



بررسی مقاومت اتصالات درختی پیچی در برابر خرابی پیش رونده ناشی از حذف ستون

مسعود ضیائی*، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گرمسار

مسلم احمدی، دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر

چکیده

تحقیق حاضر مقاومت اتصال درختی پیچی در برابر پدیده خرابی پیش رونده را بررسی می کند. این نوع اتصال فولادی به دلیل فواید فراوان از قبیل راحتی و سرعت در نصب، کیفیت بهتر جوش اتصال تیر به ستون به علت اجرا در کارخانه و پایین آوردن درصد بالایی از خطای جوشکاری نسبت به دیگر سیستم ها مورد استفاده قرار می گیرد. هدف اصلی تحقیق حاضر، بررسی مقاومت نمونه اتصالات ستون درختی انتخاب شده تحت اثر خرابی پیش رونده با روش اجزای محدود با سناریوی حذف ستون و کنترل تغییر شکل که توسط نرم افزار ABAQUS شبیه سازی و بررسی شده است. در ابتدا، صحت سنجی با استفاده از نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی انجام شده است. نتایج تحقیق نشان می دهد که استفاده از فولاد با تنش تسلیم بالاتر در ستون و قطعه تیر درختی (کناری) که به صورت تیر کاهش یافته است، سبب شده مفصل پلاستیک، در محل کاهش یافتگی تیر دور از جوش اتصال تیر درختی (کناری) به ستون رخ داده و امکان بروز شکست در جوش به شدت کاهش یافته و تغییر مکان پایدار با شکل پذیری بالا در زمان حذف ستون فراهم نموده که بهبود بیشتر رفتار در این نوع اتصال را نشان می دهد. به طور کلی و با بررسی نتایج حاصل از تحلیل ها و مقایسه رفتار اتصال ستون درختی و اتصال مستقیم تیر به ستون می توان گفت که استفاده از اتصال ستون درختی، منحنی نیرو- تغییر مکان پایدار با شکل پذیری بالا را در زمان حذف ستون فراهم نموده است.

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱

کلیدواژه ها:

اتصال ستون درختی،

خرابی پیش رونده،

حذف ستون،

شبیه سازی اجزای محدود،

تحلیل استاتیکی غیرخطی.

۱- مقدمه

خرابی پیش‌رونده^۱ زمانی اتفاق می‌افتد که یک یا تعدادی از عناصر اصلی باربر سازه به دلایلی مانند انفجار یا زلزله از کار افتاده و در این حالت، بارگذاری بیش از حد به سایر المان‌های سازه‌ای، در مجاورت المان‌های حذف شده، وارد می‌شود که باعث خرابی آنها شود. این خرابی می‌تواند به صورت پیش‌رونده در سازه منتشر و باعث خرابی موضعی یا کلی آن گردد.

انفجار گاز در ساختمان رونان پوینت^۲ در بریتانیا در سال ۱۹۶۸، بمب‌گذاری در ساختمان فدرال مورا^۳ در ایالات متحده در سال ۱۹۹۵ و فروپاشی مرکز تجارت جهانی در ایالات متحده در سال ۲۰۰۱ نمونه‌های واقعی از خرابی پیش‌رونده ساختمان‌ها است. در شکل ۱، ساختمان رونان پوینت نشان داده شده است. انفجار اجاق گاز در طبقه ۱۸م این سازه بتنی ۲۴ طبقه، دیوار باربر خارجی را به بیرون پرتاب کرد که باعث خرابی پیش‌رونده طبقات تا سطح زمین شد.



شکل ۱- خرابی پیش‌رونده در ساختمان رونان پوینت

پس از فرو ریختن بخشی از برج آپارتمانی رونان پوینت در سال ۱۹۶۸ که منجر به کشته شدن چهار تن و زخمی شدن ۱۷ تن شد، مهندسان به اهمیت مقاومت سازه‌ای در برابر فروپاشی تدریجی پی بردند.

در این راستا، روش مسیر بار جایگزین و عملکرد زنجیره‌ای به عنوان یک رویکرد طراحی مهم برای کاهش فروپاشی پیش‌رونده توسط برخی آیین‌نامه‌های طراحی در نظر گرفته شد [۱]. در این روش، سازه طوری طراحی می‌شود که اگر یکی از اعضا خراب شود، راه‌های جایگزین برای انتقال نیرو وجود داشته باشند و سازه دچار خرابی کلی نشود. بدین منظور و برای تامین عملکرد زنجیره‌ای، سازه باید پیوستگی کافی را برای فراهم آوردن مسیر جایگزین حمل بار و همچنین پایداری، هنگامی که یک عضو از سیستم قائم باربر حذف می‌شود، داشته باشد.

نحوه تشکیل و گسترش عملکرد زنجیره‌ای در تیرها بدین صورت می‌باشد که با حذف ستون، قاب در اثر بارهای ثقلی در محل ستون حذف شده و شروع به حرکت به سمت پایین می‌کند. در ابتدا، سختی خمشی تیرها در برابر بار ثقلی مقاومت می‌کند و با افزایش میزان جابه‌جایی به سمت پایین، تارهای بالا و پایین مقطع تیر تسلیم می‌شوند. در ادامه، محدوده تنش‌های کششی در مقطع تیر شروع به افزایش کرده و تار خشی به سمت بالای مقطع حرکت خواهد کرد. در جابه‌جایی‌های خیلی زیاد تنش‌های فشاری به کلی از بین رفته و تمام مقطع تیر در کشش قرار می‌گیرد. در این لحظه، تیرها به صورت کابل‌هایی در بین ستون‌ها عمل می‌کنند و نیروهای کششی قابل ملاحظه‌ای به وجود می‌آید که اتصالات باید قادر به تحمل آن باشند (شکل ۲).

بنابراین، در روش مسیر جایگزین بار، اتصالات تیر به ستون نقش قابل توجهی خواهند داشت. این اتصالات باید قادر باشند در زمان حذف ستون زیرین، بار ستون‌های بالایی را به تیرهای مجاور منتقل کنند. یکی از اتصالات تیر به ستون که به دلیل ایمنی و سهولت اجرای بالاتر مورد توجه قرار گرفته، اتصالات ستون درختی است (شکل ۳).

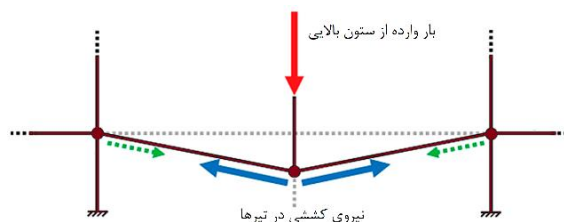
1 Progressive Collapse

2 Ronan Point

3 Murrah Federal Building



شکل ۳- اتصال ستون درختی برای اتصال تیر به ستون



شکل ۲- مسیر بار جایگزین بعد از حذف ستون

مرکز تجارت جهانی در ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱ مورد توجه قرار گرفت.

چن و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۶ مطالعات تجربی و تحلیلی در خصوص شکل پذیری اتصالات گیردار تیر به ستون مورد استفاده در سیستم ستون درختی فولادی انجام دادند. اتصالات شکل پذیر ستون درختی پیشنهادی دارای دو وجه بهبود یافته است که شامل حذف سوراخ دسترسی جوش و بال عریض تر در قطعه تیر است. تجزیه و تحلیل اجزای محدود غیرخطی اثربخشی جزئیات اتصال بهبود یافته نشان داد که شدت تنش و تقاضای کرنش پلاستیک در جوش شیاری بال تیر به طور قابل توجهی کاهش یافته است. در ادامه، آزمایش چرخه‌ای سه نمونه در مقیاس کامل برای تأیید جزئیات اتصال پیشنهادی انجام شد. همه نمونه‌ها با تشکیل مفصل پلاستیک دور از قطعه تیر متصل‌کننده تیر به ستون، رفتار انعطاف‌پذیری را بدون گسیختگی ترد ایجاد کردند. نتایج نشان داد که بال پهن‌تر قطعه تیر و حذف سوراخ دسترسی جوش در کاهش احتمال شکست ترد موثر بوده است [۲].

یانگ و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۳ آزمایش‌های تجربی بر روی انواع مختلف اتصالات تیر به ستون پیچی فولادی تحت سناریوی حذف ستون مرکزی انجام دادند. این مطالعه رفتار و مودهای خرابی اتصالات مختلف، از جمله توانایی‌های آنها برای تغییرشکل در حالت چرخشی

اجرای این اتصال با جوش قطعه تیر کوتاه، که معمولاً بین ۶۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر طول دارد، به ستون، در کارخانه و پیچ تیر اصلی به قطعه تیر، در محل کارگاه انجام می‌شود و به این دلیل، کیفیت اجرای این اتصال نسبت به سایر اتصالات خمشی بالاتر است. در سیستم ستون درختی به علت جوشکاری اتصال تیرهای کوتاه به ستون که در کارخانه انجام می‌شود، جوش حاصل دارای کیفیت بالا و نیز قیمت مناسب است و در عین حال، بازرسی جوش نیز به سهولت امکان‌پذیر می‌باشد.

انتظار می‌رود که رفتار لرزه‌ای قاب گیردار ستون درختی شکل پذیر باشد. در این قاب قطعه تیر مانند تیر پیوند در قاب‌های مهارشده، و اگر عمل می‌کند. این تیرهای پیوند می‌توانند طوری طراحی شوند که به قدر کافی شکل پذیر باشند و ظرفیت خمشی را تعیین کنند. در زمان وقوع زمین لرزه، تیرهای پیوند به عنوان فیوزهای شکل پذیر عمل خواهند کرد و اندازه نیروهای ناشی از لنگر خمشی را که می‌تواند در قاب گسترش یابد محدود می‌کند. بسته به مقاومت خمشی و سختی چرخشی تیر پیوند، قاب ستون درختی به عنوان سیستم مقاوم خمشی صلب و یا نیمه‌صلب رفتار خواهد کرد.

کارهای تحقیقاتی روزافزونی در راستای پیش‌گیری از بروز خرابی پیش‌رونده با تأکید بر اهمیت اتصال تیر به ستون انجام گرفته است. این موضوع به ویژه پس از حادثه

را بررسی نمود. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که اتصال با دونبشی پیچی جان بهترین عملکرد را در توسعه عمل زنجیره‌ای دارد.

اوه و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۵ رفتار لرزه‌ای اتصالات گیردار ستون درختی با مقطع تیر کاهش یافته را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که این اتصالات توانایی فراهم نمودن دررفت ۵٪ را مطابق ضوابط قاب‌های خمشی ویژه دارا هستند.

ژونگ و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۷ عملکرد اتصالات با سختی متفاوت را در برابر خرابی پیش‌رونده مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نیز مشاهده شد که اتصال با دونبشی پیچ شده در جان بهترین عملکرد را داشته است.

ژانگ و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۷ عملکرد لرزه‌ای قاب با ستون درختی با سه نوع جزییات اتصال مختلف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که سه نوع نمونه عملکرد شکل پذیری و ظرفیت چرخش پلاستیک خوبی دارند. مشاهده شد که ظرفیت اتلاف انرژی قطعه تیر کاهش یافته بهتر از اتصال تیر ضعیف است.

منگ و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۸ رفتار اتصالات با دهانه تیر گوناگون در برابر خرابی پیش‌رونده را مورد بررسی قرار دادند. مشاهده شد که نمونه با دو دهانه تیر یکسان عملکرد مناسب‌تری در خرابی پیش‌رونده دارد.

تانگ و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۹ رفتار اتصالات تمام پیچی را در برابر خرابی پیش‌رونده مطالعه نمودند. سازوکار خرابی اتصال با استفاده از نرم‌افزار اباکوس^۱ شبیه‌سازی شد. مشخص شد که با گسیختگی اتصال، بالایی تیر در سمتی با سختی جانبی کوچک‌تر دچار کماتش موضعی شده است. علاوه بر این، ظرفیت چرخشی اتصال در حالت حذف ستون کناری کمتر از مقدار مشابه در سناریوی حذف ستون مرکزی بود و نشان داده شد که در این حالت عمل زنجیره‌ای اتصال نمی‌تواند به‌طور کامل مورد استفاده واقع شود.

چن و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۰ رفتار خرابی پیش‌رونده را در قاب‌های فولادی با تیر کاهش یافته مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نیز از نرم‌افزار اباکوس برای شبیه‌سازی رفتار قاب استفاده گردید. مشاهده شد که برای نمونه بدون کاهش یافتگی، اگرچه اتصال با جان جوش داده شده برای افزایش ظرفیت حمل بار مساعد است، اما توسعه عملکرد زنجیره‌ای آن بسیار محدود است. خیننگ و همکاران [۹] در سال ۲۰۲۳ مقاومت خرابی پیش‌رونده قاب فولادی با ساختار انتقال بار تیر به ستون تحت سناریوی حذف ستون میانی مورد مطالعه قرار دادند. نتیجه آزمایش نشان داد که تیر رابط می‌تواند به‌طور موثر از تشکیل مفصل پلاستیک و شکستگی در ناحیه اتصال جلوگیری کند.

باتوجه به مطالعات موجود در ادبیات موضوع و عدم بررسی عملکرد اتصال ستون درختی تحت خرابی پیش‌رونده، در این تحقیق به عملکرد اتصال ستون درختی در خرابی پیش‌رونده با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و مقایسه آن با رفتار سایر اتصالات پرداخته خواهد شد.

۲- شبیه‌سازی رفتار قاب بعد از حذف ستون

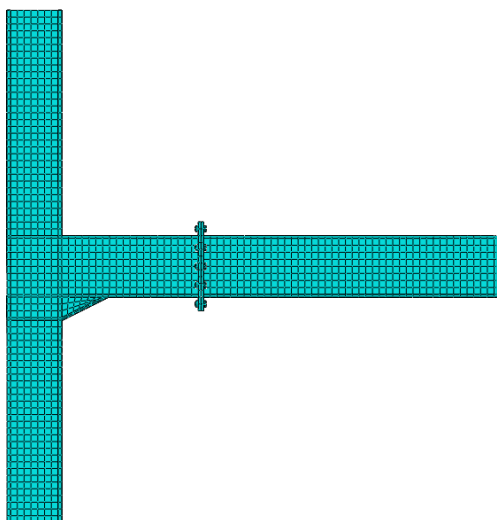
در این مقاله به بررسی اثر خرابی ستون بر رفتار اتصالات تیر به ستون درختی و مقایسه آن با دیگر اتصالات تیر به ستون پرداخته شده است. برای انجام مدل‌سازی از روش اجزای محدود و نرم‌افزار قدرتمند آباکوس استفاده شده است. برای اثبات اعتبار پیش‌بینی مدل‌های اجزای محدود، از نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی بر روی اتصالات درختی استفاده شده است. مدل نمونه آزمایشگاهی به دقت و با در نظر گرفتن همه پارامترهای هندسی و مصالح ساخته شده است.

۲-۱- صحت‌سنجی

برای انجام صحت‌سنجی از نتایج آزمایشات انجام شده

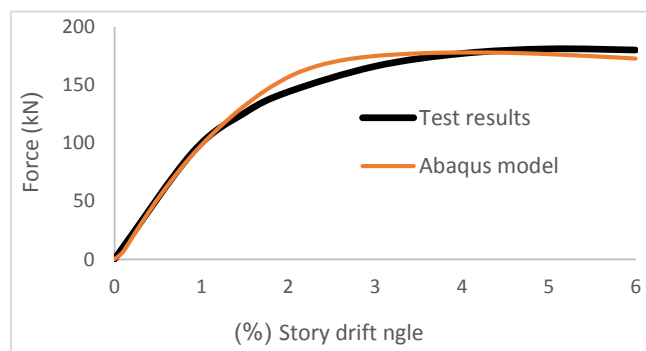
مدل اعمال شده است. در مرحله اول بار پیش تنیدگی پیچ‌ها به میزان ۰/۵۵ تنش نهایی پیچ‌ها به آن‌ها اعمال شده است. در مرحله دوم بارگذاری در انتهای تیر به صورت کنترل تغییر مکان به اندازه ۱۵ سانتی‌متر وارد شده است.

پس از انجام تحلیل حساسیت مش‌بندی، اندازه مش چهار سانتی‌متری به عنوان اندازه بهینه تعیین گردید و مش‌بندی مدل با این اندازه مش انجام شد (شکل ۵).



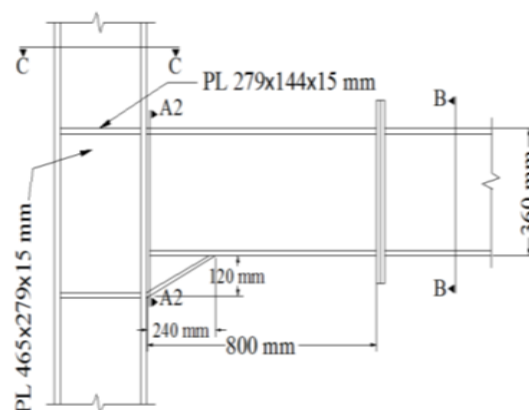
شکل ۵- مدل مش‌بندی شده قاب

تحلیل به صورت استاتیکی غیرخطی و با در نظر گرفتن اثرات تغییر شکل‌های بزرگ انجام شد. در شکل ۶ مقایسه منحنی نیرو-زاویه دریفت طبقه اتصال گزارش شده در مرجع [۱۰] و به دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود قابل مشاهده است.



شکل ۶- مقایسه پاسخ به دست آمده از آزمایش و شبیه‌سازی

توسط بهارمست و رزاقی [۱۰] استفاده شده است. در شکل ۴ مشخصات هندسی نمونه نشان داده شده است. جنس فولاد مورد استفاده برای نمونه از نوع فولاد ST37 بوده است. نمونه انتخاب شده برای صحت‌سنجی نمونه HA-F-NC بوده است.

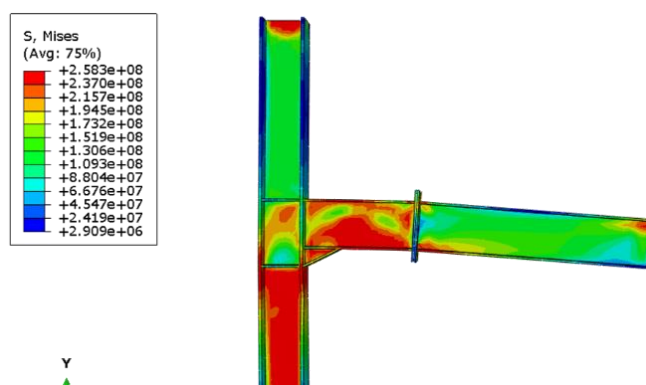


شکل ۴- نمونه مورد استفاده برای صحت‌سنجی [۱۰]

برای انجام شبیه‌سازی المان‌های سه‌بعدی هشت گرهی مکعب شکل مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات هندسی و مصالح اعضا به دقت مطابق مشخصات ارایه شده در مرجع در نظر گرفته شده است.

برای تعریف مشخصات فولاد از مدل رفتاری دوخطی با تعریف مختصات نقاط تسلیم و نهایی در فضای تنش-کرنش استفاده شده است. اندرکنش بین پیچ‌ها و سطوح اعضا به صورت تماس سطح به سطح با تعریف مشخصات عمودی به صورت تماس سخت و مماسی به صورت پنالتی با ضریب اصطکاک ۰/۳ تعریف شده است. بارگذاری در دو مرحله به

میزان تنش در تیر، ستون و صفحه انتهایی حداکثر ۲۵۸ مگاپاسکال است که نشان‌دهنده بروز جاری‌شدگی در بخش‌هایی از تیر و ستون است (شکل ۷). با توجه به نزدیکی نتایج و مد خرابی مشابه، می‌توان به نتایج پیش‌بینی شده توسط روش اجزای محدود اعتماد نمود. در ادامه، تاثیر پارامترهای مورد نظر بر رفتار اتصال درختی پس از بروز حذف ستون مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۷- کانتور تنش فون میزس در اعضا در انتهای تحلیل

درختی از تحقیق انجام شده توسط یانگ و همکاران [۱] اقتباس شده است. مدل به صورت سه‌بعدی و با استفاده از المان‌های Solid به صورت مکعبی هشت گرهی ساخته شد. در تعریف مشخصات فولاد، مشخصات الاستیک شامل مدول الاستیسیته و ضریب پواسون برای فولاد و پیچ‌های ۱۰٫۹ تعریف گردید. مشخصات پلاستیک رفتار مصالح با استفاده از روش دوخطی و تعریف نقاط تسلیم و نهایی در فضای تنش- کرنش به نرم‌افزار معرفی شد. تنش جاری شدن فولاد برابر ۲۹۰ مگاپاسکال و تنش نهایی آن برابر ۴۵۰ مگاپاسکال تعریف شد و برای در نظر گرفتن آسیب مصالح فولادی، از مدل آسیب شکل پذیر^۱ استفاده گردید.

پیچ‌های M20 با تنش تسلیم ۹۰۰ مگاپاسکال و تنش نهایی ۱۰۰۰ مگاپاسکال تعریف شد. تماس بین پیچ و بدنه به صورت تماس سطح به سطح و با ضریب اصطکاک

همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو منحنی در بخش خطی انطباق کاملی دارند و سختی الاستیک کاملاً برابر است. بعد از بروز جاری‌شدگی، اختلاف کمی بین دو منحنی مشاهده می‌شود. میزان اختلاف در این بخش منحنی در حدود ۱۰ درصد است. مدل اجزای محدود توانسته به خوبی مقاومت نهایی اتصال و افت مقاومت اتصال را پیش‌بینی نماید.

۲-۲- مطالعه پارامتریک

بعد از اطمینان از دقت و صحت پیش‌بینی‌های شبی‌سازی اجزای محدود، به مطالعه پارامتریک رفتار اتصالات درختی تیر به ستون تحت حذف ستون پرداخته شده است. شش نوع اتصال تیر به ستون در نظر گرفته شده و با استفاده از فولاد ST37 با تنش تسلیم ۲۹۰ مگاپاسکال، در مجموع شش مدل مورد بررسی قرار گرفته است. در ضمن، مقدار لنگر اول سطح ستون‌ها اندکی بیش از تیر است تا فلسفه ستون قوی و تیر ضعیف رعایت شده باشد (لنگر پلاستیک ستون ۷/۷ درصد بیشتر از لنگر پلاستیک تیر است). دلیل انتخاب لنگر پلاستیک نزدیک تیر و ستون این است که تیر تا حد امکان قوی بوده و بتواند با تغییر شکل کم، پدیده حذف ستون را با تحمل بار آن به صورت کششی تحمل نماید.

برای انجام مطالعه، مشخصات تیر و ستون و اتصال

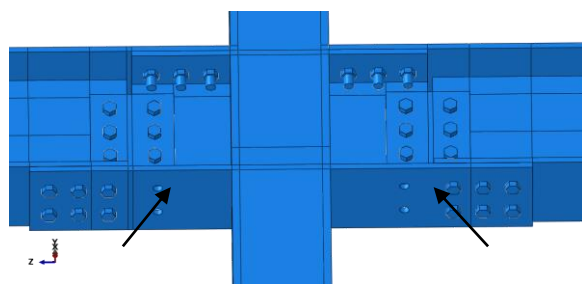
ایجاد شده است (فلش‌ها در شکل ۹). سایر مشخصات اتصال دوم مشابه اتصال اول است. قطر این سوراخ‌ها مشابه سوراخ‌های محل پیچ در نظر گرفته شده است.

در اتصال سوم، تیر و ستون با استفاده از اتصال درختی با دو ورق انتهایی وصل شده به انتهای دو قطعه تیر به هم متصل گردیده‌اند. ضخامت ورق‌های انتهایی برابر دو سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

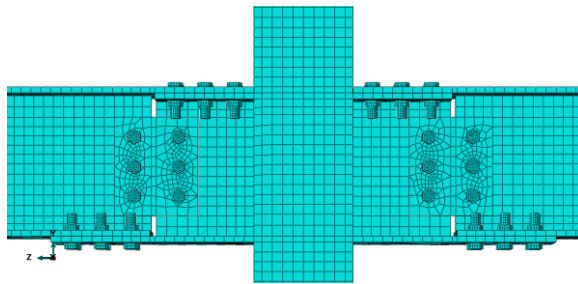
در مدل چهارم از ورق انتهایی توسعه یافته استفاده شده است و اتصال با پیچ در بالای بال‌های تیرها تامین شده است.

در اتصال پنجم، تیر و ستون بدون استفاده از اتصال درختی و با جوش نفوذی در بال و جان به ستون وصل شده‌اند.

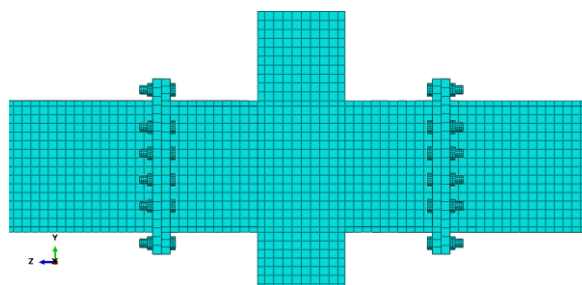
اتصال ششم مشابه اتصال مدل اول است، ولی در مقطع بال تیر کاهشی به مقدار 200×50 میلی‌متر ایجاد شده است. طول قسمت درختی متصل (تیر کناری) به ستون برای ایجاد مقطع کاهش یافته به اندازه ۲۰۰ میلی‌متر افزایش یافته است.



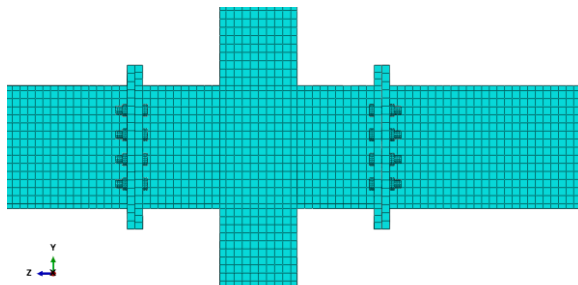
شکل ۹- مدل اتصال ستون درختی دوم



شکل ۸- مدل اتصال ستون درختی اول



شکل ۱۱- مدل اتصال ستون درختی چهارم



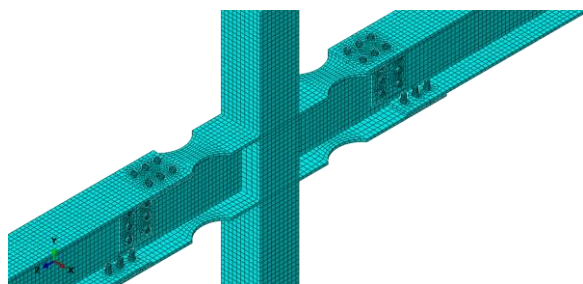
شکل ۱۰- مدل اتصال ستون درختی سوم

۰/۳ تعریف گردید. تحلیل از نوع استاتیکی غیرخطی با در نظر گرفتن اثر تغییر شکل‌های بزرگ بوده است. طول در نظر گرفته شده ستون برابر ۱/۴ متر و طول تیرهای طرفین برابر ۱/۹ متر بوده است. به دلیل وجود تقارن، نیمی از دهانه تیر در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. اندازه المان‌ها پس از انجام تحلیل حساسیت مش برابر دو سانتی‌متر برای تیر، ستون و صفحات و پنج میلی‌متر برای پیچ‌ها در نظر گرفته شده است که برای ایجاد مش‌بندی منظم و جلوگیری از شکل‌گیری المان‌ها با شکل نامناسب، پارتیشن‌بندی‌های متعددی انجام شده است.

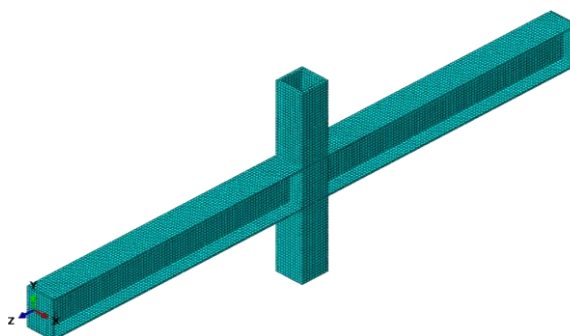
پنج نوع اتصال درختی در مقایسه با یک نوع اتصال معمولی شبیه‌سازی شده است. در شکل‌های ۸ تا ۱۳ این اتصالات نمایش داده شده‌اند.

در اتصال اول، تیر اصلی به تیر کناری متصل به ستون توسط پیچ کردن دو ورق در صفحه جان تیرها و پیچ شدن بال پایین و بالای تیرها ایجاد شده است.

در اتصال دوم، برای دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون، سوراخی در بال پایین تیر در نزدیک محل ستون

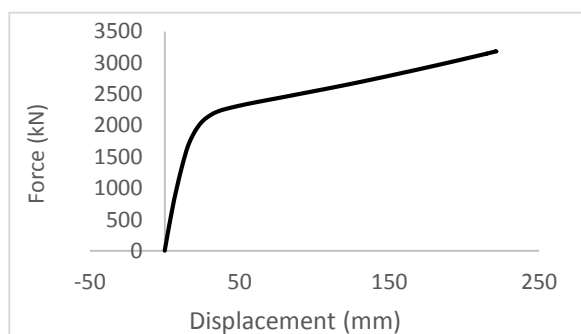


شکل ۱۳- استفاده از مقطع کاهش یافته در بال تیر متصل به ستون در اتصال ششم



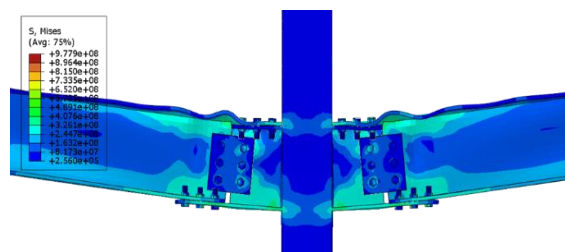
شکل ۱۲- استفاده از جوش نفوذی در بال و جان تیر متصل به ستون در اتصال پنجم

۲۲/۱ سانتی متری ستون، تحلیل با افت منحنی نیرو-تغییر مکان متوقف گردید. در این زمان بیشترین میزان کرنش پلاستیک معادل در محل ردیف اول پیچ‌های بال پایین قطعه تیر درختی و در محل اتصال تیر درختی به ستون در بال پایین رخ داده است. کماتش قابل توجه بال بالایی تیر و امکان جداسازی در محل اتصال بال به جان در تیر وجود دارد. جان تیر نیز اندکی دچار کماتش خارج صفحه شده است. سختی اولیه برابر ۱۲۴/۸ کیلونیوتن بر میلی متر است. بیشترین نیروی تحمل شده برابر ۳۱۸۰ کیلونیوتن است. منحنی نیرو-تغییر مکان دارای بخش سخت‌شوندگی است و شکل پذیری مناسبی در عملکرد مشاهده می‌شود.



شکل ۱۵- نمودار نیرو-تغییر مکان در نمونه اول

نتایج حاصل از تحلیل به صورت کانتور تنش فون میزس و منحنی نیرو-تغییر مکان نشان داده شده است. در مدل اول، جاری‌شدگی اولیه در محل اتصال بال بالایی تیر به ستون در تغییر مکان ۱/۴ سانتی متری ستون ایجاد شده است. در ادامه، حرکت رو به پایین ستون، کماتش بال بالا و ایجاد پلاستیک‌شدگی در انتهای بخش درختی در بال بالایی رخ داده است. سپس، جاری‌شدگی در بال پایین در محل اولین ردیف پیچ در قطعه تیر درختی رخ می‌دهد. با افزایش تغییر مکان ستون، در تیر در محل وصل شدن بال به جان پلاستیک‌شدگی قابل توجه اتفاق افتاده است. در ادامه، محل اتصال تیر درختی به ستون در بال پایینی دچار تسلیم شده است. در انتها، در تغییر مکان

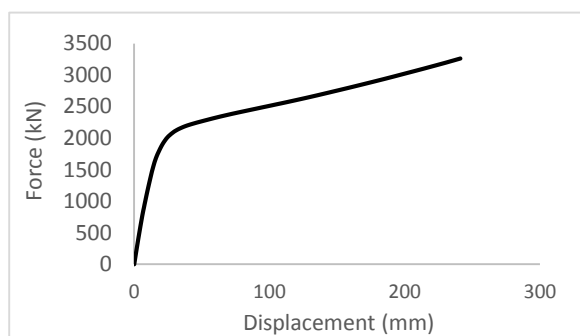


شکل ۱۴- کانتور تنش فون میزس در نمونه اول

بالایی تیر به ستون و نیز در محل اتصال جان بخش درختی

در مدل دوم، جاری‌شدگی اولیه در محل اتصال بال

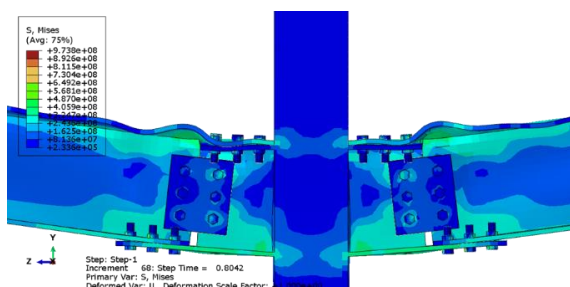
این زمان بیشترین میزان کرنش پلاستیک معادل در محل ردیف اول پیچ‌های بال پایین قطعه تیر درختی و در محل اتصال تیر درختی به ستون در بال پایین رخ داده است. بیشترین میزان کرنش پلاستیک برابر 0.32 است. سوراخ‌کاری بال پایینی قطعه تیر درختی باعث کاهش حداکثر کرنش پلاستیک معادل در سازه به میزان 6% شده است. کمناش قابل توجه بال بالایی تیر و امکان جداشدگی در محل اتصال بال به جان در تیر وجود دارد. جان تیر نیز اندکی دچار کمناش خارج صفحه شده است. در پیچ‌های اتصال بال تیر به بخش درختی جاری‌شدگی رخ داده است. با وجود افزایش ظرفیت تغییرمکان ستون، تنش در پیچ‌ها نسبت به مدل اول اندکی کاهش یافته است.



شکل ۱۷- نمودار نیرو- تغییرمکان در نمونه دوم

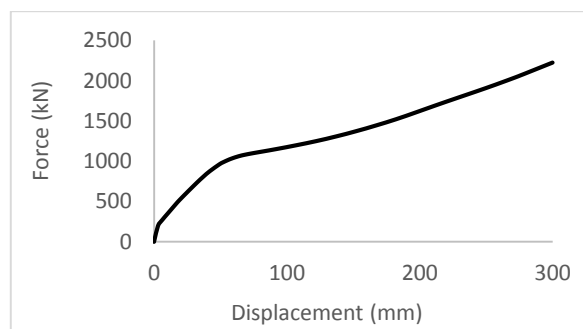
صفحات انتهایی نسبت به یکدیگر رخ داده است. در پیچ‌های ردیف پایین جاری‌شدگی رخ داده است. بیشترین کرنش پلاستیک سازه در محل پیچ‌ها اتفاق افتاده است که رفتار مناسبی نیست. سختی اولیه برابر $23/3$ کیلونیوتن بر میلی‌متر است که کاهش قابل ملاحظه‌ای نسبت به دو اتصال قبل دارد. بیشترین نیروی تحمل شده برابر 2226 کیلونیوتن است که نسبت به مدل اول، 30% درصد کاهش یافته است. منحنی نیرو- تغییرمکان دارای بخش سخت‌شوندگی است و شیب منحنی در دو مرحله کاهش یافته است.

در محل سوراخ پیچ‌های پایینی در تغییرمکان $1/4$ سانتی‌متری ستون ایجاد شده است. در ادامه، حرکت رو به پایین ستون، پلاستیک‌شدگی در مجاورت سوراخ‌های پیچ‌های بالایی اتصال جان رخ می‌دهد. کمناش بال بالا و ایجاد پلاستیک‌شدگی در انتهای بخش درختی در بال بالایی نیز رخ داده است. سپس، جاری‌شدگی در بال پایین در محل اولین ردیف پیچ در قطعه تیر درختی رخ می‌دهد. با افزایش تغییرمکان ستون، در تیر در محل وصل شدن بال به جان پلاستیک‌شدگی قابل توجه اتفاق افتاده است. در ادامه، محل اتصال تیر درختی به ستون در بال پایینی دچار تسلیم شده است. در انتها، در تغییرمکان $24/1$ سانتی‌متری ستون، تحلیل با افت منحنی نیرو- تغییرمکان متوقف گردید. در

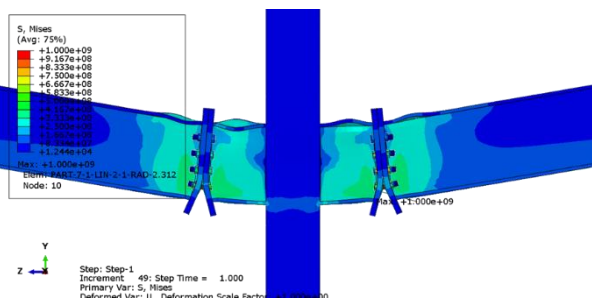


شکل ۱۶- کانتور تنش فون میزس در نمونه دوم

در مدل سوم، جاری‌شدگی اولیه در پیچ‌های بال پایین قطعه تیر درختی و نیز در مجاورت بال پایین تیر درختی در تغییرمکان $4/9$ سانتی‌متر رخ داده است. سپس، این جاری‌شدگی در جان تیر به سمت بالا حرکت کرده و هم‌زمان کمناش بال بالایی قطعه تیر درختی و جاری‌شدگی در آن رخ داده است. با افزایش تغییرمکان ستون، جاری‌شدگی در جان تیر در مجاورت بال پایین شروع شده است. در انتهای تحلیل، یعنی تغییرمکان 30 سانتی‌متری ستون به سمت پایین، مفصل پلاستیک در تیر اصلی به‌وجود آمده است. بیشترین میزان کرنش پلاستیک برابر 0.19 است. کمناش قابل توجه بال بالایی تیر و جداشدگی

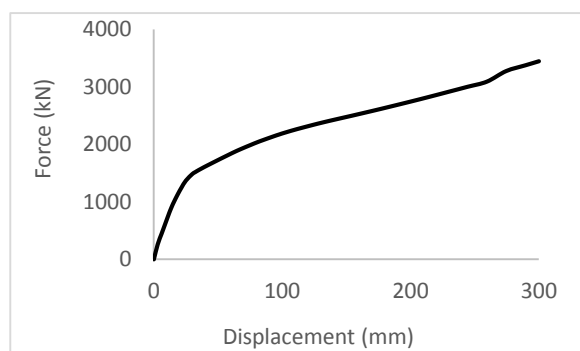


شکل ۱۸- کانتور تنش فون میزس در نمونه سوم

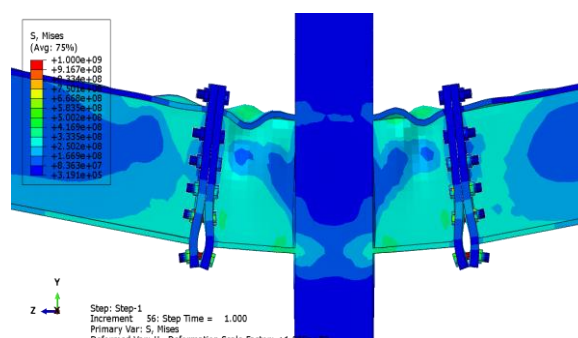


شکل ۱۹- نمودار نیرو- تغییر مکان در نمونه سوم

در مدل چهارم، جاری شدگی اولیه در پیچ‌های بال پایین قطعه تیر درختی در تغییر مکان ۲/۵ سانتی‌متر رخ داده است. سپس، کمایش بال بالایی قطعه تیر درختی و جاری شدگی در آن رخ داده است. با افزایش تغییر مکان ستون، جاری شدگی در جان تیر در مجاورت بال بالا شروع شده است. در محل اتصال قطعه تیر درختی به ستون در بال پایینی نیز جاری شدگی ملاحظه می‌شود. در تمام مدت تحلیل، بیشترین مقدار کرنش پلاستیک معادل در پیچ‌های ردیف پایین اتصال رخ داده است. در انتهای تحلیل، بیشترین میزان کرنش پلاستیک برابر ۰/۴ است. کمایش قابل توجه بال بالایی تیر و جداسازی صفحات انتهایی نسبت به



شکل ۲۰- کانتور تنش فون میزس در نمونه چهارم

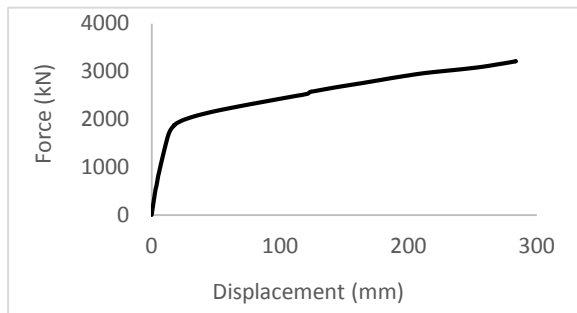


شکل ۲۱- نمودار نیرو- تغییر مکان در نمونه چهارم

تیر در مجاورت بال بالا شروع شده است. میزان جاری شدگی بال پایینی تیر نیز افزایش یافته و به صورت عمودی در جان انتشار می‌یابد. با ادامه بارگذاری، کمایش در صفحه جان تیرها نیز رخ می‌دهد. در انتهای تحلیل، بیشترین میزان کرنش پلاستیک برابر ۰/۱۳۵ است.

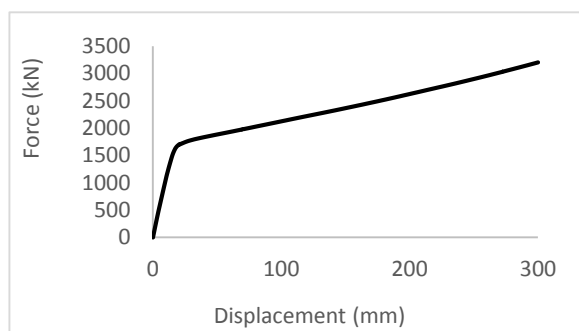
در مدل پنجم، جاری شدگی اولیه در بال بالایی تیرها در مجاورت ستون در تغییر مکان ۲/۱ سانتی‌متر همراه با کمایش بال بالایی تیر رخ داده است. همچنین جاری شدگی با شدت کمتر در محل اتصال بال پایینی تیر به ستون دیده می‌شود. با افزایش تغییر مکان ستون، جاری شدگی در جان

بیشترین نیروی تحمل شده برابر ۳۲۱۴ کیلونیوتن است که نسبت به مدل اول، یک درصد افزایش یافته است. منحنی نیرو- تغییر مکان دارای بخش سخت‌شوندگی است.



شکل ۲۳- نمودار نیرو- تغییر مکان در نمونه پنجم

جاری‌شدگی در پیچ‌ها اتفاق نیفتاده و از این لحاظ، رفتار بسیار مطلوبی رخ داده است. سختی اولیه برابر ۱۰۶/۱ کیلونیوتن بر میلی‌متر است. بیشترین نیروی تحمل شده برابر ۳۲۰۶ کیلونیوتن است که نسبت به مدل اول، در حدود یک درصد افزایش یافته است. منحنی نیرو- تغییر مکان پایدار و دارای بخش سخت‌شوندگی است و شکل پذیری بالایی در رفتار سازه مشاهده می‌شود.



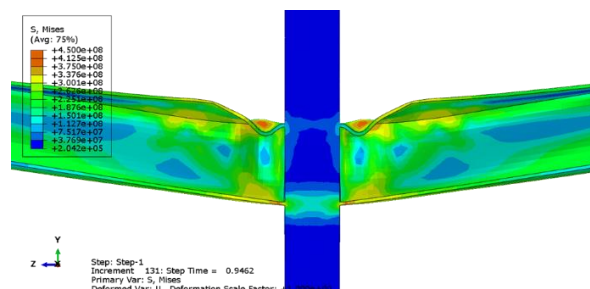
شکل ۲۵- نمودار نیرو- تغییر مکان در نمونه ششم

حاصل از تحلیل مدل‌ها و مقایسه آنها را می‌توان به شرح ذیل ارایه نمود:

- مدل اجزای محدود توانسته به خوبی مقاومت نهایی

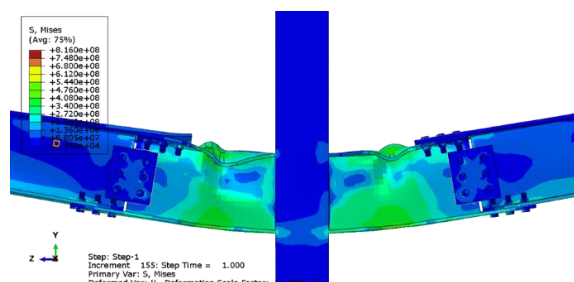
بررسی مقاومت اتصالات درختی پیچی در برابر... / ضیائی و همکاران

پلاستیک‌شدگی از بال‌های پایینی تیر به داخل ستون نیز گسترش یافته است. کمانش قابل توجه بال بالایی تیر و جداشدگی صفحات انتهایی نسبت به یکدیگر رخ داده است. سختی اولیه برابر ۱۰۷/۹ کیلونیوتن بر میلی‌متر است.



شکل ۲۲- کانتور تنش فون میزس در نمونه پنجم

در مدل ششم، جاری‌شدگی اولیه در مرکز کاهش‌یافتگی تیر در بال بالا و پایین در تغییر مکان ۱/۹ سانتی‌متر رخ داده است. با افزایش تغییر مکان ستون، جاری‌شدگی از محل‌های ذکر شده در راستای عمودی گسترش یافته و هم‌زمان کمانش بال بالایی تیر شروع شده است. با ادامه بارگذاری، کمانش در صفحه جان تیرها نیز رخ می‌دهد. در انتهای تحلیل، بیشترین میزان کرنش پلاستیک برابر ۰/۲۷ است. کمانش قابل توجه بال بالایی رخ داده است. هیچ نوع



شکل ۲۴- کانتور تنش فون میزس در نمونه ششم

۳- نتیجه‌گیری

در این تحقیق رفتار اتصالات ستون درختی مختلف بعد از بروز حذف ستون مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج

مراجع

- [1] Yang, B., Tan, K. H. (2013). Experimental tests of different types of bolted steel beam-column joints under a central-column-removal scenario, *Engineering Structures*, 54, 112–130.
- [2] Chen, C.-C., Lin, C.-C., & Lin, C.-H. (2006). Ductile moment connections used in steel column-tree moment-resisting frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(8), 793–801
- [3] Oh, K., Lee, K., Chen, L., Hong, S.-B., & Yang, Y. (2015). Seismic performance evaluation of weak axis column-tree moment connections with reduced beam section. *Journal of Constructional Steel Research*, 105, 28–38.
- [4] Zhong, W., Meng, B., & Hao, J. (2017). Performance of different stiffness connections against progressive collapse. *Journal of Constructional Steel Research*, 135, 162–175.
- [5] Zhang, A., Guo, Z., & Liu, X. (2017). Seismic performance of Z-type cantilever beam splices of column-tree connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 133, 97–111.
- [6] Meng, B., Zhong, W., & Hao, J. (2018). Anti-collapse performances of steel beam-to-column assemblies with different span ratios. *Journal of Constructional Steel Research*, 140, 125–138.
- [7] Tang, H., Deng, X., Jia, Y., Xiong, J., & Peng, C. (2019). Study on the progressive collapse behavior of fully bolted RCS beam-to-column connections. *Engineering Structures*, 199, 109618.
- [8] Chen, C., Qiao, H., Wang, J., & Chen, Y. (2020). Progressive collapse behavior of joints in steel moment frames involving reduced beam section. *Engineering Structures*, 225, 111297.
- [9] Xinheng H., Elchalakani M., Peng Y., Rui L., Yongchao N., Sheng H. (2023). Progressive collapse resistance of steel frame with beam to column transfer structure under a middle column-removal scenario, *Structures*, Volume 51, Pages 1-12.

[۱۰] رزاقی لنگرودی ج.، بهارمست حسین آبادی ا.، بررسی مکانیزم و محل تشکیل مفصل پلاستیک در قاب‌های خمشی فولادی با اتصال صلب درختی ماهیچه‌ای، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان، ۱۳۹۴.

اتصال و افت مقاومت اتصال نمونه واقعی آزمایش شده توسط محققین قبلی را پیش‌بینی نماید.

- در تمامی اتصالات، حذف ستون که با تغییر مکان عمودی رو به پایین ستون شبیه‌سازی شده است باعث کماتش بال بالایی تیر درختی متصل به ستون شده است. شدت این کماتش در برخی از مدل‌ها بسیار بیشتر است.

- اتصال درختی با استفاده از صفحه انتهایی توسعه یافته به دلیل وقوع کرنش پلاستیک بالا در ردیف پایینی پیچ‌ها و بروز پاره‌شدگی در آن رفتار مطلوبی نداشته است. در صورت استفاده از فولاد مقاوم‌تر برای ستون و قطعه تیر درختی، میزان این کرنش حتی افزایش یافته است که باعث ایجاد کرنش پلاستیک‌شدگی بسیار بیشتر در پیچ‌های ردیف پایین و پاره‌شدگی این پیچ‌ها شده است. بنابراین استفاده از این نوع اتصال توصیه نمی‌شود.

- اتصال درختی با تیر کاهش‌یافته مطلوب‌ترین رفتار را در بین اتصالات بررسی شده‌داشته است. در این مدل مفصل پلاستیک در محل کاهش‌یافتگی تیر دور از جوش اتصال تیر درختی به ستون رخ داده است و امکان بروز شکست در جوش به شدت کاهش یافته است. استفاده از فولاد پرمقاومت‌تر در ستون و قطعه تیر درختی باعث بهبود بیشتر رفتار این نوع اتصال شده است.

- اتصال مستقیم تیر به ستون با جوش نفوذی به دلیل بروز کرنش پلاستیک معادل بالا در محل جوش‌ها رفتار مطلوبی نداشته است و استفاده از آن توصیه نمی‌شود.

- سوراخ‌کاری بال پایینی قطعه تیر درختی باعث کاهش حداکثر کرنش پلاستیک معادل در سازه به میزان ۶٪ شده است و تنش پیچ‌ها را نیز کاهش داده است.

- به‌طور کلی و با بررسی نتایج حاصل از تحلیل‌ها و مقایسه رفتار اتصال ستون درختی و اتصال مستقیم تیر به ستون می‌توان گفت که استفاده از اتصال ستون درختی منحنی نیرو- تغییر مکان پایدار با شکل پذیری بالا را در زمان حذف ستون فراهم نموده است.