Ronan Point Canning Town", Her Majesty's Stationary Office, London.
- [3] Institution of Structural Engineers, (1971), The Resistance of Buildings to Accidental Damage, The Structural Engineer (London), Vol. 49, No. 2.
- [4] Corley, W.G., Mlakar, P.F., Sozen, M.A. and Thornton, C.H. (1998), "The Oklahoma City Bombing: Summary and Recommendation for Multi-Hazard Mitigation", Journal of Performance of Constructed Facilities, ACSE, Vol. 12, No. 3, pp. 110-112.
- [5] Popov, E.P. and Takhirov, S.M. (2002), "Bolted Large Seismic Steel Beam-to-Column Connections Part 1: Experimental Study", Engineering Structures, Vol. 24, No. 12, pp. 1523-1534.
- [6] Sabuwala, T., Linzell, D. and Krauthammer, T. (2005), "Finite Element Analysis of Steel Beam to Column Connections Subjected to Blast Loads", International Journal of Impact Engineering, Vol. 31, No. 7, pp. 861-876.
- [7] ABAQUS, (2008), Theory Manual, Ver. 6.10, Inc., USA.
- [8] TM51300, (1990), Structure to Resist the Effects of Accidental Explosions, USA Army.
- [9] Astaneh-Asl, A., Jones, B., Zhao, Y. and Hwa, R. (2001), "Progressive Collapse Resistance of Steel Building Floors", Report Number UCB/CEE-Steel-2001/03, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, September (www.ce.berkeley.edu/~astaneh).
- [10] Astaneh-Asl, A. (2007), "Progressive Collapse Prevention of Steel Frames with Shear Connections", technical information & product service, university of California, Berkeley.
- [11] Khandelwal, K., Sherif, E.L. and Sadek, F. (2009), "Progressive Collapse Analysis of Seismically Designed Steel Braced Frames", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, No. 3, pp. 699-708.
- [12] Urgessa, G. and Arciszewski, T. (2011), "Blast Response Comparison of Multiple Steel Frame Connections", Finite Elements in Analysis and Design. Vol. 47, No. 7, pp. 668-675.
- [13] Manaloor, Rahul. (2014), "FEM Analysis of Connections to Resist Progressive Collapse in Steel Structures", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 3 No. 5, pp. 243-246.
- [14] Faridmehr, I., Osman, M.H., Tahir, M.M., Nejad, A.F. and Azimi, M.A. (2015), "Seismic and Progressive Collapse Assessment of New Proposed Steel Connection", Journal of

مدل هفت



شکل ۱۷- نمودار تغییر مکان-زمان مدل هفت، منحنی تنش و تغییر شکل نهایی اتصال

شدند و تحت اثر بارگذاری ثابت مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج بشرح زیر مورد بررسی قرار گرفت:

■ اتصال ساده با دوبل نبشی جان در مقابل حذف ناگهانی ستون بسیار آسیب پذیر می‌باشد، به طوری که تحت این شرایط ۱۰۰ درصد تخریب در این اتصال مشاهده شد.

■ اتصال ساده با نبشی نشیمن و دوبل نبشی جان که توسط یک کابل مورب در زیر تیر تقویت شد توانست عملکرد بسیار مناسبی را در مواجهه با حذف ناگهانی ستون داشته باشد. این اتصال با حفظ یکپارچگی مناسب ماکزیمم سقوط قائم ۱۵ سانتیمتر را تجربه کرد. این اتصال مناسب‌ترین رفتار را در بین مدل‌های پیشنهادی داشت.

■ اتصال ساده با نبشی نشیمن به علاوه کابل‌های عمودی متصل به خرپای طبقه دهم پس از حذف ناگهانی ستون طبقه اول با تحمل حداکثر تغییر مکان برابر ۱۸ سانتیمتر عملکرد بسیار مناسبی در برابر خرابی پیشرونده نشان داد.

[۱۸] مبحث بیست و یکم مقررات ملی ساختمان، (۱۳۹۱)، پدافند غیر عامل،

وزارت مسکن و شهر سازی، معاونت امور مسکن و ساختمان.

[19] Wang, W., Fang, C., Qin, X., Chen, Y. and Li, L. (2016), "Performance of Practical Beam-to-SHS Column Connections Against Progressive Collapse", Engineering Structures, Vol. 106, No. 1, pp.332-347.

[20] Astaneh, A., Call, S.M. and McMullin, K.M. (1989), "Design of Single Plate Shear Connections", Engineering Journal, American Institute of Steel Construction, Vol. 26, No. 1, pp. 21-32.

Advances in Structural Engineering, Vol. 18 No. 3, pp. 439-452.

[15] Faridmehr, I., Osman, M.H., Tahir, M.M., Nejad, A.F. and Hodjati, R. (2015), "Severe Loading Assessment of Modern and New Proposed Beam to Column Connections", Latin American Journal of Solids and Structures, Vol.12, No.7, pp. 1202-1223.

[16] AISC, (2010), Seismic Provisions for Structural Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.

[17] UFC 4-023-03, (2010), Design of buildings to resist progressive collapse. Department of Defence, USA.

پی نوشت

¹ Ronan point

² Alfred p Murrah

³ Catenary action

