مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۶، شماره‌ی ۳، ص. ۳۳-۴۱

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

براثر زلزله نرتریج کالیفرنیا ۱۹۹۴ بسیاری از اتصالات متداول گیردار (BWWF)[1] در ساختمان های اسکلت فلزی دچار شکست ترد شدند. اتصال RBS [2] 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 نیزکاهش کمانش‌های 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.

hosein.soleimani.62@gmail.com
rafezyb@sut.ac.ir

۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین حالاتی که در آن سازه تحت اثر بار زلزله دچار خرابی می‌شود، شکست در اتصالات سازه است. گسیختگی در اتصالات سبب از بین رفتن یک‌پارچگی سازه و خرابی‌های پیش‌رونده می‌شود. قبل از زلزله‌ی نورتریج (۱۹۹۴)، قاب‌های فولادی مقاوم در برابر خمش با اتصالات جوشی در مناطق لرزه‌خیز آمریکا بسیار معمول بود. در این قاب‌ها از اتصالات گیردارِ «جان پیچی و بال جوشی (BWWF)» استفاده می‌شد. با مطالعات آزمایشگاهی مجدد درخصوص اتصال BWWF، 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، اِعمال کاهش موضعی در مقطع تیر معروف به RBS بود. در این حالت به فاصله‌ی اندکی از بر ستون به‌صورت 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. به‌علاوه، بسیار محتاطانه با آن برخورد می‌شد زیرا معمولاً راه حل اشکالات سازه‌یی به‌صورت حسی عبارت است از تقویت مقاطع اعضا و به‌کارگیری مصالح بیشتر، در حالی که اتصال کاهش‌یافته 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.[۵-۷] نوعی از اتصال کاهش‌یافته، معروف به «اتصال استخوانی»[3]، که با ایجاد برش کمانی در بال تیر ایجاد می‌شود بیش از انواع دیگر برش‌ها مورد توجه قرار گرفته و به‌صورت عملی اجرا شده است.[۵و۶]

با انجام مطالعات آزمایشگاهی گسترده تأیید شد که اتصال استخوانی شکل‌پذیری و قابلیت دوران خمیریِ بالایی داشته و با ایجاد مفصل خمیری در منطقه‌ی باریک‌شده ضمن محافظت از اتصال، اتلاف انرژی بیشتری به ارمغان می‌آورد. از مزایای دیگر اتصال استخوانی اقتصادی‌بودن و سهولت اجرای آن است به‌نحوی که برای ایجاد این نوع اتصال می‌توان برش در تیر را در کارخانه انجام داد و سپس تیر را به کارگاه ساختمانی منتقل کرد. ازجمله اشکالات اتصال استخوانی کاهش توانایی تحمل بار آن براثر تغییرمکان‌های بزرگ است. دلیل این امر ضعیف‌شدن مقطع بال تیر و تأثیر آن بر کاهش مقاومت مقطع نسبت به تغییرشکل‌های خارج از صفحه است که براثر آن تیر در ناحیه‌ی باریک‌شده دچار کمانش‌های موضعی و جانبی می‌شود.[۵و۶]

مطالعات آزمایشگاهی مطابق توصیه‌های محققین انجام گرفت و طی آن هشت نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته شد و تحت بارگذاری چرخه‌یی قرار گرفت.[۵-۷] 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

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۵/۵، داوری ۱۳۸۷/۱۰/۲۲، پذیرش ۱۳۸۸/۶/۴.

Archive of SID
www.SID.ir

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 ناحیه‌یی از ستون است که مقابل بال‌های تیر قرار می‌گیرد و از نظر مقاومت برشی به سه نوع چشمه‌ی اتصالِ 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 به‌شدت تقویت می‌کند. چشمه اتصال متوسط حالت بهینه‌یی 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.[۹و۱۰] 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 به‌صورت نظری در سال ۲۰۰۵ معرفی شد[۱۲] و سپس به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شد. به‌صورت شماتیک این اتصال به شکل تیری است که یک مقطع گوه‌یی 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 به‌دلیل 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 رفت‌وبرگشتی شبه لرزه‌یی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌همین منظور پارامترهای برش موضعی در تیر (ابعاد تیر و فاصله از بر ستون)، به‌صورت گام‌به‌گام تغییر داده می‌شوند و تغییر عملکرد اتصال با تغییر پارامترهای برش، به‌صورت جدول ارائه و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ارائه‌ی نتایج براساس معیارهایی از تحقیقات مختلف، و نیز یک معیارِ جدیدِ ابداعی است. در نهایت با بررسی نتایج حاصل از مطالعات پارامتریک، پارامترهای بهینه‌ی برش در تیر برای ایجاد اتصال مشخص می‌شود. همچنین اتصال یادشده و اتصالات مشابه با آن در موارد مختلفی با هم مقایسه می‌شوند.

۲. مطالعات پارامتریک

۱.۲. طراحی نمونه‌ها

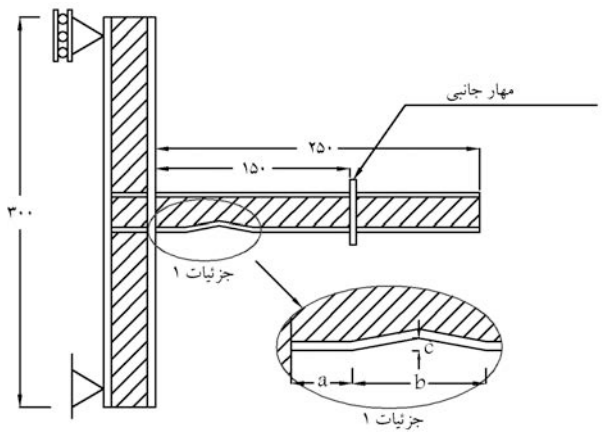
در شکل ۱ یک اتصال کاهش‌یافته با برش گوه‌یی در جان تیر نشان داده شده است. پارامترهای برش عبارت‌اند از:

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 به‌صورت یک تیر طره‌یی با مقطع IPE ۴۰۰ به‌طول ۲٫۵۰ متر در نظرگرفته شده و به وسط ستونی با مقطع IPB ۳۶۰ به‌ارتفاع ۳ متر گیردار شده‌اند. تکیه‌گاه ستون در یک انتها مفصلی و در انتهای دیگر از نوع غلتکی است.



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

مقاطع تیر و ستون در طول مطالعه‌ی پارامتریک ثابت فرض می‌شوند. به‌منظور مهار جانبی تیر و نیز محدودکردن حرکت آن در صفحه‌ی خود، یک مهار جانبی به‌فاصله‌ی ۱٫۵۰ متر از بر ستون به آن متصل شد.[۱۳]

چنان‌که ذکر شد، چشمه‌ی اتصال از نظر مقاومت برشی به سه دسته‌ی ضعیف، متوسط و قوی دسته‌بندی می‌شود. براساس مطالعات انجام‌شده[۸و۱۴] مقاومت برشی چشمه‌ی اتصال نقش مهمی در عملکرد اتصال در بارگذاری رفت‌وبرگشتی 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 ستون به‌دلیل تغییر مکان‌های گسترده زیاد است و ممکن است اتصال قبل از رسیدن به دوران خمیریِ مورد نیاز دچار شکست در جوش شود.

در نمونه‌هایی با چشمه‌ی اتصال قوی به‌دلیل صلبیت چشمه‌ی اتصال، خمیرسانی تنها در ناحیه‌ی کاهش‌یافته‌ی تیر رخ می‌دهد. در این حالت چشمه‌ی اتصال به‌دلیل 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 برمبنای 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 نظرگرفته 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 به‌ترتیب اولویت طبقه‌بندی می‌شوند. قبل از ارزش‌گذاری معیارهای انتخابی، معیار جدیدی که توسط مؤلفین پیشنهاد شده معرفی می‌شود.

Archive of SID
www.SID.ir

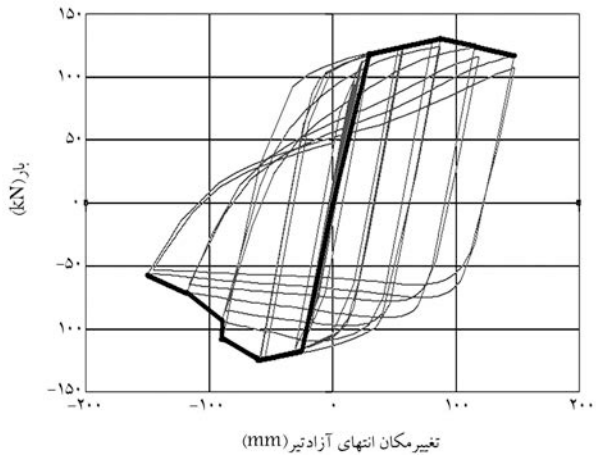
۱.۲.۲. معرفی معیار جدید نرخ کاهش مقاومت پس از نقطه‌ی بیشینه‌ی مقاومت

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)[۴]» نامیده می‌شود و آن در حقیقت، شیب منحنی بار ـ تغییر مکان پس از نقطه‌ی بیشینه‌ی تحمل نیرو است. مقدار این معیار با استفاده از منحنی پوش نمودار بار ـ 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 نشان‌دهنده‌ی نمودار بار ـ تغییر مکانِ یک اتصال نمونه با کاهش در ارتفاع جان تیر به همراه پوش رسم شده بر نمودار است.

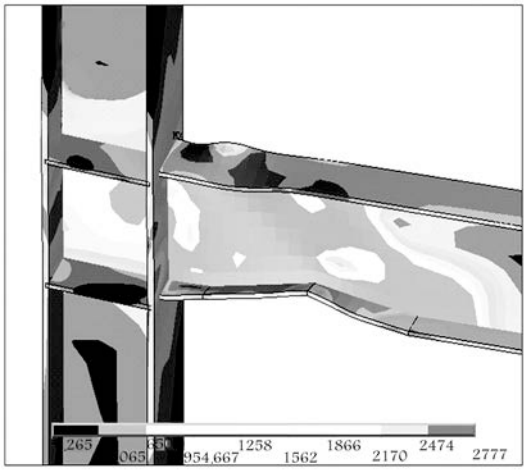
۲.۲.۲. ارزش‌گذاری معیارهای انتخاب اتصال بهینه

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 کاهش‌یافته، دورکردن مرکز تنش از اتصال و چشمه‌ی اتصال است، معیارهای زیر که به‌ترتیبِ اهمیت شماره‌گذاری شده‌اند می‌توانند برای ارزش‌گذاری عملکرد اتصال مورد استفاده قرار گیرند.

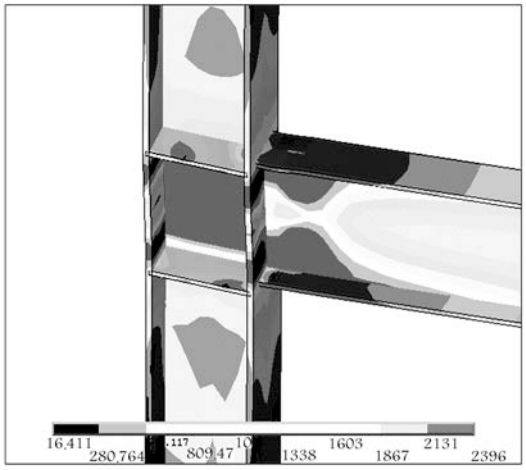
۱. موفقیت در دورکردن مرکز تنش از چشمه‌ی اتصال، اتصال تیر به ستون، و نیز کمینه‌کردن کمانش‌های موضعی بال و جان تیر و کمانش جانبی و پیچشی تیر. مثلاً در شکل ۳الف نمودار تنش فون‌میسس سه‌بعدی متناظر با تغییر مکانی برابر ۱۵cm در انتهای تیر برای اتصال با کاهش گوه‌یی در ارتفاع جان تیر، و در شکل ۳ب نمودار تنش فون‌میسس سه‌بعدی نظیر تغییر مکان برابر ۱۵cm در انتهای تیر برای اتصال ساده‌ی تیر به ستون نشان داده شده است. خاطرنشان می‌سازد معیار فون‌میسس معیاری معتبر برای تشخیص شروع تسلیم در مصالح شکل‌پذیر تحت تنش‌های مرکب سه‌بعدی 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 ۳الف تمرکز تنش از اتصال و چشمه‌ی اتصال دور شده و در ابتدای ناحیه‌ی کاهش‌یافته تمرکز یافته است، ولی در شکل ۳ب تمرکز تنش مستقیماً متوجه چشمه‌ی اتصال و ناحیه‌ی جوش بال



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



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



ب) اتصال ساده تیر به ستون.

شکل ۳. نمودار تنش فون‌میسس سه‌بعدی 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. درنتیجه نمونه‌ی شکل ۳الف در دورکردن تمرکز تنش از بر ستون بسیار موفق‌تر از نمونه‌ی شکل ۳ب عمل کرده است.

۲. توانایی در اتلاف انرژی نیروهای وارده (به‌شکل مجموع مساحت زیرمنحنی‌های بار ـ تغییرمکان در چرخه‌های بارگذاری). علت تعریف این معیار به‌دلیل اهمیت میزان استهلاک انرژی حاصل از بارهای دینامیکی رفت‌وبرگشتی است. نمودار بار ـ تغییر مکان انتهای تیر برای یک نمونه‌ی کاهش‌یافته در جان در شکل ۲ آمده است.

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

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

۵. بیشینه‌بودن ممان نهایی تحمل‌شده توسط تیر (M_{max})؛ ممان از طریق حاصل‌ضرب نیروی اعمالی به انتهای تیر در طول آزاد تیر از بر ستون محاسبه می‌شود.

Archive of SID
www.SID.ir

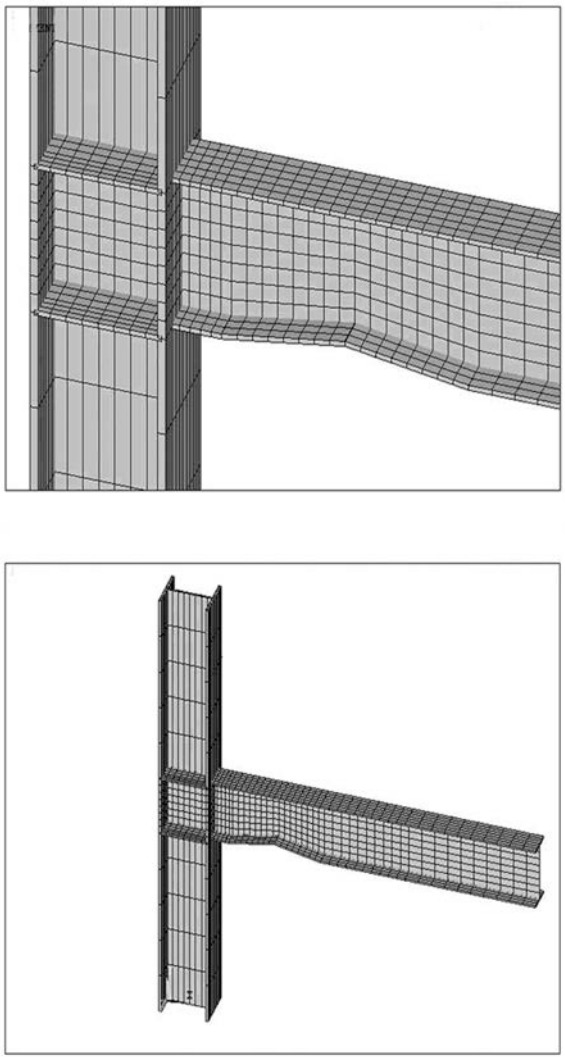
۳. تحلیل اجزا محدود

۱.۳. مدل‌سازی و تحلیل

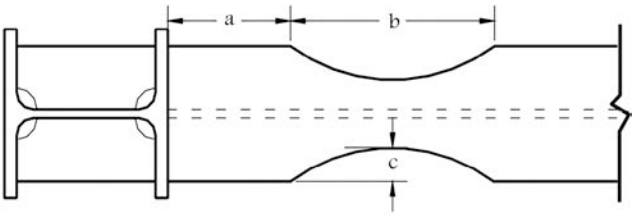
تحلیل‌های مطالعه‌ی حاضر با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود Ansys ۹٫۰ انجام گرفته است.[۱۶] این نرم‌افزار قادر به در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ و تحلیل غیرخطی سازه‌ها، حالات غیرخطی هندسی، و رفتار غیرخطی مصالح در حالت تحلیل سه‌بعدی است. برای مدل‌سازی تیر و ستون از المان پوسته‌یی چهارگره‌یی (المان Shell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

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

برای مقاطع فولادی به‌کار رفته در این پروژه از فولاد با مقاومت تسلیم $۲۴۰۰ \frac{kgf}{cm^۲}$ و مقاومت نهایی $۳۷۰۰ \frac{kgf}{cm^۲}$ استفاده شد. مدل‌سازی رفتار فولاد با استفاده از معیار



شکل ۴. تصویری از مدل اجزاء محدود.



شکل ۵. برش استخوانی و پارامترهای برش آن.

تسلیم فون‌میسس و در نظرگرفتن 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 به‌صورت 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 ۳ب) و یک نمونه اتصال استخوانی (شکل ۵) براساس راهنمایی‌های طراحی انگل‌هارت[۵و۶] مورد تحلیل قرارگرفت و نتایج آن با حالت اتصال کاهش در جان مقایسه شد.

۲.۳. تصدیق مدل و فرایند بارگذاری

به‌منظور کسب اطمینان از صحت مطالعات پارامتریک تحلیلی انجام‌شده در تحقیق حاضر سه نمونه‌ی آزمایشگاهی[۱،۱۲و۱۷] و نیز یک نمونه‌ی مدل‌سازی اجزا محدود[۱۱] که توسط محققین پیشین بررسی شده بود مجدداً به‌روش 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 ـ 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، برپایه‌ی آیین‌نامه‌ی بارگذاری چرخه‌یی اعضا فولادی[۱۸] (ATC_۲۴) مطابق شکل ۷ بر نمونه‌های مطالعه‌ی حاضر اعمال شد. یادآور می‌شود بارگذاری به‌شکل 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 کمانش‌های شدید موضعی بال و جان تیر، کمانش جانبی پیچشی، 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

به‌منظور 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 قرارگرفتند. برای این‌منظور، در هر تحلیل فقط یکی از پارامترهای برش محلی در تیر (یعنی a، 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 اعمال‌شده 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 ذکرشده

Archive of SID
www.SID.ir

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

در جدول ۱ براساس نمودار بار ـ 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 مقایسه‌کرد.

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 قرارگرفت. سپس با ثابت نگه‌داشتن سایرابعاد نمونه، پارامتر a از مقدار صفر در اولین آزمایش به مقادیر $۰/۲۵d$، $۰/۵۰d$، $۰/۷۵d$ و $۱d$ در تحلیل‌های ۲ تا ۵ تغییر یافت تا عملکرد اتصال با تغییر در پارامتر a بررسی شود (d ارتفاع تیر است).

با بررسی اطلاعات خروجی از این پنج تحلیل به‌ترتیب اهمیت آنها مطابق بخش ۲.۲.۲.، در این مرحله اندازه‌ی بهینه برای پارامتر a مقدار $۰/۲۵d$ تعیین شد. به‌منظور دست‌یابی به مقدار بهینه برای پارامتر a، در تحلیل‌های ۶ و ۷ از جدول ۱ مقادیر $۰/۱۲۵d$ و $۰/۳۷۵d$ نیز مورد بررسی قرارگرفت. پس از تحلیل شماره ۷ و با بررسی نتایج، a بهینه برابر با $۰/۳۷۵d$ تعیین شد. مقدار a به دست آمده در این مرحله را a^* نامیده شد.

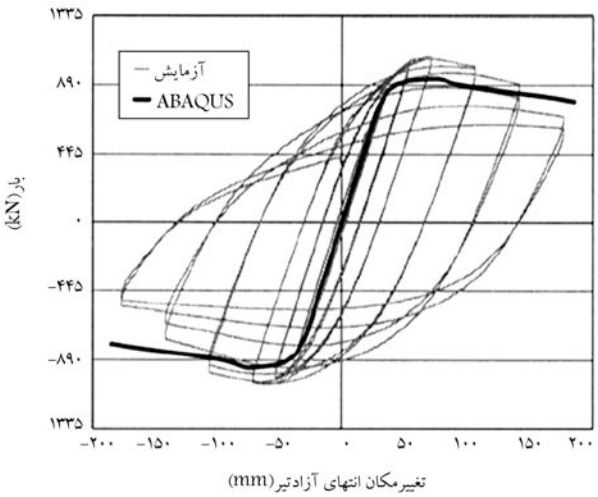
همین روند به‌صورت کاملاً مشابه برای یافتن پارامترهای بهینه‌ی b و c نیز انجام گرفت. به‌طوری که مشابه حالت قبل در حین تغییر در یک پارامتر سایر ابعاد ثابت نگه داشته می‌شد. پارامترهای بهینه‌ی محاسبه شده برای b و c تا انتهای تحلیل ۱۸، به‌ترتیب $b^* = ۱/۷۵d$ و $c^* = ۰/۱d$ تعیین شدند.

به‌منظور بهینه‌سازی مجدد پارامترهای برش به‌شکلی جدید، یک نسبت جدید به‌صورت ارتفاع ناحیه‌ی کاهش یافته تقسیم بر عرض ناحیه‌ی کاهش‌یافته ($r = c/b$) تعریف شد. ($r^* = c^*/b^*$). در تحلیل‌های شماره ۱۹ و ۲۰ برای رسیدن به r بهینه $r = ۱/۲۵r^*$ انتخاب شد. طریقه‌ی اعمال آن به این شکل بود که در تحلیل ۱۹، $b = b^*$ و $c = ۱/۲۵c^*$ فرض شد و در تحلیل شماره ۲۰، $b = ۰/۸ \times b^*$ و $c = c^*$ فرض شد.

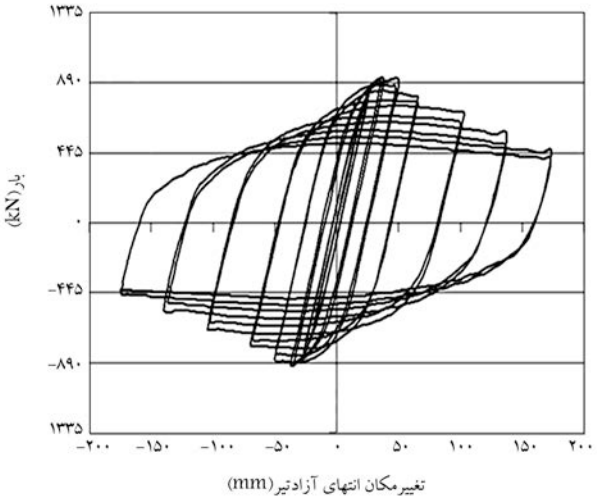
در دو تحلیل بعدی $r = ۰/۸r^*$ (یک‌بار $b = ۱/۲۵b^*$ و $c = c^*$ و بار دیگر $b = b^*$ و $c = ۰/۸c^*$) اعمال شد. پس از انجام تحلیل ۲۴ و به‌دست آوردن مقدار بهینه برای پارامتر r، پارامترهای b و c به دست آمده و مرتبط با r، b^{**} و c^{**} نامیده شدند. سپس مجدداً با ثابت نگه داشتن سایرابعاد در تحلیل‌های ۲۵ 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 درمورد پارامتر c باید گفت که با افزایش آن مقطع تیر بسیار ضعیف و دچار کمانش‌های

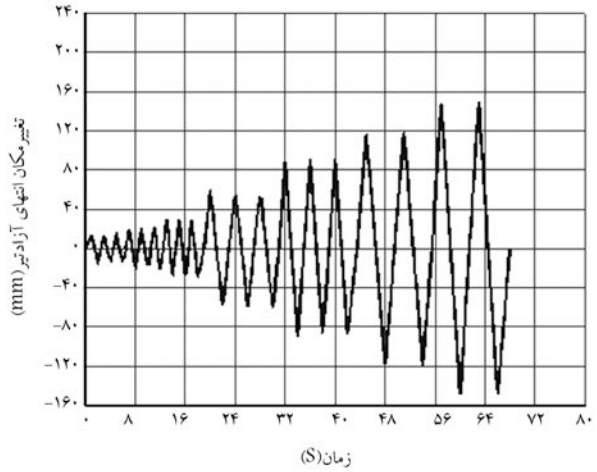


الف) نمونه آزمایشگاهی؛



ب)نمونه ی تحلیل شده توسط نرم افزار Ansys

شکل ۶. نمودار بار ـ تغییر مکان انتهای تیر به دست آمده.



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

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱. مقایسه‌ی نتایج تحلیل‌ها.

ردیف	a	b	c	اتلاف انرژی kgf.cm	$\frac{M_{max}}{M_y}$	سختی $\frac{kgf}{cm}$	DRAMP (Positive)	DRAMP (Negative)	توضیحات
۱	۰	$۲d$	$۰/۲d$	۲۱۹۶۰۷	۱/۰۲۷۹۲۷	۴۷۹۸/۶	۱۷۶/۷	۱۰۴۰/۱	
۲	$۰/۲۵d$	$۲d$	$۰/۲d$	۱۹۷۹۸۹	۱/۰۵۹۸۵۴	۴۸۳۶/۳	۲۱۷/۶	۱۸۶۱/۴	
۳	$۰/۵d$	$۲d$	$۰/۲d$	۱۹۹۰۸۳	۱/۱۰۰۶۶۸	۴۹۰۳/۹	۱۴۷/۹	۱۰۷۶/۸	
۴	$۰/۷۵d$	$۲d$	$۰/۲d$	۱۹۴۹۲۲	۱/۱۳۳۹۴	۴۹۸۱/۸	۱۱۱/۷	۱۳۷۸/۲	
۵	$۱d$	$۲d$	$۰/۲d$	۲۲۷۷۹۹	۱/۱۸۵۲۷۳	۵۰۵۹/۱	۴۶/۲	۱۹۷۲/۷	
۶	$۰/۱۲۵d$	$۲d$	$۰/۲d$	۲۲۴۰۹۲	۰/۹۹۳۲۷۴	۴۸۴۹/۷	۱۳۱/۵	۷۳۱/۸	ریزترکردن گام‌های افزایشی a
۷	$۰/۳۷۵d$	$۲d$	$۰/۲d$	۱۹۸۱۸۳	۱/۰۷۸۶۷۹	۴۸۸۸/۲	۲۲۱/۸	۱۱۳۷/۱	برای رسیدن به a بهینه یا a^*
۸	$da^* = ۰/۳۷۵$	$۱d$	$۰/۲d$	not def	not def	not def	not def	not def	به‌دلیل کوچک‌بودن منطقه‌ی باریک‌شده متوقف شد
۹	a^*	$۱/۵d$	$۰/۲d$	۱۹۲۹۹۳	۱/۰۲۰۳۳۹	۴۶۸۵/۳	۲۶۸/۴	۱۶۰۷/۶	
۱۰	a^*	$۲/۵d$	$۰/۲d$	۲۰۲۸۹۲	۱/۱۲۲۸۱۲	۴۹۱۲/۸	۲۰۳/۲	۱۱۴۶/۳	
۱۱	a^*	$۳d$	$۰/۲d$	۲۳۴۶۸۳	۱/۱۶۹۰۷۱	۵۰۰۳/۹	۱۰۵/۲	۱۵۳۲/۷	
۱۲	a^*	$۱/۲۵d$	$۰/۲d$	۱۹۰۷۷۴	۰/۹۷۳۳۷۷	۴۶۳۵/۴	۳۲۰/۰	۱۶۸۰/۷	ریزترکردن گام‌های افزایشی b
۱۳	a^*	$۱/۷۵d$	$۰/۲d$	۲۲۱۰۰۲	۱/۰۶۴۳۵۶	۴۸۲۹/۶	۱۷۸/۶	۱۰۴۰/۳	برای رسیدن به b بهینه یا b^*
۱۴	a^*	$b^* = ۱/۷۵d$	$۰/۱d$	۲۹۰۷۰۵	۱/۲۰۵۶۲۵	۵۳۸۹/۴	۱۹۹/۱	۴۵/۳	
۱۵	a^*	b^*	$۰/۳d$	۱۷۸۴۴۲	۰/۸۷۸۸۹۴	۴۱۵۵/۱	۱۷۸/۰	۱۰۲۷/۸	
۱۶	a^*	b^*	$۰/۴d$	۱۴۶۲۰۵	۰/۷۰۳۷۸۲	۳۳۶۳/۸	۱۰۹/۴	۷۳۵/۳	
۱۷	a^*	b^*	$۰/۰۵d$	۳۴۰۹۶۹	۱/۲۳۶۲۹۶	۵۶۰۰/۲	not def	not def	ریزترکردن گام‌های افزایشی c
۱۸	a^*	b^*	$۰/۱۵d$	۲۱۹۷۷۴	۱/۱۳۰۸۱۲	۵۱۲۶/۷	۲۷۲/۷	۱۰۵۲/۴	برای رسیدن به c بهینه یا c^*
۱۹	a^*	b^*	$۱/۲۵ \times c^*$	۲۳۷۰۹۱	۱/۱۶۴۴۷۹	۵۲۶۳/۴	۲۰۶/۶	۴۶۶/۴	$r = ۱/۲۵ \times r^*$
۲۰	a^*	$b^* \times ۰/۸$	$c^* = ۰/۱d$	۲۴۵۴۵۶	۱/۱۵۹۹۷۶	۵۳۵۲/۳	۱۵۴/۴	۲۷۶/۷	$r = ۱/۲۵ \times r^*$
۲۱	a^*	$b^* \times ۱/۲۵$	c^*	۳۳۰۳۳۹	۱/۲۲۷۷۴۲	۵۴۰۷/۰	not def	۷۲/۶	$r = ۰/۸ \times r^*$
۲۲	a^*	b^*	$c^* \times ۰/۸$	۳۳۷۲۹۳	۱/۲۲۸۶۰۵	۵۴۸۰/۹	not def	۱۲۳/۰	$r = ۰/۸ \times r^*$
۲۳	a^*	$b^* \times ۱/۴۲$	c^*	۳۳۸۵۲۷	۱/۲۳۱۰۱۶	۵۴۱۱/۵	not def	not def	تغییر در r برای رسیدن به r
۲۴	a^*	$b^* \times ۱/۱۱$	c^*	۳۳۳۰۳۳	۱/۲۱۶۶۷۱	۵۳۹۹/۵	not def	۳۳۶/۳	بهینه و تعیین b^{**} و c^{**}
۲۵	$a^* \times ۰/۸$	$b^{**} = ۱/۴d$	$c^{**} = ۰/۱d$	۲۴۹۹۴۹	۱/۱۴۸۷۰۵	۵۳۴۶/۷	۱۹۴/۰	۴۶۲/۶	
۲۶	$a^* \times ۱/۲$	b^{**}	c^{**}	۲۵۶۱۵۷	۱/۱۶۷۳۹۶	۵۳۵۷/۷	۲۷۸/۷	۲۰۳۷/۰	
۲۷	$a^* \times ۰/۷$	b^{**}	c^{**}	۲۴۹۳۳۱	۱/۱۵۲۳۱۷	۵۳۴۳/۸	۱۶۶/۵	۵۵۷/۵	ریزتر کردن گام‌های افزایشی a
۲۸	$۰/۹ \times a^*$	b^{**}	c^{**}	۲۴۸۸۷۴	۱/۱۵۹۴۸۹	۵۳۴۷/۷	۱۴۰/۲	۴۲۵/۵	برای رسیدن به a بهینه یا a^{**}
۲۹	۱۰	۳۰	۳/۵	۲۹۵۵۵۶	۱/۰۰۹۷۶۹	۵۴۳۶/۵	۳۶۹/۸	۴۳۱/۵	اتصال استخوانی

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.

Archive of SID

www.SID.ir

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

پارامترهای بهینه‌شده‌ی b و c درکنار 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، به‌عنوان گزینه‌ی برتر انتخاب شد.

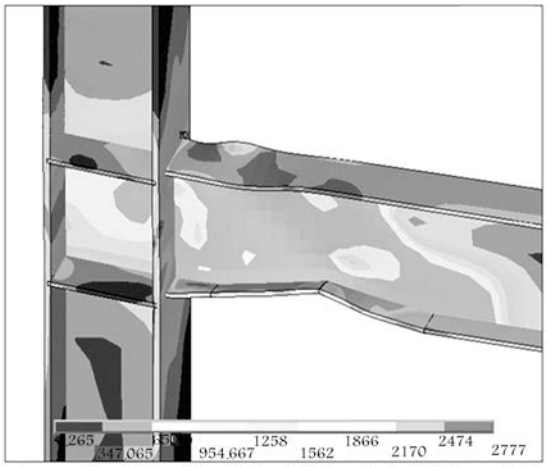
در شکل ۸ نمودار تنش فون‌میسس اتصال نمونه‌ی ۲۵ (اتصال با کاهش در جان مطابق جدول ۱) در تغییرمکان‌های ۱۲ و ۱۵ سانتی‌متر در انتهای آزاد تیر نشان داده شده است. در اشکال ۹الف و ۹ب نیز به‌ترتیب نمودار تنش فون‌میسس برای تغییر مکان ۱۵ سانتی‌متر در انتهای تیر، برای اتصال ساده و اتصال استخوانی (نمونه‌ی ۲۹ از جدول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

محل اتصال بال تیر به ستون مقطع حساسی است زیرا در این ناحیه تیر با جوش به ستون متصل می‌شود. فلز جوش حالت شکننده‌تری نسبت به مصالح فولاد تیر و ستون دارد و در بیشتر آزمایش‌های انجام شده و مشاهدات عینیِ خرابی‌های بعد از زلزله ملاحظه شده است که عموماً شکست از این قسمت شروع شده و توسعه یافته است.[۱-۴] خمیرسانی شدید چشمه‌ی اتصال نیز خطرناک است و عواقبی چون شکست در ستون و خرابی پیش‌رونده در سازه را به‌دنبال دارد.

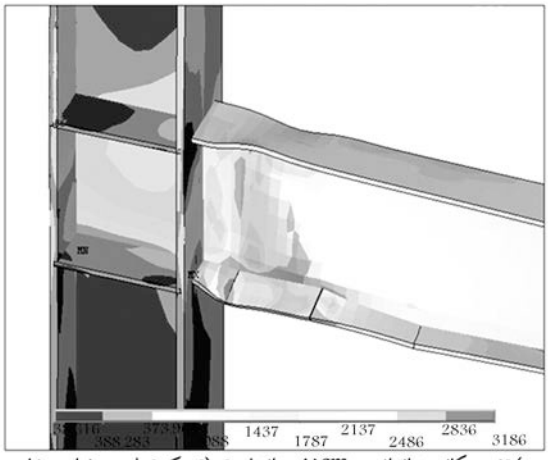
در نمونه‌ی ۲۵ (اتصال با کاهش در جان تیر مطابق جدول ۱) در تغییر مکان ۱۲ سانتی‌متر در انتهای تیر، تسلیم کلی در ناحیه‌ی کاهش‌یافته به وجود آمد و چشمه‌ی اتصال نیز به‌مقدار اندکی دچار تسلیم شد (شکل ۸الف). در تغییر مکان ۱۵ سانتی‌متر انتهای آزاد تیر، تسلیم کاملاً در ناحیه‌ی کاهش یافته متمرکز شد (شکل ۸ب).

از مقایسه‌ی اشکال ۸ب و ۹الف دیده می‌شود که اتصال کاهش‌یافته 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 ۸ب و ۹ب، و با مقایسه‌ی اتصال با کاهش در جان و اتصال

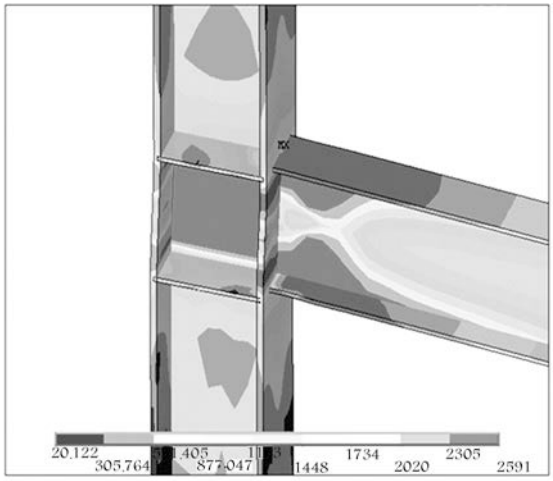


الف) تغییر مکانی به اندازه ی ۱۲cm در انتهای تیر(رخداد تسلیم کلی در بیشتر ناحیه ی کاهش یافته)؛

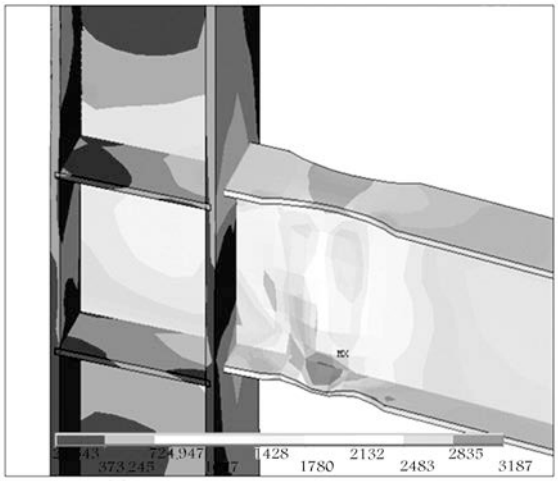


ب) تغییر مکانی به اندازه ی ۱۵cm در انتهای تیر(تمرکز تسلیم در نواحی خاصی از قسمت کاهش یافته).

شکل ۸. نمودار تنش فون‌میسس سه‌بعدی برای اتصال با کاهش در جان تیر (نمونه‌ی شماره ۲۵).



الف) اتصال ساده ی تیر به ستون؛



ب) اتصال استخوانی.

شکل ۹. نمودار تنش فون‌میسس سه‌بعدی در تغییر مکانی به‌اندازه‌ی ۱۵cm در انتهای تیر.

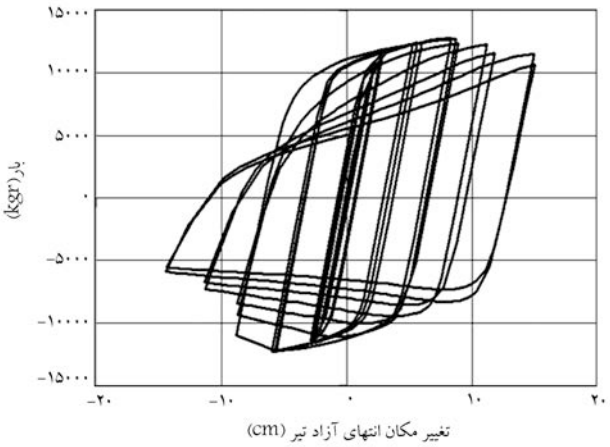
www.SID.ir

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.

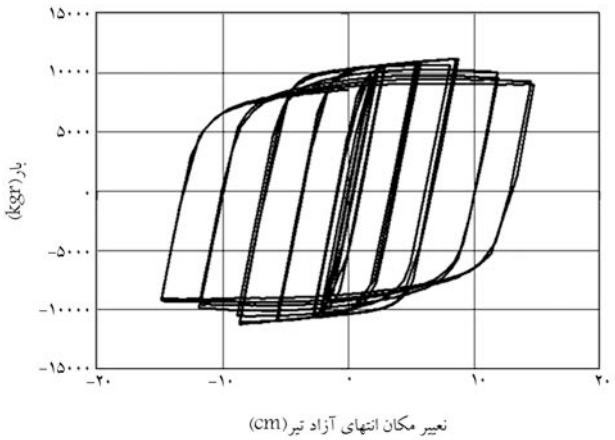
با توجه به شکل ۱۰ مقایسه‌یی بین نمودار بار ـ تغییر مکان اتصال استخوانی (نمونه‌ی شماره‌ی ۲۹ از جدول ۱) و اتصال با کاهش گوه‌یی در جان تیر (نمونه‌ی شماره‌ی ۲۵ از جدول ۱) انجام می‌شود. نمودار ۱۰الف دارای بیشینه نیرویی با مقدار بزرگ‌تر در دو طرف محور نیروها نسبت به نمودار ۱۰ب است. در نمودار ۱۰الف در طرف مثبت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

نمودار ۱۰ب که برای نمونه‌ی اتصال استخوانی است دارای چرخه‌های بازِ بار ـ تغییرمکان است و شیب کاهش مقاومت (DRAMP) در آن ملایم‌تر است. به‌دلیل اعمال برش موضعی یکسان در بال بالا و پایین تیر، نمودار در طرف مثبت و منفی محور نیروها متقارن است.

پدیده‌ی باریک‌شدگی[5] به‌صورت لاغرشدن نمودار بار ـ تغییر مکان نمونه (معمولاً در نزدیکی مبدأ مختصات) در بارگذاری رفت و برگشتی رخ می‌دهد (شکل ۱۱).[۱۹] با توجه به نمودار شکل ۱۰الف و مقایسه‌ی آن با نمودار شکل ۱۰ب دیده می‌شود که

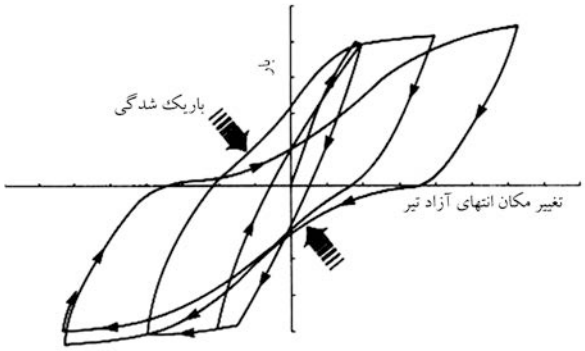


الف) نمودار بار - تغییر مکان نمونه ی شماره ی ۲۵؛



ب) نمودار بار - تغییر مکان نمونه ی اتصال استخوانی.

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



شکل ۱۱. پدیده‌ی باریک‌شدگی در بارگذاری رفت و برگشتی.

به‌دلیل 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 باریک‌شدگی گرفتار شده است. به‌دلیل اعمال کاهش در پایین جان تیر (مطابق شکل ۱) بیشترین باریک‌شدگی در جهت منفی محور تغییر مکان‌ها رخ داده است (شکل ۱۰الف).

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 مثبتِ محور نیروها بیشتر و در طرفِ منفی آن کم‌تر از نمونه‌ی اتصال با کاهش در جان است.

۵. نتیجه‌گیری

اتصال گیردار ساده‌ی تیر به ستون[6] 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 باریک‌شدگی محلی گوه‌یی 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 گوه‌یی در جان تیر با به کارگیری 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 باریک 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 کمانی 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 مقایسه‌یی میان آن و اتصال استخوانی نیز انجام گرفت. مشاهده شد که اتصال با

Archive SID
www.SID.ir

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

اتصال کاهش‌یافته با تضعیف خمشی موضعی در جان تیر توانایی بالایی در دورکردن تمرکز تنش از اتصال در تحلیل‌های مطالعه حاضر و در مطالعات آزمایشگاهی پیشین نشان داده است. ساخت این نوع اتصال به‌لحاظ اجرایی آسان است و پاسخ لرزه‌یی خوبی به‌همراه دارد.[۱۲] از مزایای دیگر آن سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی مناسب‌اند.

پانوشت

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 Structureal 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 Enginnering 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.

Archive of SID

www.SID.ir