

چکیده

در اتصالات RBS به دلیل تغییر شکل‌های پلاستیک قابل توجه پس از وقوع زلزله‌های متوسط و قوی خسارت در مقطع کاهش یافته متمرکز می‌گردد، درحالی‌که تعویض آن پس از زلزله دشوار است. هدف این مقاله بررسی عددی اتصال تیر با عمق کاهش یافته به‌عنوان یک فیوز قابل تعویض است. در این راستا مدل‌های عددی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس برای هر سه نوع اتصال صلب معمول با مقطع کاهش یافته در بال (RBS)، فیوز قابل تعویض با مقطع کاهش یافته در بال (RBS-F) و فیوز قابل تعویض با مقطع کاهش یافته در جان (RWS-F)، مطابق تست‌های آزمایشگاهی قبلی، مدل‌سازی و بررسی شدند. نتایج بیش از ۲۸ تحلیل عددی نشان داد که در نمونه‌های RBS و RBS-F با افزایش سایز تیر، شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. درحالی‌که برای نمونه RWS-F نه تنها با تغییر سایز تیر شکل‌پذیری ثابت می‌ماند بلکه شکل‌پذیری آن به‌طور محسوسی نسبت به دو نمونه دیگر بیشتر است، گرچه مقاومت نهایی آن نسبت به دو نمونه دیگر کمتر است. با افزایش ضخامت جان و اساس مقطع پلاستیک آن، می‌توان به مقاومت نهایی برابر با نمونه‌های دیگر دست یافت؛ بنابراین نمونه RWS-F اصلاح شده می‌تواند جایگزینی مناسب برای اتصالات RBS باشد.

واژگان کلیدی: قاب مقاوم خمشی فولادی، اتصال صلب، فیوز قابل تعویض، تیر با مقطع کاهش یافته جان، تیر با مقطع کاهش یافته بال.

بررسی عددی رفتار اتصال صلب فلنجی با عمق کاهش یافته و فیوز قابل تعویض

الله‌رضا مرادی گروسی

استادیار، گروه عمران، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

مهرداد تحمیلی رودسری (نویسنده مسئول)

دانشیار، گروه عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه،

ایران، Tahamouli@iauuksh.ac.ir

به‌رخ حسینی هاشمی

دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و

مهندسی زلزله، تهران، ایران

۱- مقدمه

مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و قابلیت جذب انرژی و شکل‌پذیری مناسبی را تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای فراهم می‌کنند. ولی به‌هر حال اشکالاتی هم به این طرح وارد است زیرا تغییر شکل‌های غیرالاستیک شدید در ناحیه کاهش یافته، تعویض تیر را پس از زلزله متوسط یا قوی اجتناب‌ناپذیر می‌کند؛ که البته به علت اتصال تیرهای فرعی سقف به تیرهای اصلی، تعویض این تیرها اگر غیرممکن نباشد، بسیار دشوار است.

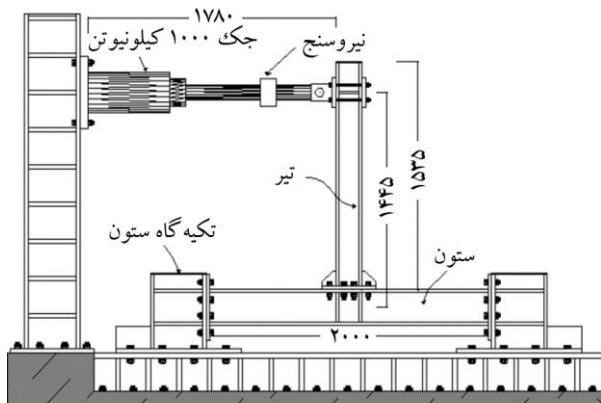
در مورد اتصالات RBS و مقایسه عملکرد آنها با تیرهای معمول تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است [۵-۷]. نتایج نشان داد که اتصالات RBS گامی مؤثر در جهت حفظ اتصال و جلوگیری از شکست ترد در آنها می‌باشند. محققین با اضافه کردن ورق‌های سخت‌کننده در جان در محل مقطع کاهش یافته، سعی در ارتقاء عملکرد اتصال داشتند [۸-۱۰]. این

شکست ترد در اتصالات می‌تواند سازه را از رسیدن به عملکرد نهایی خود باز دارد، بنابراین یکی از مخرب‌ترین انواع شکست محسوب می‌شود. شکست گسترده در اتصالات صلب فولادی در زلزله‌های نورث‌ریچ و کوبه، عملکرد اتصالات صلب رایج در آن زمان را با سؤال بزرگی مواجه نمود. تحقیقات گسترده در اتصالات صلب با جوش نفوذی کامل، نشان داد که احتمال شکست ترد و زودرس در جوش‌ها، در دریفت کم وجود دارد [۱-۳]. یکی از راهکارهای پیشنهادی برای بهبود عملکرد این نوع اتصالات پس از زلزله نورث‌ریچ، استفاده از اتصالات با مقطع کاهش یافته (RBS)^۱ بود. در این نوع اتصال، کاهش مقطع بال تیر باعث انتقال مفصل پلاستیک به داخل تیر می‌شود و مانند یک فیوز، مانع از به وجود آمدن خرابی در چشمه اتصال می‌گردد. اتصالات RBS که یکی از اتصالات صلب از پیش تأیید شده^۲ می‌باشند [۴] به‌طور گسترده‌ای

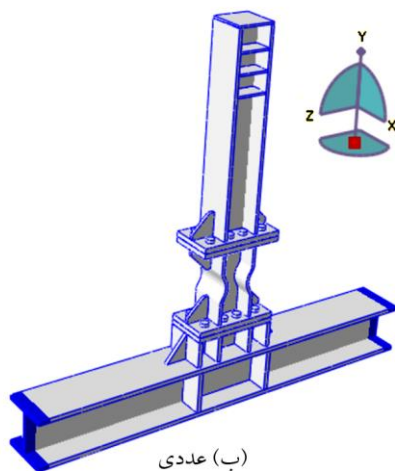
اساس ۲۸ تحلیل عددی و ترسیم نمودار هیستریزیس^۴، backbone، دوخطی معادل و محاسبه شکل‌پذیری^۵، اتلاف انرژی^۶ و سختی معادل در نمونه‌ها، نوع اصلاح شده‌ای از فیوز با اتصال RWS ارائه شد (RWS-FR). نتایج نهایی نشان می‌دهند که نمونه RWS-FR نسبت به نمونه‌های RBS و RBS-F، نه تنها شکل‌پذیری بالاتری دارد، بلکه مقاومت نهایی و سختی آن نیز مناسب است؛ بنابراین با داشتن قابلیت تعویض، برای استفاده در نواحی لرزه‌خیز با خطر نسبی بالا پیشنهاد می‌گردد.

۲- برنامه‌ریزی مدل‌های عددی

در مدل‌سازی نمونه‌های آنالیز المان محدود سعی شد چیدمان مدل‌ها و خصوصیات مصالح مطابق تحقیق گروسی و همکاران [۱۸] در نظر گرفته شود. چیدمان شماتیک آزمایشگاهی و عددی در شکل (۱) نشان داده شده است.



الف) آزمایشگاهی



شکل (۱): چیدمان شماتیک مدل‌ها.

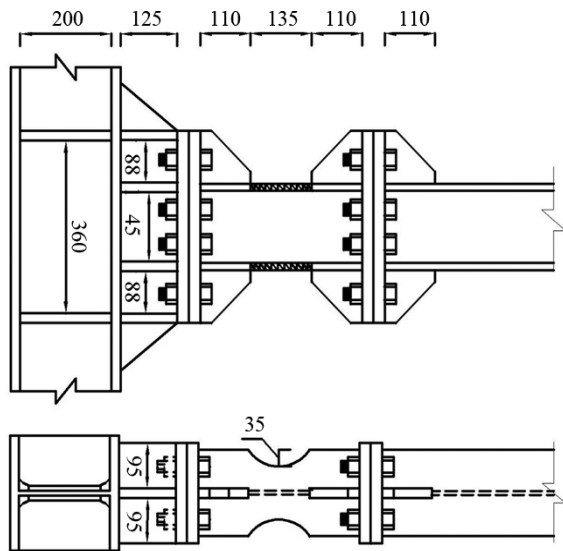
سخت‌کننده‌ها با ایجاد تأخیر در کماتش‌های موضعی در محل کاهش مقطع، باعث افزایش شکل‌پذیری شدند.

محققان بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی را بر روی اتصالات RBS پیچی و جوشی، در مورد اصلاح هندسه برش در بال، جان و مشخصات و نوع ورق انتهایی ادامه دادند [۱۱-۱۶]. مطالعات آنها نشان داد که انتخاب مناسب ابعاد ورق انتهایی، هندسه و ابعاد مقطع کاهش یافته می‌تواند علاوه بر انتقال محل مفصل پلاستیک به خارج از اتصال، شکل‌پذیری و عملکرد لرزه‌ای قاب خمشی را ارتقاء دهد.

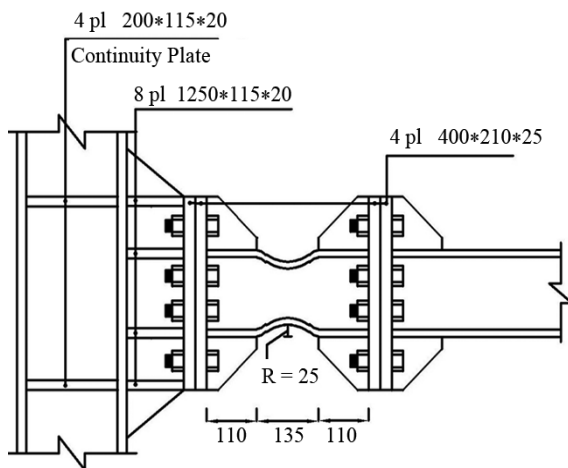
ویلیکینسون و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۰۶ یک نوع اتصال RBS با کاهش ارتفاع در جان را بررسی نمودند. نمونه پیشنهادی آنها دارای کاهش ارتفاع در جان، همانند یک گوه از یک طرف تیر بود و عملکرد نسبتاً مناسبی داشت. هرچند که در نمودار هیستریزیس، پینچینگ کاملاً مشهود بود که از نقاط ضعف اتصال محسوب می‌شود. محققان با کاهش در سطح مقطع بال و جان توانستند محل تشکیل مفصل پلاستیک را به ناحیه‌ای خارج از چشمه اتصال انتقال دهند و علاوه بر شکل‌پذیری مناسب، خسارات وارده به چشمه اتصال را به حداقل برسانند. ولی به علت تمرکز تنش در ناحیه کاهش یافته، پس از زلزله‌های متوسط یا قوی، باید تیر را مورد تعمیر یا تعویض قرار داد که این عمل اگر غیرممکن نباشد، بسیار مشکل و هزینه‌بردار است.

گروسی و همکاران [۱۸] در سال ۱۳۹۷ بررسی آزمایشگاهی استفاده از مقطع کاهش یافته در بال و جان را به صورت یک فیوز قابل تعویض^۳ انجام دادند. در آن تحقیق شکل‌پذیری مناسب تیر با مقطع کاهش یافته جان، به عنوان یک فیوز قابل تعویض بر اساس یک نمونه آزمایشگاهی نشان داده شد. هرچند که مقاومت مقطع RWS نسبت به مقطع RBS با اساس مقطع یکسان کمتر بود. بنابراین با توجه به ضرورت استفاده از مقاطع تیر با سایزهای مختلف در یک سازه بلند، نیاز به بررسی عملکرد فیوز RWS در مقاطع مختلف وجود دارد.

بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی تحقیقات قبلی، ابتدا مدل عددی هر سه نمونه با دقت بالایی صحت‌سنجی شد. سپس بر



(الف)



(ب)

شکل (۳): (الف) نمونه RBS-F و (ب) نمونه RWS-F.

نمونه‌ها تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای طبق پروتکل بارگذاری FEMA [۱۹] قرار گرفتند. تعداد سیکل‌های بارگذاری و دررفت‌های متناظر در جدول (۲) ارائه شده‌اند. مقادیر دررفت، در ارتفاع متناظر تیر ضرب شدند و به صورت جابه‌جایی در بالای آن اعمال شدند. بارگذاری آن قدر ادامه پیدا کرد تا در تیر شکست ایجاد شود و نمودار هیستریزس با کاهش مواجه گردد.

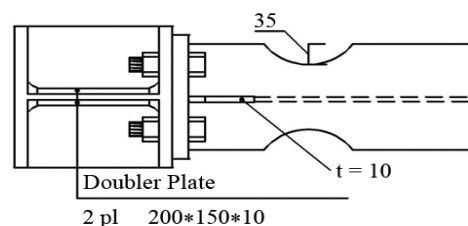
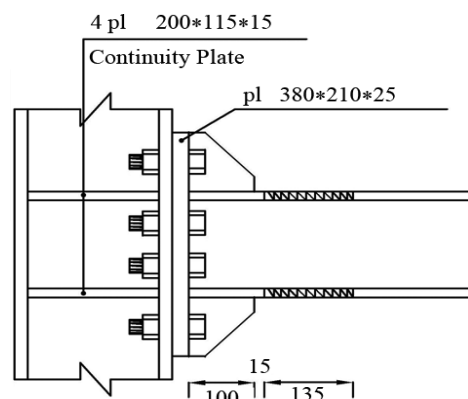
ابعاد مقطع تیر و ستون نیز در جدول (۱) ارائه شده‌اند.

نمونه اول یعنی تیر با مقطع کاهش یافته با ورق انتهایی و سخت‌کننده در شکل (۲) نشان داده شده است. ابعاد و هندسه برش مطابق ضوابط آیین‌نامه AISC انتخاب شده بودند [۴]. در نمونه‌های ۲ و ۳ از یک رابط کوتاه به عنوان فیوز قابل تعویض استفاده شد و اتصال این قطعات به تیر و ستون، از طریق ورق‌های انتهایی و پیچ انجام شد (شکل ۳).

در نمونه ۲ از مقطع با بال کاهش یافته معمول، مانند نمونه اول استفاده شد. کاهش عرض بال امکان ایجاد کمانش جانبی پیشگی را افزایش می‌دهد؛ بنابراین برای بهبود وضعیت، در نمونه سوم با تغییر در هندسه مقطع کاهش یافته، بدون تغییر در ابعاد بال تیر، ارتفاع تیر در ناحیه فیوز کاهش داده شد به نحوی که اساس مقطع پلاستیک آنها تقریباً برابر گردد. در هر دو نمونه ۲ و ۳ از یک نشیمن بر روی ستون به دو منظور تقویت چشمه اتصال^۷ و تعویض راحت فیوز پس از خسارات احتمالی زلزله استفاده شد.

جدول (۱): جزئیات ابعاد مقاطع ستون و تیر به میلی‌متر.

عضو	عرض بال	ضخامت بال	ارتفاع خالص جان	ضخامت جان
تیر	۱۸۰	۱۵	۱۵۰	۸
ستون	۲۴۰	۲۰	۲۰۰	۱۰



شکل (۲): نمونه RBS.

جدول (۲): پروتکل بارگذاری

دریفت (رادیان)	تعداد سیکل‌ها
۰/۰۰۳۷۵	۶
۰/۰۰۵	۶
۰/۰۰۷۵	۶
۰/۰۱	۴
۰/۰۱۵	۲
۰/۰۲	۲
۰/۰۳	۲
۰/۰۴	۲

در ادامه بارگذاری در هر دو سیکل از یک گام بارگذاری، ۰/۰۱ رادیان اضافه می‌شود.

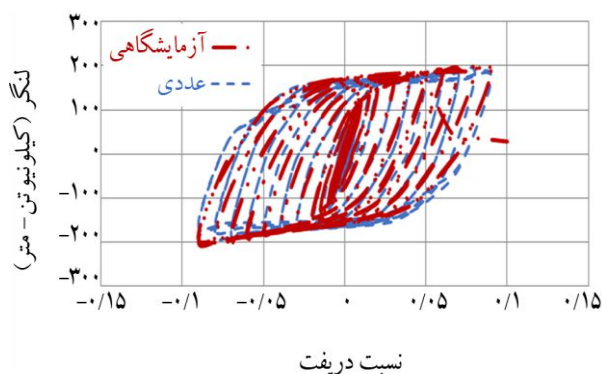
۳- صحت‌سنجی مدل‌های عددی با نتایج تست‌های اولیه

تحلیل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس با در نظر گرفتن غیرخطی هندسی و مصالح تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای انجام شد؛ و نمودار هیستریزیس لنگر-دریفت برای آنها به دست آمد. برای مدل‌سازی از المان Solid 888 گرهی با انتگرال کاهش یافته C3D8R استفاده شد. همچنین از خصوصیات مصالح ارائه شده از جدول (۲) تحقیق گروسی و همکاران [۱۸] برای مصالح ستون، تیر، ورق انتهایی، سخت‌کننده‌ها، ورق مضاعف، ورق پیوستگی، ورق نشیمن و پیچ استفاده شد. به منظور در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح معیار پلاستیک ون میسز و برای سخت‌شوندگی مصالح، از مدل combine استفاده شد، زیرا تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی در بارگذاری و بار برداری و مدل‌سازی رفتار چرخه‌ای دارد [۲۰].

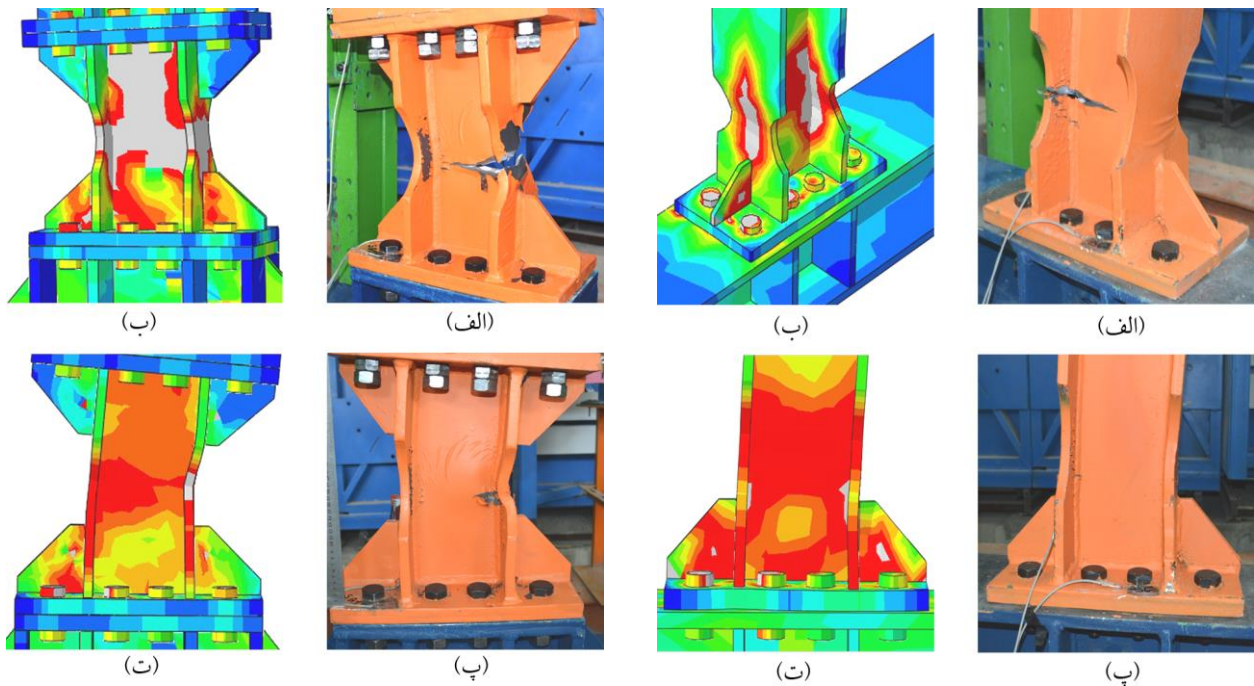
شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری مدل‌های عددی دقیقاً مطابق با نمونه‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شدند.

در مدل عددی ابتدا پیچ‌ها تا مقدار لازم پیش‌تنیده شدند، سپس بارگذاری جانبی چرخه‌ای به تیر اعمال شد. در نمونه آزمایشگاهی، دو طرف ستون توسط پلیت و پیچ به تکیه‌گاه نسبتاً صلبی متصل شده بود. از آنجا که به پلیت‌ها و پیچ‌ها آسیبی وارد نشد و هیچ جابه‌جایی در آنها مشاهده نگردید، در مدل عددی از مدل‌سازی آنها صرف‌نظر شد؛ بنابراین دو انتهای ستون به صورت

گیردار مدل گردید. تیر با طول واقعی نمونه آزمایشگاهی مدل شد و بارگذاری چرخه‌ای نیز در محل آکس جک، به تیر اعمال شد. سازه‌ی مهار جانبی در مدل عددی وارد نشد ولی در محل مهارهای جانبی، از حرکت جانبی تیر جلوگیری شد. چون در حین آزمایش تمامی نمونه‌ها تا دریفت ۹ درصد پارگی، شکست و ترک قابل توجهی در جوش مشاهده نگردید باعث اطمینان شد که نمونه‌ها تا دریفت ۸ درصد مشکلی از بابت جوش نداشته‌اند. لذا تمام نمونه‌ها با صرف‌نظر نمودن از مدل‌سازی جوش تا دریفت ۸ درصد بارگذاری شدند و قطعات با هم یکپارچه شدند. مقایسه نتایج مطالعات آزمایشگاهی با تحلیل‌های عددی و توزیع تنش در مقطع تیر در انتهای بارگذاری، به ترتیب در شکل‌های (۴) تا (۹) برای همه نمونه‌ها ارائه شده است. این نتایج در مدل‌های عددی، تطابق بسیار خوبی با نمونه‌های آزمایشگاهی دارند. همان‌طور که در مقایسه‌ی شکل‌های (۷)، (۵) و (۹) مشاهده می‌شود کماتش ایجاد شده در بال تیرها قبل از شکست مقطع در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی تطابق مناسبی دارند. منحنی‌های هیستریزیس و همچنین توزیع حداکثر تنش در محل‌هایی که در نمونه‌های آزمایشگاهی دچار خرابی شده‌اند، تطابق خوبی دارند. مقایسه پارامترهای لرزه‌ای در جدول (۳) نیز نشان می‌دهد که پارامترهای آزمایشگاهی و عددی در تناسب خوبی قرار دارند و حداکثر خطا حدود ۱۰ درصد است. این مقایسه‌ها نشان می‌دهند که می‌توان به نتایج مدل‌های عددی برای بررسی و تحلیل سایر مقاطع نیز اطمینان نمود.

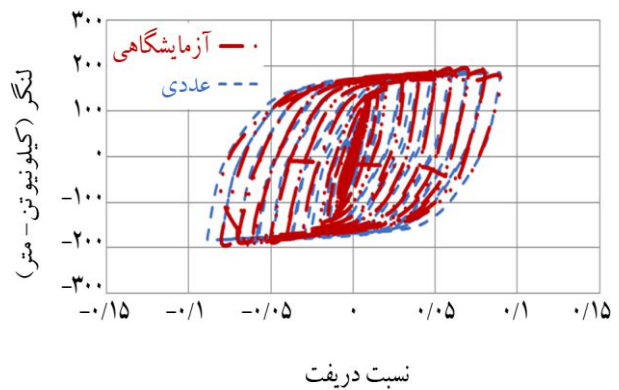
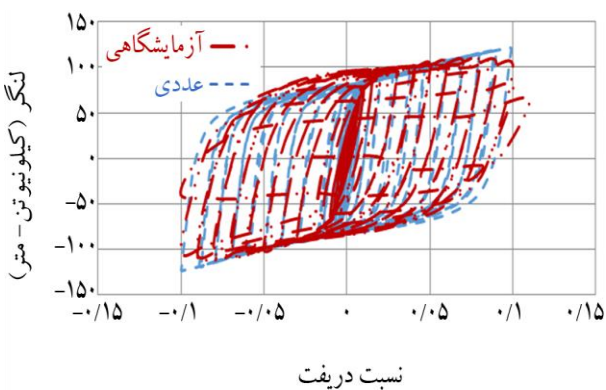


شکل (۴): صحت‌سنجی نمودار لنگر-دریفت آزمایشگاهی و عددی برای نمونه RBS.



شکل (۵): مقایسه توزیع تنش در مدل عددی با خرابی مدل آزمایشگاهی در نمونه RBS.

شکل (۷): مقایسه توزیع تنش در مدل عددی با خرابی مدل آزمایشگاهی در نمونه RBS-F.



شکل (۶): صحت سنجی نمودار لنگر-دریفت آزمایشگاهی و عددی نمونه RBS-F.

شکل (۸): صحت سنجی نمودار لنگر-دریفت آزمایشگاهی و عددی نمونه RWS-F.

جدول (۳): مقایسه پارامترهای لرزه‌ای مدل‌های عددی و آزمایشگاهی نمونه IPB18.

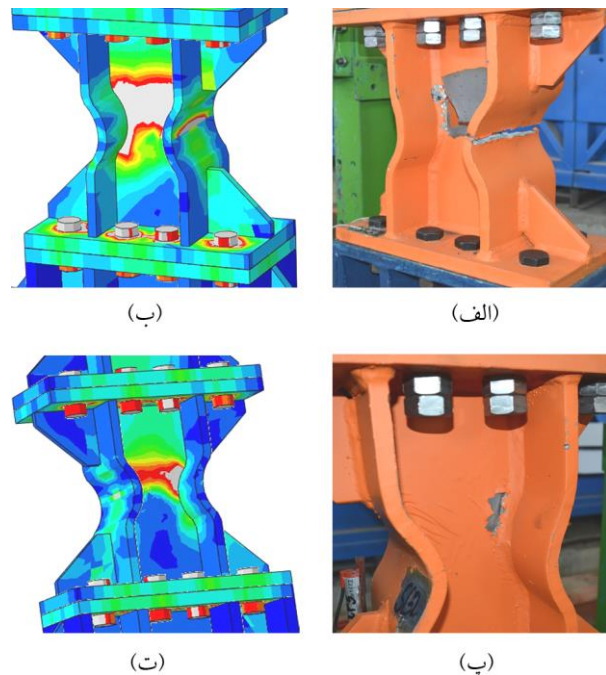
μ	K_e (کیلو نیوتن - متر)	M_{lx} (کیلو نیوتن - متر)	M_{ly} (کیلو نیوتن - متر)	θ_{lx} (درصد)	θ_{ly} (درصد)	نمونه	
۷/۲۷	۱۲/۶۳	۱۹۰/۵۴	۱۳۸/۹۰	۸	۱/۱	آزمایشگاهی	RBS
۸/۰۸	۱۳/۸۶	۱۸۷/۸۷	۱۳۷/۲۶	۸	۰/۹۹	عددی	
۷/۱۲	۱۵/۲	۱۸۵/۱۶	۱۴۸/۷۳	۷	۰/۹۸	آزمایشگاهی	RBS-F
۷/۲۴	۱۵/۵۶	۱۸۸/۰۵	۱۵۰/۳۹	۷	۰/۹۶	عددی	
۷/۸۷	۸/۹۱	۱۰۴/۰۲	۹۰/۶۳	۸	۱/۰۲	آزمایشگاهی	RWS-F
۸/۲۴	۹/۵۳	۱۰۹/۳۲	۹۲/۵۲	۸	۰/۹۷	عددی	

جدول (۴) ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که هفت سایز مختلف برای تیر از IPB140 الی IPB340 در نظر گرفته شد. برای هر سایز تیر، ستون و مشخصات ورق انتهایی متناسب با آن طراحی و انتخاب شد [۴]. برای هر سری، سه نمونه RBS، RBS-F و RBS-F با RWS ساخته شد و مجموعاً ۲۱ تحلیل عددی انجام شد. ابعاد نمونه RWS طوری انتخاب شد که اساس مقطع پلاستیک آن با نمونه RBS برابر باشد. تحلیل‌ها، مشابه شرایط آزمایشگاه و تا دریافت ۸ درصد ادامه یافتند و برای هر نمونه، نمودار هیستریزس لنگر- دوران ترسیم شد. از آنجا که در سازه‌های بلند، از تیر و ستون با ابعاد متغیر استفاده می‌شود و تست آزمایشگاهی فقط برای یک سایز تیر و ستون انجام شد، انجام این تحلیل‌های عددی گسترده می‌تواند مقایسه بهتری را بین عملکرد مقطع با عمق کاهش یافته و مقطع کاهش یافته بال ارائه نماید.

جدول (۴): مشخصات مدل‌های عددی.

سری مدل‌ها	اسم مدل‌ها	مقطع ستون	مقطع تیر	ضخامت ورق انتهایی
۱	RBS14, RBS-F14, RWS-F14	IPB200	IPB140	۱۸
۲	RBS16, RBS-F16, RWS-F16	IPB220	IPB160	۲۰
۳	RBS18, RBS-F18, RWS-F18	IPB240	IPB180	۲۵
۴	RBS22, RBS-F22, RWS-F22	IPB300	IPB220	۲۵
۵	RBS26, RBS-F26, RWS-F26	IPB400	IPB260	۲۵
۶	RBS30, RBS-F30, RWS-F30	IPB500	IPB300	۳۰
۷	RBS34, RBS-F34, RWS-F34	IPB550	IPB340	۳۰

شکل (۱۰) نمودار هیستریزس مدل‌های عددی سری ۱، ۴ و ۷ را به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد. جهت بررسی رفتار لرزه‌ای همه نمونه‌ها، نمودار backbone آنها ترسیم شد. در نتیجه مقادیر سختی، شکل‌پذیری، مقاومت نهایی و میزان اتلاف انرژی برای نمونه‌ها به‌دست آمد که می‌توان بر آن اساس، نمونه دارای بهترین عملکرد را انتخاب نمود.



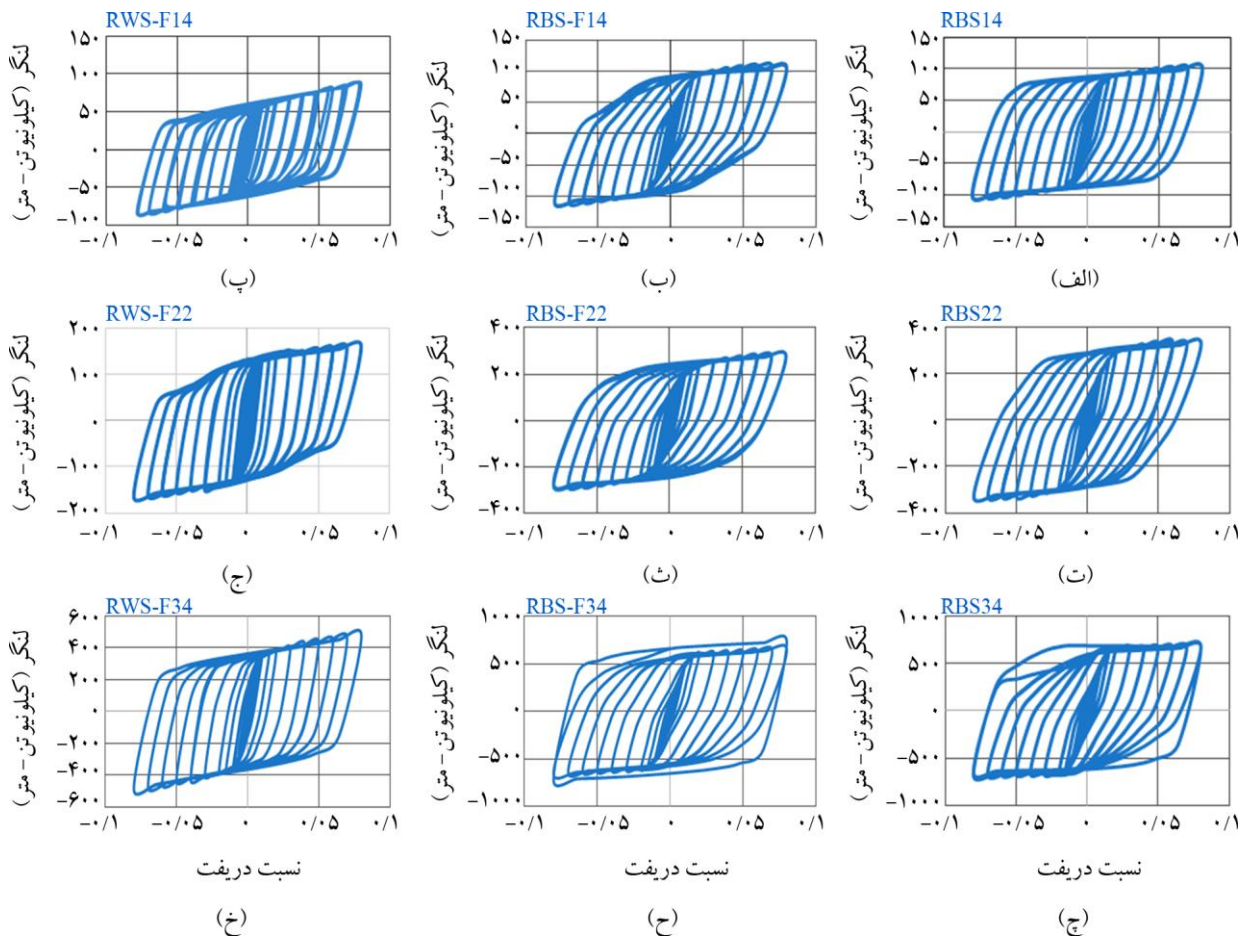
شکل (۹): مقایسه توزیع تنش در مدل عددی با خرابی مدل آزمایشگاهی در نمونه RWS-F.

لازم به ذکر است که در نمونه‌های RWS آزمایشگاهی ساخت هلال بال با روش سرد انجام شد و تنش پسماند در آن از نمونه‌های دیگر بیشتر است. تنش پسماند در لنگر نهایی تیر بی‌تأثیر است و اثر آن بیشتر در شروع لحظه تسلیم است. در شکل‌های (۴)، (۶) و (۸) مشاهده می‌شود که در هر سیکل بارگذاری در بخش خطی، شروع تسلیم در مدل عددی و آزمایشگاهی متفاوت است. این اختلاف در نمونه RWS-F به علت تنش پسماند بالاتر، نسبت به دو نمونه دیگر بیشتر است (شکل ۸).

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد کاهش مقاومت شدید در نمونه RWS-F را در مقایسه با سایر نمونه‌ها، می‌توان از نقاط ضعف آن دانست که در بخش‌های بعدی به‌طور مفصل به بررسی و رفع این نقص پرداخته خواهد شد.

۴- مطالعات عددی

در این بخش برای ارزیابی بهتر رفتار نمونه‌ها از تحلیل المان محدود غیرخطی استفاده می‌شود. مشخصات مدل‌های عددی در



شکل (۱۰): نمودار لنگر-دریفت تحلیل عددی سه مدل ۴، ۱ و ۷.

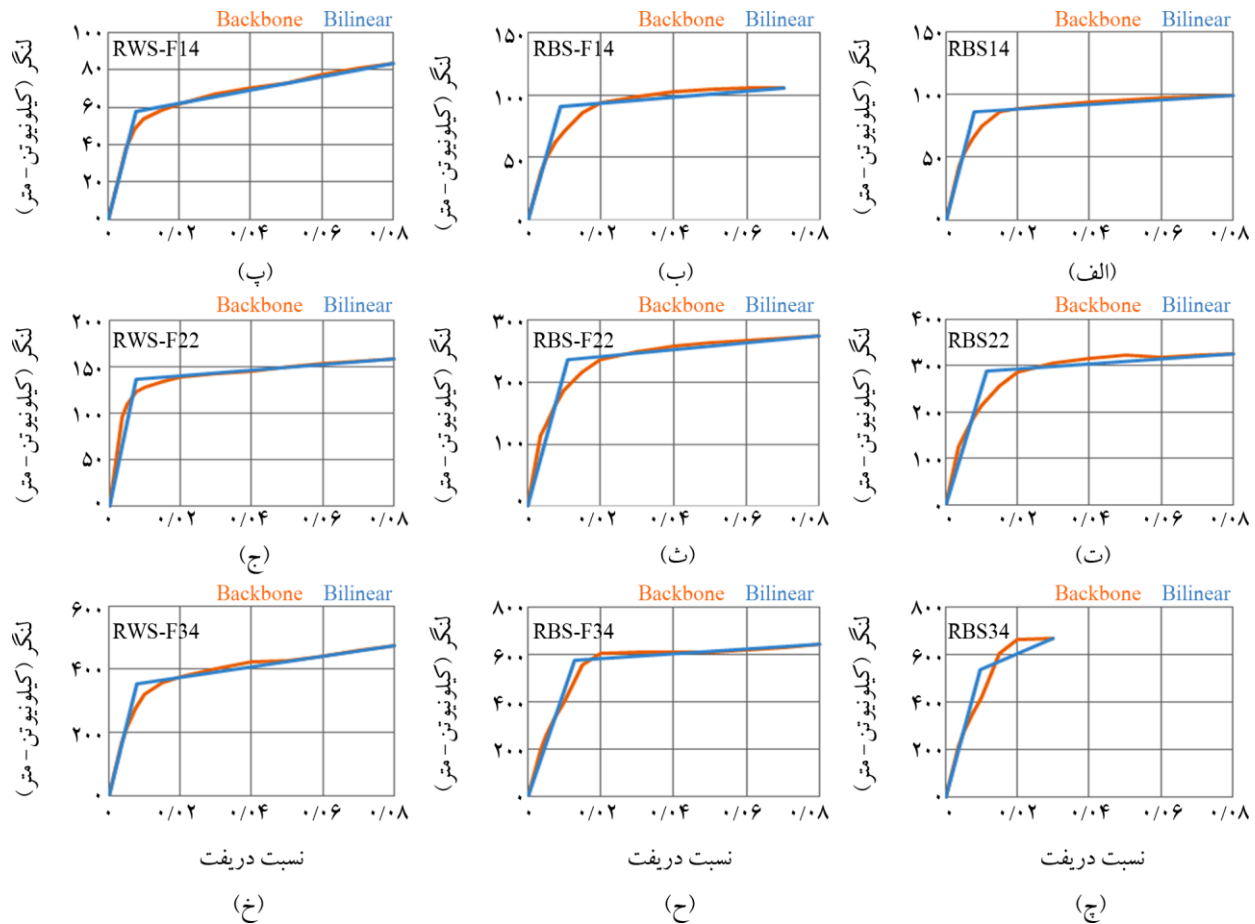
$$k_e = \frac{M_y}{\theta_y} \quad (2)$$

شکل پذیری یکی از پارامترهای مهم در طراحی سازه می باشد که توانایی آن را در تحمل تغییر شکل های پلاستیک، بدون تغییر قابل ملاحظه ای در مقاومت، نشان می دهد. شکل (۱۲) شکل پذیری مدل های عددی را با هم مقایسه می کند. ملاحظه می گردد شکل پذیری در نمونه های RBS-F و RBS با افزایش سائز مقاطع کاهش می یابد. در تحقیقات مشابه برای مقاطعی مانند IPE چنین عملکردی گزارش شده است [۱۰]. این آهنگ کاهش در نمونه های RBS بیشتر و در نمونه های RBS-F کمتر است. نمونه RWS-F از لحاظ شکل پذیری عملکرد بسیار مناسب تری دارد. علاوه بر اینکه بیشترین مقدار شکل پذیری را بین نمونه ها دارد با تغییر سائز مقطع نیز، تغییر محسوسی در شکل پذیری دیده نمی شود.

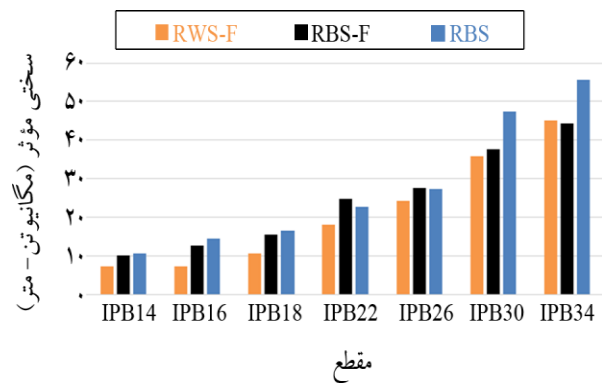
۱-۴- بررسی مشخصات لوزه ای در مدل های عددی

برای همه مدل های عددی، نمودار backbone ترسیم شد و منحنی دو خطی معادل، مطابق معیارهای مطرح شده در FEMA بر آن برازش داده شد [۲۱]. نمودار backbone تا نقطه اوج منحنی هیستریزس در نظر گرفته شد و از بخش کاهنده آن، صرف نظر شد. نمودار backbone برای مدل های ۱، ۴ و ۷ در شکل (۱۱) ارائه شده است. ترسیم نمودار دو خطی معادل باید طوری انجام شود که سطح زیر منحنی آن با نمودار backbone برابر گردد. با ترسیم نمودار دو خطی معادل پارامترهای لنگر تسلیم (M_y)، دریفت تسلیم (θ_y)، لنگر نهایی (M_u) و دریفت نهایی (θ_y) مشخص می شوند و می توان سختی مؤثر (K_e) و شکل پذیری (μ) را از روابط (۱) و (۲) محاسبه نمود:

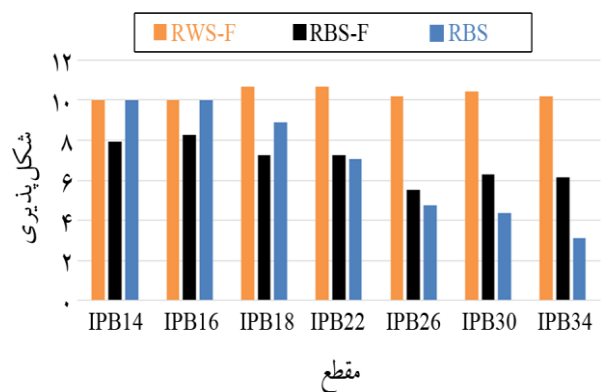
$$\mu = \frac{\theta_u}{\theta_y} \quad (1)$$



شکل (۱۱): نمودار backbone و دوخطی معادل برای مدل‌های ۱، ۴ و ۷.



شکل (۱۳): مقایسه سختی مؤثر نمونه‌های RBS، RBS-F و RWS-F در مدل‌های عددی.

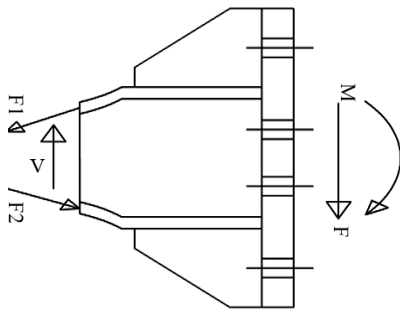


شکل (۱۲): مقایسه شکل پذیری نمونه‌های RBS، RBS-F و RWS-F در مدل‌های عددی.

نمونه‌ها مشهود نیست ولی باید مد نظر قرار گیرد. سختی سکانتی نمونه‌های عددی سری ۱، ۴ و ۷ بر اساس نمودار backbone در شکل (۱۴) ارائه شده‌اند. ملاحظه می‌گردد که افت سختی در نمونه RWS-F کمی سریع‌تر است.

سختی مؤثر، شیب اولیه نمودار دو خطی معادل است که بستگی به مقاومت و دررفت تسلیم نمونه‌ها دارد. همان‌طور که شکل (۱۳) نشان می‌دهد سختی مؤثر نمونه‌های RBS و RBS-F کمی بیشتر از نمونه‌های RWS-F می‌باشد. البته اختلاف سختی

بیشتر است. نتایج ارائه شده در تحقیق گروسی و همکاران [۱۸] نیز تأیید کننده این قضیه است و نشان می‌دهد که شکست نمونه RWS-F در آزمایشگاه از جان شروع شد. مقایسه شکل‌های (۵) و (۹) نیز اختلاف در نحوه تسلیم مقاطع RBS و RWS را در تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد؛ بنابراین مقطع RWS برای افزایش سختی و مقاومت، نسبت به نمونه‌های RBS، نیاز به تقویت جان دارد که در بخش بعد مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل (۱۵): نمودار جسم آزاد در نمونه RWS-F.

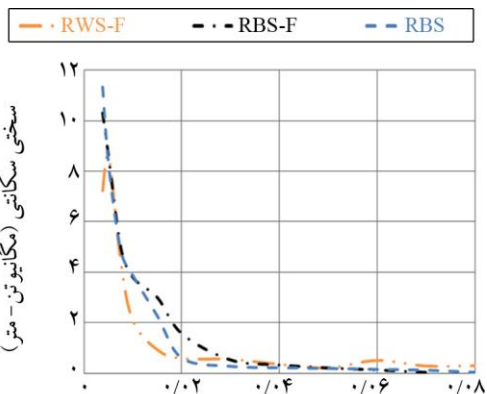
۵- مدل RWS-F اصلاح شده

مقطع RWS به لحاظ هندسه دارای شکل پذیری بالایی است و به علت اینکه نسبت عرض بال به ارتفاع مقطع در آن نسبت به نمونه‌های RBS بیشتر است، انتظار می‌رود کماتش جانبی پیچشی و کماتش موضعی در آن دیرتر رخ دهد. ولی به علت افزایش چشمگیر تنش‌های برشی در جان، در حالتی که اساس مقطع پلاستیک آن با نمونه RBS یکسان است، مقاومت نهایی آن کمتر است؛ بنابراین برای افزایش مقاومت نهایی و سختی در نمونه RWS دو رویکرد وجود دارد:

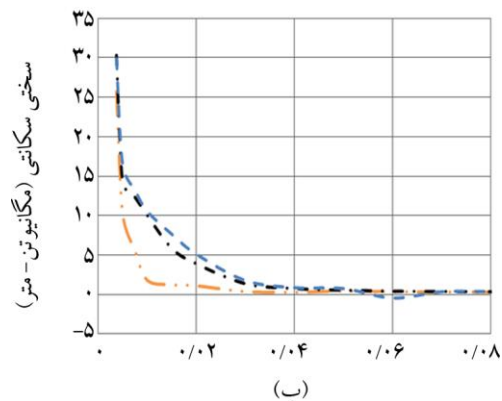
- افزایش اساس مقطع نسبت به نمونه RBS

- افزایش ضخامت جان

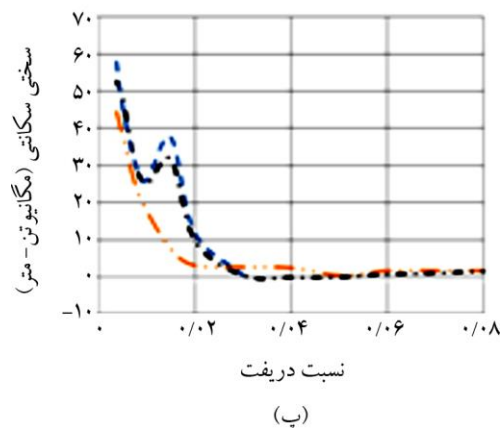
در این بخش از هر دو رویکرد به‌طور هم‌زمان استفاده شد؛ بنابراین هفت مدل عددی دیگر برای نمونه RWS-FR ساخته شد. با کاهش مقدار R طبق شکل (۳-الف)، اساس مقطع پلاستیک این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های RBS و RBS-F به اندازه ۲۰ درصد بیشتر در نظر گرفته شد. ضمناً ضخامت جان نمونه‌ها نیز مطابق با جدول (۵) افزایش داده شد.



(الف)



(ب)

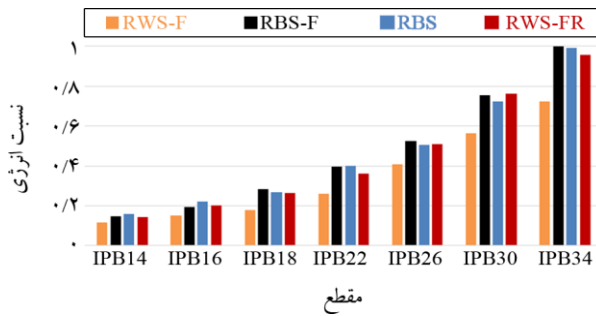


(پ)

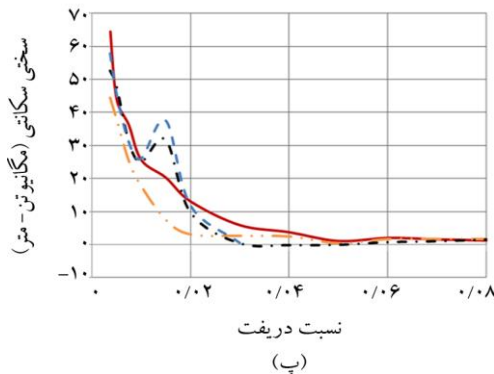
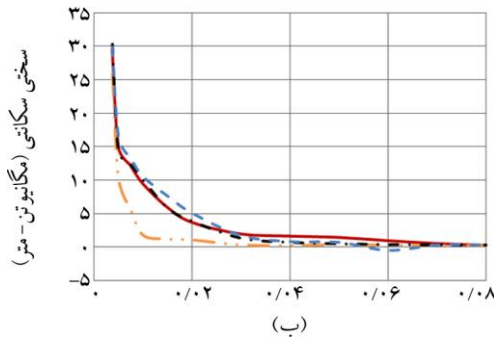
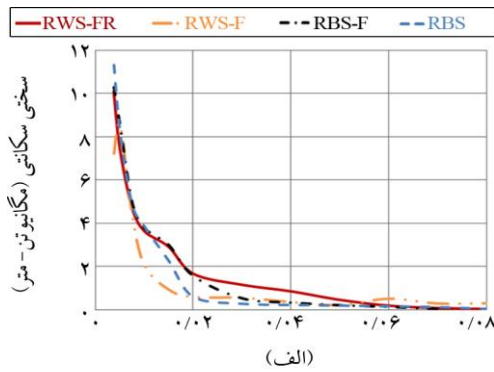
شکل (۱۴): مقایسه سختی سکانتی مدل‌های عددی سری ۴، ۱ و ۷.

به نظر می‌رسد نمونه RWS-F در عین حالی که از نظر پایداری در نمودار هیستریزیس و شکل‌پذیری عملکرد بسیار مناسبی دارد، از نظر مقاومت و سختی با مشکل مواجه است. دلیل اصلی آن را می‌توان در هندسه اتصال جستجو نمود. شکل (۱۵) نمودار جسم آزاد آن را نشان می‌دهد. مشخص است که زوج نیروی مؤثر بر بال، باعث افزایش برش در مقطع می‌گردند؛ بنابراین تنش برشی در جان نسبت به نمونه‌های RBS و RBS-F بسیار

تفاوتی ندارد و از ظرفیت اتلاف انرژی بالایی برخوردار است. شکل (۱۸) سختی سکانتی نمونه‌های عددی سری ۱، ۴ و ۷ نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد افت سختی نمونه RWS-FR نسبت به نمونه‌های دیگر، دیرتر رخ داده و دارای عملکرد مناسب‌تری است.



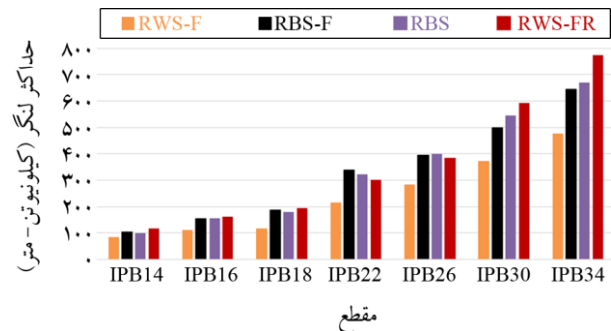
شکل (۱۷): مقایسه اتلاف انرژی تجمعی نرمالیزه نمونه‌های عددی.



شکل (۱۸): مقایسه سختی سکانتی مدل‌های عددی سری ۱، ۴ و ۷ با احتساب نمونه RWS-FR.

جدول (۵): مقایسه ضخامت جان و مقدار R در نمونه‌های RWS-FR با RWS-F (ابعاد به میلی‌متر).

سایز تیر	RWS-FR		RWS-F	
	R	ضخامت جان	R	ضخامت جان
IPB14	۹	۱۵	۱۷/۵	۷
IPB16	۱۴/۵	۱۷	۲۳	۸
IPB18	۱۷	۱۵	۲۵	۸
IPB22	۱۶	۲۰	۲۹	۹/۵
IPB26	۱۹/۵	۱۶	۳۵	۱۰
IPB30	۲۲/۵	۲۰	۴۰/۵	۱۱
IPB34	۱۸/۵	۲۰	۴۱	۱۲



شکل (۱۶): مقایسه مقاومت نهایی نمونه‌های عددی.

در شکل (۱۶) مقاومت نهایی هر ۲۸ نمونه عددی با هم مقایسه شده است. واضح است که نمونه RWS-FR دارای مقاومت بسیار مناسبی است و با انتخاب درست ضخامت جان و میزان کاهش ارتفاع در فیوز (R)، می‌توان به مقاومت مطلوب دست یافت. ضمناً در تمام مدل‌های RWS-FR محل تشکیل مفصل پلاستیک در وسط فیوز است و افزایش مقاومت در مقطع، باعث جابه‌جایی مفصل پلاستیک نشده است؛ بنابراین با فلسفه تضعیف مقطع جهت حفاظت از اتصال تعارضی ندارد.

اتلاف انرژی یکی از خصوصیات مهم لرزه‌ای هر اتصال، تحت اثر بارهای چرخه‌ای است که در هر سیکل، بر اساس سطح زیر منحنی لنگر-دریفت به دست می‌آید. شکل (۱۷) مقدار اتلاف انرژی تجمعی نرمالیزه شده را برای همه نمونه‌های عددی نشان می‌دهد. واضح است که اتلاف انرژی نمونه RWS-F به علت کم بودن مقاومت نهایی، نسبت به نمونه‌های RBS و RBS-F کمتر است. ولی نمونه RWS-FR از منظر اتلاف انرژی با بقیه نمونه‌ها

شبه‌استاتیکی و چرخه‌ای تا دریافت ۸ درصد اعمال شد. بر اساس سه نمونه آزمایشگاهی قبلی و بیش از ۲۸ مدل عددی المان محدود غیرخطی نتایج زیر به دست آمد:

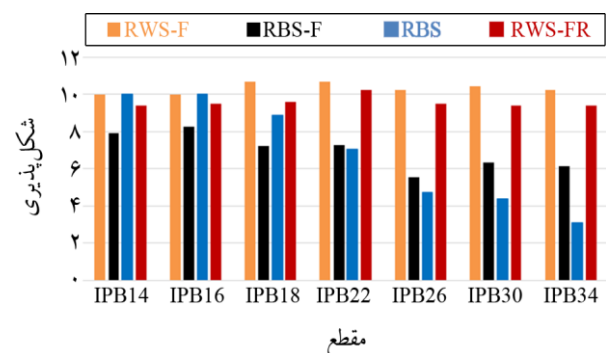
- در نمونه‌های RBS و RBS-F با افزایش سائز تیر، شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. درحالی‌که برای نمونه RWS-F نه تنها با تغییر سائز تیر شکل‌پذیری ثابت می‌ماند بلکه شکل‌پذیری آن به‌طور محسوسی نسبت به دو نمونه دیگر بیشتر است.
- نمونه RWS-F با اساس مقطع پلاستیک معادل با نمونه RBS-F، مقاومت نهایی و سختی کمتری دارد. دلیل اصلی آن هندسه مقطع با عمق کاهش یافته است.
- نمونه RWS-F اصلاح شده، با ضخامت بیشتر برای جان به‌عنوان نمونه نهایی پیشنهاد شد. این نمونه دارای سختی، مقاومت نهایی و اتلاف انرژی در حدود نمونه‌های RBS و RBS-F است. درحالی‌که شکل‌پذیری آن به‌مراتب بالاتر است.

بنابراین استفاده از نمونه RWS-FR با مشخصات لرزه‌ای بسیار خوب و قابلیت تعویض، در نواحی لرزه‌خیز با هر سطح خطری پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

1. Engelhardt, M.D. and Husain, A.S. (1993) Cyclic-loading performance of welded flange-bolted web connections. *Journal of Structural Engineering*, **119**(12), 3537-50.
2. Miller, D.K. (1998) Lessons learned from the Northridge earthquake. *Engineering Structures*, **20**(4-6), 249-60.
3. Mahin, S.A. (1998) Lessons from damage to steel buildings during the Northridge earthquake. *Engineering Structures*. **20**(4-6), 261-70.
4. American Institute of Steel Construction (2016) *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*. (ANSI/AISC 358-16) Chicago, Illinois.
5. Sofias, C.E., Kalfas, C.N., and Pachoumis, D.T. (2014) Experimental and FEM analysis of reduced

شکل‌پذیری هر ۲۸ نمونه عددی، در شکل (۱۹) مقایسه شده‌اند. گرچه شکل‌پذیری نمونه RWS-FR نسبت به نمونه RWS-F کمی کاهش یافته است ولی هنوز نسبت به نمونه‌های RBS و RBS-F بسیار بیشتر است؛ بنابراین نمونه RWS-FR علاوه بر حفظ مقاومت، سختی و سطح اتلاف انرژی، از شکل‌پذیری بسیار بیشتری نیز نسبت به نمونه‌های RBS و RBS-F برخوردار است. مهم‌تر اینکه با دارا بودن قابلیت تعویض می‌تواند دارای کاربرد زیادی در مناطق لرزه‌خیز با خطر نسبی بالا باشد.



شکل (۱۹): مقایسه شکل‌پذیری هر ۲۸ نمونه عددی.

۶- نتیجه‌گیری

شکست ترد در اتصالات، یکی از مخرب‌ترین انواع شکست در سازه محسوب می‌شود. پس از زلزله نورث‌ریج ۱۹۹۴ اتصالات RBS عرضه شدند که با تشکیل مفصل پلاستیک در خارج از محل اتصال، باعث حفظ جوش‌ها می‌شوند. به دلیل تمرکز خسارت در مقطع کاهش یافته، تیر پس از زلزله‌های متوسط یا قوی آسیب می‌بیند و باید تعویض شود که بسیار مشکل یا غیر ممکن است.

در این مقاله امکان استفاده از مقطع کاهش یافته در یک فیوز قابل تعویض، بر اساس تست‌های آزمایشگاهی قبلی و مدل‌های عددی برای تیرهای با سائزهای مختلف مقطع، ارزیابی شد. بدین منظور در مدل‌سازی المان محدود سه نمونه اتصال تیر با مقطع کاهش یافته و ورق انتهایی (RBS)، نمونه دارای فیوز با مقطع کاهش یافته بال (RBS-F) و مقطع کاهش یافته جان (RWS-F) با سائزهای مختلف ساخته شدند. بارگذاری به‌صورت

15. Rahnavard, R., Hassanipour, A., and Siahpolo, N. (2015) Analytical study on new types of reduced beam section moment connections affecting cyclic behavior. *Case Studies in Structural Engineering*, **3**, 33-51.
16. Tsavdaridis, K.D., Faghih, F., and Nikitas, N. (2014) Assessment of perforated steel beam-to-column connections subjected to cyclic loading. *Journal of Earthquake Engineering*, **18**(8), 1302-25.
17. Wilkinson, S., Hurdman, G., and Crowther, A. (2006) A moment resisting connection for earthquake resistant structures. *Journal of Constructional Steel Research*, **62**(3), 295-302.
18. Garoosi, A.M., TahamouliRoudsari, M., and Hashemi, B.H. (2018) Experimental evaluation of rigid connection with reduced section and replaceable fuse. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 125-137 (in Persian).
19. FEMA (2000) *Recommended Seismic Design Provisions for New Moment Frame Buildings Report*. FEMA 350, Federal Emergency Management Agency, Washington DC.
20. FEMA (2005) *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. FEMA- 440, Federal Emergency Management Agency, Redwood City.
21. Shi, G., Wang, M., Bai, Y., Wang, F., Shi, Y.J., and Wang, Y.Q. (2012) Experimental and modeling study of high-strength structural steel under cyclic loading. *Engineering Structures*, **37**, 1-13.
- beam section moment endplate connections under cyclic loading. *Engineering Structures*, **59**, 320-329.
6. Swati, Ajay Kulkarni, and Vesmawala Gaurang (2014) Study of steel moment connection with and without reduced beam section. *Case Studies in Structural Engineering*, **1**, 26-31.
7. Oh, K., Lee, K., Chen, L., Hong, S.B., and Yang, Y. (2015) Seismic performance evaluation of weak axis column-tree moment connections with reduced beam section. *Journal of Constructional Steel Research*, **105**, 28-38.
8. Deylami, A. and Tabar, A.M. (2013) Promotion of cyclic behavior of reduced beam section connections restraining beam web to local buckling. *Thin-Walled Structures*, **73**, 112-20.
9. Tahamouli, R.M., Abdollahi, F., Salimi, H., Azizi, S., and Khosravi, A.R., (2015) The effect of stiffener on behavior of reduced beam section connections in steel moment-resisting frames. *International Journal of Steel Structures*, **15**(4), 827-834.
10. Tahamouli Roudsari, M., Jamshidi, H.K., and Mohebi Zangeneh, M. (2016) Experimental and Numerical Investigation of IPE Reduced Beam Sections with Diagonal Web Stiffeners. *Journal of Earthquake Engineering*, 1-20.
11. Hedayat, A.A. and Celikag, M. (2009) Post-Northridge connection with modified beam end configuration to enhance strength and ductility. *Journal of Constructional Steel Research*, **65**(7), 1413-30.
12. Hassanien, S.H., Ramadan, H.M., Abdel-Salam, M.N., and Mourad, S.A. (2014) Experimental study of prequalified status of flush end plate connections. *HBRC Journal*.
13. Tsavdaridis, K.D. and Papadopoulos, T. (2016) A FE parametric study of RWS beam-to-column bolted connections with cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research*, **116**, 92-113.
14. Maleki, S. and Tabbakhha, M. (2012) Numerical study of Slotted-Web-Reduced-Flange moment connection. *Journal of Constructional Steel Research*, **69**(1), 1-7.

واژه‌نامه

- ۱- تیر با مقطع کاهش یافته Reduced Beam Section (RBS)
- ۲- اتصال صلب از پیش تأیید شده Prequalified Rigid Connections
- ۳- فیوز قابل تعویض Replaceable Fuse
- ۴- نمودار هیستریزیس Hysteretic Diagram
- ۵- شکل پذیری Ductility
- ۶- اتلاف انرژی Energy Dissipation
- ۷- چشمه اتصال Panel Zone

Numerical Evaluation of Rigid Connection with Reduced Depth Section and Replaceable Fuse

Allah Reza Moradi Garoosi¹, Mehrzad Tahamouli Roudsari^{2*}, and Behrokh Hosseini Hashemi³

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran
2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran, *Corresponding Author, email: Tahamouli@iauksh.ac.ir
3. Associate Professor, Structural Engineering Research Center, The International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

Brittle failure can prevent structural connections from reaching their peak performance. It is therefore considered as one of the most destructive forms of failure. The prevalence of different failure in rigid connections of steel frames in the aftermath of the Northridge and Kobe earthquakes brought the performance of these connections under question. Research into rigid connections with complete penetrating welding revealed that it is highly probable for the welds to undergo premature brittle failure at low drifts. To address this problem, the use of Reduced Beam Sections (RBS) was recommended by the scientific community after the Northridge earthquake. In this connection, the beam's flanges are cut (reduced) so that it can take on the form of a fuse, making it possible for the plastic hinge to be driven toward the inside of the beam, thereby preventing the panel zone from failing. RBSs, which are categorized as "prequalified connections", have been the subject of extensive investigations and have suitable energy absorption and ductility under cyclic loadings. They are not, nonetheless, without flaws and are accompanied by problems such as the need for replacement after average or severe earthquakes due to severe inelastic deformations in the reduced area. This problem is compounded by the connection of secondary beams to primary beams in the ceiling of the structures in which they are used.

The objective of this investigation is the numerical evaluation of RBS connections with replaceable fuses. Numerical simulations on three models – namely, a conventional reduced beam section connection (RBS), a reduced-flange connection with a replaceable fuse (RBS-F), and a reduced-web connection with a replaceable fuse (RWS-F) – were carried out using ABAQUS, with material and geometric nonlinearities having been considered. Also, the materials of the columns, beams, and plates, stiffeners, doubler and continuity plates, seat plates, and bolts have been defined based precisely on experimental data. Loading and support conditions of the numerical models were the same as those of the experimental samples.

In the numerical models, the bolts were first pre-stressed to a sufficient degree. Then, lateral cyclic loading was applied to the beam of each model. The hysteretic curves of the numerical models are in good agreement with those of the experimental samples, indicating that the numerical models can reliably be used for the evaluation of other sections. Seven different profiles were selected from IPB sections (IPB140 to IPB340) for the beam. Suitable columns and endplates were designed for every beam size. For every set, three RBS, RBS-F, RDS-F, and RWS-FR models were constructed, bring the total analyzed models to 28. The dimensions of the RWS model were selected so that its plastic section modulus would be the same as that of the RBS sample. Similar to the tests, the analyses continued until a draft of 8% and the hysteretic moment-rotation diagram of each sample was obtained. Since in tall buildings beams and columns with variable dimensions are used in the experiment was carried out for beams and columns with one size, performing extensive numerical analyses can offer a better comparison of the performance reduced-depth sections and reduced-flange sections.

The results of more than 28 numerical analyses showed that in the RBS and RBS-F models, increasing the size of the beam reduces ductility. However, for the RWS-F sample, not only does increasing the size of the beam maintains the beam's ductility, it also keeps it, noticeably, above those of the other two samples. The ultimate strength of the sample, however, is less than the other two samples. By increasing the web's thickness and its plastic

section modulus, an ultimate strength on par with those of the other samples can be achieved. Therefore, the modified RWS-F sample can be a suitable replacement for RBS connections.

Keywords: Steel Moment Resisting Frame, Rigid Connection, Replaceable Fuse, Reduced Beam Section in Web, Reduced Beam Section in Flange.