

چکیده

تغییر نگرشی که پس از زلزله نورث ریج در طراحی اتصالات رخ داد محققان متعددی را بر آن داشت تا برای بهبود عملکرد اتصالات صلب تیر به ستون ایده‌های جدید را مورد مطالعه قرار دهند. برخی از این ایده‌ها بر محور ممانعت از ایجاد تنش‌های سه‌بعدی در محل اتصال تیر به ستون، برخی بر کاهش تغییر شکل‌های برشی چشمه اتصال و برخی دیگر بر حذف ورق‌های پیوستگی متمرکز شده و عملکرد هر یک به کمک کارهای آزمایشگاهی و تحلیلی متعدد به‌بوته آزمایش گذاشته شد. از جمله آنها می‌توان به طرح‌های ابتکاری اتصال با ورق کناری و اتصال با ورق دیافراگمی (سخت‌کننده بیرونی) اشاره کرد. اولی مانع بروز تنش‌های سه‌بعدی شده و به تقویت چشمه اتصال کمک می‌کند و دومی با حذف ورق‌های پیوستگی و ممانعت از ناپیوستگی ستون، چشمه اتصال را سخت‌تر کرده و عملکرد لرزه‌ای آنرا بهبود می‌بخشد. در مقاله حاضر با طرح ایده‌ای جدید که ترکیبی از اتصال با ورق کناری، اتصال با ورق دیافراگمی و اتصال صلب با ورق بالاسری و زیرسری تأیید شده در مبحث ۱۰ است، سعی شده است مزیت‌های آنها به‌طور یکپارچه جمع شده و به بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصال صلب کمک شود. برای این منظور مدل پیشنهادی به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و به‌طور غیرخطی تحلیل شده است. برای نمایش خرابی در اجزای فولادی، روش Birth & Death در تحلیل به کار رفته است. نتایج نشان می‌دهد که اتصال پیشنهادی علاوه بر حذف ورق‌های پیوستگی داخلی، موجب تقویت قابل توجه چشمه اتصال شده و با حذف اتصال مستقیم تیر به ستون، موجب کاهش تغییر شکل‌های بال ستون و در نتیجه حذف تنش‌های سه‌بعدی در این محل شده است.

واژگان کلیدی: اتصال صلب تیر به ستون، اتصال با ورق کناری، اتصال با ورق دیافراگمی، اتصال صلب جوشی با ورق بالاسری و زیرسری، Birth & Death، چشمه اتصال، تغییر شکل بال ستون.

بررسی تحلیلی اتصال صلب با ورق دیافراگمی خارجی و ورق کناری در ستون‌های مربعی توخالی تحت بارگذاری لرزه‌ای

محمدقاسم وتر (نویسنده مسئول)

استادیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، vetr@iiees.ac.ir

سهیل فلاح

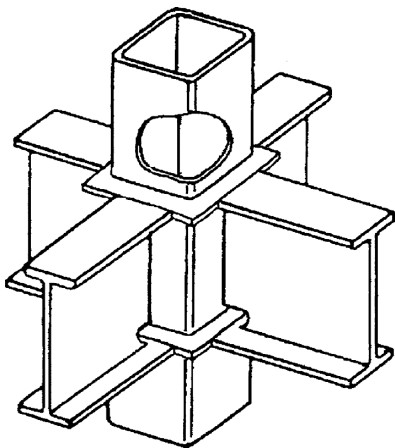
دانشجوی دکتری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۱- مقدمه و تاریخچه

گسترده‌ای در پروژه SAC-II با مشارکت FEMA بر روی اتصالات خمشی با هندسه‌های مختلف صورت گرفت تا معیارهایی برای طراحی لرزه‌ای شکل‌پذیر این اتصالات ارائه شود و انواع جدیدی از آن پیشنهاد شود [۲]. در میان اتصالات پیشنهاد شده نوع رایج اتصالات با ورق بالاسری و زیرسری کاربرد رایج‌تری در ایران دارد. استفاده از این نوع اتصال در ستون‌های باکس توخالی مستلزم اجرای ورق پیوستگی داخل ستون است که

آنچه در زلزله ۱۹۹۴ نورث ریج اتفاق افتاد باعث شد که دیدگاه‌های قبلی درباره شکل‌پذیری اتصالات خمشی جوشی تیر به ستون به محاق کشیده شوند [۱]؛ به‌طوری‌که دگرگونی قابل توجهی در طراحی این نوع اتصالات که از ۱۹۶۰ در ساختمان‌سازی حاکم بود، رخ دهد [۲]. خسارت‌ها به‌صورت شکست ترد در جوش نفوذی بال به ستون رخ داده و رفتار شکل‌پذیر را مختل کرده بود. مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی

مقطع مربع خالی [۶] یا مربع پر شده با بتن [۷-۸]، دایره خالی [۹] و دایره پر شده با بتن [۱۰-۱۲] توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیقات سعی شده است به کمک روش های ابتکاری مختلف به جای ورق های پیوستگی داخل ستون، از المان های خارج از ستون به عنوان سخت کننده ستون استفاده شود. یکی از این روش ها که می تواند با ساختار اجرایی اتصالات صلب در ایران تطبیق داشته باشد، استفاده از ورق دیافراگم خارجی است که نمونه ای از آن در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): اتصال صلب با ورق دیافراگم خارجی [۷].

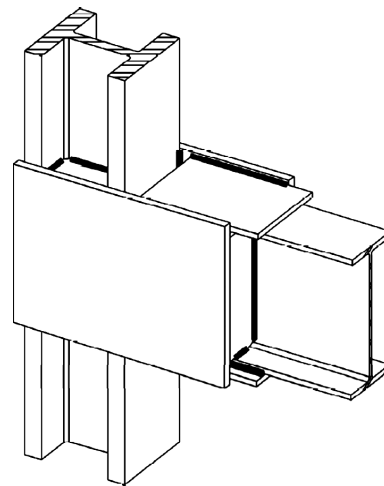
ایده ای که در این پژوهش مورد بررسی قرار می گیرد ترکیبی از اتصال با ورق کناری، اتصال با ورق دیافراگمی و اتصال متعارف صلب با ورق روسری و زیر سری است (WFP) که بر روی ستون های باکس یا توخالی مربعی به کار می رود.

۲- اتصال پیشنهادی

در اتصال پیشنهادی سعی شده است ویژگی های اجرایی هر سه نوع اتصال با ورق دیافراگمی، اتصال با ورق کناری و اتصال WFP در یک نمونه جمع آوری شود به نحوی که کفایت لازم در انتقال نیروها را داشته و دستیابی به شکل پذیری مناسب را ممکن سازد. دو نمونه از این اتصال در شکل (۳) نشان داده شده است. لنگر خمشی تیر در این اتصال با ترکیب دو روش ورق های دیافراگمی و اتصال خمشی WFP به ستون منتقل می شوند.

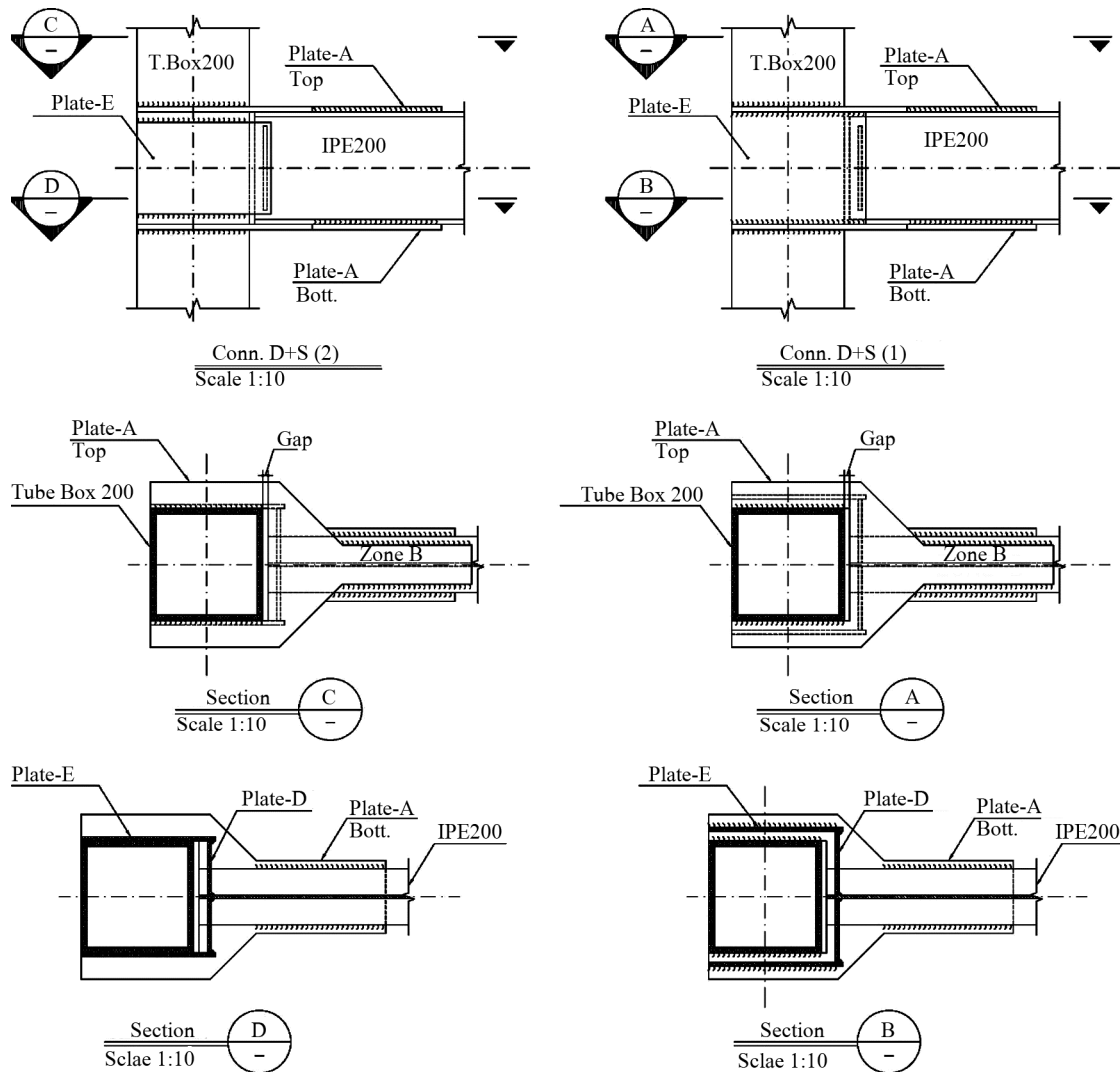
دشواری های اجرایی متعددی دارد؛ بنابراین یافتن راه حلی برای حذف ورق های پیوستگی یا اصلاح ساختار اجرایی آن بدون آسیب زدن به کیفیت شکل پذیری اتصال در ستون های توخالی مورد توجه محققین قرار گرفت. ایده هایی مانند استفاده از ورق کناری و ورق دیافراگمی خارجی از این دست هستند.

اتصال خمشی با ورق کناری یک اختراع ثبت شده توسط شرکت «سیستم های ورق کناری» است [۳]. در این اتصال تیر به طور مستقیم به ستون متصل نمی شود و انتقال خمش و برش توسط ورق های کناری صورت می گیرد (شکل ۱). این ایده مانع بروز تنش های سه بعدی و نهایتاً شکست ترد احتمالی در اتصال می شود. همچنین افزایش سختی در مجاورت چشمه اتصال، تغییر شکل های برشی آن را محدود می کند. همه جوش ها در آن از نوع گوشه و کارگاهی هستند. نیروی داخل جوش ها نیز در صفحه برشی به آنها وارد می شود. کیفیت این اتصال در تحقیقات مختلف مانند مؤسسه ارزیابی ICBO [۴] و پنل مشاوره فنی شهرستان لس آنجلس LACO-TAP [۵] نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل (۱): اتصال با ورق های کناری [۲].

به موازات این ایده، اصلاح ساختار ورق های پیوستگی (دیافراگم) در اتصال صلب به ستون های توخالی مورد توجه محققین مختلف قرار گرفت. این روش به ویژه در ستون های توخالی یکپارچه کاربرد دارد. این ایده بر روی ستون های با



شکل (۳): اتصال پیشنهادی ترکیبی از اتصال با ورق کناری، اتصال با ورق دیافراگمی خارجی و اتصال متعارف صلب با ورق بالاسری و زیرسری (WFP) است، D+S 1: ورق E به ورق‌های دیافراگمی متصل می‌شود، D+S 2: ورق E به جان ستون جوش می‌شود.

پیوستگی داخل ستون که مشکلات اجرایی زیادی داشته و در امتداد محور ستون ناپیوستگی ایجاد می‌کند، مرتفع شود. اما در انتقال نیروی برشی تیر از ایده ورق‌های کناری کمک گرفته شده است. نیروی برشی همانند اتصال با ورق کناری توسط ورق‌های متعامد از جان (ورق D) به دو ورق موازی با جان ستون (ورق E) منتقل شده و از آنجا به ورق‌های دیافراگمی (D+S 1) یا جان ستون (D+S 2) منتقل می‌شود. باز هم با جداسازی تیر از بال ستون، از بروز تمرکز تنش در محل اتصال ورق جان به ستون جلوگیری شده است و همچنین به کمک ورق‌های کناری (ورق‌های D و E) چشمه اتصال سخت‌تر شده است. کلیه جوش‌ها مانند اتصال با ورق کناری از نوع گوشه هستند.

بدین منظور ورق‌های دیافراگمی بالا و پایین (ورق‌های A) به دور ستون حرکت کرده و همانند اتصال WFP تا روی بال فوقانی و زیر بال تحتانی یافته و با جوش گوشه به آنها متصل می‌شوند (بخش B). همانند اتصال WFP عرض ورق فوقانی کمتر از عرض بال تیر و عرض ورق تحتانی بیشتر از آن در نظر گرفته شده است تا جوش‌های گوشه به صورت تخت قابل اجرا باشند. در اتصال ورق‌های دیافراگمی به ستون، از ایده ورق کناری کمک گرفته شده و هرگونه اتصال مستقیم تیر و دیافراگم به بال ستون قطع شده است (فاصله GAP). با این ترکیب اتصال می‌تواند کارگاهی انجام شده، از تمرکز و بروز تنش سه‌بعدی در بال ستون احتراز شده و به کمک ورق‌های دیافراگمی نیاز به ورق

$$\frac{\sum M_{pc}^*}{\sum M_{pb}^*} > 1.0 \quad (2)$$

جمع لنگرهای پلاستیک ستون‌های متصل به گره و M_{pc}^* جمع لنگرهای پلاستیک تیرهای متصل به گره است. برای تعیین این نسبت باید نیروی محوری ستون مشخص باشد. یانگ و همکاران [۸] نشان داده‌اند که میزان نیروی محوری در شکل‌پذیری اتصال دخیل است. در اتصالاتی که نیروی محوری ستون کمتر از $0.6Py$ و در محدوده $0.4Py$ واقع شده است، بیشترین شکل‌پذیری در اتصال مشاهده شده است؛ بنابراین نیروی محوری ستون برابر $0.4Py$ یا $0.4A.Fy$ در نظر گرفته می‌شود. سطح مقطع ستون $73/4$ سانتی‌متر مربع است بنابراین نیروی محوری ستون برابر 70 تن تعیین می‌شود. با این فرض ضابطه فوق با فرض تیرهای مشابه در دو طرف اتصال و ستون‌های مشابه در بالا و پایین اتصال برابر 0.944 به دست می‌آید. این عدد در قاب با شکل‌پذیری ویژه قابل قبول نیست اما در قاب متوسط قابل قبول تلقی می‌شود.

۳-۳- ورق‌های دیافراگمی

هندسه ورق دیافراگمی شامل عرض آن در محل اتصال به ستون و تیر، ضخامت ورق‌ها و الگوی تغییر عرض آن از کنار ستون تا محل اتصال با تیر است. در برخی مقالات (مانند آلوستاز و اشنایدر [۱۵]) که اتصال ورق دیافراگمی به‌طور مستقیم و با جوش نفوذی به‌صورت لبه به لب با ورق بال تیر صورت گرفته یا توسط یک ورق وصله ثانویه به لب تیر متصل شده است، ضخامت ورق دیافراگمی برابر ضخامت بال تیر در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر ضخامت ورق به دو روش تعیین می‌شود. اولی بر اساس نیاز معرفی شده در مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان در طراحی اتصال صلب صورت می‌گیرد. بر این اساس ضخامت و طول جوش اتصال ورق‌ها به تیر بر اساس لنگر و برشی به دست می‌آید که پس از تشکیل مفصل پلاستیک در انتهای ورق اتصال و با مشارکت بارهای مرده و زنده، در بر ستون ایجاد می‌شوند. برای تیر IPE200 با دهانه ۴ متر و با فرض بار مرده ۴۵۰ کیلوگرم

۳- فرضیات

فولاد مورد استفاده از نوع ST37 با مدول الاستیسیته $E=2.1E6$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و تنش جاری شدن $Fy=2400$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و نوع قاب خمشی، متوسط در نظر گرفته شده است. دهانه تیر و عرض بارگیر آن ۴ متر و ارتفاع ستون‌ها ۳ متر فرض شده است. تیر از نوع IPE200 و ستون از قوطی Tube Box نورد شده مطابق با جدول پروفیل‌های خالی اشتال انتخاب شده‌اند [۱۳]. نوع الکتروود جوش E70 با تنش نهایی ۴۹۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع انتخاب شده است.

۳-۱- هندسه ستون

بعد ستون ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است و برای تعیین ضخامت آن الزامات لرزه‌ای کمانش موضعی در قاب متوسط مطابق مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان [۱۴] ملاک عمل قرار گرفته است. مطابق این ضابطه حداکثر نسبت پهنا به ضخامت بال ستون قوطی شکل از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$0.64 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (1)$$

مقدار معیار فوق برابر $18/93$ به دست می‌آید؛ بنابراین ضخامت حداقل دیواره یک ستون توخالی با عرض داخلی ۱۸ سانتی‌متر برابر 0.95 به دست می‌آید. در جدول اشتال برای قوطی نورد شده توخالی با عرض خارجی ۲۰ سانتی‌متر، حداکثر ضخامت ستون برابر ۱ سانتی‌متر است که مناسب است. در پیوست ۱ کمانش کلی ستون مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که تحت بار وارده برابر $0.4Py$ ، ستون دچار کمانش نمی‌شود.

۳-۲- تیر ضعیف - ستون قوی

کنترل این ضابطه برای قاب متوسط الزامی نیست اما می‌تواند تصویری از وضعیت مقاومتی اعضای متصل به گره ترسیم کند. این معیار در بند ۲-۹-۳-۱۰ مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان به‌صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

تیر در نظر گرفته‌اند؛ همچنین ملاک‌های متفاوت دیگری توسط چپو و همکاران [۱۲] و وانگ و همکاران [۱۷] در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر عرض ورق دیافراگمی برابر نصف عرض لازم برای اتصال ورق به تیر در نظر گرفته شده است، زیرا بحرانی‌ترین مقدار را نتیجه می‌دهد.

سومین پارامتر هندسی ورق دیافراگمی زاویه اتصال آن به بال ستون و حرکت به دور ستون است. در مقاله اشنایدر و آلوسناز [۱۸] تأثیر تغییر زاویه از ۴۵ به ۳۰ درجه بر بهبود شکل‌پذیری بررسی شده است. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است در این تحقیق تغییر زاویه ورق‌های دیافراگمی ۴۵ درجه انتخاب شده است.

بر اساس طراحی مطابق با ضوابط مبحث ۱۰ م.م.س. (مقررات ملی ساختمان) به دو عدد ورق اتصال جان برای انتقال نیروی برشی نیاز است. پس از طراحی اتصال، ضخامت ورق‌ها ۱۰ میلی‌متر به دست آمده است؛ بنابراین ضخامت ورق‌های D و E (شکل ۳) در اتصال پیشنهادی برابر ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

با این فرضیات تعدادی نمونه جهت انجام مطالعات تحلیلی انتخاب شده‌اند. در جدول (۱) نام و مشخصات این نمونه‌ها به‌طور خلاصه آورده شده است. در کنار نمونه‌های این پژوهش اتصال با ورق کناری، اتصال دیافراگمی و اتصال WFP نیز مدل‌سازی و تحلیل خواهد شد تا نتایج با یکدیگر مقایسه شود. مشخصات این نمونه‌ها نیز در جدول (۱) آورده شده است.

بر مترمربع و بار زنده و دیوارهای جداکننده به ترتیب ۲۰۰ و ۱۰۰ کیلوگرم بر مترمربع، ضخامت ورق اتصال فوقانی ۳۰ و ضخامت ورق اتصال تحتانی ۱۵ میلی‌متر به دست می‌آید. همچنین عرض ورق فوقانی ۷۰ میلی‌متر و عرض ورق تحتانی ۱۳۰ میلی‌متر تعیین می‌شود. در فرآیند مطالعات تحلیلی این اعداد به‌عنوان حد بالای پارامتر ضخامت در نظر گرفته شده است.

در دومین روش، ضخامت ورق‌های دیافراگمی به نحوی تعیین می‌شود که سطح ورق بالاسری در محل اتصال به تیر با سطح بال تیر برابر باشد. ضخامت بال IEP200 برابر ۸/۵ میلی‌متر و عرض آن ۱۰۰ میلی‌متر است؛ بنابراین اگر عرض ورق در محل اتصال به بال ۷۰ میلی‌متر باشد، ضخامت آن از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$(3) \quad \frac{8.5 \times 100}{70} = 12.1 \text{ mm}$$

بنابراین در روش دوم ضخامت ورق‌های بالا و پایین ۱۲ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. برای جلوگیری از کمانش موضعی در ورق دیافراگمی، کمانش تحت بار حدی در پیوست ۲ کنترل شده و نشان داده می‌شود که وقوع کمانش در این بار در ورق‌های دیافراگمی رخ نخواهد داد.

تغییرات عرض ورق دیافراگمی در مقالات مختلف متفاوت در نظر گرفته شده و یکی از پارامترهای متغیر برای بهبود اتصال بوده است. برای مثال اشنایدر و همکاران [۱۶] عرض کلی ورق دیافراگمی را در محل اتصال به ستون برابر عرض ستون + عرض

جدول (۱): نمونه‌های بررسی شده در تحقیق.

شماره	نام اختصاری	نوع اتصال	ضخامت ورق اتصال (میلی‌متر)	نوع اتصال جان تیر
نمونه ۱	D+S (1A)	ورق دیافراگمی + کناری	بالا ۳۰ و پایین ۱۵	ورق کناری به ورق دیافراگمی
نمونه ۲	D+S (1B)	ورق دیافراگمی + کناری	بالا و پایین ۱۲	ورق کناری به ورق دیافراگمی
نمونه ۳	D+S (2A)	ورق دیافراگمی + کناری	بالا ۳۰ و پایین ۱۵	ورق کناری به ستون
نمونه ۴	D+S (2B)	ورق دیافراگمی + کناری	بالا و پایین ۱۲	ورق کناری به ستون
نمونه ۵	DIAPH (A)	ورق دیافراگمی	بالا ۳۰ و پایین ۱۵	ورق جان به ستون
نمونه ۶	DIAPH (B)	ورق دیافراگمی	بالا و پایین ۱۲	ورق جان به ستون
نمونه ۷	SIDE (A)	ورق کناری	بالا ۳۰ و پایین ۱۵	ورق کناری به ستون
نمونه ۸	SIDE (B)	ورق کناری	بالا و پایین ۱۲	ورق کناری به ستون
نمونه ۹*	WFP	اتصال صلب با ورق بالاسری و زیر سری	بالا ۳۰ و پایین ۱۵	ورق جان به ستون

* تنها نمونه‌ی دارای ورق پیوستگی (سخت‌کننده) داخل ستون است.

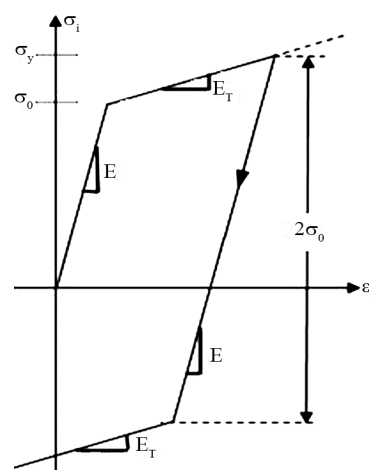
۴- مدل سازی

شده است که در مجاورت جوش تا ۰/۳۵ سانتی متر کاهش داده می شود. در شکل (۵) جزئیات مدل سه بعدی اتصال پیشنهادی نشان داده شده است. در گوشه بالا و گوشه پایین شکل، نحوه مدل سازی جوش و اتصال آن به ورق ها نشان داده شده است. فرض شده است ورق های دیافراگمی اتصال مستقیمی به ستون ندارند و تنها از طریق جوش به ستون متصل شده اند.

بارگذاری شامل بار محوری ستون به اندازه ۰/۴Py و اعمال جابه جایی قائم در انتهای تیر است. تحلیل غیرخطی با روش نیوتن-رافسون کامل انجام می شود. به دلیل ماهیت غیرخطی تحلیل باید بارگذاری به آهستگی و گام به گام صورت گیرد. معیار همگرایی جابه جایی انتخاب شده و نتایج آن با معیار همگرایی نیرو یکسان بوده است. همچنین از گزینه تحلیل Line Search در انجام تحلیل غیرخطی استفاده شده است. این گزینه افزایش گام در بارگذاری را با مقیاسی به نام S تعدیل می کند تا دستیابی به همگرایی را تسهیل کند. حداقل تغییر گام بارگذاری ۱ سانتی متر انتخاب شده است، اما این اختیار به برنامه داده شده است که در مواردی که تحلیل مشکل همگرایی دارد، گام بارگذاری کوچک تری در نظر گرفته شود.

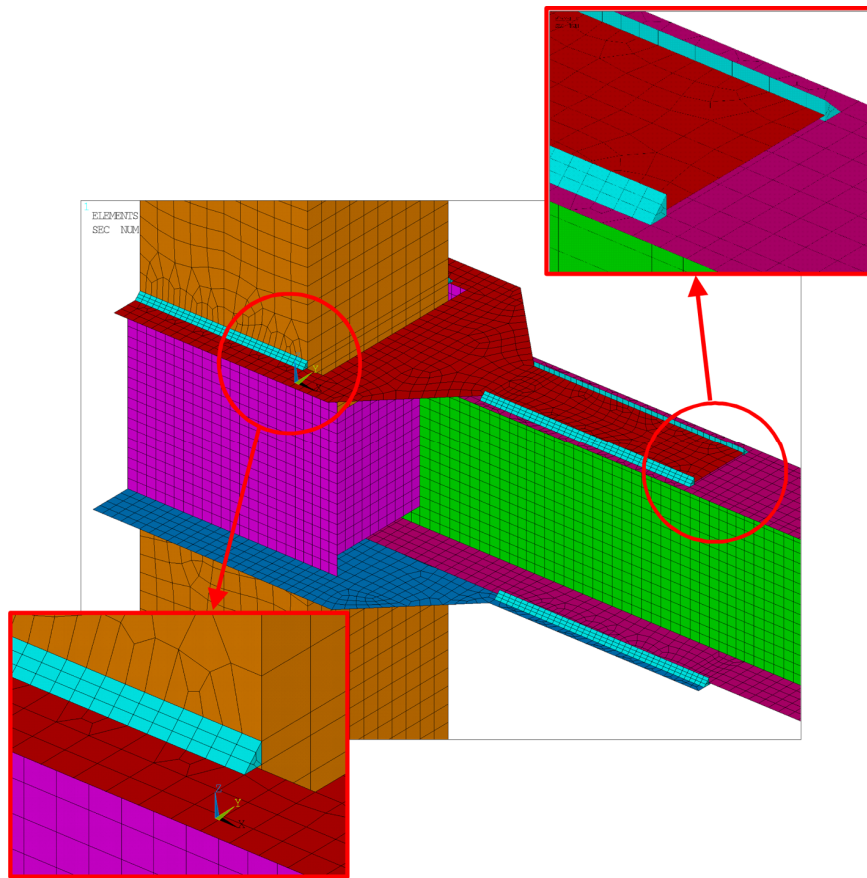
انجام تحلیل غیرخطی فولاد در ANSYS وضعیت مدل را در هر لحظه بارگذاری نمایش می دهد اما نمی تواند بروز خرابی در المان ها را شبیه سازی کند. در برخی موارد با وقوع واگرایی یا محاسبات که می تواند در اثر ناپایداری در یک بخش کوچک یا بخش بزرگی از مدل رخ دهد، تحلیل متوقف شده و ادامه نمی یابد، اما باز هم وقوع خرابی یا پارگی در المان ها قابل استخراج نیست. در پژوهش حاضر برای مشاهده المان های آسیب دیده از فرآیندی به نام Birth & Death در نرم افزار استفاده شده است. به کمک این فرآیند می توان پس انجام تحلیل در هر گام، نتایج را بررسی و بر اساس یک معیار مشخص، المان های آسیب دیده را جدا کرده و اثر سختی و جرم آنها را از معادلات حذف نمود. بدین ترتیب کاهش سختی و مقاومت می تواند در نمودار رفتاری نمونه دیده شود و جابه جایی و مقاومت متناظر با آن استخراج شود. همچنین امکان مشاهده مکان هایی از مدل اعم از جوش یا فولاد که دچار زوال شده اند نیز وجود خواهد داشت.

برای بررسی رفتار غیرخطی نمونه های انتخاب شده لازم است از یک نرم افزار اجزای محدود استفاده شود. نرم افزار ANSYS یک نرم افزار تحلیل اجزای محدود است [۱۹] که قابلیت شبیه سازی رفتار غیرخطی مواد را داراست. در این نرم افزار می توان با تعریف رفتار دو خطی (الاستو-پلاستیک کامل یا با سخت شوندگی) رفتار غیرخطی فولاد را شبیه سازی کرد. مدل مصالحی که در این پژوهش به کار رفته مدل Bilinear Kinematic Hardening دو خطی است که در شکل (۴) نشان داده شده است. نقطه شکست منحنی برابر تنش فولاد و شیب خط دوم برابر $E_T = 0.002E$ در نظر گرفته شده است [۲۰].



شکل (۴): نمودار رفتاری دو خطی Bilinear Kinematic Hardening فولاد در نرم افزار ANSYS [۱۹].

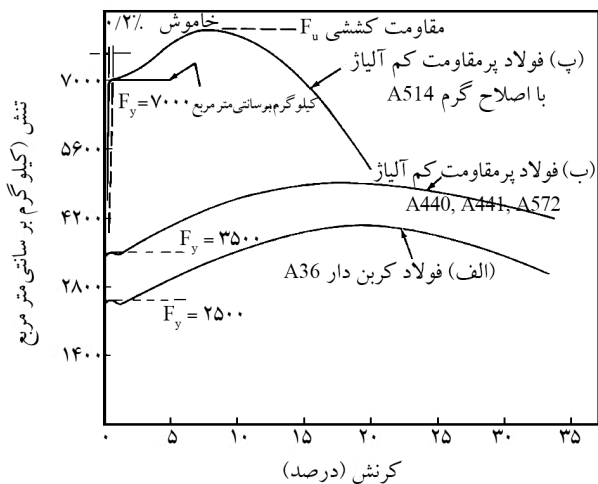
برای شبیه سازی تیر، ستون و ورق ها از المان های صفحه ای SHELL181 استفاده شده است. این المان ها قابلیت مدل سازی رفتار پلاستیک را داشته و دارای چهار گره هستند که هر گره ۶ درجه آزادی جابه جایی و دورانی داراست. برای شبیه سازی جوش های گوشه اصلی که به طور مستقیم در باربری خمشی مشارکت دارند از المان SOLID45 استفاده شده است تا دقت بیشتری در مدل سازی سختی و مقاومت آنها حاصل شود. این المان می تواند دارای هشت گره باشد که هر گره ۳ درجه آزادی جابه جایی دارد. این المان نیز می تواند رفتار پلاستیک را شبیه سازی کند. ابعاد المان ها حداکثر ۲ سانتی متر در نظر گرفته



شکل (۵): جزئیات مدل سه‌بعدی و مدل جوش در اتصال پیشنهادی D+S.

$$\epsilon_e = \frac{1}{1+\nu'} \left(\frac{1}{2} \left[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 \right] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

که در آن ϵ_e کرنش معادل فون میسرز، ν ضریب پواسون و ϵ_i کرنش‌های اصلی هستند.



شکل (۶): نمودار تنش-کرنش فولاد [۲۱].

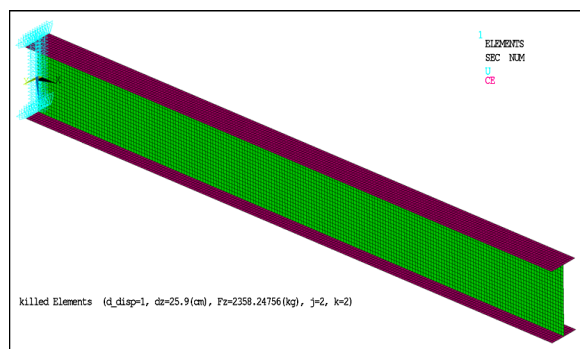
معیاری که برای خرابی در نظر گرفته شده است کرنش پلاستیک است. در شکل (۶) نمودار رفتاری فولاد [۲۱] و در جدول (۲) مقادیر کرنش متناظر با خرابی جوش آورده شده است [۲۲]. چنانچه دیده می‌شود در فولاد پس از کرنش ۲۰ درصد مقاومت کاهش یافته و با گلویی شدن فولاد خسارت آغاز می‌شود. در جدول (۲) نیز کرنش حد خرابی جوشکاری برای الکترودهای E60 و E70 به‌طور میانگین ۲۰ درصد گزارش شده است؛ بنابراین فرض می‌شود کرنش ۲۰ درصد در رفتار پلاستیک بیانگر حد خرابی مصالح فولاد و جوش خواهد بود. از آنجایی که این کرنش ممکن است در جهات مختلفی در یک نمونه ایجاد شود معیار فون میسرز در محاسبه کرنش پلاستیک انتخاب و به‌عنوان پارامتر کنترلی در بررسی وقوع تخریب به کار می‌رود. کرنش پلاستیک فون میسرز از رابطه (۴) استخراج می‌شود:

جدول (۲): مقادیر کرنش متناظر با خرابی جوش [۲۲].

درصد کشیدگی در قطر ۴ برابر طول	قدرت تسلیم در انحراف ۰/۲ درصد		قدرت کششی		طبقه بندی AWS	
	A5/1M (مگاپاسکال)	A5/1 (ksi)	A5/1M (مگاپاسکال)	A5/1 (ksi)	A5/1M	A5/1
۲۲	۳۳۰	۴۸	۴۳۰	۶۰	E۴۳۱۰	E۶۰۱۰
۲۲	۳۳۰	۴۸	۴۳۰	۶۰	E۴۳۱۱	E۶۰۱۱
۱۷	۳۳۰	۴۸	۴۳۰	۶۰	E۴۳۱۲	E۶۰۱۲
۱۷	۳۳۰	۴۸	۴۳۰	۶۰	E۴۳۱۳	E۶۰۱۳
۲۲	۳۳۰	۴۸	۴۳۰	۶۰	E۴۳۱۸	E۶۰۱۸
۲۲	۳۳۰	۴۸	۴۳۰	۶۰	E۴۳۱۹	E۶۰۱۹
۲۲	۳۳۰	۴۸	۴۳۰	۶۰	E۴۳۲۰	E۶۰۲۰
تعیین نشده است	تعیین نشده است	تعیین نشده است	۴۳۰	۶۰	E۴۳۲۲ ^d	E۶۰۲۲ ^d
۲۲	۳۳۰	۴۸	۴۳۰	۶۰	E۴۳۲۷	E۶۰۲۷
۱۷	۴۰۰	۵۸	۴۹۰	۷۰	E۴۹۱۴	E۷۰۱۴
۲۲	۴۰۰	۵۸	۴۹۰	۷۰	E۴۹۱۵	E۷۰۱۵
۲۲	۴۰۰	۵۸	۴۹۰	۷۰	E۴۹۱۶	E۷۰۱۶
۲۲	۴۰۰	۵۸	۴۹۰	۷۰	E۴۹۱۸	E۷۰۱۸
۱۷ ^c	۴۰۰	۵۸	۴۹۰	۷۰	E۴۹۲۴	E۷۰۲۴
۲۲	۴۰۰	۵۸	۴۹۰	۷۰	E۴۹۲۷	E۷۰۲۷
۲۲	۴۰۰	۵۸	۴۹۰	۷۰	E۴۹۲۸	E۷۰۲۸
۲۲	۴۰۰	۵۸	۴۹۰	۷۰	E۴۹۴۸	E۷۰۴۸
۲۴	۳۷۰-۵۰۰ ^g	۷۲-۵۳ ^g	Note f	Note f	E۴۹۱۸M	E۷۰۱۸M

۵- راستی آزمایی مدل

در شکل (۷) مدل سه بعدی ساخته شده در نرم افزار نشان داده شده است. در انتهای آزاد تیر یک تغییر مکان قائم اعمال شده و با انجام تحلیل غیرخطی نمودار نیرو- تغییر مکان آن استخراج شده است. روش تحلیل مانند آنچه در بخش مفروضات گفته شد با کنترل کرنش حداکثر ۲۰ درصد و حذف المان‌های تخریب شده صورت گرفته است.



شکل (۷): مدل تیر کنسولی ۲ متری برای راستی آزمایی نرم افزار.

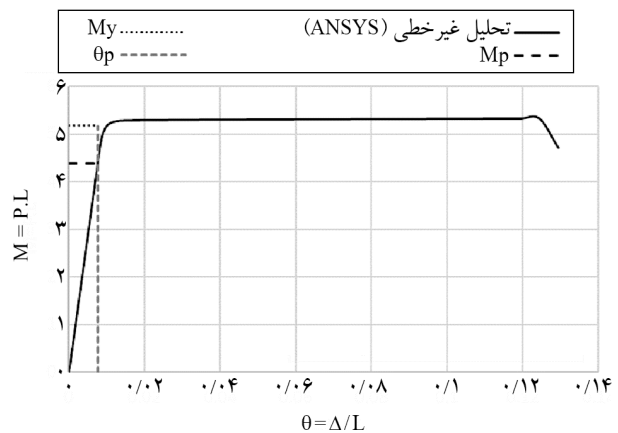
استفاده از یک نرم افزار برای انجام محاسبات و تحلیل‌های مهندسی نیازمند راستی آزمایی آن است. در این مقاله نتایج تحلیل غیرخطی اجزای محدود یک تیر کنسولی با مشخصات پروفیل IPE200 با تعدادی پاسخ کلیدی که به کمک روابط مقاومت مصالح قابل محاسبه‌اند، مقایسه شده و صحت نتایج بررسی می‌شود. رفتار مصالح تیر الاستو- پلاستیک کامل با مدول الاستیسیته ۲/۱E6 کیلوگرم بر سانتی مترمربع و مدول الاستیسیته مماسی صفر و تنش جاری شدن ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی مترمربع شبیه‌سازی شده است. طول تیر ۲ متر است. تکیه گاه تیر با تعریف قیدهای جابه‌جایی برای گره‌های یک طرف آن تعریف شده است. قیدهای تکیه‌گاهی گره‌های بال تیر در جهت قائم و در جهت محور تیر و قیدهای تکیه‌گاهی گره‌های جان در هر سه جهت اعمال شده است.

اتصال تیر در مدل گنجانده شده است. تیر تا وسط دهانه چهار متری شبیه‌سازی شده است. بارگذاری به صورت یک جابه‌جایی زیاد شونده به انتهای آزاد تیر اعمال شده است. بالا و پایین ستون‌ها و انتهای تیر تکیه‌گاه مفصلی در نظر گرفته شده است. همان‌طور که قبلاً گفته شد تحلیل با کنترل کرنش پلاستیک فون میسز و حذف المان‌هایی که کرنش پلاستیک بیشتر از ۲۰ درصد دارند با تکنیک Birth & Death صورت گرفته است. در هر مدل ابتدا ستون تحت بار محوری 0.4Py قرار داده شده و سپس جابه‌جایی فزاینده در انتهای تیر اعمال می‌شود.

در شکل (۹) توزیع کرنش پلاستیک و محل المان‌های حذف شده در مدل‌های D+S در آخرین گام تحلیلی نشان داده شده است. در برخی مدل‌ها جوش، در برخی فولاد پایه و در پاره‌ای هر دو دچار آسیب شده‌اند. در مدل (1A) D+S مفصل پلاستیک در انتهای ورق‌های اتصال ایجاد شده است. در این مدل خرابی المان‌ها در جوش گوشه اتصال ورق‌ها، بال تیر و جان تیر رخ داده و منجر به زوال مقاومت شده است. موقعیت المان‌های تخریب شده در شکل (۹) با پیکان نشان داده شده است. ضخامت زیاد ورق‌های دیافراگمی در این مدل مانع آسیب‌دیدگی محل اتصال به ستون شده و خسارت در انتهای آن متمرکز شده است.

در مدل (1B) D+S که ورق‌های نازک‌تری در اتصال دارد تمرکز تنش‌های پلاستیک در ابتدای محل تغییر زاویه ورق‌های اتصال و کنج محل اتصال ورق‌های دیافراگمی به ستون دیده می‌شود. کاهش ضخامت ورق‌ها باعث شد که محل مفصل پلاستیک به نزدیکی ستون منتقل شود. محل المان‌های آسیب‌دیده شامل ابتدای خط جوش و ورق اتصال در همین محل است. این مسئله در شکل (۱۰) به وضوح دیده می‌شود. در این شکل نمای جانبی اتصالات قبل و پس از تغییر شکل نشان داده شده است. مدل اولیه با خطی ممتد نمایش داده شده است. کاهش ضخامت ورق‌های دیافراگمی باعث شده است که محل خمیدگی تیر و در نتیجه مفصل پلاستیک به کنار ستون حرکت کند.

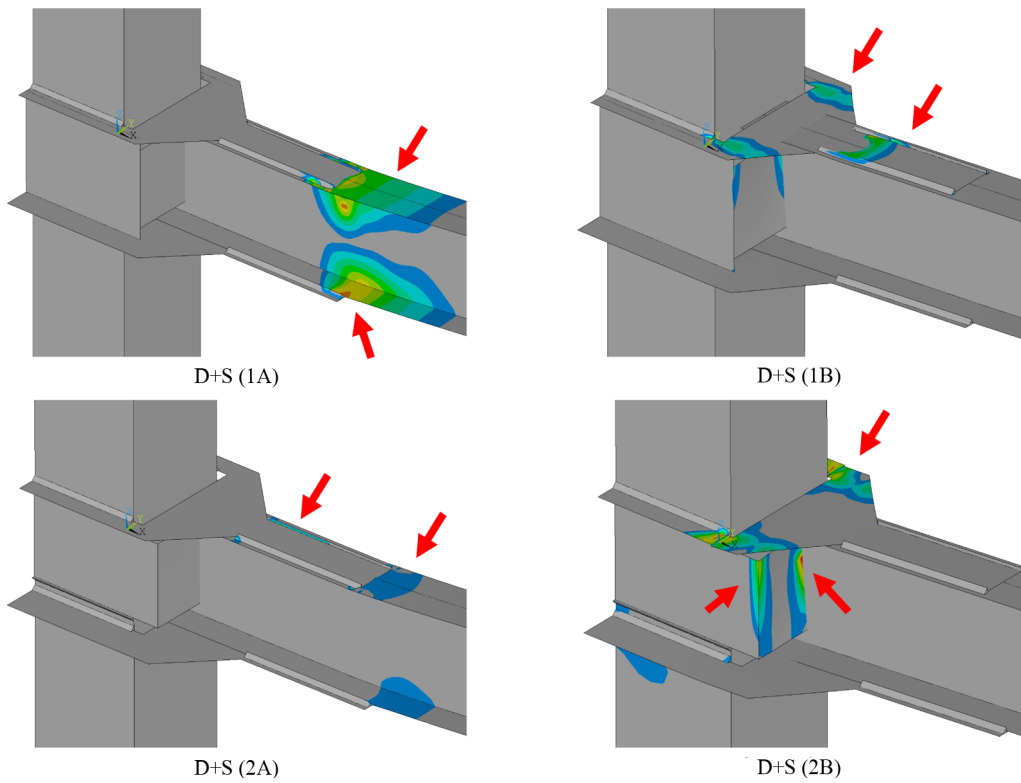
در شکل (۸) نمودار نیرو - تغییر مکان تیر ترسیم شده است. به موازات تحلیل اجزای محدود، محاسبات دستی برای تعیین لنگر متناظر با جاری شدن اولین تار (My)، لنگر متناظر با جاری شدن کل مقطع (Mp) و دوران متناظر با My (θ_y) محاسبه شده و در نمودار مشخص شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود تیر با رسیدن به My در دوران θ_y شروع به جاری شدن کرده و شیب منحنی کاهش می‌یابد. پس از آن به مجانب Mp رسیده و به تغییر شکل با سختی صفر ادامه می‌دهد. این تغییر شکل تا زمانی که اولین المان‌ها دچار گسیختگی شده و شکست اتفاق افتد (نقطه کاهش مقاومت در نمودار)، ادامه می‌یابد. مقدار Mp محاسبه شده توسط ANSYS کمی بیش از مقدار محاسبه شده دستی است. دلیل آن بروز تنش‌های سه‌بعدی در محل تکیه‌گاه مدل اجزای محدود است که منجر به ظاهر شدن مقاومت بیشتر می‌شود. بر اساس این نتایج ضریب شکل‌پذیری μ تیر برابر ۱۰/۵ به دست آمده است.



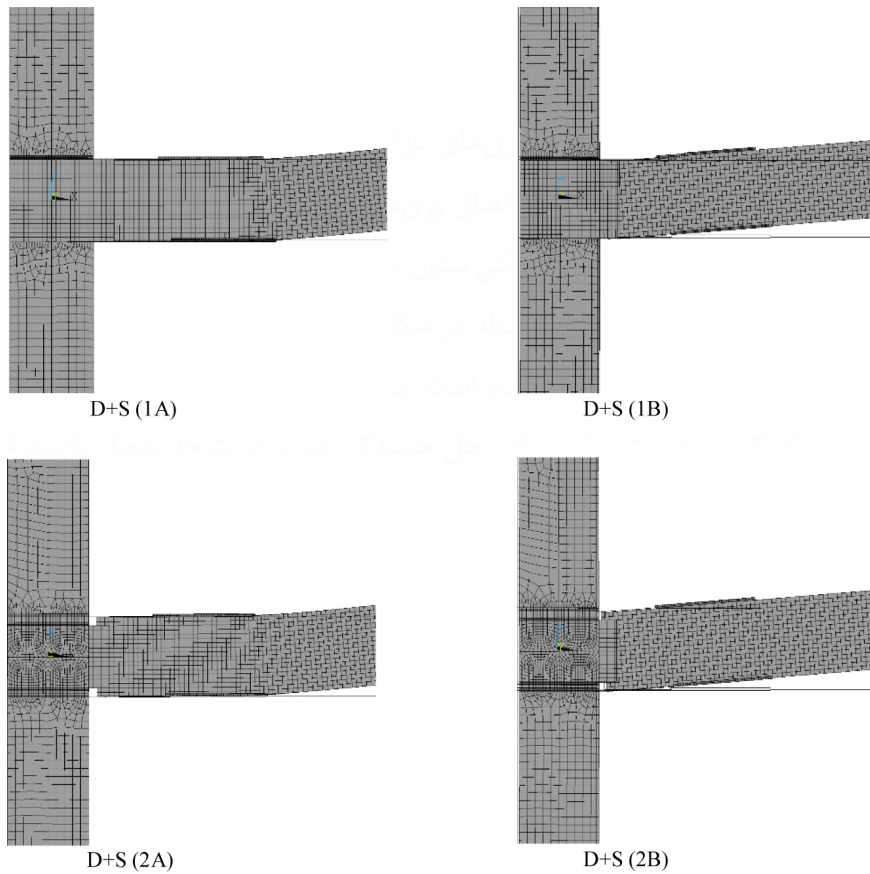
شکل (۸): نمودار لنگر - دوران تیر IPE200 و مقایسه آن با نتایج تحلیلی دستی.

۶- نتایج تحلیلی

مدل‌هایی که در جدول (۱) معرفی شده‌اند تحلیل شده و نتایج آنها استخراج شده است. چهار مدل اول، مدل‌های پیشنهاد شده در این تحقیق هستند که نتایج آنها با مدل‌های با ورق کناری (SIDE)، با ورق دیافراگمی خارجی (DIAPH) و اتصال WFP مقایسه شده است. نصف ارتفاع ستون‌ها در بالا و پایین



شکل (۹): توزیع کرنش پلاستیک در مدل‌های D+S، محل‌المان‌های آسیب‌دیده با پیکان مشخص شده است.



شکل (۱۰): تغییر شکل تیرها قبل و پس از بارگذاری در مدل‌های D+S.

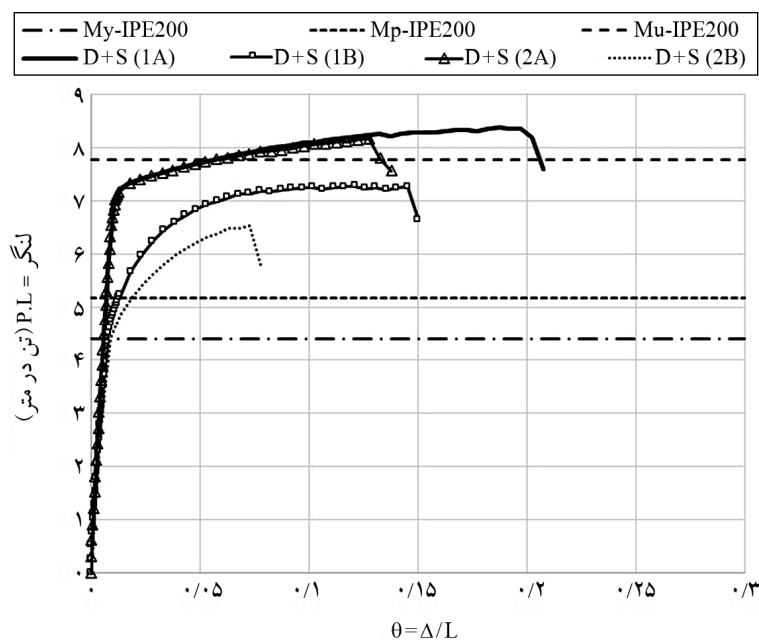
ضخامت بیشتر مدل‌های A باعث شده است که مقاومت اتصال بیشتر از مدل‌های B باشد. بیشترین شکل پذیری مربوط به اتصال D+S (1A) است. تفاوت در نحوه اتصال ورق‌های کناری نیز بر پاسخ تأثیرگذار بوده است. مدل‌های ۱ که ورق کناری به دیافراگم‌ها وصل شده است، تغییر شکل بیشتری را تحمل کرده‌اند. در میان این نمونه‌ها مدل D+S (1A) بهترین پاسخ را به لحاظ مقاومت، شکل پذیری و محل تشکیل مفصل پلاستیک داشته است. سایر مدل‌ها به دلیل وقوع خسارت در ورق در نزدیکی ستون یا شکست جوش در نزدیکی ستون نتوانسته‌اند شکل پذیری بیشتری را تأمین کنند.

برای مقایسه نمونه‌های D+S با رویکردی متفاوت، نمودارهای دوران-لنگر برای دو دوران θ و $\theta 1$ مطابق با شکل (۱۲) نیز ترسیم و مقایسه می‌شوند. هدف استفاده از یک معیار عددی برای تشخیص سهم رفتار غیرخطی در دو نقطه کلیدی بر ستون و انتهای ورق‌های دیافراگمی است.

اولین نمودار به نام M- θ شامل لنگر-دوران کلی اتصال است. لنگر M برابر لنگر ناشی از نیروی Pz در انتهای تیر حول نقطه A مطابق شکل (۱۲) است. مقدار θ برابر نسبت جابه‌جایی انتهای تیر بر طول AB است. این نمودار تصویری از پاسخ کلی اتصال است.

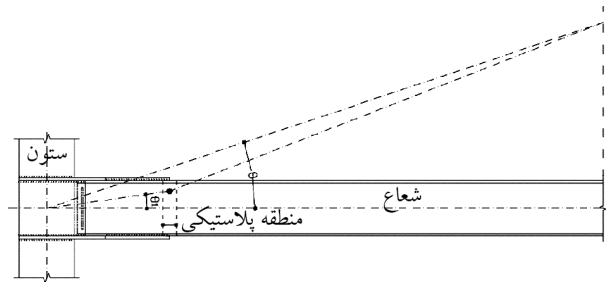
مدل D+S (2A) مانند مدل 1A است با این تفاوت که ورق‌های کناری به جای دیافراگم‌ها به جان ستون متصل شده‌اند. در این مدل تمرکز کرنش‌های پلاستیک و خرابی المان‌ها در ابتدا و انتهای جوش، ورق‌های متصل به آنها و بال تیر دیده می‌شود. در مدل D+S (2B) توزیع کرنش‌های پلاستیک در محل تغییر زاویه ورق‌های دیافراگمی و ورق‌های جان و کناری دیده می‌شود. با کاهش ضخامت ورق‌های دیافراگمی، سهم نیروی ورق‌های جان و کناری بیشتر شده و دچار رفتار پلاستیک شده‌اند. المان‌های خسارت دیده در محل تغییر زاویه ورق‌های دیافراگمی دیده می‌شوند. در این مدل نیز با کم شدن ضخامت ورق‌ها محل انحنای تیر به سمت ستون حرکت کرده است (شکل ۱۰).

در شکل (۱۱) نمودار لنگر-دوران چهار مدل D+S با یکدیگر مقایسه شده است. در همین نمودار لنگرهای $M_y = F_y.S$ ، $M_p = F_y.Z$ و $M_u = F_u.Z$ نیز برای درک بهتر نتایج به صورت خطوط افقی ترسیم شده‌اند. لنگر تیر از حاصل ضرب نیروی انتهای آزاد تیر در طول تیر به دست آمده است. دوران تیر از تقسیم جابه‌جایی انتهای آزاد تیر بر طول تیر + دوران وسط تیر در محل اتصال به دست آمده است. واحدها تن، متر و رادیان هستند.

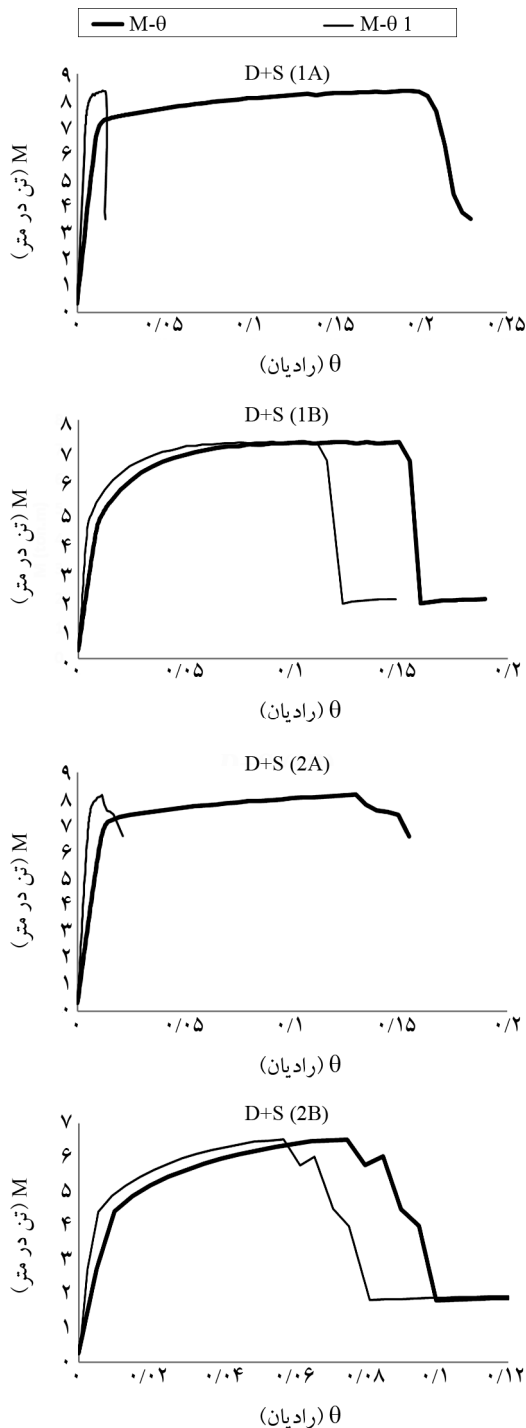


شکل (۱۱): مقایسه نمودار لنگر-دوران مدل‌های D+S.

دچار خسارت شده و المان‌ها تخریب شده‌اند. این مسئله در تغییر شکل‌های نمای جانبی تیرها که در شکل (۱۵) نشان داده شده است نیز دیده می‌شود. باز هم کم کردن ضخامت ورق‌ها منجر به تغییر محل انحنای تیر و حرکت مفصل پلاستیک به سمت ستون شده است.



شکل (۱۲): مقایسه دوران θ و θ_1 .

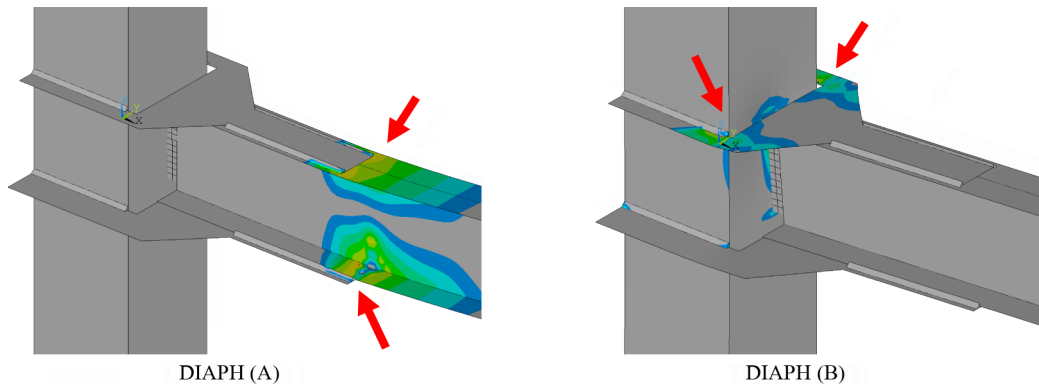


شکل (۱۳): مقایسه نمودارها $M-\theta$ و $M-\theta_1$ در مدل‌های D+S.

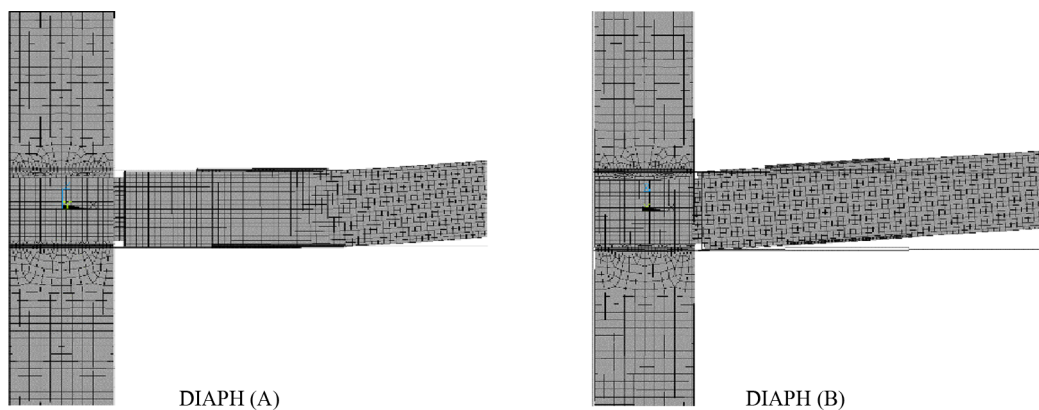
نمودار دوم، $M-\theta_1$ است که برای تشخیص محل لنگر پلاستیک ترسیم شده است. تعریف M همانند قبل است و θ_1 در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در صورتی که مفصل پلاستیک در محل اتصال تیر به ستون رخ دهد نمودارهای $M-\theta$ و $M-\theta_1$ به یکدیگر نزدیک می‌شوند؛ اما اگر لنگر پلاستیک در انتهای ورق‌های اتصال رخ دهد، نمودار $M-\theta$ تفاوت قابل توجهی نسبت به نمودار $M-\theta_1$ خواهد داشت. این نمودارها در شکل (۱۳) برای چهار اتصال D+S با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

همان‌طور که از نمودارها دیده می‌شود در مدل‌های A نمودار $M-\theta_1$ اتلاف انرژی بسیار کمتری نسبت به $M-\theta$ داشته است. این مسئله نشان می‌دهد که درصد بزرگی از اتلاف انرژی در انتهای ورق‌های اتصال رخ داده است و در بر ستون اتلاف انرژی بسیار ناچیز است. به عبارتی عملکرد اتصال مطابق با فرضیات طراحی بوده است؛ اما در مدل‌های B دو منحنی $M-\theta$ و $M-\theta_1$ به یکدیگر نزدیک هستند. به عبارتی حجم بزرگی از اتلاف انرژی در بر ستون یا نزدیک به آن رخ داده است که با اهداف طراحی مغایرت داشته است، زیرا می‌تواند خسارت‌ها را به ناحیه چشمه اتصال و در نهایت بدنه ستون منتقل کند.

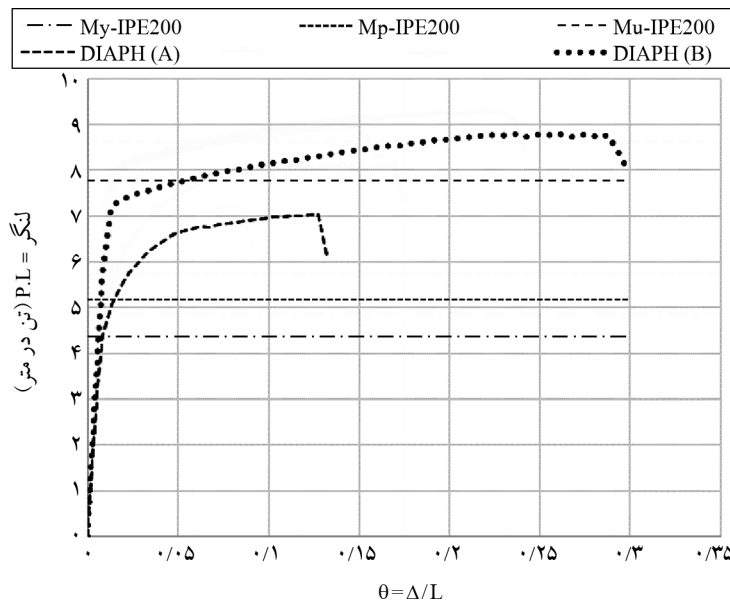
در شکل (۱۴) توزیع کرنش‌های پلاستیک در مدل‌های DIAPH نشان داده شده است. در مدل A که ضخامت ورق‌های اتصال بیشتر است، مفصل پلاستیک در انتهای دیافراگم تشکیل شده و تمرکز خرابی‌ها در این محل رخ داده است. خرابی‌ها در جوش، ورق دیافراگم و ورق بال و جان تیر مشاهده می‌شوند. در مدل B که ضخامت ورق‌های اتصال کمتر است، خرابی‌ها در بر اتصال به ستون متمرکز شده‌اند. در این بخش ورق دیافراگمی



شکل (۱۴): توزیع کرنش پلاستیک در مدل‌های DIAPH، محل‌المان‌های آسیب‌دیده با پیکان مشخص شده است.



شکل (۱۵): تغییر شکل تیرها در نمای جانبی در مدل‌های DIAPH، کاهش ضخامت ورق منجر به تغییر محل مفصل پلاستیک شده است.



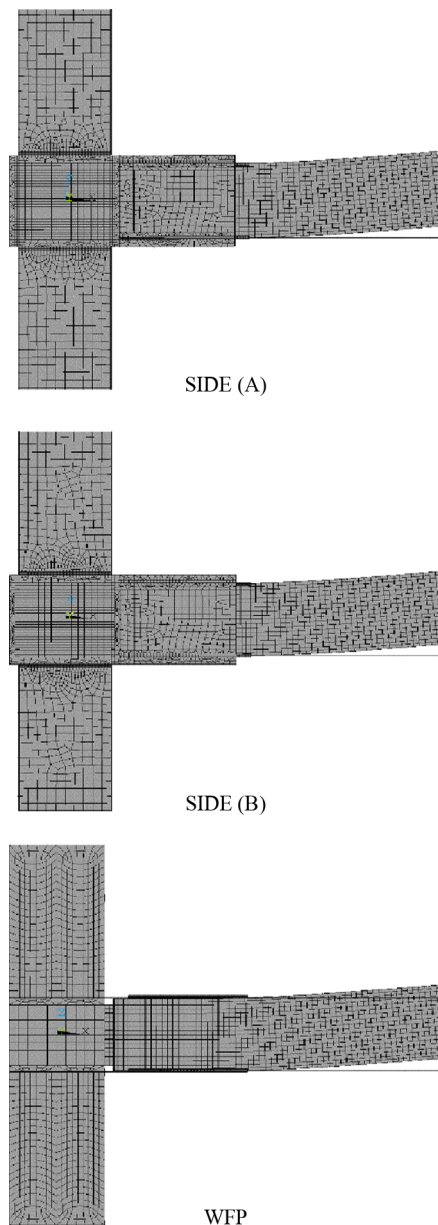
شکل (۱۶): مقایسه نمودار لنگر- دوران مدل‌های DIAPH.

اتصال B حرکت مفصل به سمت ستون، منجر به تمرکز خرابی‌ها در مجاورت ستون می‌شود که مطلوب نیست؛ بنابراین اتصال نوع B عملکرد مناسب‌تری از خود نشان داده است.

در شکل (۱۶) نمودار پاسخ لنگر دوران این دو اتصال ترسیم و مقایسه شده است. هنگامی که ورق‌های دیافراگمی ضخامت بیشتری دارند، شکل پذیری و مقاومت اتصال بیشتر شده است.

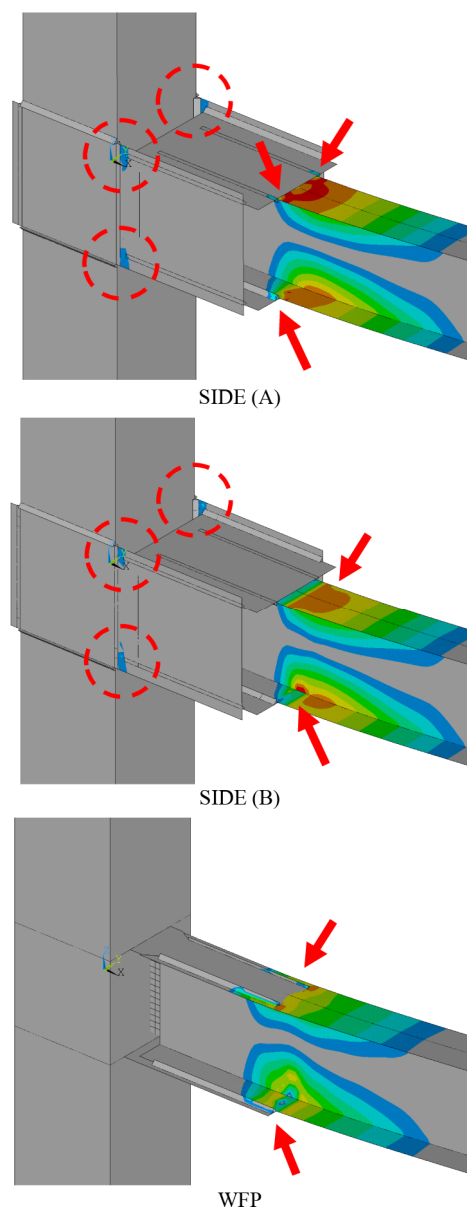
در مدل (A) SIDE خسارت‌ها در بال تیر و جوش محل اتصال بال به ورق‌ها رخ داده است؛ اما در مدل (B) SIDE خسارت‌ها در بال و جان تیر در انتهای ورق‌های اتصال متمرکز شده است. در مدل WFP خرابی‌ها در جوش ورق‌ها، بال و جان تیر در انتهای ورق اتصال متمرکز شده است.

در شکل (۱۸) تغییر شکل جانبی اتصالات SIDE و WFP نمایش داده شده است. محل مفصل در انتهای ورق‌های اتصال دیده می‌شود. وقوع و تمرکز کرنش‌های پلاستیک مؤید همین نتیجه است.



شکل (۱۸): تغییر شکل تیرها در نمای جانبی مدل‌های SIDE و WFP.

در شکل (۱۷) توزیع کرنش‌های پلاستیک در مدل‌های SIDE و WFP نشان داده شده است. در هر سه مدل اول محل مفصل پلاستیک در پایان ورق‌های اتصال روی تیر دیده می‌شود. با این حال در مدل‌های SIDE وقوع برخی کرنش‌های پلاستیک به‌طور موضعی در محل اتصال به ستون نمایان است که نقطه‌ضعفی برای آن محسوب می‌شود. به نظر می‌رسد تغییر در ضخامت ورق‌ها تأثیر چندانی در توزیع کرنش‌های پلاستیک در این نوع اتصال نداشته است.

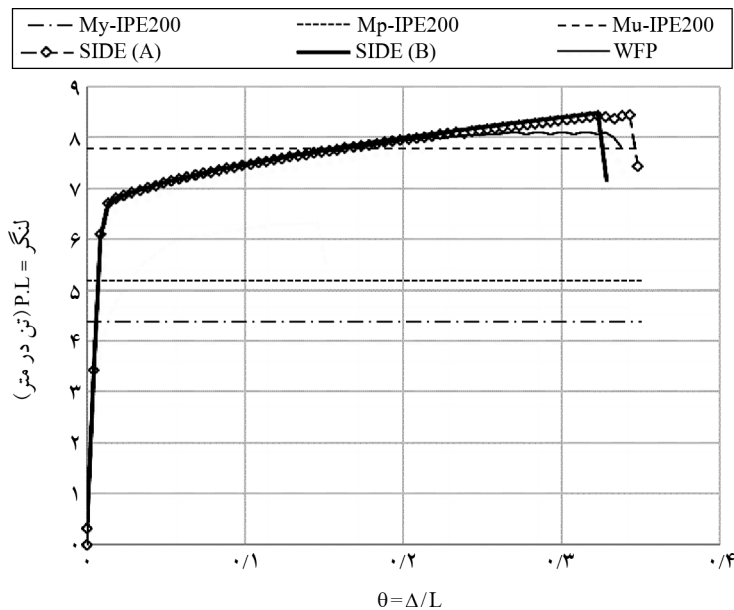


شکل (۱۷): توزیع کرنش پلاستیک در مدل‌های SIDE و WFP. محل المان‌های آسیب‌دیده با پیکان مشخص شده است، دایره‌های خط‌چین محل کرنش‌های پلاستیک در بر ستون را نشان می‌دهند.

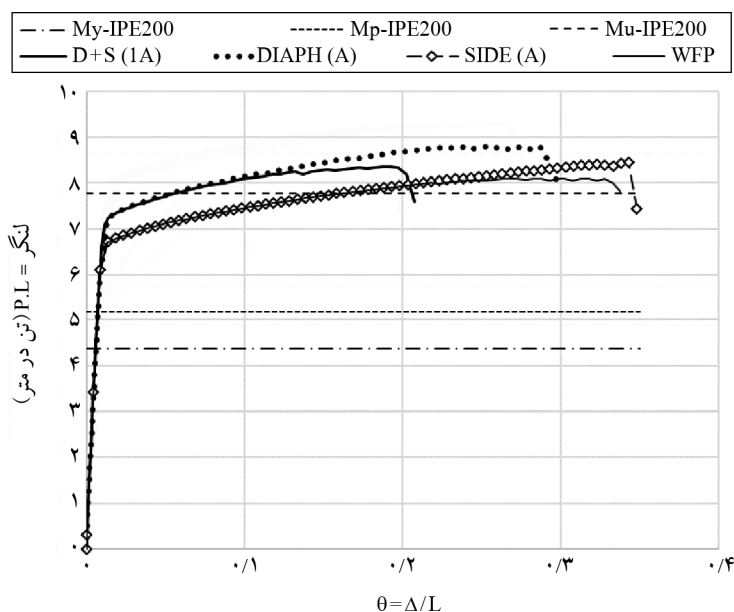
شکل پذیری، مقاومت و نقطه خرابی تقریباً در هر سه یکسان است.

بین نتایج به دست آمده اتصال D+S (1A)، اتصال DIAPH (A)، اتصال SIDE (A) نتایج قابل قبولی در میان هم‌خانواده‌های خود داشته‌اند. برای مقایسه بین انواع اتصالات شبیه‌سازی شده در شکل (۲۰) نمودار لنگر-دوران این اتصالات و اتصال WFP ترسیم شده است.

در شکل (۱۹) نمودار پاسخ لنگر-دوران این سه اتصال ترسیم و مقایسه شده است. در اتصال SIDE هنگامی که ورق‌ها ضخامت بیشتری دارند، شکل پذیری و مقاومت اتصال کمی بیشتر شده است. با این حال شکل نمودارها تا نزدیکی نقطه خرابی تقریباً یکسان است. بدین ترتیب تغییر در ضخامت ورق‌ها اثر چندانی روی عملکرد اتصال نداشته است. نمودار اتصال SIDE شباهت زیادی با نمودار اتصال WFP نشان می‌دهد.



شکل (۱۹): مقایسه نمودار لنگر-دوران مدل‌های SIDE و مدل WFP.



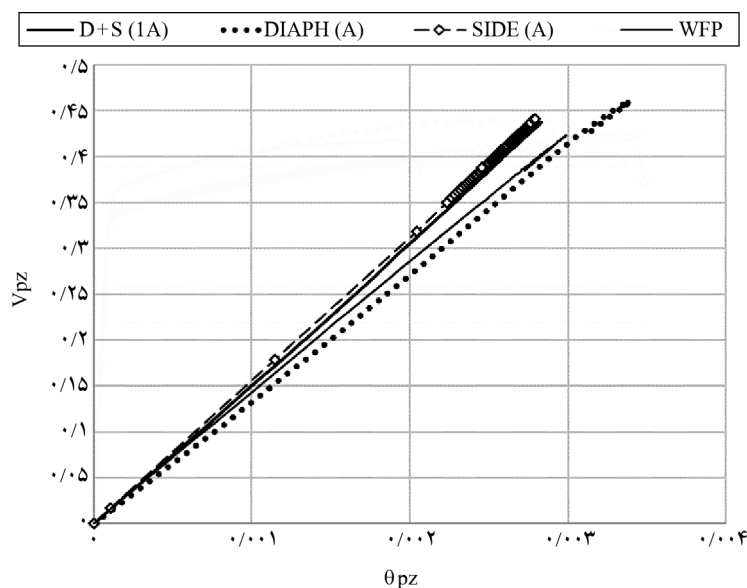
شکل (۲۰): مقایسه نمودار لنگر-دوران مدل‌های D+S (1A)، DIAPH (A)، SIDE (A) و WFP.

در شکل (۲۲) نمودار تغییر مکان نسبی وسط بال ستون برای مدل‌های مختلف ترسیم شده که این تغییر مکان از جابه‌جایی نسبی نقطه A نسبت به نقطه B در جهت محور x (امتداد طولی تیر) استخراج شده و محور افقی نمودار دوران تیر می‌باشد. بیشترین تغییر مکان نسبی بال ستون مربوط به اتصال دیافراگمی است. پس از آنها اتصال WFP بیشترین تغییر مکان بال را نتیجه می‌دهد. کمترین تغییر مکان بال ستون مربوط به اتصال D+S است که نوعی شکم‌دادگی در اثر نیروهای جانبی دیافراگم‌ها است و هیچ‌گونه تأثیر مستقیمی از تیر نگرفته است. به این ترتیب احتمال بروز تنش‌های سه‌بعدی در محل اتصال تیر به ستون در اتصال پیشنهادی کمترین است.

در جدول (۳) وزن ورق‌های به کار رفته در این چهار اتصال بدون در نظر گرفتن وزن تیر و ستون آورده شده و با یکدیگر مقایسه شده است. سبک‌ترین اتصال DIAPH (A) و سنگین‌ترین اتصال (A) SIDE است. اتصال پیشنهادی وزنی برابر ۳۷ کیلوگرم دارد که در جایگاه سوم قرار گرفته است.

چنانچه در شکل (۲۰) ملاحظه می‌شود اتصال SIDE و WFP عملکردی مشابه به لحاظ مقاومت و شکل‌پذیری دارند. اتصال پیشنهادی D+S مقاومت یکسانی داشته اما شکل‌پذیری کمتری از خود نشان داده است. بیشترین مقاومت مربوط به اتصال DIAPH است، شکل‌پذیری این اتصال نزدیک به WFP است.

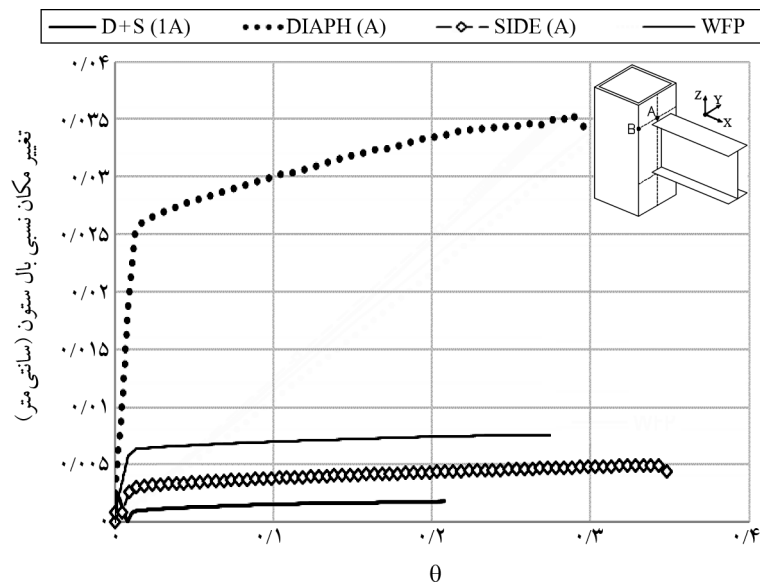
در شکل (۲۱) نمودار نیروی برشی - دوران چشمه اتصال چهار مدل (A) DIAPH، (A) SIDE و WFP مقایسه شده است. برش چشمه اتصال از تقسیم لنگر تیر در محل اتصال به ارتفاع تیر به دست آمده است. دوران چشمه اتصال از تفاضل تغییر مکان بالا و پایین جان ستون در تراز ورق‌های اتصال و تقسیم آن بر ارتفاع تیر محاسبه شده است. اتصال پیشنهادی D+S بعد از اتصال با ورق کناری SIDE کمترین تغییر شکل چشمه اتصال را داشته است. پس از آنها به ترتیب اتصال WFP و DIAPH واقع شده‌اند. به این ترتیب اتصال پیشنهادی توانسته است در کنترل تغییر شکل‌های برشی چشمه اتصال تأثیر مناسبی داشته باشد.



شکل (۲۱): مقایسه نمودار برش - تغییر مکان برشی چشمه اتصال در مدل‌های (A) DIAPH، (A) SIDE و WFP.

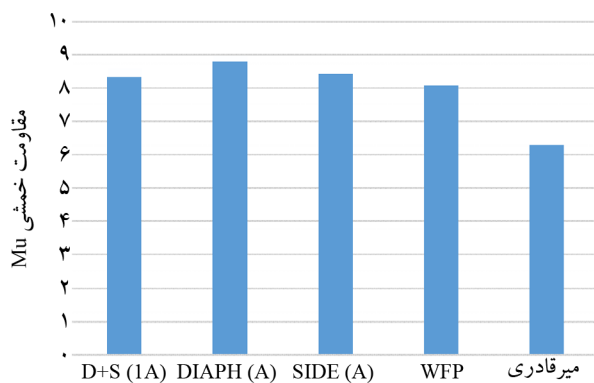
جدول (۳): مقایسه وزن اتصالات.

نام اختصاری	ورق‌های اتصال	ضخامت ورق اتصال (میلی‌متر)	وزن (کیلوگرم)
DIAPH (A)	ورق دیافراگمی + ورق جان	بالا ۳۰ و پایین ۱۵، جان ۱۰	۳۰/۲
WFP	اتصال صلب با ورق بالاسری و زیر سری + ورق جان	بالا ۳۰ و پایین ۱۵، جان ۱۰	۳۵/۷
D+S (1A)	ورق دیافراگمی + کناری	بالا ۳۰، پایین ۱۵، کناری ۱۰	۳۷/۱
SIDE (A)	ورق کناری	بالا ۳۰ و پایین ۱۵، کناری ۱۰	۴۰/۴



شکل (۲۲): مقایسه نمودار تغییر مکان نسبی بال ستون در مدل‌های (D+S (1A), DIAPH (A), SIDE (A), WFP.

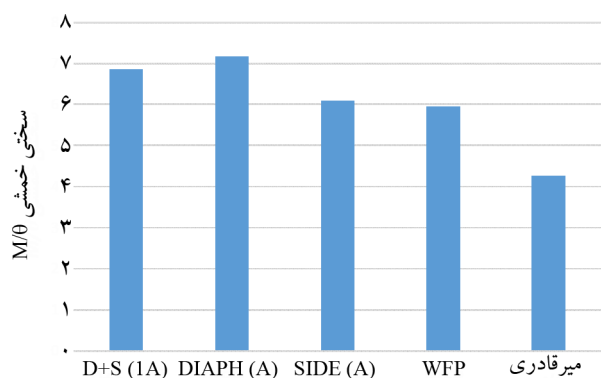
مشابه است. با این حال بیشترین مقاومت متعلق به اتصال DIAPH است. پس از آن دو اتصال پیشنهادی (D+S) و SIDE با رده مقاومتی یکسان قرار گرفته‌اند.



شکل (۲۳): مقایسه مقادیر مقاومت خمشی پنج اتصال (D+S (1A), DIAPH (A), SIDE (A), WFP و میرفادری.

در نمودار ستونی (۳) مقادیر شکل‌پذیری چهار اتصال مورد بررسی ترسیم شده و مقایسه شده‌اند. شکل‌پذیری اتصالات از تقسیم دوران متناظر با مقاومت حداکثر به دوران متناظر با لنگر جاری شدن استخراج شده است. چنانچه دیده می‌شود بیشترین شکل‌پذیری متعلق به اتصالات WFP و SIDE است. اتصال پیشنهادی در میان اتصالات بررسی شده کمترین شکل‌پذیری را داراست.

در شکل‌های (۲۳) تا (۲۵) مقادیر سختی و مقاومت و شکل‌پذیری چهار اتصال فوق با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در شکل (۲۳) مقادیر سختی هر اتصال به صورت ستونی ترسیم شده است. برای محاسبه سختی، شیب اولیه منحنی لنگر-دوران استخراج شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود اتصال پیشنهادی به لحاظ سختی در جایگاه دوم پس از DIAPH قرار گرفته است.



شکل (۲۴): مقایسه مقادیر سختی خمشی پنج اتصال (D+S (1A), DIAPH (A), SIDE (A), WFP و میرفادری).

در شکل (۲۴)، مقادیر مقاومت اتصالات مقایسه شده‌اند. ملاک مقاومت، حداکثر لنگری است که در نمودار نیرو و تغییر مکان دیده شده است. رده مقاومتی اغلب اتصالات در سطحی

کمک ورق‌های کناری آنرا محدود سازد. ویژگی که با اقتباس از اتصال SIDE به دست آورده است. هر دو اتصال SIDE و D+S توانسته‌اند تغییر شکل‌های برشی چشمه اتصال را بهتر کنترل نمایند.

مقایسه تغییر مکان نسبی بال ستون بیانگر تأثیر قابل ملاحظه اتصال پیشنهادی در کاهش آن است (کمترین مقدار در میان چهار اتصال). نتیجه‌ای که با قطع کامل اتصال تیر به ستون چه در ورق‌های اتصال بال و چه در ورق اتصال جان به دست آمده است. ویژگی‌ای که از اتصال با ورق کناری اقتباس شده است.

مقایسه وزنی اتصالات نشان می‌دهد اتصال با ورق کناری سنگین‌تر از اتصال D+S است؛ بنابراین اتصال پیشنهادی توانسته است با ارائه برخی مزیت‌های اتصال با ورق کناری، وزن کمتری نسبت به آن داشته باشد.

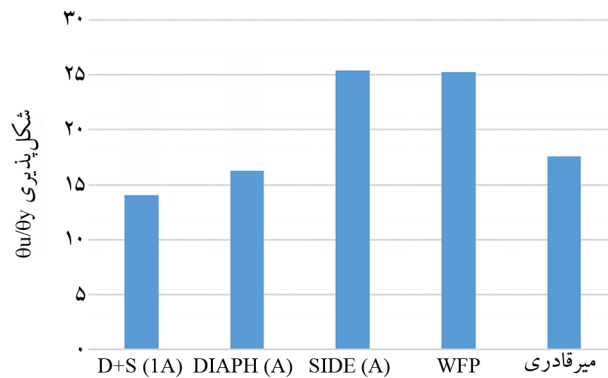
با وجود آنکه اتصال با ورق کناری توانسته است در کنترل تغییر شکل چشمه اتصال و شکل‌پذیری بهتر از D+S عمل کند، اما اتصال D+S بر خلاف آن از بروز کرنش‌های پلاستیک در محل اتصال به ستون جلوگیری کرده است.

در اتصالات پیشنهادی تمرکز کرنش‌های پلاستیک در محدوده اتصال و ورق‌های آن یا تیر رخ داده است و تنش‌ها در ستون‌ها در محدوده الاستیک باقیمانده است. به این ترتیب باربری ستون دچار اختلال نشده است.

به‌عنوان جمع‌بندی می‌توان گفت اتصال پیشنهادی با ترکیب ویژگی‌های اتصالات قبلی می‌تواند به کاهش تغییر شکل برشی چشمه اتصال، کاهش مؤثر تغییر شکل نسبی بال ستون و افزایش مقاومت اتصال و حذف کرنش‌های پلاستیک در مجاورت ستون کمک کند. با این حال همانند اتصال با ورق دیافراگمی شکل‌پذیری اتصال کمتر از نوع رایج آن WFP و اتصال با ورق کناری است.

مراجع

1. Sage (1995) 1994 Northridge, CA, Earthquake, Volume 1, 1995. *Earthquake Spectra*, 11(S2).



نمودار (۲۵): مقایسه مقادیر شکل‌پذیری پنج اتصال DIAPH, D+S (1A), WFP و SIDE (A), (A).

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شد با ترکیب سه نوع اتصال WFP (اتصال صلب جوشی با ورق بالاسری و زیرسری)، اتصال با ورق کناری (SIDE) و اتصال با ورق دیافراگمی از خارج (DIAPH) در ستون‌های مربعی توخالی، اتصال جدیدی پیشنهاد شود که بتواند تجمعی از ویژگی‌های اجرایی و رفتاری آنها باشد. اتصال پیشنهادی D+S نامیده شده است. مجموعه‌ای از این اتصالات با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS مدل‌سازی و به‌طور غیرخطی تحت بار جانبی تحلیل شدند. نتایج زیر حاصل مقایسه انجام شده است:

به کمک اتصال پیشنهادی می‌توان از ورق‌های پیوستگی داخل ستون بی‌نیاز شد. ویژگی‌ای که اتصال متعارف WFP فاقد آن است. به این ترتیب استفاده از آن در ستون‌های توخالی بدون آسیب زدن به پیوستگی ستون امکان‌پذیر و کارآمد است.

شکل‌پذیری اتصال پیشنهادی نسبت به سایر اتصالات حدود ۴۰ درصد کاهش یافته است اما مقاومت آن نسبت به اتصال WFP بیشتر است. این افزایش مقاومت مرهون ویژگی اقتباس شده از اتصال DIAPH است که ورق‌های دیافراگمی را از آن گرفته است. کاهش ضخامت ورق‌های دیافراگمی به کاهش شکل‌پذیری و مقاومت اتصال منجر می‌شود.

اتصال پیشنهادی توانسته است تغییر مکان برشی چشمه اتصال را بیشتر از اتصال WFP و DIAPH کنترل نماید و به

13. Association of German Steel Manufacturers (1995). *Profiles of Steel Building*. Nasser Nassehi (Trans.), Science and Technology Publications, 110, 1374 (in Persian).
14. Ministry of Roads and Urban Development, Deputy for Building and Construction (2013). Topic 10 of the National Building Regulations - Design and Execution of Steel Buildings, 1392 (in Persian).
15. Alostaz, Y.M. and Schneider, S.P. (1996) Analytical behavior of connections to concrete-filled steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, **40**(2), 95-127.
16. Schneider, S.P., Kramer, D.R., and Sarkkinen, D.L. (2004) The design and construction of concrete-filled steel tube column frames. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (13WCEE)*, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 252.
17. Wang, W.D., Han, L.H., and Uy, B. (2008) Experimental behaviour of steel reduced beam section to concrete-filled circular hollow section column connections. *Journal of Constructional Steel Research*, **64**(5), 493-504.
18. Schneider, S.P. and Alostaz, Y.M. (1998) Experimental behavior of connections to concrete-filled steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, **45**(3), 321-352.
19. ANSYS, Inc. Products Release 17.0.
20. Sadowski, A.J., Rotter, J.M., Stafford, P.J., Reinke, T., and Ummenhofer, T. (2017) On the gradient of the yield plateau in structural carbon steels. *Journal of Constructional Steel Research*, **130**, 120-130.
21. Shapur Tahouni (2014). *Design of Steel Structures*, Dehkhoda, 1393 (in Persian). Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding, AWS, An American National Standard, A5.1/A5.1M:2012.
22. Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding, AWS, An American National Standard, A5.1/A5.1M:2012.
23. Deputy Director of Technical and Development of Technical Criteria (2006). Steel Connections Code, Journal No. 264, Third Edition, 1385 (in Persian).
2. FEMA (2000) FEMA-350–Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, Federal Emergency Management Agency.
3. Houghton, D.L. (1998) The sideplate moment connection: a design breakthrough eliminating recognized vulnerabilities in steel moment frame connections. *Proceedings of the 2nd World Conf. on Steel Construction, San Sebastian, Spain*.
4. ICBO (1988, 1991, and 1997) *Uniform Building Code, Indicated Edition*. International Conference of Building Officials, Whittier, California.
5. LACOTAP (Los Angeles County Technical Advisory Panel) (1997) SMRF Bulletin No. 3, Steel Moment Resisting Frame (SMRF) Connection Systems.
6. Han, Q.H., Liu, M.J., Lu, Y., and Zhao, S.S. (2016) Experimental and simulation study on seismic behavior of beam-column joints with cast steel stiffener. *Journal of Structural Engineering*, **142**(7), 04016030.
7. Park, J.W., Kang, S.M., and Yang, S.C. (2005) Experimental studies of wide flange beam to square concrete-filled tube column joints with stiffening plates around the column. *Journal of Structural Engineering*, **131**(12), 1866-1876.
8. Yang, C., Yang, J.F., Su, M.Z., and Liu, C.Z. (2016) Numerical study on seismic behaviours of ConXL biaxial moment connection. *Journal of Constructional Steel Research*, **121**, 185-201.
9. Wang, W., Chen, Y., Li, W., and Leon, R.T. (2011) Bidirectional seismic performance of steel beam to circular tubular column connections with outer diaphragm. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **40**(10), 1063-1081.
10. Alostaz, Y.M., & Schneider, S.P. (1996) Analytical behavior of connections to concrete-filled steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, **40**(2), 95-127.
11. Azizinamini, A. and Schneider, S.P. (2004) Moment connections to circular concrete-filled steel tube columns. *Journal of Structural Engineering*, **130**(2), 213-222.
12. Chiew, S.P., Lie, S.T., and Dai, C.W. (2001) Moment resistance of steel I-beam to CFT column connections. *Journal of Structural Engineering*, **127**(10), 1164-1172.

پیوست ۱- بررسی کمانش کلی ستون

مشخصات هندسی ستون به شرح زیر است:

$$A = 73.4 \text{ cm}^2$$

$$r_x = r_y = 7.69 \text{ cm}$$

$$k = 2$$

$$\frac{kL}{r} = 78.0$$

بر این اساس مقدار تنش مجاز فشاری برابر خواهد شد با

(مطابق با جداول [۲۱]):

$$F_{cr} = 1787 \text{ kg/cm}^2$$

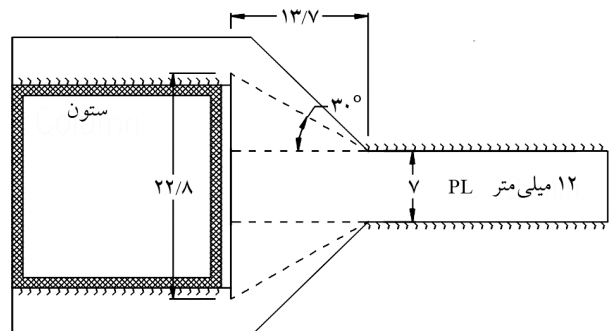
بار محوری وارد شده به ستون در مدل بر اساس تنش فشاری F_y

۰/۴ است که برابر ۹۶۰ کیلوگرم بر سانتی مترمربع است. این مقدار به طور قابل ملاحظه‌ای از بار کمانشی کمتر است. به این ترتیب کمانش کلی در ستون بر طرح و عملکرد اتصال حاکم نیست.

پیوست ۲- کنترل کمانش موضعی ورق‌های دیافراگمی

مسئله کمانش ورق‌های دیافراگمی برای نازک‌ترین ورق

(ضخامت ۱/۲ سانتی متر) کنترل می‌شود. در شکل پیوست ۱ پلان ورق دیافراگمی نشان داده شده است. طول ناحیه فشاری بدون مهار ۱۳/۷ سانتی متر است. عرض حداکثر این ناحیه در باربری فشاری به تشابه از گاست پلیت مهاربندها و تئوری ویتنور با زاویه ۳۰ درجه از محل اعمال بار در نظر گرفته می‌شود که در بر وجه ستون به ۲۲/۸ سانتی متر می‌رسد.



شکل (پ-۱): پلان ورق دیافراگمی.

عرض متوسط ناحیه فشاری برابر است با:

$$(22.8 + 7) / 2 = 14.9 \text{ cm}$$

$$t_{\text{Plate}} = 1.2 \text{ cm}$$

مطابق آئین نامه اتصالات فولادی نشریه شماره ۲۶۴ [۲۳]،

ضریب طول مؤثر در گاست پلیت تحت فشار و با فرض عرض ویتنور برابر ۱/۲ در نظر گرفته می‌شود. همچنین شعاع ژیراسیون مطابق با همین استاندارد برابر ۰/۳ t لحاظ می‌شود؛ بنابراین ضریب لاغری ورق تحت فشار برابر خواهد شد با:

$$\frac{KL}{r} = 45.7$$

بر این اساس تنش بحرانی فشاری F_{cr} برابر ۲۱۶۶ کیلوگرم

بر سانتی مترمربع به دست می‌آید (مطابق با جداول [۲۱])؛ بنابراین ظرفیت محوری ورق تحت فشار با عرض متوسط برابر خواهد شد با:

$$P_{cr} = 14.9 \times 1.2 \times 2166 = 38.7 \text{ ton}$$

در طرف دیگر نیروی وارد از طرف اتصال به ورق

دیافراگمی از حاصل ضرب مساحت آن در تنش جاری شدن محاسبه می‌شود:

$$P_{\text{connection}} = 7 \times 1.2 \times 2400 = 20.2 \text{ ton} \ll 38.7$$

در هر دو محاسبه از اثر ضرایب کاهنده مقاومت صرف نظر

شده است. مقایسه فوق نشان می‌دهد که کمانش ورق دیافراگمی نقطه بحرانی در مقاومت اتصال نیست. همین نتایج به سایر ورق‌های با ضخامت متفاوت قابل تعمیم است.

Analytical Assessment of Rigid Connection with External Diaphragm Plate and Side Plate in Hollow Box Columns through Seismic Loading

Mohammad Ghasem Vetr^{1*} and Soheil Fallah²

1. Assistant Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: vetr.iiees.ac.ir
2. Ph.D. Student, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran.

The huge number of failures and collapsed structures in the 1994 Northridge earthquake is always referred to as a turning point in the design of moment-resisting connections because it influenced the design of this type of beam-to-column connections. The occurrence of brittle failures in the welding of the joints, which led to the rupture of the connection plate, beam or column flanges, was one of the major damages that occurred in this type of connection in the mentioned enormous ground motion. After the Northridge earthquake, the attitude of researchers about designing moment-resisting connections completely changed. Many researchers tried to propose novel methods and ideas to improve the performance of rigid beam-to-column connections. Some of these methods are focused on different areas of the connections such as preventing the creation of three-dimensional stresses at the location of beam-to-column connection, reducing the shear deformation of the panel zone of connections, and removing the double or continuing plates of them. Furthermore, the proper seismic performance of each method was assessed based on numerous experimental and analytical studies. One of the most applicable rigid connections that we can refer to in this case is the connection with Welded Flange Plates (WFP). This connection is designed in such a way that the plastic hinge occurs at the end of the connecting plates. This type of connection is often used with hollow box columns. In this connection, due to the creation of concentrated forces in the column, which are created in the alignment of the connection plates, the flange or the web of the column may be damaged. For this reason, connection plates are used inside the column (continuing plates), which are generally installed by going through multiple steps and making additional cuts in the column. On the other hand, the occurrence of significant shear forces in the panel zone of connection may cause damage to it and require the implementation of double plates. The implementation of these types of steel plates can also cause difficulties in implementing the whole connection. For this reason, finding a solution that makes the implementation of rigid connections with welded flange plates unnecessary from continuing plates or double plates can be an important solution to facilitate the implementation of such connections. Rigid connections such as connection with the side plate and connection with the diaphragm plate (external stiffener) are options that have provided modifications to remove the connection continuing and double plates. The side plates prevent three-dimensional stresses and assist in strengthening the panel zone of connection. On the other hand, by removing the connection plates and preventing the discontinuity of the column, the diaphragm plate makes the panel zone stiffer and improves its seismic performance. In this article, a novel idea for rigid connection is proposed, which is a combination of connection with side plate, connection with diaphragm plate and rigid connection with welded flange plates, prequalified in steel structures standard of Iran. The new method has been tried to use the advantages of three rigid connection methods (WFP, connection with side and diaphragm plate) in hollow square (box) columns. In other words, the main purpose of this study is to integrate the advantages of the three mentioned methods and help to improve the seismic performance of the rigid connection. To assess the seismic performance of this connection, its 3D model has been created in finite element software and then analyzed with a nonlinear method. To perform the analysis, the models are analyzed under dynamic loading and their results, including the distribution of plastic strains, the location of failures, and the moment-rotation and shear force-deformation diagrams of the connection panel zone are calculated and evaluated. To show the damage in the components of this steel connection, the Birth and Death method is used in the analysis.

The results show that the proposed connection has significant advantages. In addition to removing the internal connection plates, this connection has significantly strengthened the panel zone of the connection, and by removing the direct connection of the beam to the column, it has reduced the deformation of the column flange and, as a result, eliminated the three-dimensional stresses at this location.

Keywords: I Beam Hollow Section rigid Connection, Diaphragm Plate Connection, Welded Flange Plate, Birth & Death Method, Panel Zone, Column Flange Deformation, Hollow Section Column