

ارزیابی و پیشنهاد حالت بهینه برای اتصال RBS با کاهش در ارتفاع جان تیر

حسین سلیمانی (کارشناس ارشد)

بهزاد رافضی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

مهندسی عمران: شریف
دوری: ۲۶-۲، شماره ۳، ص. ۴۱-۳۳

بر اثر زلزله نورتیج کالیفرنیا ۱۹۹۴ بسیاری از اتصالات متداول گیردار (BWFF) در ساختمان های اسکلت فلزی دچار شکست ترد شدند. اتصال RBS^۲ به عنوان جایگزینی برای این اتصالات معرفی شد که با اعمال کاهش موضعی مقطع تیر در نزدیکی بر ستون شکل می‌یابد و از مزایای آن جذب انرژی و دوران پلاستیک بالا است. در نوشتار حاضر نوع جدیدی از اتصال RBS ارائه شده و در یک مطالعه پارامتریک، عملکرد آن در بارگذاری چرخه‌یی سنجیده شده است. از مزایای این اتصال، حفظ فشردگی مقطع تیر و عدم کاهش قابل توجه در سختی پیچشی و نیز کاهش کمناش‌های موضعی دانسته شد. همچنین معیار جدیدی برای توصیف نرخ کاهش مقاومت پس از رسیدن به بیشینه تحمل بار نمونه مورد استفاده قرار گرفت.

واژگان کلیدی: اتصال کاهش یافته، اتصال استخوانی، کاهش در ارتفاع جان تیر، بارگذاری چرخه‌یی، روش اجزا محدود.

۱. مقدمه

بیشتر، در حالی که اتصال کاهش یافته راه حلی است که کاهش در مقاومت و سختی عضو را پیشنهاد می‌دهد.

در مطالعات قبلی برش‌های مختلفی برای ایجاد ضعف موضعی در تیر پیشنهاد شده است.^[۱-۵] نوعی از اتصال کاهش یافته، معروف به «اتصال استخوانی»^۳، که با ایجاد برش کمانی در بال تیر ایجاد می‌شود بیش از انواع دیگر برش‌ها مورد توجه قرار گرفته و به صورت عملی اجرا شده است.^[۶-۸]

با انجام مطالعات آزمایشگاهی گسترده تأیید شد که اتصال استخوانی شکل پذیری و قابلیت دوران خمیری بالایی داشته و با ایجاد مفصل خمیری در منطقه‌ی بار یک شده ضمن محافظت از اتصال، اتلاف انرژی بیشتری به ارمغان می‌آورد. از مزایای دیگر اتصال استخوانی اقتصادی بودن و سهولت اجرای آن است به نحوی که برای ایجاد این نوع اتصال می‌توان برش در تیر را در کارخانه انجام داد و سپس تیر را به کارگاه ساختمانی منتقل کرد. از جمله اشکالات اتصال استخوانی کاهش توانایی تحمل بار آن بر اثر تغییر مکان‌های بزرگ است. دلیل این امر ضعیف شدن مقطع بال تیر و تأثیر آن بر کاهش مقاومت مقطع نسبت به تغییر شکل‌های خارج از صفحه است که بر اثر آن تیر در ناحیه‌ی بار یک شده دچار کمناش‌های موضعی و جانبی می‌شود.^[۹]

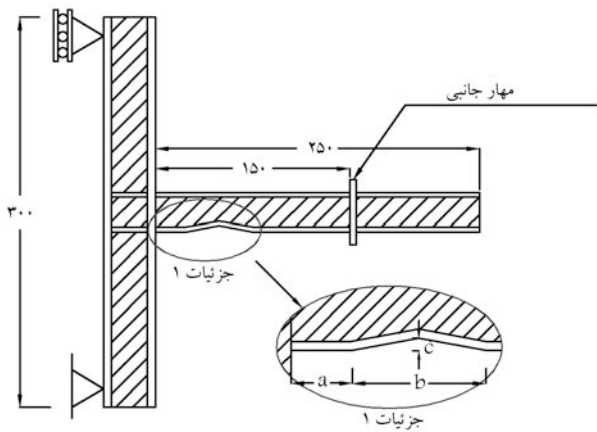
مطالعات آزمایشگاهی مطابق توصیه‌های محققین انجام گرفت و طی آن هشت نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته شد و تحت بارگذاری چرخه‌یی قرار گرفت.^[۱۰-۱۲] هدف از انجام این آزمایش‌ها ارزیابی تأثیر نحوه‌ی اتصال جان تیر به ستون (پیچی یا جوشی) و اثر مقاومت برشی چشمه‌ی اتصال بر عملکرد اتصال استخوانی بود. در این آزمایش‌ها نمونه‌هایی با چشمه‌ی اتصال قوی یا متوسط دارای عملکرد مطلوب، و نمونه‌هایی با

یکی از مهم‌ترین حالتی که در آن سازه تحت اثر بار زلزله دچار خرابی می‌شود، شکست در اتصالات سازه است. گسیختگی در اتصالات سبب از بین رفتن یک پارچگی سازه و خرابی‌های پیش‌رونده می‌شود. قبل از زلزله‌ی نورتیج (۱۹۹۴)، قاب‌های فولادی مقاوم در برابر خمش با اتصالات جوشی در مناطق لرزه‌خیز آمریکا بسیار معمول بود. در این قاب‌ها از اتصالات گیردار «جان پیچی و بال جوشی (BWFF)» استفاده می‌شد. با مطالعات آزمایشگاهی مجدد در خصوص اتصال BWFF، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی بسیار کم و شکست ترد در جوش‌های بال تیر به ستون در تغییر مکان‌های اندک مشاهده شد.^[۱-۴]

یکی از راهکارهای پیشنهادی برای بهبود عملکرد این نوع اتصالات، اعمال کاهش موضعی در مقطع تیر معروف به RBS بود. در این حالت به فاصله‌ی اندکی از بر ستون به صورت موضعی قسمتی از جان تیر بریده می‌شود تا ظرفیت خمشی تیر در آن منطقه کاهش یابد. با این عمل مفصل خمیری دور از محل اتصال تیر به ستون و در خود تیر ایجاد می‌شود و از شکست در اتصال و جوش بال تیر به ستون جلوگیری می‌شود.

تا قبل از سال ۱۹۹۴، هیچ‌گونه مبادرتی به استفاده‌ی عملی از مفهوم RBS در ساختمان‌های فلزی به عمل نیامده بود و هیچ روش طراحی مبتنی بر آن نیز وجود نداشت. به علاوه، بسیار محتاطانه با آن برخورد می‌شد زیرا معمولاً راه حل اشکالات سازه‌یی به صورت حسی عبارت است از تقویت مقاطع اعضا و به‌کارگیری مصالح

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۵/۵، داوری ۱۳۸۷/۱۰/۲۲، پذیرش ۱۳۸۷/۶/۴.



شکل ۱. برش گوه‌بی، پارامترهای برش و نمونه‌ی قبل از تحلیل.

مقاطع تیر و ستون در طول مطالعه‌ی پارامتریک ثابت فرض می‌شوند. به‌منظور مهار جانبی تیر و نیز محدود کردن حرکت آن در صفحه‌ی خود، یک مهار جانبی به فاصله‌ی ۱/۵ متر از بر ستون به آن متصل شد.^[۱۳]

چنان که ذکر شد، چشمه‌ی اتصال از نظر مقاومت برشی به سه دسته‌ی ضعیف، متوسط و قوی دسته‌بندی می‌شود. براساس مطالعات انجام شده^[۸،۱۴] مقاومت برشی چشمه‌ی اتصال نقش مهمی در عملکرد اتصال در بارگذاری رفت و برگشتی دارد. در یک چشمه‌ی اتصال ضعیف اتلاف انرژی قابل ملاحظه و دوران خمیری بالا حاصل می‌شود. اما در این حالت چون چشمه‌ی اتصال ستون کاملاً به وضعیت تسلیم می‌رسد، احتمال شکست در جوش بال تیر به دلیل تغییر مکان‌های گسترده زیاد است و ممکن است اتصال قبل از رسیدن به دوران خمیری مورد نیاز دچار شکست در جوش شود.

در نمونه‌هایی با چشمه‌ی اتصال قوی به دلیل صلبیت چشمه‌ی اتصال، خمیرسانی تنها در ناحیه‌ی کاهش یافته‌ی تیر رخ می‌دهد. در این حالت چشمه‌ی اتصال به دلیل صلبیت در تغییر مکان‌ها و اتلاف انرژی نقشی ندارد و اتلاف انرژی بسیار کم‌تری به وجود می‌آید. چشمه‌ی اتصال قوی همچنین موجب ایجاد کمانش‌های جانبی و محلی در تیر، کاهش ظرفیت باربری تیر، و نیز پیچش ستون خواهد شد.^[۸]

در مطالعه‌ی حاضر، چشمه‌ی اتصال مورد استفاده بر مبنای روابط به کار گرفته شده در یکی از تحقیقات^[۱۴] از نوع متوسط فرض می‌شود. در اتصال مفروض، طبق آیین‌نامه‌های آژانس مدیریت بحران فدرال (FEMA)^[۱۵] و (AISC)^[۱۳]، حضور ورق‌های پیوستگی روبه‌روی بال‌های تیر ضرورت داشت؛ با اندکی محافظه‌کاری عرض و ارتفاع این ورق‌ها برابر بال‌های تیر در نظر گرفته شد.

طبق توصیه‌های آژانس مدیریت بحران فدرال (FEMA) باید هم‌زمان با تسلیم خمشی تیر، تسلیم برشی چشمه‌ی اتصال آغاز شود. این حالت در چشمه‌ی اتصال متوسط رخ می‌دهد. چشمه‌ی اتصال متوسط (متعادل) ضمن شرکت داشتن در خمیرسانی و داشتن سهم مناسبی از اتلاف انرژی و دوران خمیری، از کمانش‌های موضعی و پیچشی تیر می‌کاهد.

۲.۲. معیارهای انتخاب اتصال بهینه

در این فصل معیارهای مهم در انتخاب اتصال بهینه معرفی و به ترتیب اولویت طبقه‌بندی می‌شوند. قبل از ارزش‌گذاری معیارهای انتخابی، معیار جدیدی که توسط مؤلفین پیشنهاد شده معرفی می‌شود.

چشمه‌ی اتصال ضعیف دارای عملکرد نامطلوب ارزیابی شدند. همچنین مشخص شد که اتصال جوشی جان تیر به ستون عملکرد بهتری نسبت به اتصال پیچی آن دارد.^[۸]

یادآور می‌شود چشمه‌ی اتصال ناحیه‌ی از ستون است که مقابل بال‌های تیر قرار می‌گیرد و از نظر مقاومت برشی به سه نوع چشمه‌ی اتصال ضعیف، متوسط و قوی گروه‌بندی می‌شود. چشمه‌ی اتصال قوی مقاومت خوب ولی شکل‌پذیری پایینی دارد. چشمه‌ی اتصال ضعیف شکل‌پذیری بسیار خوبی نشان می‌دهد ولی ریسک شکست در اتصال را به شدت تقویت می‌کند. چشمه‌ی اتصال متوسط حالت بهینه‌ی است مابین دو حالت قبلی، و از مقاومت و شکل‌پذیری مطلوبی برخوردار است. به‌طور معمول، کاهش در مقطع بال تیر نخست باعث کمانش موضعی جان و سپس کمانش پیچشی و موضعی بال در بارگذاری می‌شود.^[۱۴] در تحقیقات محققین نشان داده شده است که کمانش موضعی جان مهم‌ترین حالت کمانشی در تیرهایی است که با برش موضعی در بال‌هایشان تضعیف شده‌اند.^[۱۱]

هدف تحقیق حاضر، مطالعه‌ی پارامتریک تحلیلی نوع جدیدی از اتصال کاهش یافته است. این اتصال ابتدا به صورت نظری در سال ۲۰۰۵ معرفی شد^[۱۳] و سپس به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. به صورت شماتیک این اتصال به شکل تیری است که یک مقطع گوه‌بی از جان آن برداشته شده و بال دوباره به آن متصل شده است. از مزایای حالت جدید نسبت به حالت کاهش در بال تیر، فشردگی بیشتر مقطع تیر است. همچنین به دلیل سختی پیچشی قابل توجه تیر، مقطع مقاومت بیشتری در برابر کمانش جانبی پیچشی از خود نشان می‌دهد.

در این نوشتار مزایا و معایب این اتصال و رفتار آن در بارگذاری رفت و برگشتی شبه لرزه‌یی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به همین منظور پارامترهای برش موضعی در تیر (ابعاد تیر و فاصله از بر ستون)، به صورت گام‌به‌گام تغییر داده می‌شوند و تغییر عملکرد اتصال با تغییر پارامترهای برش، به صورت جدول ارائه و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ارائه‌ی نتایج براساس معیارهایی از تحقیقات مختلف، و نیز یک معیار جدید ابداعی است. در نهایت با بررسی نتایج حاصل از مطالعات پارامتریک، پارامترهای بهینه‌ی برش در تیر برای ایجاد اتصال مشخص می‌شود. همچنین اتصال یاد شده و اتصالات مشابه با آن در موارد مختلفی با هم مقایسه می‌شوند.

۲. مطالعات پارامتریک

۱.۲. طراحی نمونه‌ها

در شکل ۱ یک اتصال کاهش یافته با برش گوه‌بی در جان تیر نشان داده شده است. پارامترهای برش عبارت‌اند از:

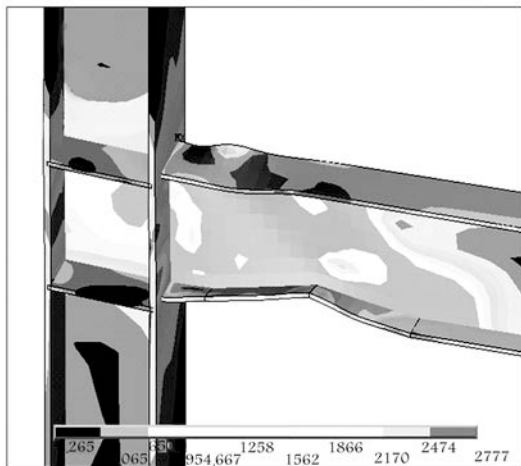
a : فاصله‌ی برش از بر ستون؛

b : طول منطقه‌ی اعمال برش؛

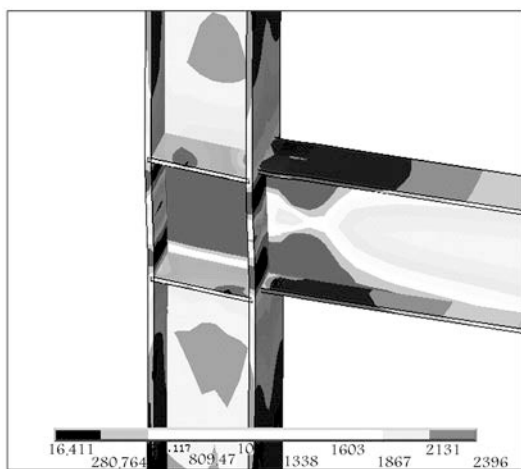
c : ارتفاع برش از پایین‌ترین قسمت لبه‌ی بال تیر.

پارامتر r نیز که در ادامه خواهد آمد برابر نسبت c/b است.

شکل ۱ ابعاد و محل مهاربندی نمونه را نیز نشان می‌دهد. تمامی نمونه‌ها به صورت یک تیر طره‌یی با مقطع IPE ۴۰۰ به طول ۲/۵ متر در نظر گرفته شده و به وسط ستونی با مقطع IPB ۳۶۰ به ارتفاع ۳ متر گیردار شده‌اند. تکیه‌گاه ستون در یک انتها مفصلی و در انتهای دیگر از نوع غلتکی است.



الف) اتصال با کاهش گوه یی در ارتفاع جان تیر؛



ب) اتصال ساده تیر به ستون.

شکل ۳. نمودار تنش فون میسس سه بعدی در تغییر مکانی به اندازه‌ی ۱۵cm در انتهای تیر.

تیر به ستون شده است. اگر تمرکز تنش در محل اتصال بال تیر به ستون رخ دهد موجب شکست جوش بال تیر به ستون می‌شود و در نهایت سبب گسیختگی کلی اتصال می‌شود. در نتیجه نمونه‌ی شکل ۳ الف در دور کردن تمرکز تنش از بر ستون بسیار موفق تر از نمونه‌ی شکل ۳ ب عمل کرده است.

۲. توانایی در اتلاف انرژی نیروهای وارده (به شکل مجموع مساحت زیر منحنی‌های بار - تغییر مکان در چرخه‌های بارگذاری). علت تعریف این معیار به دلیل اهمیت میزان استهلاك انرژی حاصل از بارهای دینامیکی رفت و برگشتی است. نمودار بار - تغییر مکان انتهای تیر برای یک نمونه‌ی کاهش یافته در جان در شکل ۲ آمده است.

۳. سختی اولیه بیشتر در نمودار بار - تغییر مکان.

۴. کمینه بودن نرخ کاهش مقاومت پس از رسیدن به بیشینه‌ی تحمل نیرو (DRAMP).

۵. بیشینه بودن ممان نهایی تحمل شده توسط تیر (M_{max})؛ ممان از طریق حاصل ضرب نیروی اعمالی به انتهای تیر در طول آزاد تیر از بر ستون محاسبه می‌شود.

۱.۲.۲. معرفی معیار جدید نرخ کاهش مقاومت پس از نقطه‌ی بیشینه‌ی

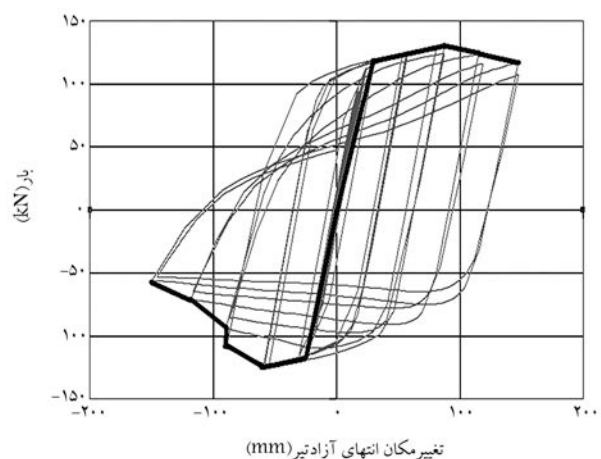
مقاومت

در مطالعه‌ی حاضر معیار جدیدی برای تعیین میزان کاهش مقاومت اتصال پس از رسیدن اتصال به مقاومت بیشینه، توسط مؤلفین پیشنهاد شده است. این معیار جدید «نرخ کاهش مقاومت پس از نقطه‌ی بیشینه (DRAMP)» نامیده می‌شود و آن در حقیقت، شیب منحنی بار - تغییر مکان پس از نقطه‌ی بیشینه‌ی تحمل نیرو است. مقدار این معیار با استفاده از منحنی پوش نمودار بار - تغییر مکان در چرخه‌های بارگذاری در طرف مثبت و منفی محور تغییر مکان قابل محاسبه است. (بار، نیروی وارد شده بر انتهای آزاد تیر و تغییر مکان، جابه‌جایی انتهای آزاد تیر در جهت نیروی وارد شده بر آن است). شکل ۲ نشان دهنده نمودار بار - تغییر مکان یک اتصال نمونه با کاهش در ارتفاع جان تیر به همراه پوش رسم شده بر نمودار است.

۲.۲.۲. ارزش‌گذاری معیارهای انتخاب اتصال بهینه

طبق اهمیت اطلاعات خروجی از هر تحلیل، یک طبقه‌بندی براساس ارزش هر معیار در دست‌یابی به یک اتصال بهینه صورت می‌گیرد. از آنجا که مهم‌ترین هدف در استفاده از اتصال کاهش یافته، دور کردن مرکز تنش از اتصال و چشمه‌ی اتصال است، معیارهای زیر که به ترتیب اهمیت شماره‌گذاری شده‌اند می‌توانند برای ارزش‌گذاری عملکرد اتصال مورد استفاده قرار گیرند.

۱. موفقیت در دور کردن مرکز تنش از چشمه‌ی اتصال، اتصال تیر به ستون، و نیز کمینه‌کردن کماتش‌های موضعی بال و جان تیر و کماتش جانبی و بیچشی تیر. مثلاً در شکل ۳ الف نمودار تنش فون میسس سه بعدی متناظر با تغییر مکانی برابر ۱۵cm در انتهای تیر برای اتصال با کاهش گوه‌یی در ارتفاع جان تیر، و در شکل ۳ ب نمودار تنش فون میسس سه بعدی نظیر تغییر مکان برابر ۱۵cm در انتهای تیر برای اتصال ساده‌ی تیر به ستون نشان داده شده است. خاطرنشان می‌سازد معیار فون میسس معیاری معتبر برای تشخیص شروع تسلیم در مصالح شکل پذیر تحت تنش‌های مرکب سه بعدی است و مطابق این معیار هنگامی که تفاوت تنش‌های اصلی در ماده به مقدار مشخصی می‌رسد، ماده دچار تسلیم شده و جاری می‌شود. واضح است که در شکل ۳ الف تمرکز تنش از اتصال و چشمه‌ی اتصال دور شده و در ابتدای ناحیه‌ی کاهش یافته تمرکز یافته است، ولی در شکل ۳ ب تمرکز تنش مستقیماً متوجه چشمه‌ی اتصال و ناحیه‌ی جوش بال



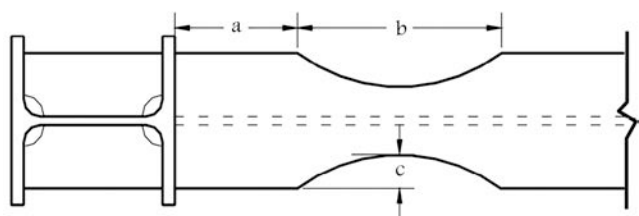
شکل ۲. نمودار بار - تغییر مکان نمونه‌ی شماره ۹ (از جدول ۱) و پوش رسم شده بر نمودار.

۳. تحلیل اجزا محدود ۱.۳. مدل سازی و تحلیل

تحلیل‌های مطالعه‌ی حاضر با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود Ansys ۹٫۰ انجام گرفته است.^[۱۶] این نرم‌افزار قادر به در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ و تحلیل غیرخطی سازه‌ها، حالات غیرخطی هندسی، و رفتار غیرخطی مصالح در حالت تحلیل سه‌بعدی است. برای مدل‌سازی تیر و ستون از المان پوسته‌یی چهارگویی (المان ۴۳ Shell) با قابلیت تغییر مکان‌ها و کرنش‌های بزرگ و حالات غیرکشسان استفاده شد. این المان در هر گره دارای سه‌درجه آزادی انتقالی و سه‌درجه آزادی دورانی است. تصویر مدل اجزاء محدود یکی از نمونه‌ها در شکل ۴ آمده است.

چنان که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، یک شبکه‌ی ظریف‌تر در منطقه‌ی کاهش یافته اعمال شده است چراکه تسلیم مصالح بیشتر در آن محل اتفاق می‌افتد و نیازمند دقت محاسبات بالاتری است.

برای مقاطع فولادی به کار رفته در این پروژه از فولاد با مقاومت تسلیم $240 \frac{kgf}{cm^2}$ و مقاومت نهایی $370 \frac{kgf}{cm^2}$ استفاده شد. مدل‌سازی رفتار فولاد با استفاده از معیار



شکل ۵. برش استخوانی و پارامترهای برش آن.

تسلیم فون میسس و در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح با ضریب پواسون ۰٫۳ انجام گرفت. از منحنی فولاد سه‌خطی با سخت‌شوندگی سینماتیک استفاده شد. عملکرد نمونه‌ها در این سری تحلیل‌ها به صورت جدول با یکدیگر مقایسه و نهایتاً طرح ایده‌آل براساس معیارهای بخش ۲.۲.۲ انتخاب می‌شود.

همچنین یک نمونه اتصال BWWF که اتصال ساده‌ی تیر به ستون بدون باریک‌شدگی است (شکل ۳ ب) و یک نمونه اتصال استخوانی (شکل ۵) براساس راهنمایی‌های طراحی انگل‌هارت^[۱۶] مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج آن با حالت اتصال کاهش در جان مقایسه شد.

۲.۳. تصدیق مدل و فرایند بارگذاری

به منظور کسب اطمینان از صحت مطالعات پارامتریک تحلیلی انجام شده در تحقیق حاضر سه نمونه‌ی آزمایشگاهی^[۱۷، ۱۸] و نیز یک نمونه‌ی مدل‌سازی اجزا محدود^[۱۹] که توسط محققین پیشین بررسی شده بود مجدداً به روش اجزاء محدود مدل‌سازی و بارگذاری شدند. نتایج به دست آمده از این مدل‌سازی انطباق بسیار خوبی با نتایج پیشین داشتند.

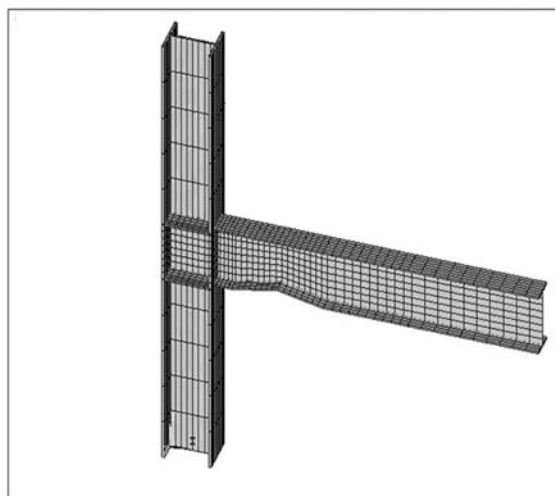
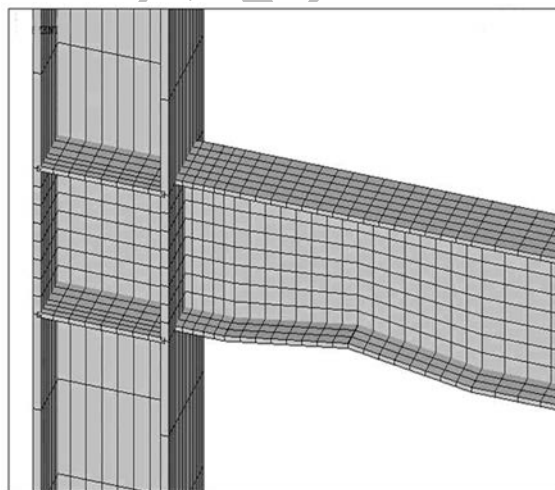
در شکل ۶ نمودار بار- تغییر مکان انتهای تیر برای یک نمونه‌ی آزمایشگاهی^[۱۷] و نیز نتایج به دست آمده از تحلیل اجزاء محدود این نمونه در مطالعه‌ی حاضر آورده شده است.

بارگذاری چرخه‌یی براساس رژیم کنترل تغییر مکان، بر پایه‌ی آیین‌نامه‌ی بارگذاری چرخه‌یی اعضا فولادی^[۱۸] (ATC-۲۴) مطابق شکل ۷ بر نمونه‌های مطالعه‌ی حاضر اعمال شد. یادآور می‌شود بارگذاری به شکل اعمال تغییر مکان بر انتهای آزاد تیر تا دوران خمیری ۰٫۰۶ رادیان ادامه یافت که ادامه بارگذاری بیش از این مقدار، به سبب رخداد کمناش‌های شدید موضعی بال و جان تیر، کمناش جانبی پیشگی، و نیز کاهش شدید مقاومت مطابق با عملکرد تیر در واقعیت نخواهد بود.^[۹]

۴. بحث بر روی نتایج مطالعات پارامتریک و انتخاب

اتصال بهینه

به منظور انتخاب اتصال بهینه، ۲۸ نمونه‌ی اتصال با کاهش موضعی در جان تیر با پارامترهای برش مختلف (a, b, c)، و نیز یک نمونه‌ی اتصال استخوانی مورد تحلیل قرار گرفتند. برای این منظور، در هر تحلیل فقط یکی از پارامترهای برش محلی در تیر (یعنی a یا b یا c) با گام‌های کوچک افزایش یا کاهش می‌یافت. عملکرد نمونه با این تغییر، براساس معیارهای بخش ۲.۲.۲ با نمونه‌های پیشین مشابه در مطالعه‌ی حاضر مقایسه می‌شد و سپس بهترین اندازه‌ی برآورد شده برای پارامتر بر نمونه اعمال شده و در مرحله‌ی بعد همین عمل روی پارامتر دیگری آغاز شد. هدف از این کار، رسیدن به اندازه‌های برش موضعی در تیر بود که بهترین عملکرد را براساس معیارهای ذکر شده



شکل ۴. تصویری از مدل اجزاء محدود.

برای اتصال داشته باشند. خلاصه‌یی از تحلیل‌های انجام‌گرفته در جدول ۱ آمده است.

در جدول ۱ براساس نمودار بار - تغییر مکان هر نمونه مقادیر سختی، بیشینه ممان به دست آمده، اتلاف انرژی و نرخ کاهش مقاومت پس از رسیدن به بیشینه‌ی تحمل نیرو (DRAMP)، محاسبه و درج شده است. با توجه به این جدول می‌توان اطلاعات خروجی از تحلیل هر نمونه را با نمونه‌ی دیگر مقایسه کرد.

اولین نمونه‌ی ساخته‌شده در جدول ۱ با شماره‌ی (۱) مشخص شده است. این نمونه با پارامترهای برش مطابق آزمایش انجام‌شده‌ی پیشین^[۱۲] طراحی و تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفت. سپس با ثابت نگه‌داشتن سایر ابعاد نمونه، پارامتر a از مقدار صفر در اولین آزمایش به مقادیر $0,75d$ ، $0,5d$ و $0,25d$ در تحلیل‌های ۲ تا ۵ تغییر یافت تا عملکرد اتصال با تغییر در پارامتر a بررسی شود (ارتفاع تیر است).

با بررسی اطلاعات خروجی از این پنج تحلیل به ترتیب اهمیت آنها مطابق بخش ۲.۲.۲، در این مرحله اندازه‌ی بهینه برای پارامتر a مقدار $0,25d$ تعیین شد. به‌منظور دست‌یابی به مقدار بهینه برای پارامتر a ، در تحلیل‌های ۶ و ۷ از جدول ۱ مقادیر $0,125d$ و $0,375d$ نیز مورد بررسی قرار گرفت. پس از تحلیل شماره ۷ و با بررسی نتایج، a بهینه برابر با $0,375d$ تعیین شد. مقدار a به دست آمده در این مرحله را a^* نامیده شد.

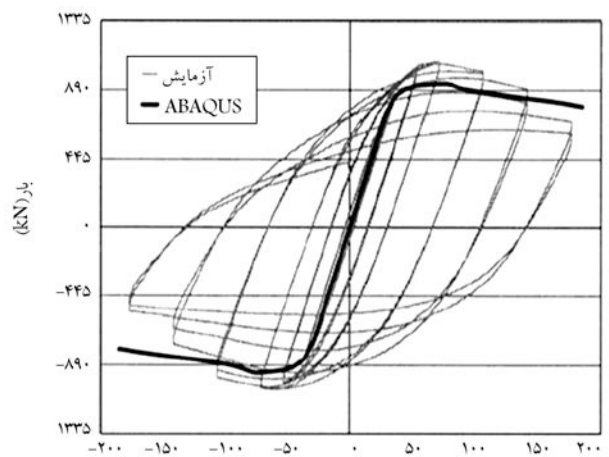
همین روند به‌صورت کاملاً مشابه برای یافتن پارامترهای بهینه‌ی b و c نیز انجام گرفت. به‌طوری‌که مشابه حالت قبل در حین تغییر در یک پارامتر سایر ابعاد ثابت نگه داشته می‌شد. پارامترهای بهینه‌ی محاسبه شده برای b و c تا انتهای تحلیل ۱۸، به ترتیب $b^* = 0,175d$ و $c^* = 0,1d$ تعیین شدند.

به‌منظور بهینه‌سازی مجدد پارامترهای برش به‌شکلی جدید، یک نسبت جدید به‌صورت ارتفاع ناحیه‌ی کاهش یافته تقسیم بر عرض ناحیه‌ی کاهش یافته ($r = c/b$) تعریف شد. ($r^* = c^*/b^*$). در تحلیل‌های شماره ۱۹ و ۲۰ برای رسیدن به r بهینه $r^* = 0,25$ انتخاب شد. طریقه‌ی اعمال آن به این شکل بود که در تحلیل شماره ۱۹، $b = b^*$ و $c = 0,25c^*$ فرض شد و در تحلیل شماره ۲۰، $b = 0,8 \times b^*$ و $c = c^*$ فرض شد.

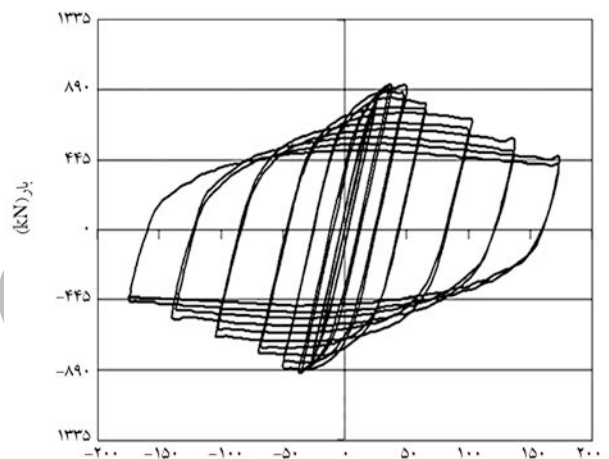
در دو تحلیل بعدی $r^* = 0,8r$ (یک بار $b = 0,25b^*$ و $c = c^*$ و بار دیگر $b = b^*$ و $c = 0,8c^*$) اعمال شد. پس از انجام تحلیل ۲۴ و به‌دست آوردن مقدار بهینه برای پارامتر r ، پارامترهای b و c به دست آمده و مرتبط با r ، b^* و c^* نامیده شدند. سپس مجدداً با ثابت نگه‌داشتن سایر ابعاد در تحلیل‌های ۲۵ تا ۲۸ پارامتر a به‌صورت گام‌به‌گام تغییر داده شد و a بهینه‌ی حاصله پس از تحلیل ۲۸، a^{**} نامیده شد.

با افزایش در پارامتر a مقطع باریک‌شده‌ی تیر از بر ستون دور شده و سبب ایجاد مفصل خمیری در اتصال به جای مقطع باریک‌شده می‌شود. با کاهش بسیار زیاد a مجدداً تسلیم در خود اتصال رخ می‌دهد. مقدار a بهینه باعث می‌شود که تسلیم عمدتاً در محل باریک‌شدگی مقطع تیر رخ دهد و اتصال از وقوع تمرکز تنش مصون بماند.

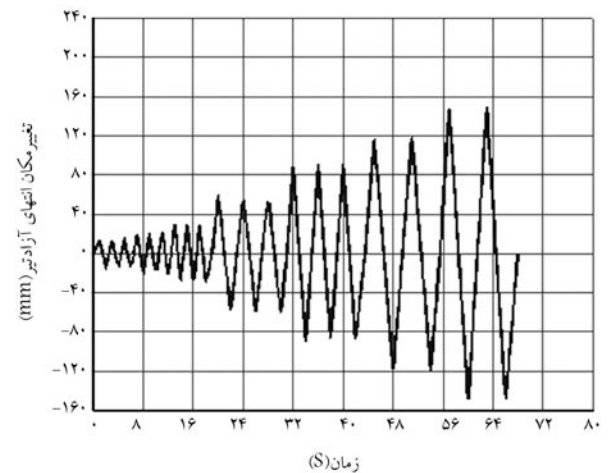
با افزایش پارامتر b ، طول ناحیه‌ی باریک‌شدگی افزایش می‌یابد و عملاً نقش باریک‌شدگی تیر کاهش یافته و مفصل خمیری به محل اتصال منتقل می‌شود. با کاهش زیاد پارامتر b مشاهده می‌شود که به‌دلیل کوچک‌تر شدن ناحیه‌ی تضعیف‌شده، مفصل خمیری از ناحیه‌ی کاهش‌یافته‌ی تیر به اتصال منتقل می‌شود. اما در مورد پارامتر c باید گفت که با افزایش آن مقطع تیر بسیار ضعیف و دچار کماتش‌های



شکل ۶. نمودار بار - تغییر مکان انتهای آزاد تیر (الف) نمونه آزمایشگاهی؛



شکل ۷. نمودار تغییر مکان‌های چرخه‌یی اعمال شده به انتهای تیر.



شکل ۸. تغییر مکان انتهای آزاد تیر (ب) نمونه‌ی تحلیل شده توسط نرم افزار Ansys.

جدول ۱. مقایسه‌ی نتایج تحلیل‌ها.

توضیحات	DRAMP (Negative)	DRAMP (Positive)	سختی $\frac{kgf}{cm}$	$\frac{M_{max}}{M_y}$	انلاف انرژی kgf.cm	c	b	a	ردیف
	۱۰۴۰,۱	۱۷۶,۷	۴۷۹۸,۶	۱,۰۲۷۹۲۷	۲۱۹۶۰۷	۰,۲d	۲d	۰	۱
	۱۸۶۱,۴	۲۱۷,۶	۴۸۳۶,۳	۱,۰۵۹۸۵۴	۱۹۷۹۸۹	۰,۲d	۲d	۰,۲۵d	۲
	۱۰۷۶,۸	۱۴۷,۹	۴۹۰۳,۹	۱,۱۰۰۶۶۸	۱۹۹۰۸۳	۰,۲d	۲d	۰,۱۵d	۳
	۱۳۷۸,۲	۱۱۱,۷	۴۹۸۱,۸	۱,۱۳۳۹۴	۱۹۴۹۲۲	۰,۲d	۲d	۰,۷۵d	۴
	۱۹۷۲,۷	۴۶,۲	۵۰۵۹,۱	۱,۱۸۵۲۷۳	۲۲۷۷۹۹	۰,۲d	۲d	۱d	۵
ریزترکردن گام‌های افزایشی a	۷۳۱,۸	۱۳۱,۵	۴۸۴۹,۷	۰,۹۹۳۲۷۴	۲۲۴۰۹۲	۰,۲d	۲d	۰,۱۲۵d	۶
برای رسیدن به a بهینه یا a*	۱۱۳۷,۱	۲۲۱,۸	۴۸۸۸,۲	۱,۰۷۸۶۷۹	۱۹۸۱۸۳	۰,۲d	۲d	۰,۳۷۵d	۷
به دلیل کوچک بودن منطقه‌ی باریک شده متوقف شد	not def	not def	not def	not def	not def	۰,۲d	۱d	da* = ۰,۳۷۵	۸
	۱۶۰۷,۶	۲۶۸,۴	۴۶۸۵,۳	۱,۰۲۰۳۳۹	۱۹۲۹۹۳	۰,۲d	۱,۵d	a*	۹
	۱۱۴۶,۳	۲۰۳,۲	۴۹۱۲,۸	۱,۱۲۲۸۱۲	۲۰۲۸۹۲	۰,۲d	۲,۵d	a*	۱۰
	۱۵۳۲,۷	۱۰۵,۲	۵۰۰۳,۹	۱,۱۶۹۰۷۱	۲۳۴۶۸۳	۰,۲d	۳d	a*	۱۱
ریزترکردن گام‌های افزایشی b	۱۶۸۰,۷	۳۲۰,۰	۴۶۳۵,۴	۰,۹۷۳۳۷۷	۱۹۰۷۷۴	۰,۲d	۱,۲۵d	a*	۱۲
برای رسیدن به b بهینه یا b*	۱۰۴۰,۳	۱۷۸,۶	۴۸۲۹,۶	۱,۰۶۴۳۵۶	۲۲۱۰۰۲	۰,۲d	۱,۷۵d	a*	۱۳
	۴۵,۳	۱۹۹,۱	۵۳۸۹,۴	۱,۲۰۵۶۲۵	۲۹۰۷۰۵	۰,۱d	b* = ۱,۷۵d	a*	۱۴
	۱۰۲۷,۸	۱۷۸,۰	۴۱۵۵,۱	۰,۸۷۸۸۹۴	۱۷۸۴۴۲	۰,۳d	b*	a*	۱۵
	۷۳۵,۳	۱۰۹,۴	۳۳۶۳,۸	۰,۷۰۳۷۸۲	۱۴۶۲۰۵	۰,۴d	b*	a*	۱۶
ریزترکردن گام‌های افزایشی c	not def	not def	۵۶۰۰,۲	۱,۲۳۶۲۹۶	۳۴۰۹۶۹	۰,۵d	b*	a*	۱۷
برای رسیدن به c بهینه یا c*	۱۰۵۲,۴	۲۷۲,۷	۵۱۲۶,۷	۱,۱۳۰۸۱۲	۲۱۹۷۷۴	۰,۱۵d	b*	a*	۱۸
$r = ۱,۲۵ \times r^*$	۴۶۶,۴	۲۰۶,۶	۵۲۶۳,۴	۱,۱۶۴۴۷۹	۲۳۷۰۹۱	$۱,۲۵ \times c^*$	b*	a*	۱۹
$r = ۱,۲۵ \times r^*$	۲۷۶,۷	۱۵۴,۴	۵۳۵۲,۳	۱,۱۵۹۹۷۶	۲۴۵۴۵۶	$c^* = ۰,۱d$	$b^* \times ۰,۸$	a*	۲۰
$r = ۰,۸ \times r^*$	۷۲,۶	not def	۵۴۰۷,۰	۱,۲۲۷۷۴۲	۳۳۰۳۳۹	c*	$b^* \times ۱,۲۵$	a*	۲۱
$r = ۰,۸ \times r^*$	۱۲۳,۰	not def	۵۴۸۰,۹	۱,۲۲۸۶۰۵	۳۳۷۲۹۳	$c^* \times ۰,۸$	b*	a*	۲۲
تغییر در r برای رسیدن به r	not def	not def	۵۴۱۱,۵	۱,۲۳۱۰۱۶	۳۳۸۵۲۷	c*	$b^* \times ۱,۴۲$	a*	۲۳
بهینه و تعیین b** و c**	۳۳۶,۳	not def	۵۳۹۹,۵	۱,۲۱۶۶۷۱	۳۳۳۰۳۳	c*	$b^* \times ۱,۱۱$	a*	۲۴
	۴۶۲,۶	۱۹۴,۰	۵۳۴۶,۷	۱,۱۴۸۷۰۵	۲۴۹۹۴۹	$c^{**} = ۰,۱d$	$b^{**} = ۱,۴d$	$a^* \times ۰,۸$	۲۵
	۲۰۳۷,۰	۲۷۸,۷	۵۳۵۷,۷	۱,۱۶۷۳۹۶	۲۵۶۱۵۷	c**	b**	$a^* \times ۱,۲$	۲۶
ریزترکردن گام‌های افزایشی a	۵۵۷,۵	۱۶۶,۵	۵۳۴۳,۸	۱,۱۵۲۳۱۷	۲۴۹۳۳۱	c**	b**	$a^* \times ۰,۷$	۲۷
برای رسیدن به a بهینه یا a**	۴۲۵,۵	۱۴۰,۲	۵۳۴۷,۷	۱,۱۵۹۴۸۹	۲۴۸۸۷۴	c**	b**	$۰,۹ \times a^*$	۲۸
اتصال استخوانی	۴۳۱,۵	۳۶۹,۸	۵۴۳۶,۵	۱,۰۰۹۷۶۹	۲۹۵۵۵۶	۳,۵	۳۰	۱۰	۲۹

کلیه‌ی واحدها براساس kgf و cm است.

Not def به این معنی است که پارامتر مورد نظر قابل محاسبه نیست.

پارامترهای برش برای اتصال با کاهش در جان (نمونه‌های ۱ تا ۲۸) مطابق با شکل ۱ و برای اتصال استخوانی (نمونه ۲۹) براساس شکل ۵ است.

به ستون متصل می‌شود. فلز جوش حالت شکننده‌تری نسبت به مصالح فولاد تیر و ستون دارد و در بیشتر آزمایش‌های انجام شده و مشاهدات عینی خرابی‌های بعد از زلزله ملاحظه شده است که عموماً شکست از این قسمت شروع شده و توسعه یافته است. [۲۱] خمیرسانی شدید چشمه‌ی اتصال نیز خطرناک است و عواقبی چون شکست در ستون و خرابی پیش‌رونده در سازه را به دنبال دارد.

در نمونه‌ی ۲۵ (اتصال با کاهش در جان تیر مطابق جدول ۱) در تغییر مکان ۱۲ سانتی‌متر در انتهای تیر، تسلیم کلی در ناحیه‌ی کاهش یافته به وجود آمد و چشمه‌ی اتصال نیز به مقدار اندکی دچار تسلیم شد (شکل ۸ الف). در تغییر مکان ۱۵ سانتی‌متر انتهای آزاد تیر، تسلیم کاملاً در ناحیه‌ی کاهش متمرکز شد (شکل ۸ ب).

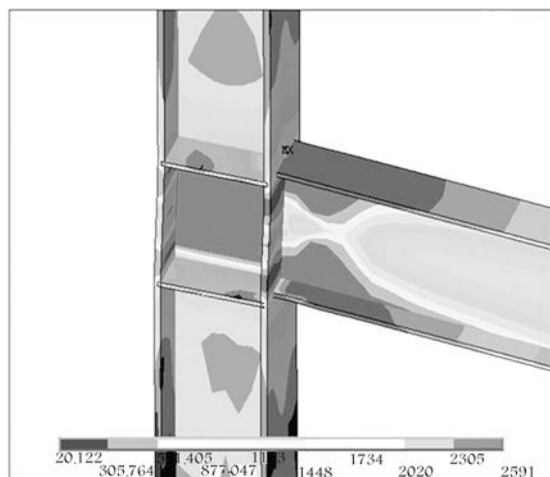
از مقایسه‌ی اشکال ۸ ب و ۹ الف دیده می‌شود که اتصال کاهش یافته با اعمال تضعیف موضعی در جان عملکرد چشم‌گیری در دورکردن تمرکز تنش از اتصال و چشمه‌ی اتصال نسبت به نمونه‌ی ساده‌ی اتصال تیر به ستون دارد. با توجه به اشکال ۸ ب و ۹ ب، و با مقایسه‌ی اتصال با کاهش در جان و اتصال

جان‌بی و کاهش مقاومت شدید می‌شود. با کاهش زیاد این پارامتر نیز اتصال به مثابه اتصال تیر به ستون بدون باریک‌شدگی تیر عمل کرده و تسلیم عمدتاً در اتصال رخ می‌دهد.

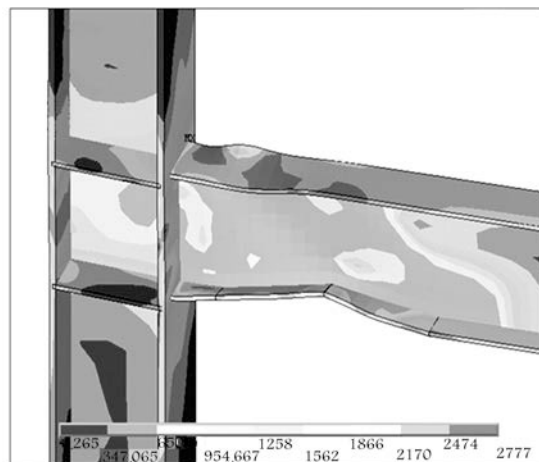
پارامترهای بهینه‌شده‌ی b و c در کنار پارامتر بهینه‌ی a که بعد از تحلیل‌های زیاد و مقایسه‌ی نتایج به دست آمدند، بهترین نتیجه در دورکردن تمرکز تنش از چشمه‌ی اتصال و ستون، و انتقال مفصل خمیری به درون تیر را به دنبال داشتند. بر این اساس، اتصال با کاهش در جان تیر متناظر با پارامترهای بهینه‌ی برش با شماره‌ی ۲۵ از جدول ۱، به عنوان گزینه‌ی برتر انتخاب شد.

در شکل ۸ نمودار تنش فون میسس اتصال نمونه‌ی ۲۵ (اتصال با کاهش در جان مطابق جدول ۱) در تغییر مکان‌های ۱۲ و ۱۵ سانتی‌متر در انتهای آزاد تیر نشان داده شده است. در اشکال ۹ الف و ۹ ب نیز به ترتیب نمودار تنش فون میسس برای تغییر مکان ۱۵ سانتی‌متر در انتهای تیر، برای اتصال ساده و اتصال استخوانی (نمونه‌ی ۲۹ از جدول ۱) نشان داده شده است.

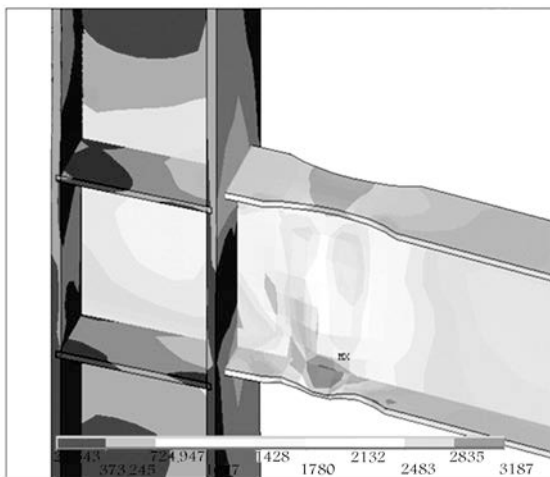
محل اتصال بال تیر به ستون مقطع حساسی است زیرا در این ناحیه تیر با جوش



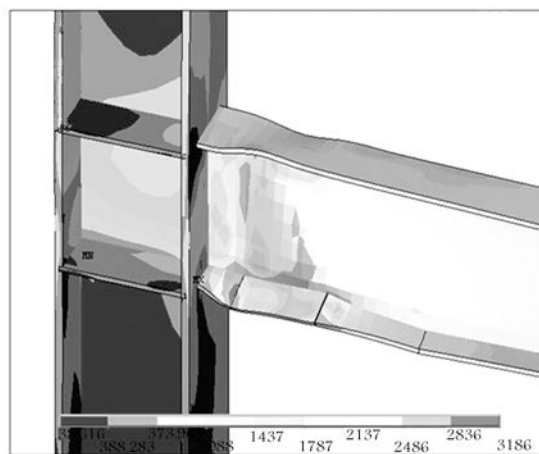
الف) اتصال ساده‌ی تیر به ستون؛



الف) تغییر مکانی به اندازه‌ی ۱۲cm در انتهای تیر (رخداد تسلیم کلی در بیشتر ناحیه‌ی کاهش یافته)؛



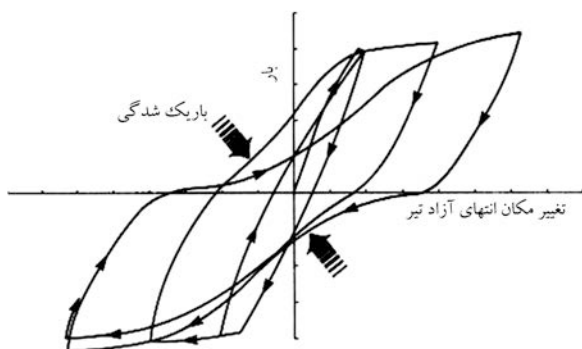
ب) اتصال استخوانی.



ب) تغییر مکانی به اندازه‌ی ۱۵cm در انتهای تیر (تمرکز تسلیم در نواحی خاصی از قسمت کاهش یافته).

شکل ۹. نمودار تنش فون میسس سه بعدی در تغییر مکانی به اندازه‌ی ۱۵cm در انتهای تیر.

شکل ۸. نمودار تنش فون میسس سه بعدی برای اتصال با کاهش در جان تیر (نمونه‌ی شماره ۲۵).



شکل ۱۱. پدیده‌ی بار یک شدگی در بارگذاری رفت و برگشتی.

به دلیل عدم تقارن در اتصال با کاهش در جان نسبت به اتصال استخوانی، این اتصال با افزایش دامنه‌ی تغییر مکان در بارگذاری، بیش از اتصال استخوانی به بار یک شدگی گرفتار شده است. به دلیل اعمال کاهش در پایین جان تیر (مطابق شکل ۱) بیشترین بار یک شدگی در جهت منفی محور تغییر مکان‌ها رخ داده است (شکل ۱۰ الف). در بررسی دیگر معیارها (با توجه به جدول ۱) مشاهده می‌شود که اتلاف انرژی نیروهای وارده برای نمونه استخوانی ۱۵٪ بیش از نمونه‌ی تضعیف شده در جان است. در ضمن بیشینه‌ی ممان تحمل شده توسط اتصال با تضعیف در جان ۱۲٪ بیش از نمونه‌ی استخوانی است. نمونه‌ی استخوانی سخت‌تر است و شیب کاهش مقاومت (DRAMP) آن در طرف مثبت محور نیروها بیشتر و در طرف منفی آن کم‌تر از نمونه‌ی اتصال با کاهش در جان است.

۵. نتیجه‌گیری

اتصال گیردار ساده‌ی تیر به ستون^۶ در بارگذاری دچار تمرکز تنش شدید در محل اتصال تیر به ستون و چشمه‌ی اتصال می‌شود که این خود سبب شکست جوش بال تیر به ستون می‌شود. یکی از راه‌های رفع این مشکل به‌کارگیری اتصال خمشی کاهش‌یافته با بار یک شدگی محلی گوه‌ی در جان تیر است. در تحقیق حاضر، مطالعه‌ی پارامتریک تحلیلی برای اطمینان از عملکرد اتصال با کاهش در جان انجام گرفته است. این مطالعه بر یافتن پارامترهای بهینه‌ی برش محلی در تیر براساس معیارهای معتبر و مستدل متمرکز شده است.

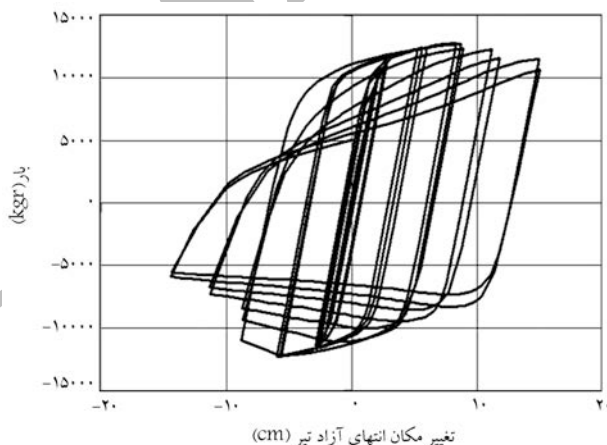
پس از بررسی جنبه‌های مختلف نتایج به دست آمده از تحلیل‌های عددی، در نهایت مقادیر پارامترهای بهینه‌ی برش (مطابق شکل ۱) برای اتصال با کاهش در جان $a^{**} = ۰,۳d$ و $b^{**} = ۱,۴d$ و $c^{**} = ۰,۱d$ برآورد شدند (d ارتفاع تیر است). چنانچه اتصال تیر به ستون با کاهش محلی گوه‌ی در جان تیر با به‌کارگیری پارامترهای برش a^{**} و b^{**} و c^{**} تعیین شده در مطالعه‌ی حاضر اجرا شود، تمرکز تنش در محل اتصال تیر به ستون و چشمه‌ی اتصال بسیار کاهش یافته و به منطقه‌ی بار یک شده در تیر منتقل می‌شود. منطقه‌ی کاهش‌یافته در تیر تحت اثر نیروهای وارده، تغییر مکان‌های خمیری بزرگ همراه با اتلاف انرژی بالا از خود نشان خواهد داد که سبب به تأخیر افتادن شکست و شکل‌پذیری قابل توجه برای اتصال می‌شود. لازم به ذکر است که نوعی از اتصال کاهش‌یافته با کاهش کماتی در بال تیر که «اتصال استخوانی» نامیده می‌شود، مورد استقبال وسیع طراحان سازه و سازندگان بوده است. به‌منظور ارزش‌گذاری رفتار اتصال خمشی با ضعف موضعی جان تیر مقایسه‌ی میان آن و اتصال استخوانی نیز انجام گرفت. مشاهده شد که اتصال با

استخوانی، اتصال با کاهش در جان عملکرد بهتری به‌لحاظ دورکردن تمرکز تنش از چشمه‌ی اتصال از خود بروز می‌دهد. برای اتصال با تضعیف در جان می‌توان گفت که تمرکز تنش در ناحیه‌ی اتصال بال تیر به ستون پایین‌تر است.

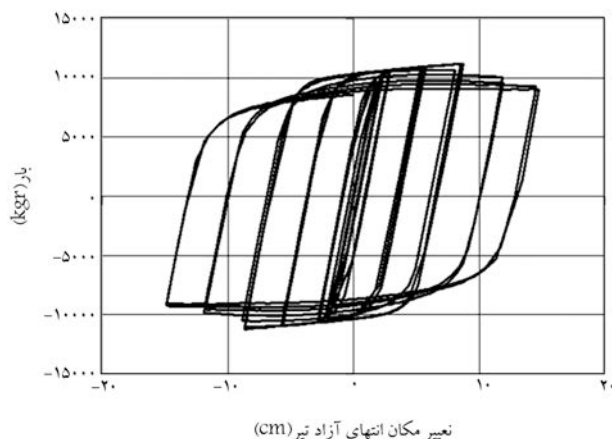
با توجه به شکل ۱۰ مقایسه‌ی بین نمودار بار - تغییر مکان اتصال استخوانی (نمونه‌ی شماره‌ی ۲۹ از جدول ۱) و اتصال با کاهش گوه‌ی در جان تیر (نمونه‌ی شماره‌ی ۲۵ از جدول ۱) انجام می‌شود. نمودار ۱۰ الف دارای بیشینه نیرویی با مقدار بزرگ‌تر در دو طرف محور نیروها نسبت به نمودار ۱۰ ب است. در نمودار ۱۰ الف در طرف مثبت محور نیروها شیب کاهش مقاومت (DRAMP) کم، ولی در طرف منفی محور نیروها زیاد است. ضمن این که به دلیل اعمال بریدگی گوه‌ی تنها در پایین مقطع تیر نمودار بار - تغییر مکان آن نامتقارن است.

نمودار ۱۰ ب که برای نمونه‌ی اتصال استخوانی است دارای چرخه‌های باز بار - تغییر مکان است و شیب کاهش مقاومت (DRAMP) در آن ملایم‌تر است. به دلیل اعمال برش موضعی یکسان در بال بالا و پایین تیر، نمودار در طرف مثبت و منفی محور نیروها متقارن است.

پدیده‌ی بار یک شدگی^۵ به‌صورت لاغر شدن نمودار بار - تغییر مکان نمونه معمولاً در نزدیکی مبدأ مختصات در بارگذاری رفت و برگشتی رخ می‌دهد (شکل ۱۱).^[۱۹] با توجه به نمودار شکل ۱۰ الف و مقایسه‌ی آن با نمودار شکل ۱۰ ب دیده می‌شود که



الف) نمودار بار - تغییر مکان نمونه‌ی شماره‌ی ۲۵



ب) نمودار بار - تغییر مکان نمونه‌ی اتصال استخوانی.

شکل ۱۰. نمودار بار - تغییر مکان نمونه‌ی شماره ۲۵ و اتصال استخوانی.

است که سبب کاهش مقاومت و رخداد پدیده‌ی باریک‌شدگی در تغییر مکان‌های زیاد می‌شود.

اتصال کاهش‌یافته با تضعیف خمشی موضعی در جان توانایی بالایی در دورکردن تمرکز تنش از اتصال در تحلیل‌های مطالعه حاضر و در مطالعات آزمایشگاهی پیشین نشان داده است. ساخت این نوع اتصال به لحاظ اجرایی آسان است و پاسخ لرزه‌یی خوبی به همراه دارد.^[۱۱] از مزایای دیگر آن سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی مناسب‌اند.

تضعیف موضعی در جان تیر، توانایی بیشتری در دورکردن مفصل خمیری از اتصال تیر به ستون و چشمه‌ی اتصال از خود نشان می‌دهد. با معیارهایی که در مطالعه‌ی حاضر تعیین شد، این توانایی به‌عنوان مهم‌ترین عملکرد اتصالات کاهش‌یافته ارزیابی شد.

همچنین، چنان که در جدول ۱ ذکر شد، اتصال با کاهش در جان اتلاف انرژی و سختی کم‌تر و مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌ی اتصال استخوانی نشان داد. البته از معایب اتصال با کاهش در جان نیز عدم تقارن در منحنی‌های بار - تغییر مکان

پانویس

1. bolted web, welded flange (BWWF)
2. reduced beam section
3. dogbone
4. degradation ratio after maximum point (DRAMP)
5. pinching
6. bolted web welded flange

منابع

1. Engelhardt, M.D. and Husain, A.S. "Cyclic-loading performance of welded flange-bolted web connections", *Journal of Structural Engineering*, **119**(12), pp. 3537-3550 (December 1993).
2. Duane K. Miller "Lessons learned from the northridge earthquake", *Engineering Structures*, **20**, pp. 249-260 (1998).
3. Mahin, S.A. "Lessons from damage to steel buildings during the Northridge earthquake", *Engineering Struct*, **20**(4-6), pp. 261-70 (1998).
4. Calado, L., *Cyclic Behaviour of Beam to Column Bare Steel Connection: Influence of Column Size*, In: Mazzolani FM (ed.), *Moment resistant connections of steel frames in seismic areas*, London: E & FN SPON (2000).
5. Engelhardt, M.D.; Winneberger, T.; Zekany, A.J. and Potyraj, T.J. "The dogbone connection", Part II, *Modern Steel Construction*, pp.46-55 (1996).
6. Engelhardt, M.D.; Winneberger, T., Zekany, A.J. AND Potyraj, T.J. "Experimental investigation of dogbone moment connections", *Engineering Journal*, AISC, Fourth Quarter, pp. 128-139 (1998).
7. Iwankiw, N. "Ultimate strength considerations for seismic design of the reduced beam section (internal plastic hinge)", *Engineering Journal*, AISC, **34** (1), pp.3-16 (1997).
8. Cheol-Ho, L.; Sang-Woo J.; Jin-Ho K. and Chia-Ming U. "Effects of panel zone strength and beam web connection method on seismic performance of reduced beam section steel moment connections", *Journal of Structural Engineering*, pp. 1854-1865 (2005).
9. Naeim, F.; kan P. and ahmad I. "A new rigid connection for heavy beams and columns in steel moment resisting frames", *Engineer Association of California* (2001).
10. Naeim, F., *The Seismic Design Handbook*, (2nd ed.), Kluwer Academic Publishers, p. 418 (2001).
11. Uang, C.M. and Fan, C.C. "Cyclic stability criteria for steel moment connections with reduced beam section" *J Struct Enginering ASCE*, **127**(9), pp. 1021-7 (2001).
12. Wilkinson, S.; Hurdman, G. and Crowther, A. "A moment resisting connection for earthquake resistant structures", *Journal of Constructional Steel Research*, pp. 265-302 (July 2005).
13. American Institute of Steel Construction (AISC), *Seismic provisions for structural steel buildings*, Chicago (2002).
14. Moslehi Tabar, A. and Deylami, A. "Instability of beams with reduced beam section moment connections emphasizing the effect of column panel zone ductility", *Journal of Constructional Steel Research*, pp. 1475-1491 (May 2005).
15. Federal Emergency Management Agency, *Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings*. Report no. FEMA-350 (2000).
16. ANSYS (Revision 9.0). *User's manual, theory*, vol. IV. Swanson Analysis Systems, Inc.
17. Gilton, C.S. and Uang, C.M. "Cyclic response and design recommendations of weak-axis reduced beam section moment connections", *Journal of Structural Engineering*, pp. 452-463 (April 2002).
18. ATC-24, *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures* (1992).
19. *The seismic design HandBook*, Farzad Naeim, second edition.