



بررسی عملکرد اتصالات صلب تیر با مقطع کاهش یافته با سخت کننده‌های افقی و قائم در قاب خمشی فولادی

وحید صابری^{۱*}، حمید صابری^۱، مسعود سلیمی کیا^۱، عباسعلی صادقی^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه غیرانتفاعی ایوانکی، سمنان، ایران.

۲- گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۱

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۵/۱۴

کلمات کلیدی:

اتصال تیر با مقطع کاهش یافته (RBS)

بارگذاری چرخه‌ای

سخت کننده افقی

سخت کننده قائم

نرم‌افزار ABAQUS

خلاصه: در این تحقیق، رفتار اتصالات تیر با مقطع کاهش یافته (RBS) تقویت شده با استفاده از سخت کننده‌های افقی و قائم تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر سخت کننده‌ها بر بهبود رفتار چرخه‌ای اتصالات مطالعه گردیده است. از نرم افزار اجزا محدودی ABAQUS جهت صحت‌سنجی و شبیه‌سازی رفتار اتصال RBS استفاده شده است. مطالعه‌ی پارامتری با تغییر جنس و نحوه‌ی آرایش سخت کننده‌ها در محل اتصال انجام شد. نتایج تحلیل‌های اجزا محدودی انجام شده نشان داد که در حالت استفاده از ترکیب دو سخت کننده‌ی افقی و دو سخت کننده‌ی قائم، مقاومت اولیه و نهایی اتصال در مقایسه با اتصال بدون سخت کننده به ترتیب ۶/۲٪ و ۲۶/۱٪ درصد افزایش یافته است. در حالت استفاده از سخت کننده‌های افقی و قائم با پیکربندی مستطیلی، با طول برابر با ۷۵ درصد طول ناحیه‌ی کاهش مقطع و ارتفاع برابر با ۷۵ درصد ارتفاع تیر، مقاومت اولیه و نهایی اتصال در مقایسه با حالت بدون تقویت به ترتیب حدود ۶٪ و ۲۰٪ درصد افزایش یافته است. با مقایسه استفاده از فولادهای ST37 و ST52 در سخت کننده‌ها، مشاهده گردید که هر دو حالت دارای تأثیر یکسانی در افزایش مقاومت اتصال بوده‌اند و می‌توان از تأثیر جنس فولاد سخت کننده‌ها در افزایش مقاومت اتصال صرف نظر کرد.

۱- مقدمه

از آنجایی که زلزله‌های بسیار شدید، دوره‌ی بازگشت طولانی دارند و حتی ممکن است یک سازه در طول عمر خود چنین زمین لرزه‌هایی را تجربه نکند، بنابراین طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله‌های قوی به گونه‌ای که سازه دچار آسیب نگردد، غیرعملی و غیراقتصادی خواهد بود و رویکرد آیین‌نامه‌ها در این مورد جلوگیری از فروریزش ساختمان‌هاست. رفتار غیرالاستیک در سازه‌های فولادی با تشکیل مفاصل پلاستیک در اتصالات تیر به ستون و در تکیه‌گاه ستون‌ها اتفاق می‌افتد. مفاصل پلاستیک نیز از تسلیم خمشی تیرها و ستون‌ها و تسلیم برشی چشمه‌های اتصال شکل می‌گیرد. در این حالت انتظار می‌رود که تیرها متحمل چرخش غیرالاستیک بزرگی در نواحی مفاصل پلاستیک شوند که ممکن است در انتهای تیرها قرار گیرند. اگر چه اتصالات به گونه‌ای طراحی می‌شوند که بتوانند تغییر شکل‌های بزرگ را در هنگام زلزله تجربه کنند ولی تجربه زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که برخلاف انتظار، بسیاری از اتصالات خمشی از خود رفتار شکل‌پذیری را ارائه

نمی‌دهند [۱].

اتصالات تیر به ستون در قاب‌های خمشی فولادی نقش ویژه‌ای را در شکل‌پذیری آن‌ها ایفا می‌کنند و تا مدتی تصور می‌شد که اتصالات خمشی به کار رفته در این نوع قاب‌ها وظیفه خود در تامین شکل‌پذیری را به خوبی انجام می‌دهند. ولی زلزله‌ی نورتریج در سال ۱۹۹۴ نقطه‌ی عطفی در عملکرد قاب‌های خمشی بود. پس از این زلزله مشخص شد که اتصالات تیر به ستون در این قاب‌ها در بسیاری از ساختمان‌ها دچار گسیختگی ترد شده و شکل‌پذیری آن‌ها مورد تردید قرار گرفت. پژوهشگران آزمایش‌ها و بررسی‌های مختلفی را جهت بهبود رفتار اتصالات تیر به ستون در این قاب‌ها انجام داده و دو راهکار اساسی برای بهبود عملکرد آن‌ها پیشنهاد گردید که شامل تقویت اتصال و تضعیف عمدی تیرهای متصل به ستون (RBS) می‌باشد. RBS به معنای تضعیف عمدی ظرفیت خمشی تیر به صورت موضعی در فاصله‌ی اندک از اتصال آن به ستون است، که خود سبب افزایش شکل‌پذیری و دوران پلاستیک اتصال می‌گردد، بدون آن که



این تحقیق، رفتار مشابهی را برای اتصالات RBS با ضخامت ورق برابر با ضخامت بال تیر و ضخامت ورق برابر با نصف ضخامت بال تیر نشان داد. استفاده از ورق پیوستگی در چشمه اتصال ستون با سخت کردن بال ستون و مقاومت در برابر کماتش موضعی باعث بهبود رفتار اتصال می‌گردد [۵]. مرشدی و همکاران (۲۰۱۷) یک اتصال جدید از اتصال RBS، به نام اتصال RBS دوگانه (DRBS)^۳ را معرفی نموده و با استفاده از مدل‌سازی اجزا محدود رفتار لرزه‌ای اتصال را مورد بررسی قرار دادند. در اتصال پیشنهادی از دو مقطع کاهش‌یافته متوالی در مجاورت بر ستون، برای گسترش ناحیه مفصل پلاستیک در تیر استفاده می‌شود. در این اتصال، ناحیه بین دو مقطع کاهش‌یافته تیر به صورت جانبی به دال سقف متصل می‌گردد تا از کماتش پیچشی-جانبی ناحیه پلاستیک تیر جلوگیری شود. نتایج نشان داد که با رعایت ضوابط و محدودیت‌هایی خاص، اتصال DRBS دارای چرخه‌های هیستریزس مناسبی می‌باشند. در مقایسه با اتصال RBS متداول، اتصال پیشنهادی دارای ۴۰ درصد ظرفیت تغییر شکلی بیشتر می‌باشد. پلاستیسیته شدن هر دو مقطع کاهش‌یافته اتصال، مد خرابی کماتش اتصال را به تاخیر انداخته و مقدار انرژی لرزه‌ای جذب شده قبل از کماتش اتصال را در مقایسه با اتصال RBS متداول، به مقدار ۵۰ تا ۷۵ درصد افزایش می‌دهد [۶]. تحلی رودسری و همکاران (۲۰۱۶) برای تقویت اتصال RBS استفاده از سخت‌کننده‌های قطری در محل کاهش مقطع در تیر را پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد که استفاده از سخت‌کننده قطری در محل کاهش مقطع باعث افزایش اتلاف انرژی و ظرفیت چرخش پلاستیک اتصال RBS و افزایش شکل‌پذیری اتصال می‌گردد [۷]. رهنورد و همکاران (۲۰۱۵)، هشت اتصال خمشی با شکل‌های مختلف کاهش مقطع بال تیر را با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدودی ABAQUS مدل‌سازی کرده و رفتار چرخه‌ای آن‌ها را مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که در اتصال RBS با سوراخ‌های با قطر یکسان و متغیر، تغییر شکل‌های پلاستیک عمدتاً در تیر متمرکز می‌باشد [۸]. سواتی و گارانگ^۴ (۲۰۱۴) با انجام آزمایشاتی با بارگذاری چرخه‌ای، تأثیر استفاده از مقطع کاهش‌یافته در رفتار اتصال را مورد بررسی قرار دادند. در نمونه بدون کاهش مقطع، بال ستون دچار کماتش شده و چشمه اتصال ستون به حد تسلیم رسیده و آسیب دید. همچنین مناطق حداکثر تنش فون میسز در چشمه اتصال و در نزدیکی ناحیه جوش اتفاق می‌افتد و به دلیل شیوع ترک در جوش بال پایین تیر، اتصال عملکرد ضعیفی داشت [۹]. دیلمی و مصلحی تبار (۲۰۱۳)، با پیشنهاد جزئیات جدید، یک روش تقویت

سختی و مقاومت آن دچار زوال قابل توجهی شود. کاهش سطح مقطع تیر به روش‌های مختلفی قابل اجرا است که از آن جمله می‌توان به کاهش مقطع بال به روش‌های متفاوت و کاهش مقطع جان اشاره کرد. در بعضی حالات مشاهده شده که راهبرد کاهش سطح مقطع نیز دارای نقاط ضعفی از جمله کاهش مقاومت اتصال در برابر کماتش جانبی-پیچشی و همچنین کاهش تحمل بار در برابر تغییر مکان‌های بزرگ می‌باشد. یکی از روش‌های تقویت اتصالات تیر با مقطع کاهش یافته (RBS)، استفاده از سخت‌کننده‌های افقی و قائم در محل کاهش مقطع تیر در جان آن می‌باشد. با توجه به اینکه این نوع اتصالات در سازه‌های خمشی کاربرد زیادی دارند، با بهبود و ارتقاء عملکرد آن‌ها می‌توان از وارد شدن خسارات جانی و مالی فراوان در هنگام بروز زمین‌لرزه‌های شدید، به ویژه در کشورمان که بر روی کمربند زلزله خیز آلباید قرار گرفته، جلوگیری کرده و شدت خسارت‌های احتمالی را کم کرده است. از زمان پیدایش ایده استفاده از اتصالات با مقطع تیر کاهش یافته، پژوهشگران زیادی بر روی رفتار این نوع اتصالات بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی انجام داده و به بررسی نقاط ضعف و قوت آن پرداخته و با ارائه راهکارهای کاربردی، سعی کرده‌اند تا رفتار لرزه‌ای آن را بهبود ببخشند. در این جا به تعدادی از مطالعات انجام شده در زمینه اتصالات RBS و روش‌های مختلف مقاوم‌سازی آن اشاره می‌شود [۲]. در ادامه، تاریخچه‌ی تحقیق در زمینه مقاوم‌سازی اتصالات RBS با استفاده از سخت‌کننده‌های افقی و قائم ارائه شده است.

تحلی رودسری و مرادی (۲۰۱۸)، جهت بررسی کارایی سخت‌کننده‌های پیشنهادی، تعداد ۴ آزمایش بر روی اتصالات RBS با تیرهای IPE140 و IPE270 در دو حالت با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده قوطی شکل به انجام رساندند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سخت‌کننده پیشنهادی بدون افزایش قابل توجه در مقاومت اتصال، به طور قابل ملاحظه‌ای شکل‌پذیری اتصال را افزایش می‌دهد [۳]. کانائو و همکاران^۱ (۲۰۱۸)، به طور تحلیلی رفتار اتصالات RBS با سخت‌کننده‌های افقی و قائم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که بدون استفاده از مهار جانبی کافی، سخت‌کننده‌های افقی و قائم توانایی به تاخیر انداختن کماتش موضعی و جلوگیری از تمرکز تنش را دارند. علاوه بر این مقاومت تیر بیش از ۸۰ درصد مقاومت پلاستیک آن می‌باشد [۴]. برده و همکاران^۲ (۲۰۱۷) با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدودی ANSYS، رفتار اتصالات RBS را تحت بارگذاری جانبی یکنواخت با تغییر ضخامت ورق پیوستگی مورد بررسی قرار دادند. نتایج

3 Double Reduced Beam Section
4 Swati and Gaurang

1 Kanao et al.
2 Berde et al.

خمشی با مقطع تیر کاهش یافته نظیر تعداد، جنس و آرایش سخت کننده‌ها مطالعه می‌شود که نوآوری قابل توجهی محسوب می‌گردد.

۲- روش تحقیق

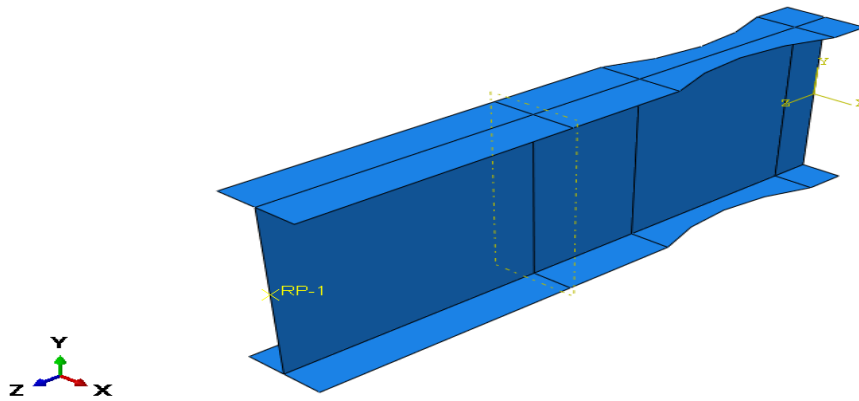
۲-۱- صحت‌سنجی مدل‌سازی

لی و همکاران (۲۰۰۹)، رفتار ناپایداری موضعی یک تیر RBS تحت بار چرخه‌ای را به طور تحلیلی مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. مطابق مرجع مدنظر به منظور صحت‌سنجی، تیر با مقطع W30X99 انتخاب و در نرم‌افزار ABAQUS [۱۵] مدل‌سازی گردید. پارامترهای a، b و c برای تیر مورد بررسی به ترتیب برابر با ۱۳۲، ۶۲۱ و ۶۶ میلی‌متر می‌باشد. طول مدل تیر برابر با ۱۹۶۴ میلی‌متر است. مطابق شکل ۱، جهت مدل‌سازی رفتار فولاد، از مدل پلاستیک با سخت شوندگی ایزوتروپیک^۲ استفاده شده است. جرم مخصوص فولاد برابر با ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. مدول الاستیسیته و ضریب پواسون فولاد به ترتیب برابر با ۲۱۰۰۰۰ مگاپاسکال و ۰/۳ تعریف شده است. رفتار پلاستیک فولاد به صورت دوخطی با تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال و با سخت شدگی ایزوتروپیک تعریف شده است. روش حل معادلات المان محدود به صورت مستقیم و با استفاده از تکنیک نیوتن کامل می‌باشد. شرایط مرزی مسئله، شامل مقید کردن تمامی درجات آزادی تغییر مکان و چرخش در انتهای تکیه گاه تیر و مقید کردن درجه آزادی انتقالی جانبی و چرخش تیر در انتهای آزاد می‌باشد. شرایط مرزی بر اساس شکل ۲ ارائه شده است. مطابق شکل ۳، برای مش‌بندی مدل از المان S4R با انتگرال‌گیری کاهش یافته استفاده شده است. اندازه مش‌ها با استفاده از تحلیل حساسیت مش به دست آمده است. بدین منظور مدل اجزا محدودی ساخته شده در نرم‌افزار ABAQUS، در چهار حالت مختلف با مش‌های به اندازه ۲۰۰ میلی‌متر، ۱۰۰ میلی‌متر، ۵۰ میلی‌متر و ۲۵ میلی‌متر تحلیل شد. با کاهش اندازه مش‌ها از ۵۰ به ۲۵ میلی‌متر، تغییر چندانی در منحنی هیستریزس اتصال به وجود نمی‌آید. در نتیجه اندازه المان‌ها در نواحی کاهش مقطع برابر با ۲۵ میلی‌متر و در نواحی خارج از آن برابر با ۵۰ میلی‌متر انتخاب شده است.

در شکل ۴، کانتور تغییر شکل‌های جانبی تیر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در محل اتصال RBS تغییر شکل‌های خارج از صفحه جان تیر به شدت افزایش یافته و اتصال دچار کماتش جانبی جان می‌گردد و در نتیجه در چرخه‌های بارگذاری با افزایش مقدار دوران انتهای تیر، مقاومت اتصال کاهش می‌یابد.

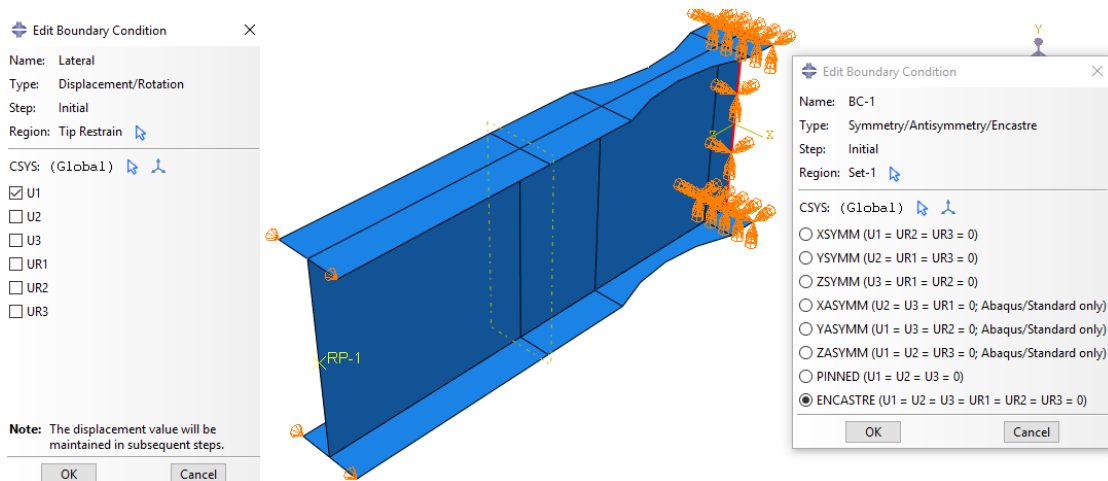
جهت کاهش مشکل کماتش در اتصالات RBS ارائه نمودند و با انجام آزمایش‌هایی کارآیی جزئیات پیشنهادی را به اثبات رساندند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که اتصالات RBS متداول حداقل دوران پلاستیک ۰/۰۳، مورد نیاز برای سطح عملکردی ایمنی جانی را برآورده می‌کنند، اما به دلیل کماتش موضعی جان قادر به رسیدن به سطح عملکردی آستانه فروریزش در مناطق با خطر لرزه‌ای بسیار زیاد نمی‌باشند. اما جزئیات پیشنهادی برای تقویت اتصال RBS، ملزومات حد عملکردی آستانه فروریزش را برآورده می‌کند [۱۰]. هان و همکاران^۱ (۲۰۱۲) برای بررسی و بهسازی اتصالات موجود که قادر به تحمل دوران دو درصد رادیان مربوط به قاب‌های خمشی متوسط نیستند، رابطه‌ای تجربی ارائه نمودند که قادر به تخمین ظرفیت چرخشی این اتصالات می‌باشد. آن‌ها در نهایت دستورالعملی جهت طراحی اتصالات RBS با جان پیچ شده ارائه نمودند که ظرفیت دورانی اتصال را به بیش از دو درصد رادیان می‌رساند [۱۱]. میرقادی و همکاران (۲۰۱۰)، نوع جدیدی از اتصال RBS با جان آکاردثونی را جهت استفاده در قاب‌های خمشی معرفی نمودند. جهت بررسی عملکرد لرزه‌ای اتصال پیشنهادی دو نمونه تقریباً مشابه با مقیاس ۲/۳ ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش شد. نتایج نشان داد که هر دو نمونه، بدون کاهش مقاومت قابل توجه تا تغییر مکان نسبی ۸ درصد کارآیی دارند، که این مقدار تغییر مکان نسبی بیشتر از ملزومات لازم برای قاب‌های خمشی با شکل‌پذیری ویژه می‌باشد [۱۲]. ایمان‌پور و همکاران (۲۰۰۸)، نوع جدیدی از اتصال RBS را پیشنهاد نمودند که در آن به جای بریدن بال تیر، از ورق‌های موج‌دار در جان تیر برای کاهش مقاومت تیر در طول مشخصی از بر ستون استفاده شده بود. از آنجایی که ورق‌های موج‌دار فاقد مقاومت خمشی می‌باشند، در نتیجه استفاده از آن‌ها در ناحیه مفصل پلاستیک باعث کاهش مقاومت تیر و تشکیل مفصل در ناحیه ورق موج‌دار می‌گردد. نتایج نشان داد که جان‌های موج‌دار باعث بهبود پایداری پلاستیک شده و بدون هیچگونه کماتش یا شکست تردی در ناحیه پلاستیک، ظرفیت تحمل چرخش‌های پلاستیک بزرگ را در اتصال فراهم می‌آورد [۱۳].

با توجه به اینکه تحقیقات انجام شده در زمینه تقویت اتصالات RBS با استفاده از سخت کننده بسیار محدود و اندک می‌باشد، در این تحقیق رفتار اتصالات RBS که با استفاده از سخت کننده‌های افقی و قائم تقویت شده‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق روی تأثیر پارامترهای سخت کننده‌های افقی و قائم در مقاومت‌سازی و بهبود عملکرد اتصالات



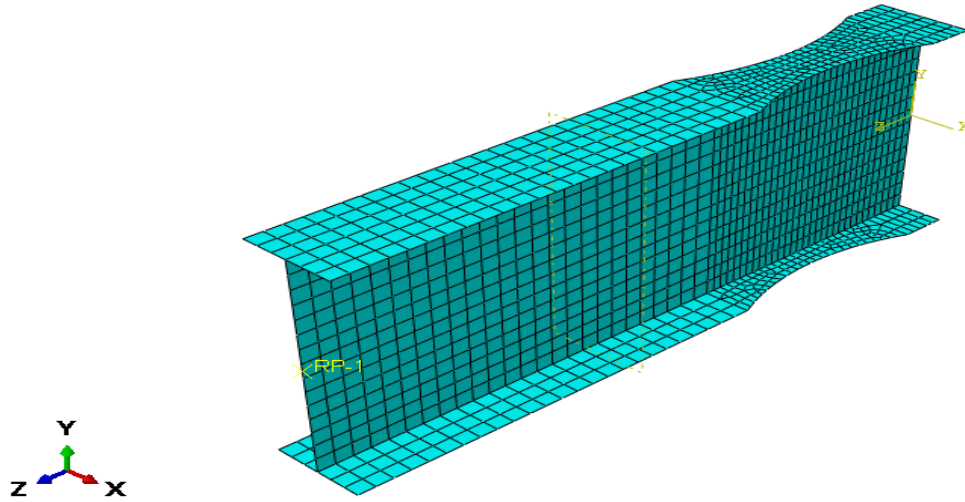
شکل ۱. مدل اجزا محدودی RBS

Fig. 1. Finite element model of RBS.



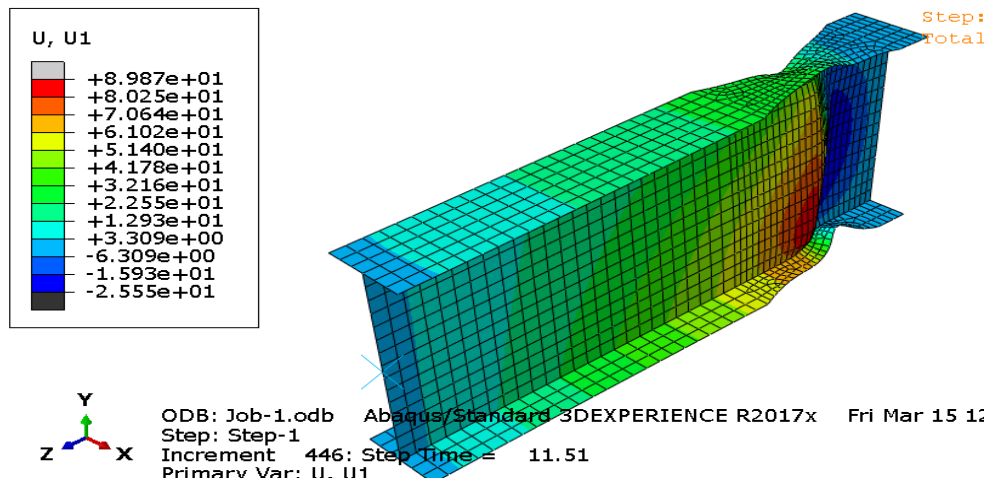
شکل ۲. اعمال شرایط مرزی در مدل RBS

Fig. 2. Applying boundary conditions on RBS model.



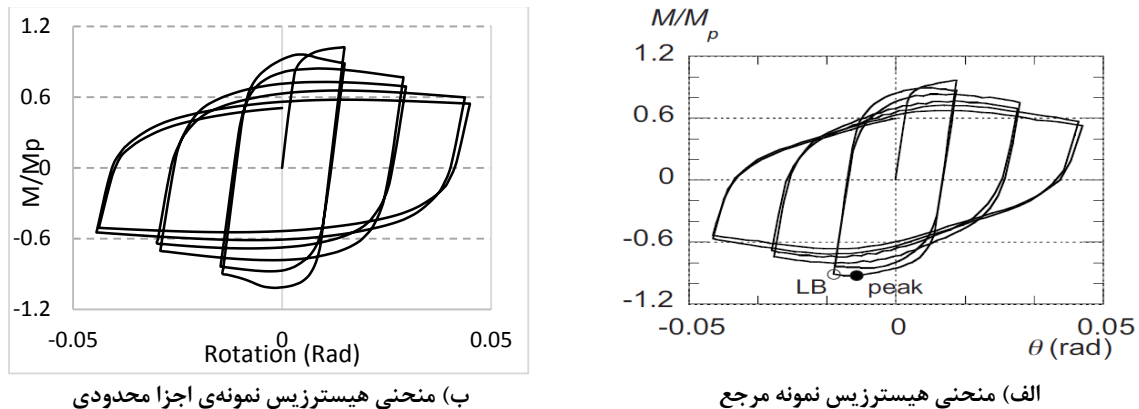
شکل ۳. مدل مش بندی RBS

Fig. 3. Mesh of RBS model.



شکل ۴. کانتور تغییر شکل جانبی مدل RBS

Fig. 4. Lateral displacement contour of RBS model.



شکل ۵. مقایسه منحنی هیستریزیس تحلیل اجزا محدودی با نمونه مرجع

Fig. 5. The comparison of hysteresis curve of finite element analysis with reference sample. A) Hysteresis curve of reference model. B) Hysteresis curve of finite element model.

استفاده از این مدل، تأثیر استفاده از سخت کننده‌های افقی و قائم در بهبود عملکرد اتصالات RBS مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در مطالعه‌ی پارامتری از IPE300 به عنوان تیر استفاده شده است. مطابق بند ۱۰-۳-۱۳-۲ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۱۶]، با توجه به شکل ۶ در محل کاهش مقطع باید محدودیت‌های رابطه (۱) تامین شوند:

$$\begin{aligned} 0.5b_{bf} &\leq a \leq 0.75b_{bf} \\ 0.65d &\leq b \leq 0.85d \\ 0.1b_{bf} &\leq c \leq 0.25b_{bf} \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، b_{bf} عرض بال تیر و d ارتفاع کل مقطع تیرمی باشد. مشخصات IPE300 در جدول ۱ نشان داده شده است.

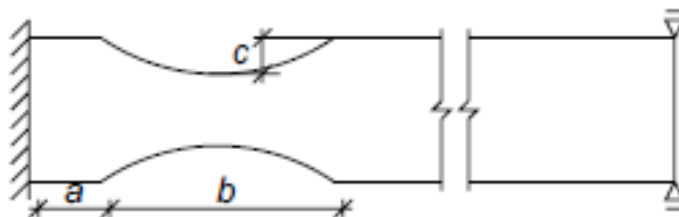
با توجه به جدول ۱، بازه مجاز مقادیر کاهش مقطع تیر IPE300 مطابق رابطه (۲) برابر است با:

$$\begin{aligned} 75mm &\leq a \leq 112.5mm \\ 195mm &\leq b \leq 255mm \\ 15mm &\leq c \leq 37.5mm \end{aligned} \quad (2)$$

در شکل ۵ (الف و ب) منحنی لنگر-دوران نمونه‌ی مرجع و مدل اجزا محدودی نشان داده شده است. در این شکل، محور افقی نشان دهنده دوران انتهای تیر نسبت به انتهای ثابت و محور قائم نشان دهنده‌ی نسبت لنگر انتهای تیر به لنگر پلاستیک مقطع تیر می‌باشد. مطابق شکل ۵، مدل اجزا محدودی با دقت بسیار مناسبی قادر به شبیه‌سازی رفتار اتصال RBS بوده و دارای دقت بالایی در تخمین مقاومت بیشینه و افت مقاومت اتصال در چرخه‌های متعدد می‌باشد. مقاومت بیشینه اتصال آزمایش شده، در چرخه‌ی اول بارگذاری بوده و برابر با ۰/۹۸۰ برابر لنگر پلاستیک تیر می‌باشد. در اتصال مدل اجزا محدودی این مقاومت برابر با ۱/۰۲۳ برابر لنگر پلاستیک به دست آمده است، که نشان دهنده خطای ۴/۴ درصدی در تخمین مقاومت بیشینه اتصال می‌باشد. مقاومت نهایی اتصال در آزمایش نیز برابر با ۰/۵۳۹ برابر لنگر پلاستیک می‌باشد که این مقاومت در مدل اجزا محدودی برابر با ۰/۵۴۵ برابر لنگر پلاستیک تیر می‌باشد، که نشان دهنده خطای ۱/۱ درصدی مدل اجزا محدودی می‌باشد.

۲-۲-۲ مدل‌سازی نمونه‌های مورد مطالعه

در این تحقیق، ابتدا مدل اجزا محدودی مورد استفاده در مدل‌سازی رفتار اتصالات RBS مورد صحت‌سنجی قرار گرفته و دقت آن به اثبات رسید. با



شکل ۶. مشخصات مقطع کاهش یافته در اتصال RBS

Fig. 6. The specifications of reduced beam in RBS connection.

جدول ۱. مشخصات مدل مورد بررسی

Table 1. The specifications of studied model.

۳۰۰	ارتفاع کل (mm)
۱۵۰	عرض بال (mm)
۱۰/۷	ضخامت بال (mm)
۷/۱	ضخامت جان (mm)
۶۲۸۰۰۰	اساس مقطع پلاستیک (mm ³)

چرخه بارگذاری رفت و برگشتی، مشابه چرخه مورد استفاده در مدل مرجع در نظر گرفته شده است. مشخصات نمونه‌های در نظر گرفته شده برای مطالعه پارامتری در جدول ۲ نشان داده شده است.

۳- یافته‌های تحقیق

۳-۱- تأثیر سخت کننده‌های قائم

استفاده از سخت کننده‌های قائم در سه حالت مورد بررسی قرار گرفت. این سه حالت شامل استفاده از یک سخت کننده در وسط ناحیه کاهش مقطع، دو سخت کننده در ابتدا و انتهای ناحیه اتصال و سه سخت کننده در ابتدا، انتها و وسط ناحیه کاهش مقطع می‌باشد. نحوه نام‌گذاری و مشخصات سخت کننده‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

در شکل ۷، مقاومت نهایی اتصالات تقویت شده با استفاده از سخت کننده‌های قائم با مقاومت نهایی اتصال بدون تقویت، در پایان هر چرخه بارگذاری مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، استفاده از سه

در نتیجه در مدل‌های اجزا محدودی مورد بررسی، مشخصات مقطع کاهش یافته مطابق رابطه (۳) می‌باشد:

$$\begin{aligned} a &= 80\text{mm} \\ b &= 200\text{mm} \\ c &= 35\text{mm} \end{aligned} \quad (3)$$

مطابق بند ۱۰-۳-۱۳-۲ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۱۶]، در اتصال RBS در فاصله $d/5$ از انتهای مقطع کاهش یافته، باید تکیه‌گاه جانبی تعبیه گردد، که در مدل‌های مورد بررسی این بند نیز لحاظ شده است. فولاد مصرفی برای تیر و سخت-کننده‌ها نیز از نوع ST37 با مقاومت تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۲۱۰۰۰۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون $0/3$ فرض شده است. علاوه بر این، در مدل‌هایی که هدف بررسی تأثیر جنس سخت کننده‌ها در رفتار اتصال می‌باشد، از فولاد ST52 با مقاومت تسلیم ۳۶۰ مگاپاسکال، برای سخت کننده‌ها استفاده شده است.

جدول ۲. مشخصات مدل‌های عددی مورد مطالعه

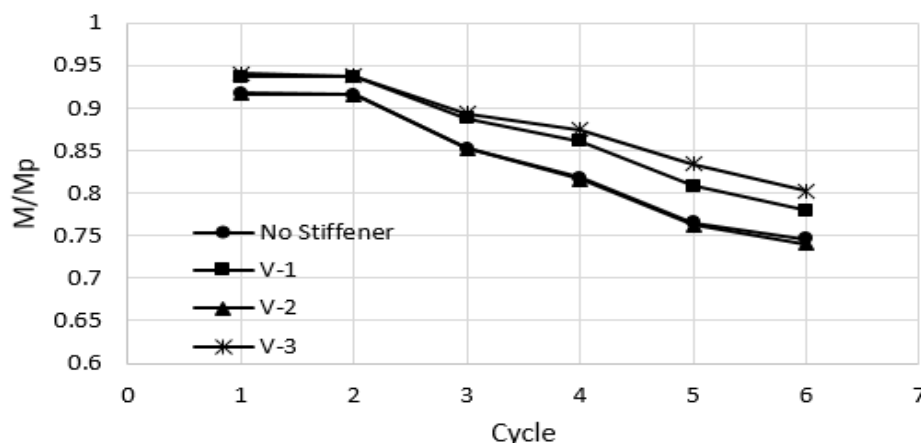
Table 2. The specifications of studied numerical models.

نام نمونه	تعداد سخت کننده افقی	تعداد سخت کننده قائم	ضخامت سخت کننده (mm)	توضیحات
No Stiffener	---	---	---	نمونه مرجع (استاندارد) بدون سخت کننده
V-1	---	۱	۸	۱ سخت کننده قائم به عرض ۴۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر
V-2	---	۲	۸	۲ سخت کننده قائم به عرض ۷۵ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر
V-3	---	۳	۸	۳ سخت کننده قائم به عرض ۷۵ و ۴۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر
H-1	۱	---	۸	۱ سخت کننده افقی به عرض ۷۵ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر
H-2	۲	---	۸	۲ سخت کننده افقی به عرض ۷۵ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر
H-3	۳	---	۸	۳ سخت کننده افقی به عرض ۷۵ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر
V1+H1	۱	۱	۸	۱ سخت کننده قائم به عرض ۴۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و ۱ سخت کننده افقی به عرض ۷۵ و طول ۲۰۰ میلی‌متر
V2+H1	۱	۲	۸	۲ سخت کننده قائم به عرض ۷۵ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و ۱ سخت کننده افقی به عرض ۷۵ و طول ۲۰۰ میلی‌متر
V3+H1	۱	۳	۸	۳ سخت کننده قائم به عرض ۷۵ و ۴۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر و ۱ سخت کننده افقی به عرض ۷۵ و طول ۲۰۰ میلی‌متر
H2+V1	۲	۱	۸	۱ سخت کننده قائم به عرض ۴۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و ۲ سخت کننده افقی به عرض ۷۵ و طول ۲۰۰ میلی‌متر
H2+V2	۲	۲	۸	۲ سخت کننده قائم به عرض ۷۵ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و ۲ سخت کننده افقی به عرض ۷۵ و طول ۲۰۰ میلی‌متر
S-1	۲	۲	۸	۲ سخت کننده قائم به عرض ۴۰ و ارتفاع ۲۲۵ میلی‌متر و ۲ سخت کننده افقی به عرض ۴۰ و طول ۱۵۰ میلی‌متر
S-2	۳	۲	۸	۳ سخت کننده قائم به عرض ۷۵ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و ۲ سخت کننده افقی به عرض ۷۵ و طول ۲۰۰ میلی‌متر
V-3-ST52	---	۳	۸	۳ سخت کننده قائم به عرض ۷۵ و ۴۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و فولاد از جنس ST52
H-3-ST52	۳	---	۸	۳ سخت کننده افقی به عرض ۷۵ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر و فولاد از جنس ST52
S-1-ST52	۲	۲	۸	۲ سخت کننده قائم به عرض ۴۰ و ارتفاع ۲۲۵ میلی‌متر و ۲ سخت کننده افقی به عرض ۴۰ و طول ۱۵۰ میلی‌متر و فولاد از جنس ST52

جدول ۳. مشخصات مدل‌های دارای سخت کننده قائم

Table 3. The specifications of models with vertical stiffener.

ارتفاع سخت کننده (mm)	عرض سخت کننده (mm)	ضخامت سخت کننده (mm)	روش تقویت	نام نمونه
۳۰۰	۴۰	۸	یک سخت کننده قائم در وسط	V-1
۳۰۰	۷۵	۸	دو سخت کننده قائم در ابتدا و انتها	V-2
۳۰۰	در ابتدا و انتها: ۷۵ در وسط: ۴۰	۸	دو سخت کننده قائم در ابتدا و انتها و یک سخت کننده قائم در وسط	V-3



شکل ۷. مقایسه‌ی مقاومت نهایی در هر چرخه‌ی بارگذاری در اتصالات RBS تقویت شده با سخت کننده قائم

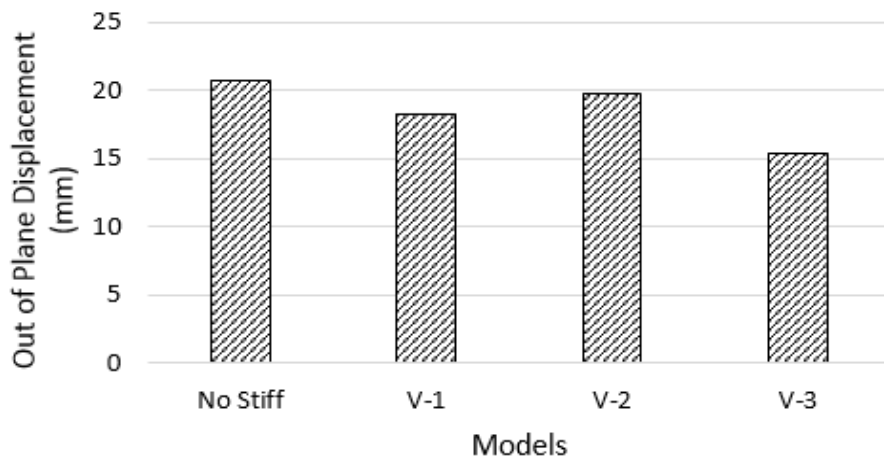
Fig. 7. Comparison of final strength in each load cycle in RBS connections reinforced with vertical stiffener.

خارج از صفحه جان تیر در محل کاهش مقطع، که نشان دهنده کماتش موضعی جان تیر در اتصال RBS می‌باشد، نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با وجود تأثیر مثبت سخت کننده‌ها در کاهش تغییر شکل‌های خارج از صفحه جان تیر، اما مقدار این تغییر شکل‌ها، زیاد می‌باشد، که نشان دهنده کماتش جان تیر در محل اتصال و در نتیجه زوال مقاومت اتصال می‌باشد.

مطابق شکل ۹، کانتور تغییر شکل برای اتصال RBS با تعداد سخت کننده‌ی مختلف قائم ارائه شده است. به عنوان نمونه برای تقویت اتصال با

سخت کننده قائم بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت نهایی اتصال داشته و استفاده از دو سخت کننده در ابتدا و انتهای ناحیه کاهش مقطع، تأثیری در افزایش مقاومت اتصال ندارد. در پایان چرخه‌ی اول بارگذاری، مقاومت نهایی اتصالات V-1، V-2، و V-3 در مقایسه با اتصال بدون تقویت به ترتیب ۲/۲، ۰/۱، و ۲/۷ درصد افزایش یافته است. در پایان چرخه‌ی آخر بارگذاری، مقاومت نهایی اتصالات V-1 و V-3 در مقایسه با اتصال بدون تقویت به ترتیب ۴/۵ و ۷/۶ درصد افزایش یافته است.

در شکل ۸، تأثیر سخت کننده‌های قائم در کاهش بیشینه تغییر شکل



شکل ۸. بیشینه تغییر شکل خارج از صفحه جان مدل RBS در محل کاهش مقطع در اتصالات دارای سخت کننده قائم

Fig. 8. Maximum out-of-plane deformation of RBS model at section reduction in connections with vertical stiffener.

دهنده عرض بال تیر و محور قائم نشان دهنده نسبت تنش فون میسر به تنش تسلیم فولاد تیر می‌باشد. مطابق این شکل‌ها، با وجود تقویت اتصال RBS با استفاده از سخت کننده‌های قائم، توزیع تنش در بال تیر، به ویژه در محل کاهش مقطع، نسبتاً یکنواخت بوده و این سخت کننده‌ها سبب تمرکز تنش در ناحیه کاهش مقطع نمی‌شوند. مطابق شکل ۱۱، در مقایسه با اتصال بدون تقویت، تنش فون میسر بیشینه در بال تحتانی تیر در انتهای ثابت در مدل‌های V-۱ و V-۳ به ترتیب ۳۰ و ۱۹ درصد افزایش یافته و در مدل V-۲، ۱۷ درصد کاهش یافته است. مطابق شکل ۱۲، در مقایسه با اتصال بدون تقویت، تنش فون میسر بیشینه در بال فوقانی تیر در انتهای ثابت در مدل‌های V-۱ و V-۳ به ترتیب ۳ و ۴ درصد افزایش یافته و در مدل V-۲، ۱/۵ درصد کاهش یافته است. مطابق شکل ۱۳، در مقایسه با اتصال بدون تقویت، تنش فون میسر بیشینه در بال تحتانی تیر در محل کاهش مقطع در مدل‌های V-۱، V-۲ و V-۳ به ترتیب ۷، ۳ و ۹ درصد افزایش یافته است. مطابق شکل ۱۴، در مقایسه با اتصال بدون تقویت، تنش فون میسر بیشینه در بال فوقانی تیر در محل کاهش مقطع در مدل‌های V-۱، V-۲ و V-۳ به ترتیب ۵، ۳ و ۶ درصد افزایش یافته است.

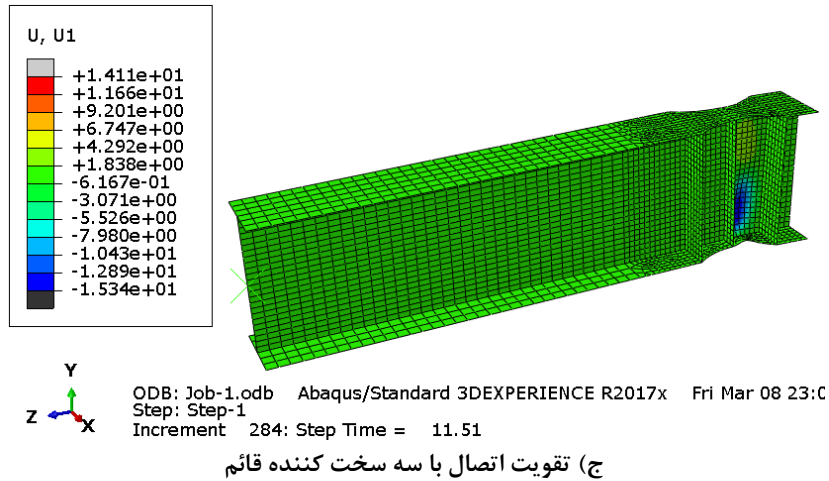
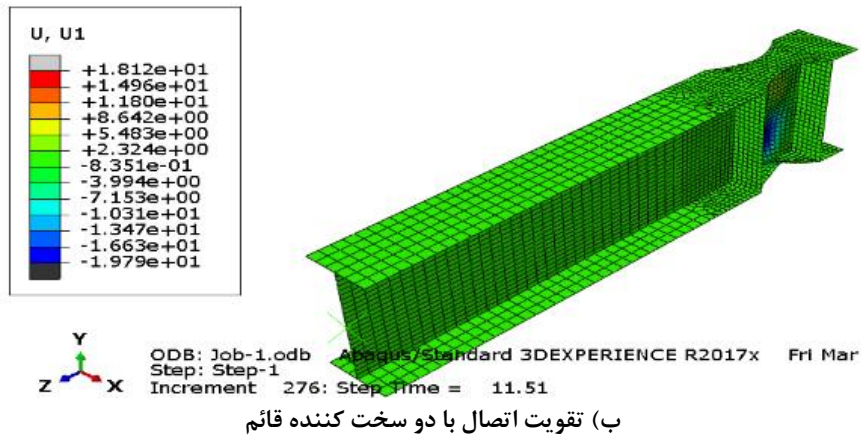
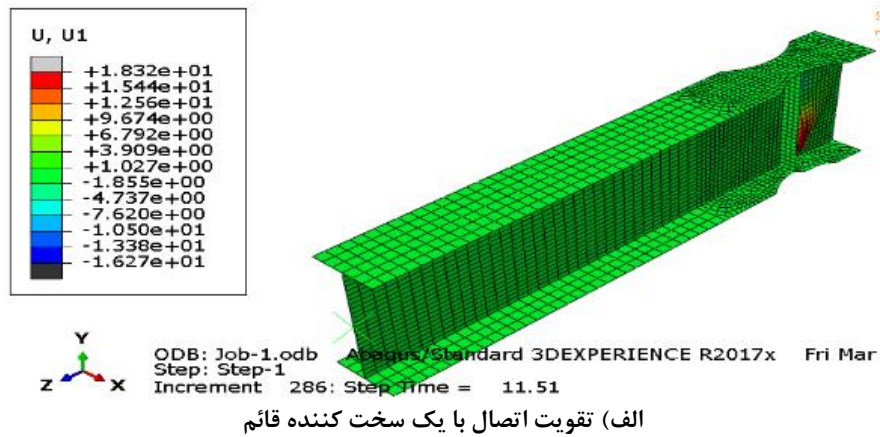
۳-۲- تأثیر سخت کننده‌های افقی

استفاده از سخت کننده‌های افقی در سه حالت مورد بررسی قرار گرفت. این سه حالت شامل استفاده از یک سخت کننده در وسط ارتفاع تیر، دو

سه سخت کننده قائم، در پایان چرخه‌ی ششم بارگذاری جان تیر در محل کاهش مقطع تیر دچار کماتش موضعی شده و مقدار تغییر شکل خارج از صفحه جان تیر در محل کاهش مقطع برابر با ۱۵/۳۴ میلی‌متر می‌باشد.

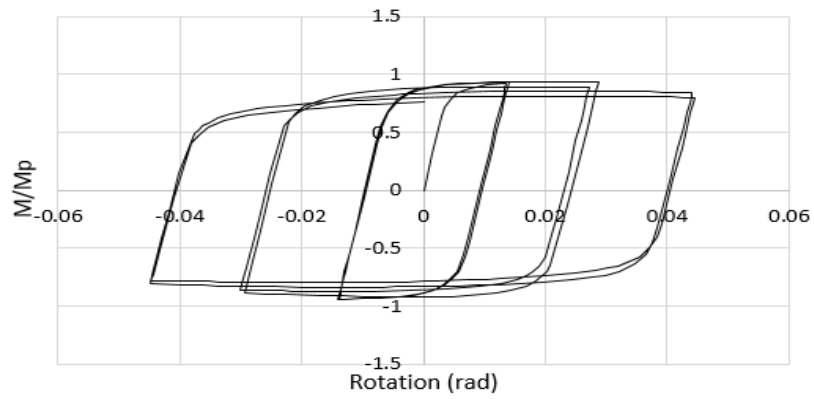
در شکل ۱۰، منحنی هیستریزیس لنگر-دوران انتهایی تیر RBS با یک، دو و سه ورق سخت کننده قائم نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، مقاومت خمشی اتصال با افزایش چرخه‌های بارگذاری کاهش می‌یابد. در شکل ۱۰ (الف)، مقاومت خمشی اتصال در پایان هر چرخه‌ی بارگذاری نشان داده شده است. در پایان چرخه‌ی اول بارگذاری مقاومت خمشی اتصال برابر با ۰/۹۳۷ مقاومت پلاستیک مقطع تیر می‌باشد. اما در پایان چرخه‌ی ششم بارگذاری مقاومت خمشی اتصال کاهش یافته و به ۰/۷۸۰ مقاومت پلاستیک تیر می‌رسد، که نشان دهنده کاهش ۱۶/۷ درصدی مقاومت خمشی اتصال می‌باشد. در شکل ۱۰-ب مقاومت خمشی اتصال در پایان چرخه‌ی ششم بارگذاری مقاومت خمشی اتصال کاهش یافته و از ۰/۹۱۷ به ۰/۷۴۰ مقاومت پلاستیک تیر می‌رسد، که نشان دهنده کاهش ۱۹/۳ درصدی مقاومت خمشی اتصال می‌باشد. در شکل ۱۰-ج مقاومت خمشی اتصال ۱۴/۶ درصد کاهش یافته است.

در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴، نمودار توزیع تنش‌های فون میسر در امتداد بال‌های فوقانی و تحتانی تیر، در انتهای ثابت و وسط ناحیه کاهش مقطع، در پایان چرخه ششم بارگذاری نشان داده شده است. در این حالت، بال فوقانی در کشش و بال تحتانی در فشار می‌باشد. در این نمودارها محور افقی نشان

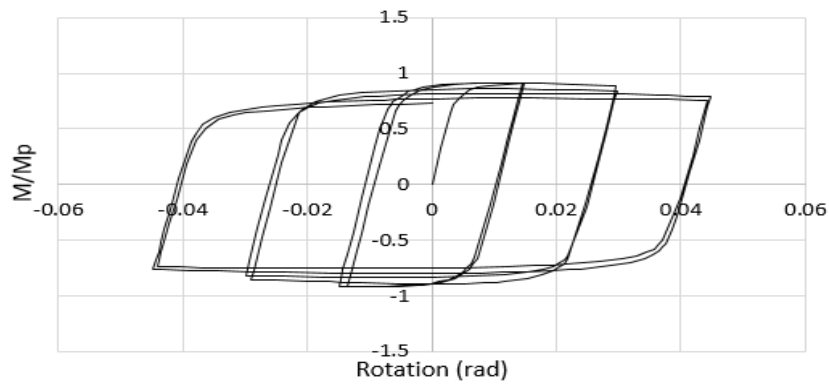


شکل ۹. تغییر شکل خارج صفحه اتصال در چرخه ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی ۰/۰۴۵-

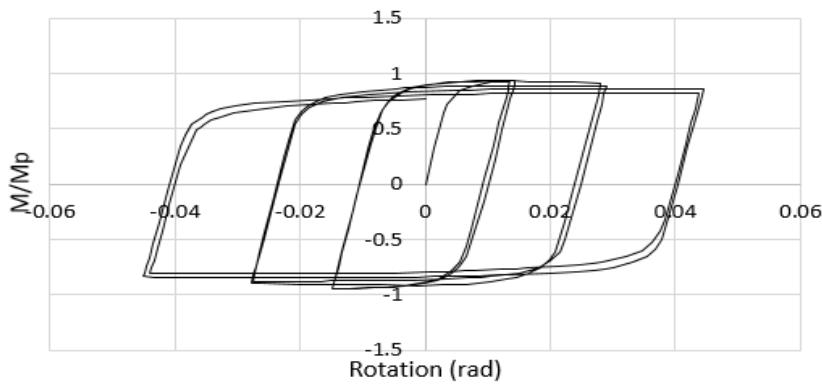
Fig. 9. Out-of-plane deformation of the connection in the sixth loading cycle in the relative displacement of -0-045. A) Strengthen the connection with one vertical stiffener. B) Strengthen the connection with two vertical stiffeners. C) Strengthen the connection with three vertical stiffeners.



الف) تقویت اتصال با یک سخت کننده قائم



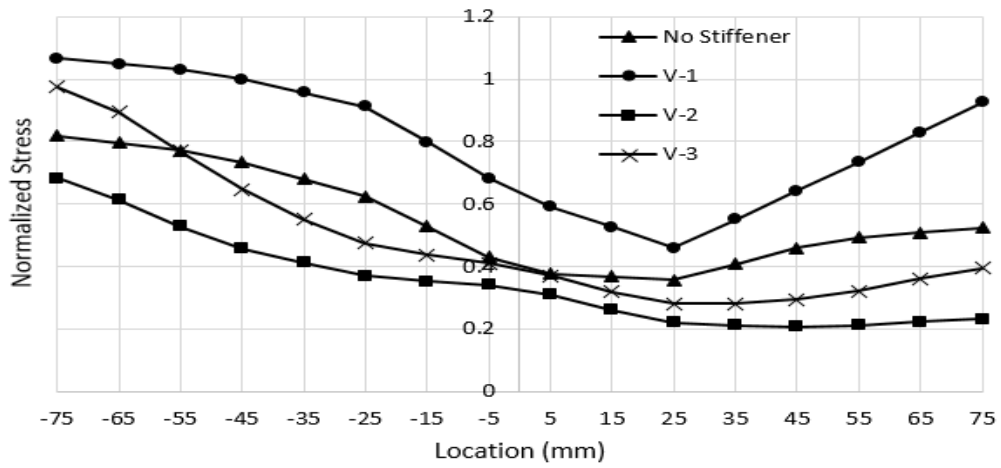
ب) تقویت اتصال با دو سخت کننده قائم



ج) تقویت اتصال با سه سخت کننده قائم

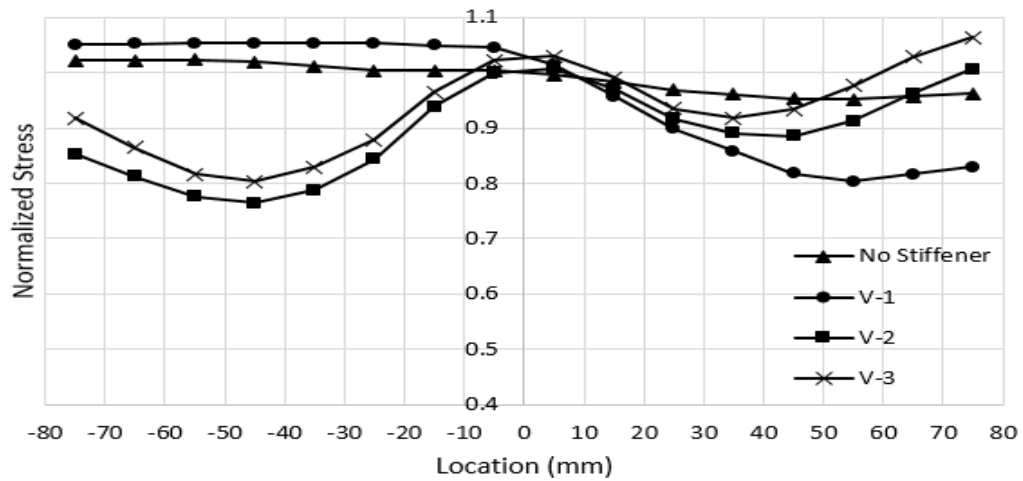
شکل ۱۰. منحنی هیستریزیس لنگر-دوران انتهای تیر در اتصال RBS

Fig. 10. Hysteresis curve of moment-rotation of-end-of-beam at RBS connection. A) Strengthen the connection with one vertical stiffener. B) Strengthen the connection with two vertical stiffener. C) Strengthen the connection with three vertical stiffener.



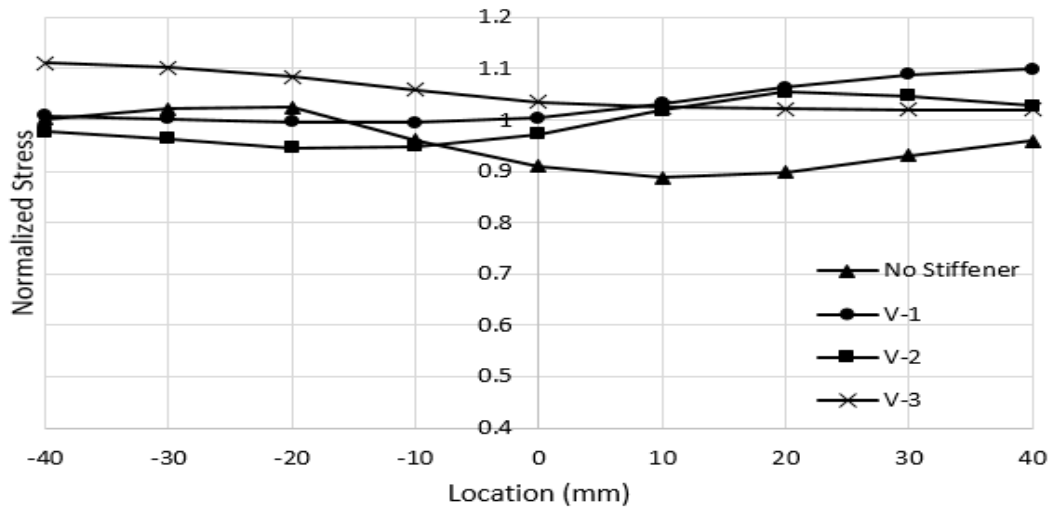
شکل ۱۱. توزیع تنش در چرخه‌ی ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی -0.045 ، در بال تحتانی تیر در انتهای ثابت

Fig. 11. Stress distribution in the sixth loading cycle at relative displacement of -0.045 , in the lower wing of the beam at the fixed end.



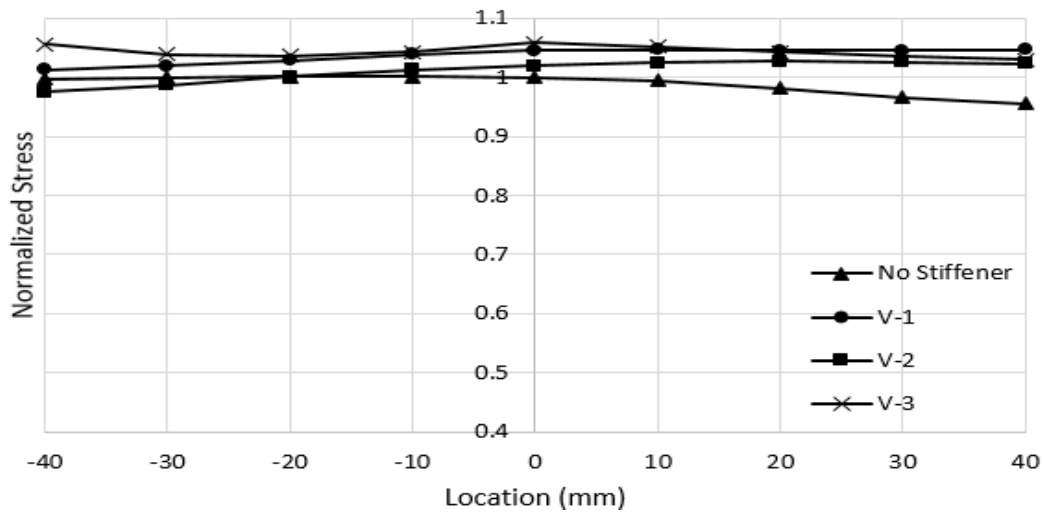
شکل ۱۲. توزیع تنش در چرخه‌ی ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی -0.045 ، در بال فوقانی تیر در انتهای ثابت

Fig. 12. Stress distribution in the sixth loading cycle at relative displacement of -0.045 , in the upper wing of the beam at the fixed end.



شکل ۱۳. توزیع تنش در چرخه‌ی ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی -0.045 ، در بال تحتانی تیر در وسط ناحیه کاهش مقطع

Fig. 13. Stress distribution in the sixth loading cycle at relative displacement of -0.045 , in the lower wing of the beam at the middle of reduced section area.



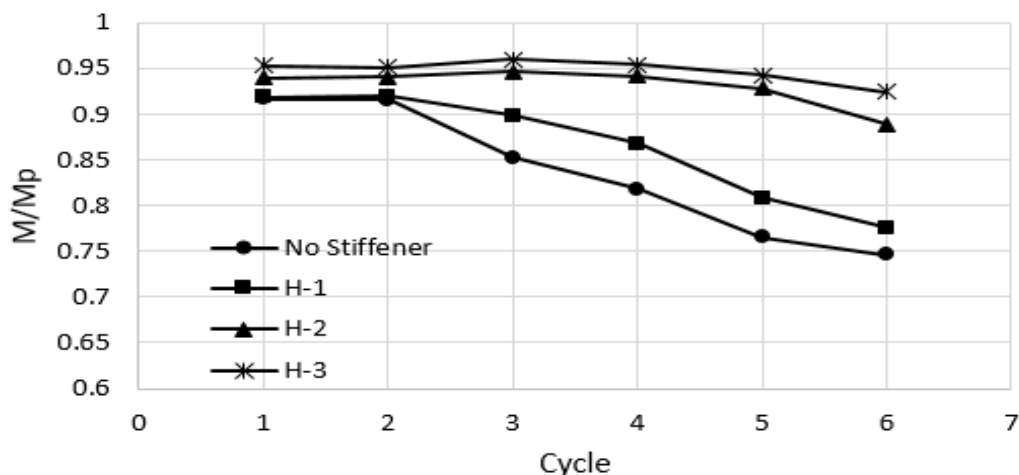
شکل ۱۴. توزیع تنش در چرخه‌ی ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی -0.045 ، در بال فوقانی تیر در وسط ناحیه کاهش مقطع

Fig. 14. Stress distribution in the sixth loading cycle at relative displacement of -0.045 , in the upper wing of the beam at the middle of reduced section area.

جدول ۴. مشخصات مدل‌های دارای سخت کننده افقی

Table 4. The specifications of models with horizontal stiffener.

نام نمونه	روش تقویت	ضخامت سخت کننده (mm)	عرض سخت کننده (mm)	طول سخت کننده (mm)
H-1	یک سخت کننده در وسط ارتفاع تیر	۸	۷۵	۲۰۰
H-2	دو سخت کننده به فواصل دو سوم ارتفاع تیر	۸	۷۵	۲۰۰
H-3	سه سخت کننده به فواصل سه چهارم ارتفاع تیر	۸	۷۵	۲۰۰



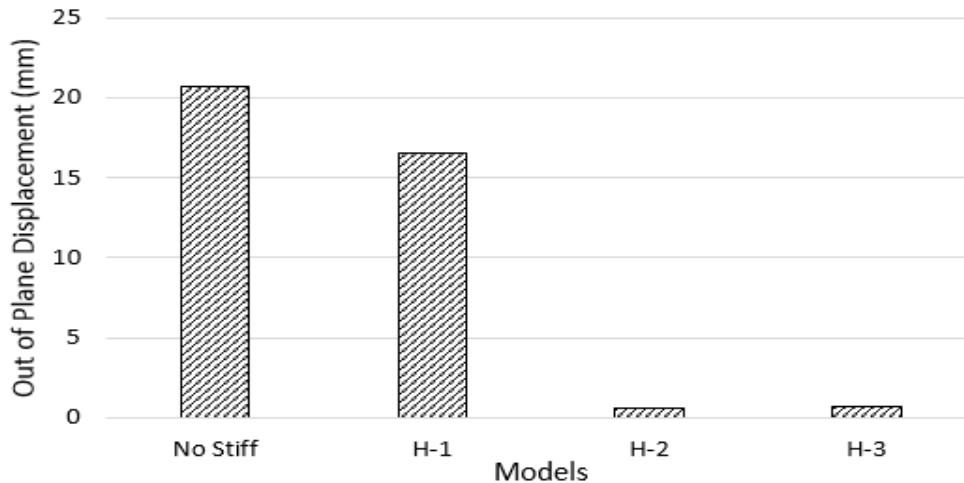
شکل ۱۵. مقایسه‌ی مقاومت نهایی در هر چرخه‌ی بارگذاری در اتصالات تقویت شده با سخت کننده افقی

Fig. 15. Comparison of final strength in each load cycle in RBS connections reinforced with horizontal stiffener

داشته و استفاده از یک سخت کننده در وسط ارتفاع، کمترین تأثیر را در افزایش مقاومت اتصال دارد. در پایان چرخه‌ی اول بارگذاری، مقاومت نهایی اتصالات H-1، H-2 و H-3 در مقایسه با اتصال بدون تقویت به ترتیب ۰/۳، ۲/۶ و ۴ درصد افزایش یافته است. در پایان چرخه‌ی آخر بارگذاری، مقاومت نهایی اتصالات H-1، H-2 و H-3 در مقایسه با اتصال بدون تقویت به ترتیب ۴/۱، ۱۹/۲ و ۲۴ درصد افزایش یافته است. علاوه بر افزایش مقاومت اتصالات تقویت شده با استفاده از سخت کننده‌های افقی،

سخت کننده در ارتفاع تیر و سه سخت کننده در ارتفاع تیر، با فواصل مساوی و در طول ناحیه کاهش مقطع می‌باشد. نحوه نام‌گذاری و مشخصات سخت کننده‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است.

در شکل ۱۵، مقاومت نهایی اتصالات تقویت شده با استفاده از سخت کننده‌های افقی با مقاومت نهایی اتصال بدون تقویت، در پایان هر چرخه بارگذاری مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، استفاده از سه سخت کننده افقی بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت نهایی اتصال



شکل ۱۶. بیشینه تغییر شکل خارج از صفحه جان تیر RBS در محل کاهش مقطع در اتصالات دارای سخت کننده افقی

Fig. 16. Maximum out-of-plane deformation of RBS model at section reduction in connections with horizontal stiffener.

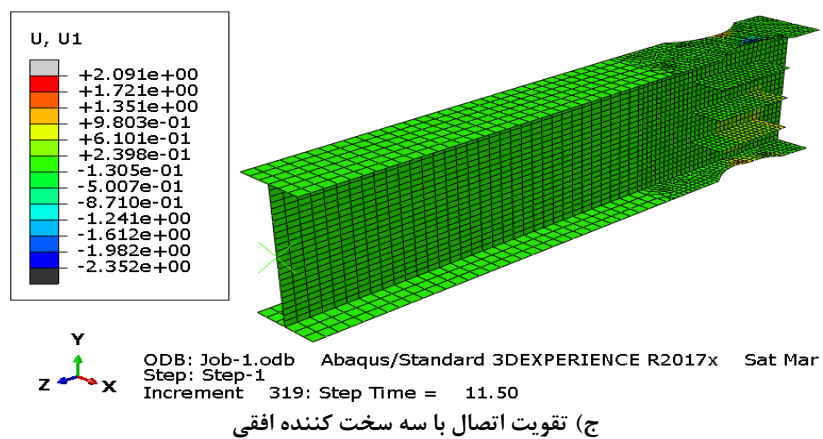
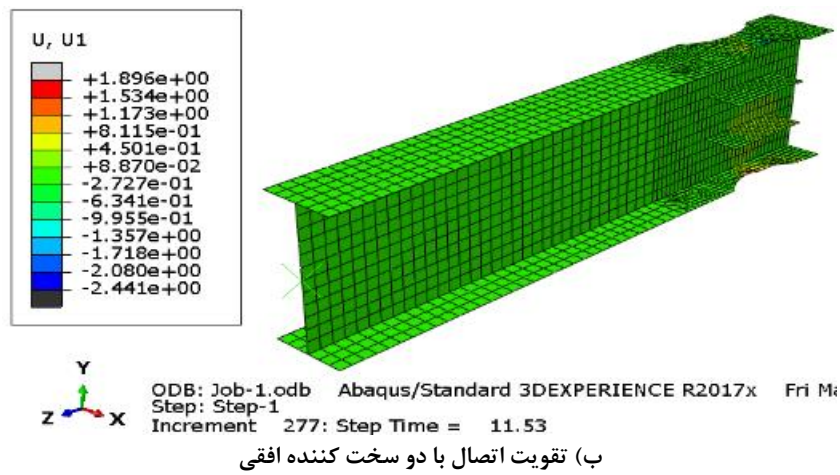
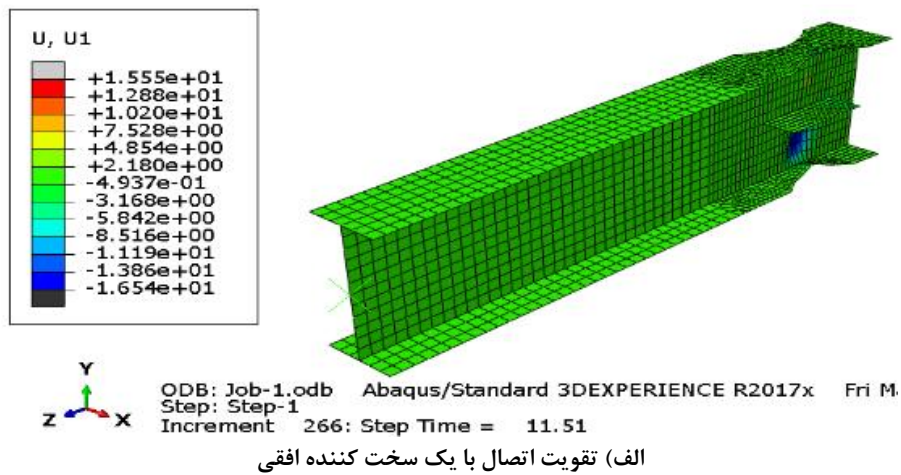
بارگذاری نشان داده شده است. در پایان چرخه‌ی اول بارگذاری مقاومت خمشی اتصال برابر با ۰/۹۱۹ مقاومت پلاستیک مقطع تیر می‌باشد. اما در پایان چرخه‌ی ششم بارگذاری مقاومت خمشی اتصال کاهش یافته و به ۰/۷۷۶ مقاومت پلاستیک تیر می‌رسد، که نشان دهنده کاهش ۱۵/۵ درصدی مقاومت خمشی اتصال می‌باشد. در شکل ۱۸-ب مقاومت خمشی اتصال ۵/۴ درصد کاهش یافته است. در شکل ۱۸-ج مقاومت خمشی اتصال به ۲/۹ درصد کاهش یافته است.

در شکل‌های ۱۹ تا ۲۲، نمودار توزیع تنش‌های فون میسر در امتداد بال‌های فوقانی و تحتانی تیر، در انتهای ثابت و وسط ناحیه کاهش مقطع، در پایان چرخه‌ی ششم بارگذاری نشان داده شده است. در این حالت، بال فوقانی در کشش و بال تحتانی در فشار می‌باشد. در این نمودارها محور افقی نشان دهنده عرض بال تیر و محور قائم نشان دهنده نسبت تنش فون میسر به تنش تسلیم فولاد تیر می‌باشد. مطابق این شکل‌ها، با وجود تقویت اتصال RBS با استفاده از سخت کننده‌های افقی، توزیع تنش در بال تیر، به ویژه در محل کاهش مقطع، نسبتاً یکنواخت بوده و این سخت کننده‌ها سبب تمرکز تنش در ناحیه کاهش مقطع نمی‌شوند. مطابق شکل ۱۹، در مقایسه با اتصال بدون تقویت، تنش فون میسر بیشینه در بال تحتانی تیر در انتهای ثابت در مدل‌های H-2 و H-3 به ترتیب ۲۱ و ۳۴ درصد افزایش یافته و در مدل H-1، ۲۰ درصد کاهش یافته است. مطابق شکل ۲۰، در مقایسه با

در اتصالات تقویت شده با استفاده از دو و سه سخت کننده، زوال مقاومت اتصال در اثر چرخه‌های بارگذاری نیز تا حد بسیار زیادی کاهش یافته است. در شکل ۱۶، تأثیر سخت کننده‌های افقی در کاهش بیشینه تغییر شکل خارج از صفحه جان تیر در محل کاهش مقطع، که نشان دهنده کماتش موضعی جان تیر در اتصال RBS می‌باشد، نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در حالت استفاده از دو و سه سخت کننده افقی در محل کاهش مقطع، بیشینه تغییر شکل خارج از صفحه جان تیر کاهش یافته و تقریباً به صفر می‌رسد، که نتیجه آن از بین رفتن مشکل کماتش موضعی جان و زوال مقاومت اتصال در چرخه‌های بارگذاری متناوب می‌باشد.

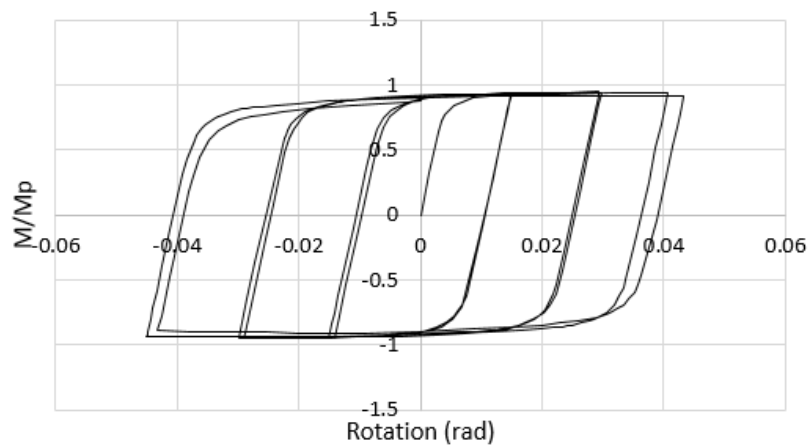
مطابق شکل ۱۷، کانتور تغییر شکل برای اتصال RBS با تعداد سخت کننده‌ی مختلف افقی ارائه شده است. به عنوان نمونه برای تقویت اتصال با سه سخت کننده افقی، در پایان چرخه‌ی ششم بارگذاری جان تیر در محل کاهش مقطع تیر از کماتش موضعی جان جلوگیری شده و مقدار تغییر شکل خارج از صفحه جان تیر در محل کاهش مقطع برابر با ۰/۶۷ میلی‌متر می‌باشد.

در شکل ۱۸ منحنی هیستریزس لنگر-دوران انتهای تیر RBS با یک، دو و سه ورق سخت کننده افقی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، مقاومت خمشی اتصال با افزایش چرخه‌های بارگذاری کاهش می‌یابد. در شکل ۱۸-الف مقاومت خمشی اتصال در پایان هر چرخه

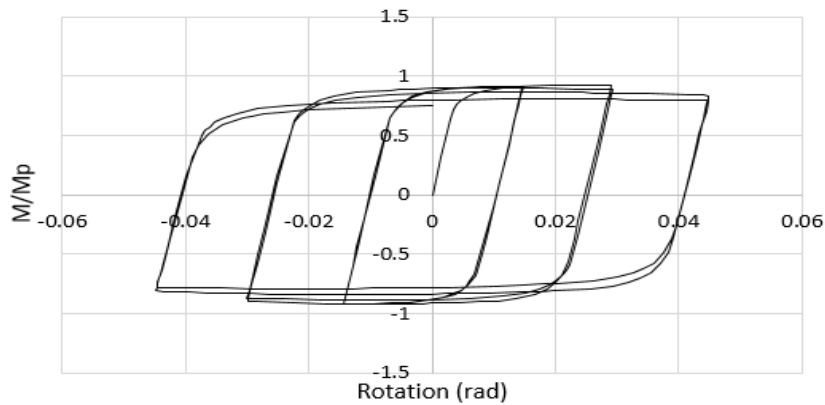


شکل ۱۷. منحنی هیستریزیس لنگر-دوران انتهای تیر در اتصال RBS

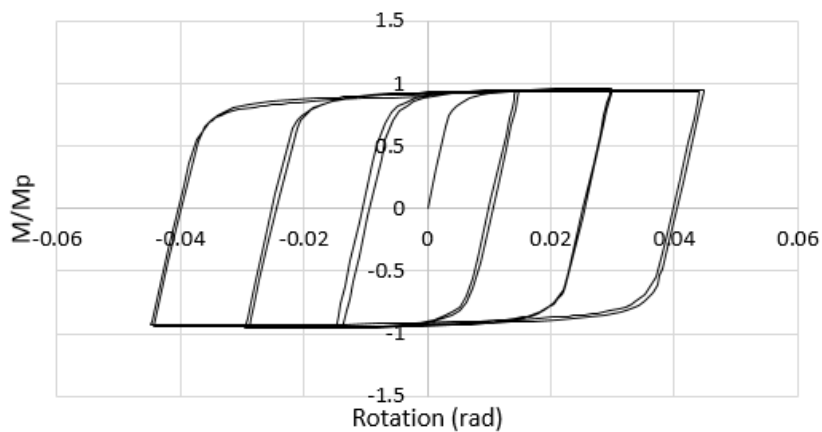
Fig. 17. Out-of-plane deformation of the connection in the sixth loading cycle in the relative displacement of -0-045. A) Strengthen the connection with one horizontal stiffener. B) Strengthen the connection with two horizontal stiffeners. C) Strengthen the connection with three horizontal stiffeners.



الف) تقویت اتصال با یک سخت کننده افقی



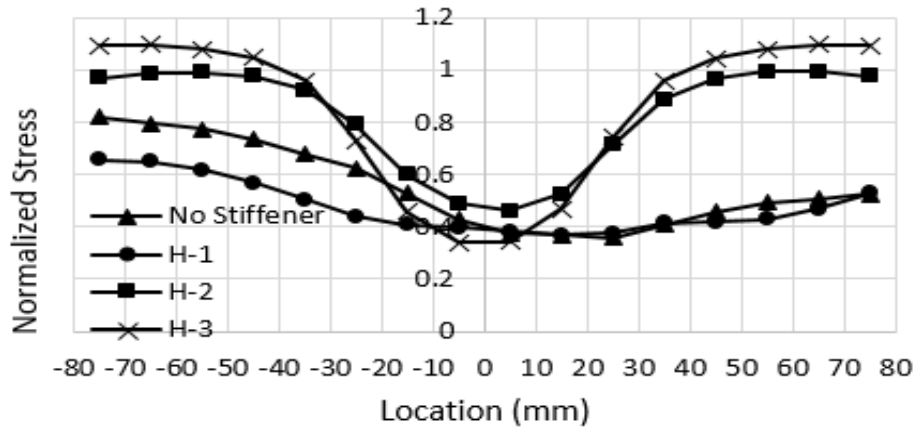
ب) تقویت اتصال با دو سخت کننده افقی



ج) تقویت اتصال با سه سخت کننده افقی

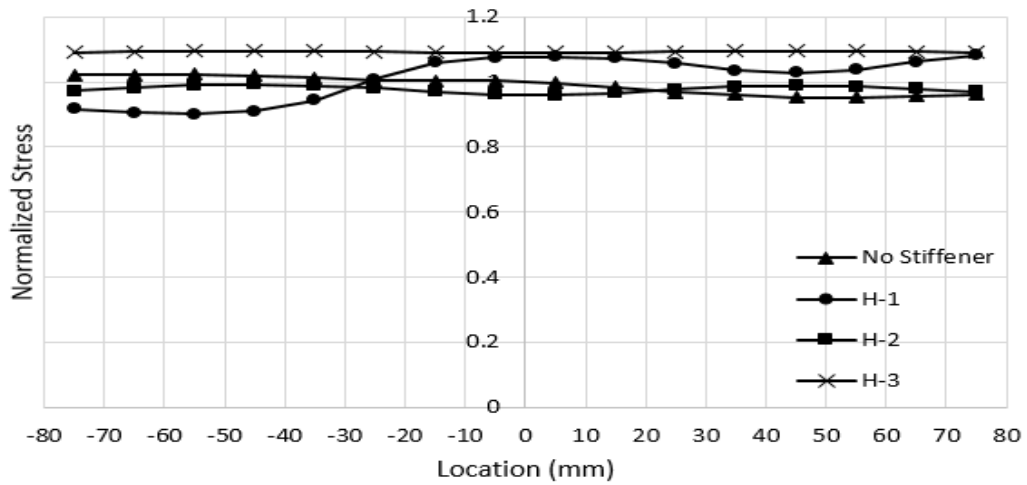
شکل ۱۸. منحنی هیستریزیس لنگر-دوران انتهای تیر در اتصال RBS

Fig. 18. Hysteresis curve of moment-rotation of end-of-beam at RBS connection. A) Strengthen the connection with one horizontal stiffener. B) Strengthen the connection with two horizontal stiffeners. C) Strengthen the connection with three horizontal stiffeners.



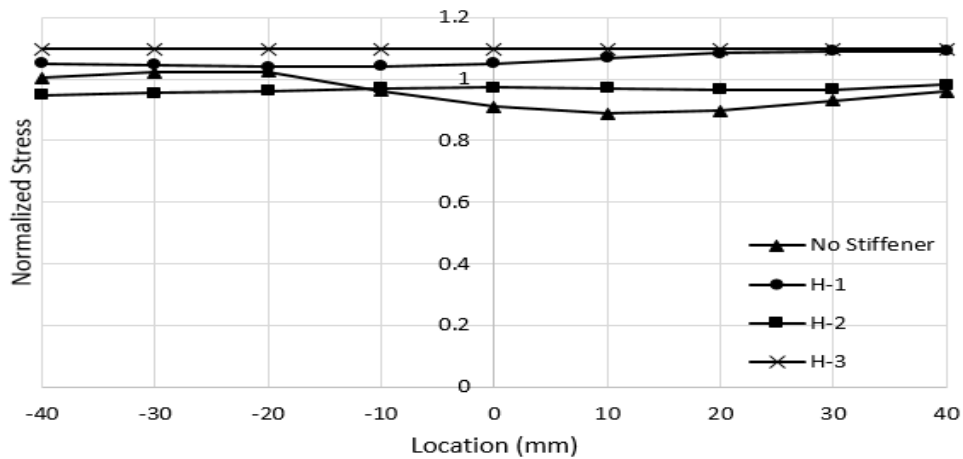
شکل ۱۹. توزیع تنش در چرخه‌ی ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی -0.045 ، در بال تحتانی تیر در انتهای ثابت

Fig. 19. Stress distribution in the sixth loading cycle at relative displacement of -0.045 , in the lower wing of the beam at the fixed end



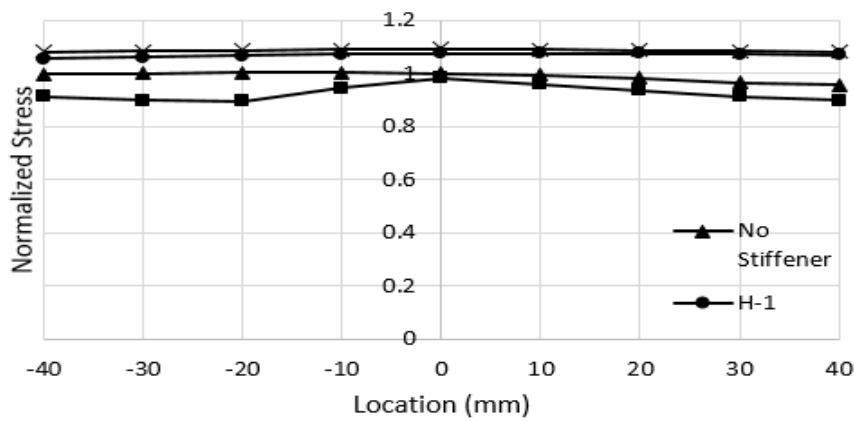
شکل ۲۰. توزیع تنش در چرخه‌ی ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی -0.045 ، در بال فوقانی تیر در انتهای ثابت

Fig. 20. Stress distribution in the sixth loading cycle at relative displacement of -0.045 , in the upper wing of the beam at the fixed end.



شکل ۲۱. توزیع تنش در چرخه‌ی ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی -0.045 ، در بال تحتانی تیر در وسط ناحیه کاهش مقطع

Fig. 21. Stress distribution in the sixth loading cycle at relative displacement of -0.045 , in the lower wing of the beam at the middle of reduced section area.



شکل ۲۲. توزیع تنش در چرخه‌ی ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی -0.045 ، در بال فوقانی تیر در وسط ناحیه کاهش مقطع

Fig. 22. Stress distribution in the sixth loading cycle at relative displacement of -0.045 , in the upper wing of the beam at the middle of reduced section area.

جدول ۵. مشخصات مدل‌های دارای سخت کننده ترکیبی

Table 5. The specifications of models with combined stiffener.

نام نمونه	روش تقویت	ضخامت سخت کننده (mm)	عرض سخت کننده (mm)	طول سخت کننده (mm)
V1+H1	یک سخت کننده قائم در وسط	۸	۴۰	۳۰۰
	یک سخت کننده افقی در وسط ارتفاع تیر	۸	۷۵	۲۰۰
V2+H1	دو سخت کننده قائم در ابتدا و انتها	۸	۷۵	۳۰۰
	یک سخت کننده افقی در وسط ارتفاع تیر	۸	۷۵	۲۰۰
V3+H1	دو سخت کننده قائم در ابتدا و انتها و یک سخت کننده قائم در وسط	۸	ابتدا و انتها: ۷۵ وسط: ۴۰	۳۰۰
	یک سخت کننده افقی در وسط ارتفاع تیر	۸	۷۵	۲۰۰
H2+V1	یک سخت کننده قائم در وسط	۸	۴۰	۳۰۰
	دو سخت کننده افقی به فواصل دو سوم ارتفاع تیر	۸	۷۵	۲۰۰
H2+V2	دو سخت کننده قائم در ابتدا و انتها	۸	۷۵	۳۰۰
	دو سخت کننده افقی به فواصل دو سوم ارتفاع تیر	۸	۷۵	۲۰۰

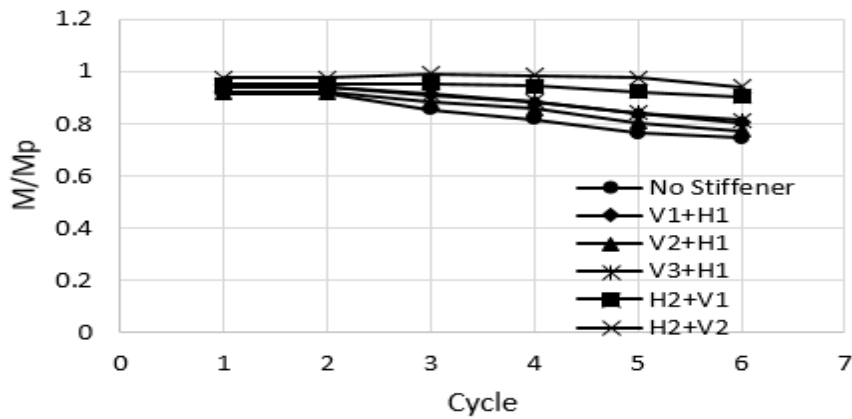
دو سخت کننده افقی در ارتفاع تیر به همراه یک سخت کننده قائم در وسط ناحیه کاهش مقطع و دو سخت کننده افقی در ارتفاع تیر به همراه دو سخت کننده قائم در ابتدا و انتهای ناحیه کاهش مقطع می‌باشد. نحوه نام‌گذاری و مشخصات سخت کننده‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است.

در شکل ۲۳، مقاومت نهایی اتصالات تقویت شده با استفاده از ترکیب سخت کننده‌های افقی و قائم با مقاومت نهایی اتصال بدون تقویت، در پایان هر چرخه بارگذاری مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، استفاده از ترکیب دو سخت کننده افقی و دو سخت کننده قائم، بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت نهایی اتصال داشته و استفاده از ترکیب دو سخت کننده قائم و یک سخت کننده افقی، کمترین تأثیر را در افزایش مقاومت اتصال دارد. در پایان چرخه اول بارگذاری، مقاومت نهایی اتصالات V1+H1، V2+H1، V3+H1، H2+V1 و H2+V2 در مقایسه با اتصال بدون تقویت به ترتیب ۲/۴، ۰/۴، ۲/۹، ۳/۶ و ۶/۲ درصد افزایش یافته است. در پایان چرخه آخر بارگذاری، مقاومت نهایی اتصالات V1+H1، V2+H1، V3+H1، H2+V1 و H2+V2 در مقایسه با اتصال بدون تقویت به ترتیب ۷/۹، ۳/۷، ۹/۱، ۲۱/۲ و ۲۶/۱ درصد افزایش یافته است. علاوه بر افزایش مقاومت اتصالات تقویت شده، در اتصالات تقویت شده با

اتصال بدون تقویت، تنش فون میسز بیشینه در بال فوقانی تیر در انتهای ثابت در مدل‌های H-1 و H-3 به ترتیب ۵/۶ و ۷ درصد افزایش یافته و در مدل H-2، ۳ درصد کاهش یافته است. مطابق شکل ۲۱، در مقایسه با اتصال بدون تقویت، تنش فون میسز بیشینه در بال تحتانی تیر در محل کاهش مقطع در مدل‌های H-1 و H-3 به ترتیب ۶/۶ و ۷/۳ درصد افزایش یافته و در مدل H-2، ۴/۲ درصد کاهش یافته است. مطابق شکل ۲۲، در مقایسه با اتصال بدون تقویت، تنش فون میسز بیشینه در بال فوقانی تیر در محل کاهش مقطع در مدل‌های H-1 و H-3 به ترتیب ۷/۴ و ۹ درصد افزایش یافته و در مدل H-2، ۲ درصد کاهش یافته است.

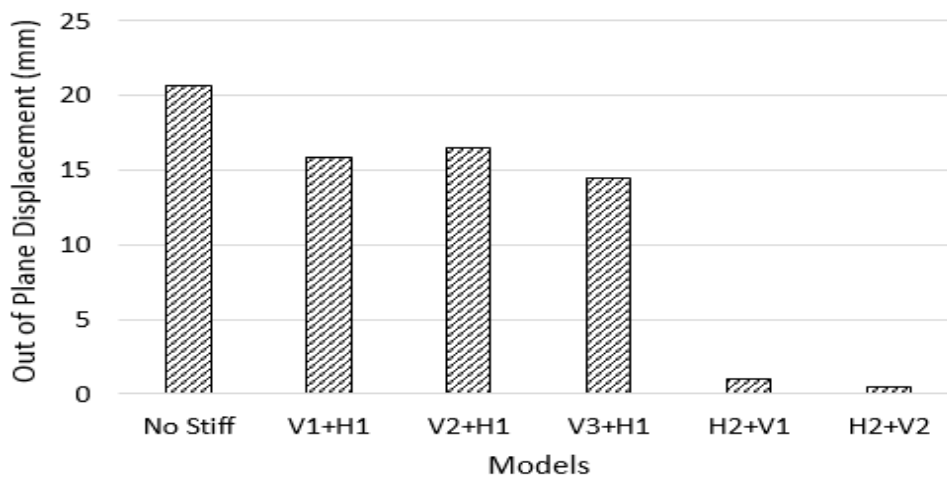
۳-۳- تأثیر ترکیب سخت کننده‌های افقی و قائم

استفاده از ترکیب سخت کننده‌های افقی و قائم در پنج حالت مورد بررسی قرار گرفت. این پنج حالت شامل استفاده از یک سخت کننده افقی در وسط ارتفاع تیر به همراه یک سخت کننده قائم در وسط ناحیه کاهش مقطع، یک سخت کننده افقی در وسط ارتفاع تیر به همراه دو سخت کننده قائم در ابتدا و انتهای ناحیه کاهش مقطع، یک سخت کننده افقی در وسط ارتفاع تیر به همراه سه سخت کننده قائم در ابتدا، انتها و وسط ناحیه کاهش مقطع،



شکل ۲۳. مقایسه‌ی مقاومت نهایی در هر چرخه‌ی بارگذاری در اتصالات تقویت شده

Fig. 23. Comparison of final strength in each load cycle in reinforced RBS connections.

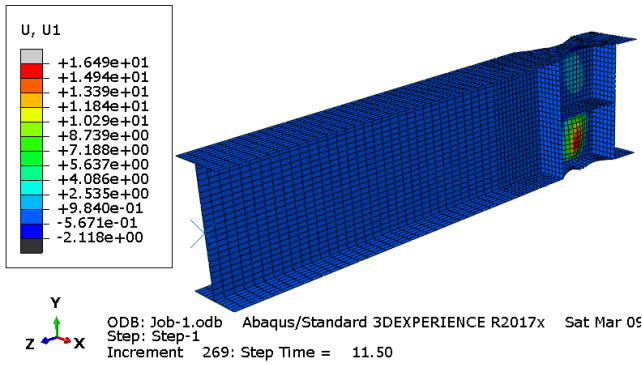


شکل ۲۴. بیشینه تغییر شکل خارج از صفحه جان تیر RBS در محل کاهش مقطع در اتصالات تقویت شده

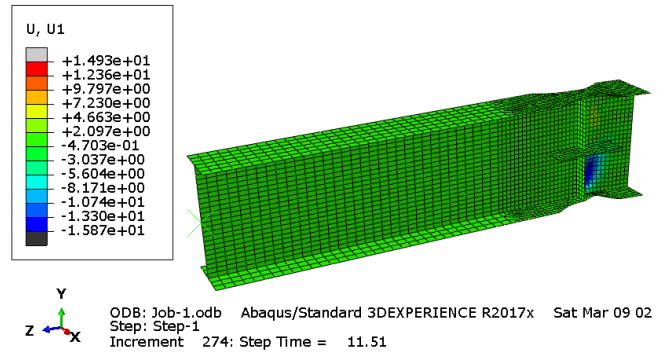
Fig. 24. Maximum out-of-plane deformation of RBS model at section reduction in reinforced connections.

جان تیر کاهش یافته و تقریباً به صفر می‌رسد، که نتیجه آن از بین رفتن مشکل کماتش موضعی جان و زوال مقاومت اتصال در چرخه‌های بارگذاری متناوب می‌باشد. مطابق شکل ۲۵، کانتور تغییر شکل برای اتصال RBS با تعداد سخت کننده‌ی ترکیبی ارائه شده است. به عنوان نمونه برای تقویت اتصال با دو سخت کننده افقی و دو سخت کننده قائم، در پایان چرخه‌ی ششم بارگذاری جان تیر در محل کاهش مقطع تیر از کماتش موضعی جان جلوگیری شده و مقدار تغییر شکل خارج از صفحه جان تیر در محل کاهش

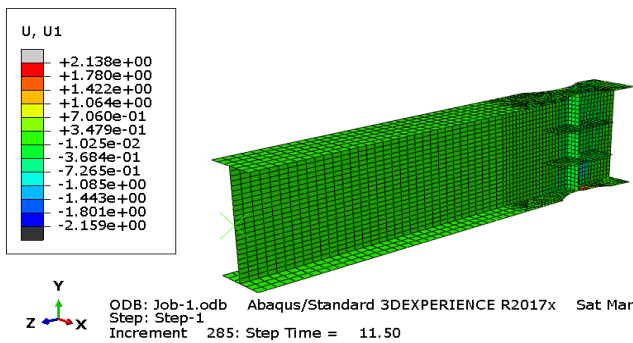
استفاده از ترکیب دو سخت کننده افقی و یک یا دو سخت کننده قائم، زوال مقاومت اتصال در اثر چرخه‌های بارگذاری نیز تا حد بسیار زیادی کاهش یافته است. در شکل ۲۴، تأثیر سخت کننده‌های ترکیبی در کاهش بیشینه تغییر شکل خارج از صفحه جان تیر در محل کاهش مقطع، که نشان دهنده کماتش موضعی جان تیر در اتصال RBS می‌باشد، نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در حالت استفاده از دو سخت کننده افقی در ترکیب با یک یا دو سخت کننده قائم، بیشینه تغییر شکل خارج از صفحه



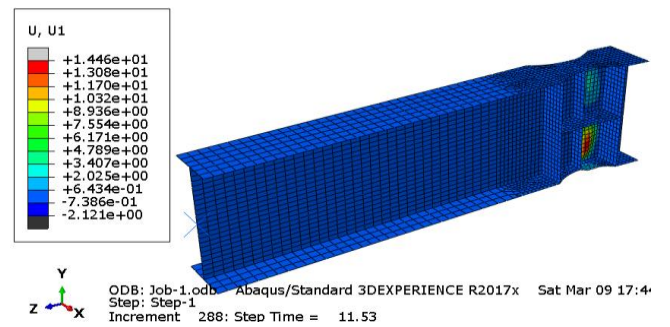
ب) تقویت اتصال با یک سخت کننده افقی و دو سخت کننده قائم



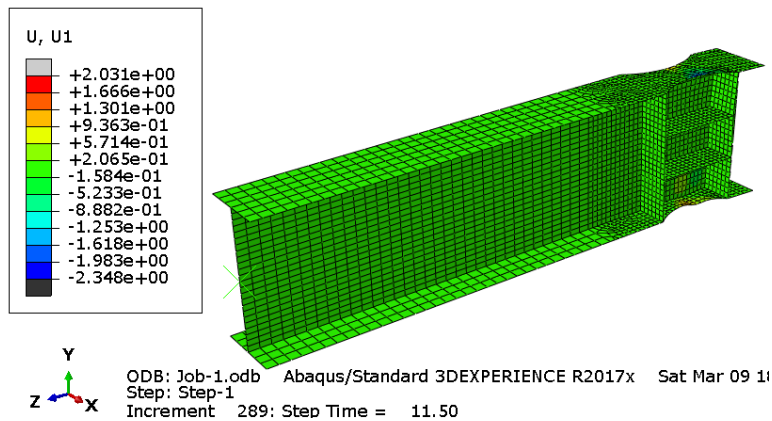
الف) تقویت اتصال با یک سخت کننده افقی و قائم



ج) تقویت اتصال با دو سخت کننده افقی و یک سخت کننده قائم



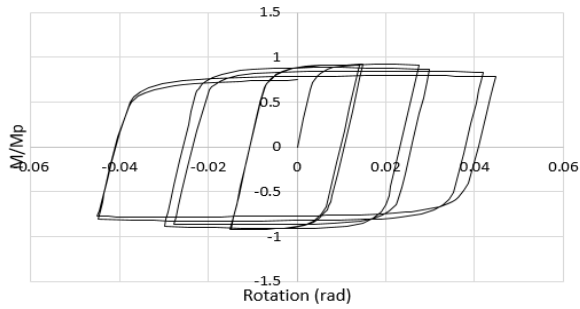
د) تقویت اتصال با یک سخت کننده افقی و سه سخت کننده قائم



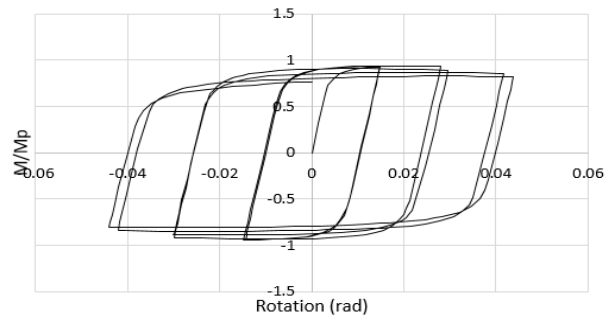
ه) تقویت اتصال با دو سخت کننده افقی و دو سخت کننده قائم

شکل ۲۵. تغییر شکل خارج صفحه اتصال در چرخه‌ی ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی ۰/۰۴۵-+

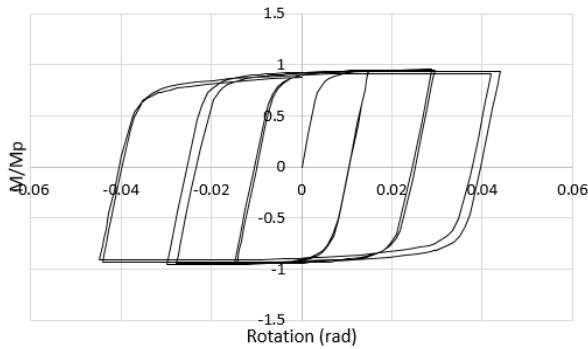
Fig. 25. Out-of-plane deformation of the connection in the sixth loading cycle in the relative displacement of -0.045. A) Strengthen the connection with one horizontal stiffener and one vertical stiffener. B) Strengthen the connection with one horizontal stiffener and two vertical stiffeners. C) Strengthen the connection with one horizontal stiffener and three vertical stiffeners. D) Strengthen the connection with two horizontal stiffeners and one vertical stiffener. E) Strengthen the connection with two horizontal stiffeners and two vertical stiffeners



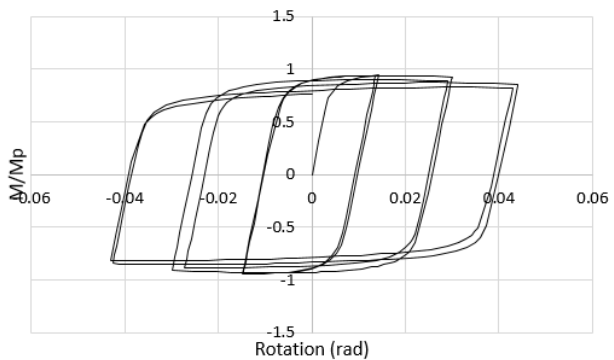
ب) تقویت اتصال با یک سخت کننده افقی و دو سخت کننده قائم



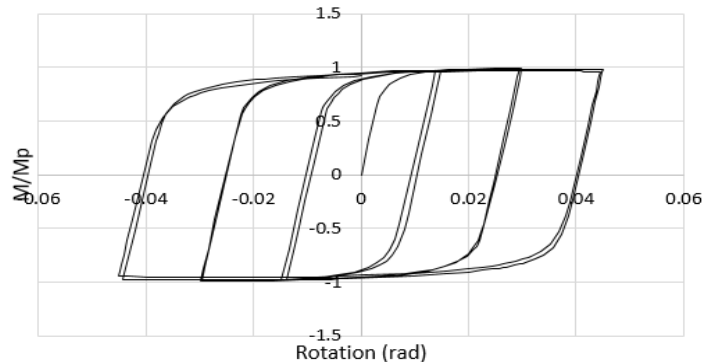
الف) تقویت اتصال با یک سخت کننده افقی و قائم



ج) تقویت اتصال با دو سخت کننده افقی و یک سخت کننده قائم



ج) تقویت اتصال با یک سخت کننده افقی و سه سخت کننده قائم



خ) تقویت اتصال با دو سخت کننده افقی و دو سخت کننده قائم

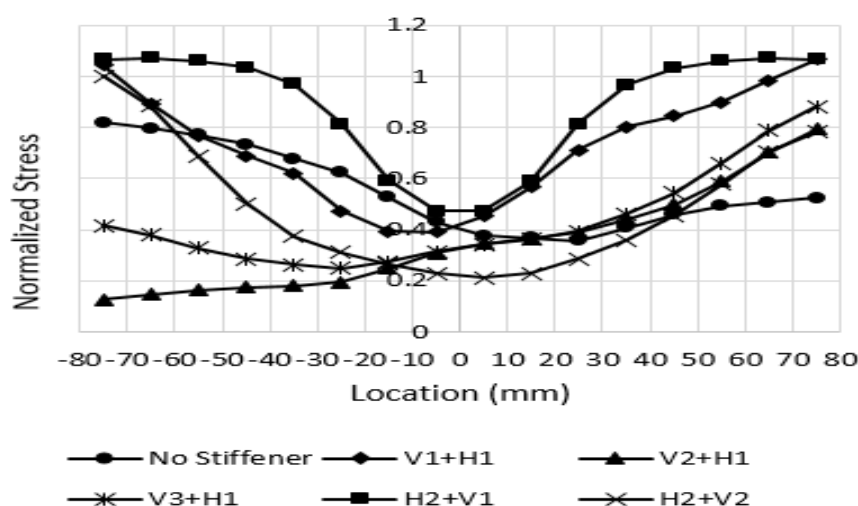
شکل ۲۶. منحنی هیستریزیس لنگر-دوران انتهای تیر در اتصال RBS

Fig. 26. Hysteresis curve of moment-rotation of end-of-beam at RBS connection. A) Strengthen the connection with one horizontal stiffener and one vertical stiffener. B) Strengthen the connection with one horizontal stiffener and two vertical stiffeners. C) Strengthen the connection with one horizontal stiffener and three vertical stiffeners. D) Strengthen the connection with two horizontal stiffeners and one vertical stiffener. E) Strengthen the connection with two horizontal stiffeners and two vertical stiffeners.

شکل ۲۶-الف مقاومت خمشی اتصال در پایان هر چرخه بارگذاری نشان داده شده است. در پایان چرخه اول بارگذاری مقاومت خمشی اتصال برابر با ۰/۹۳۹ مقاومت پلاستیک مقطع تیر می‌باشد. اما در پایان چرخه ششم بارگذاری مقاومت خمشی اتصال کاهش یافته و به ۰/۸۰۵ مقاومت پلاستیک

مقطع برابر با ۰/۴۷ میلی‌متر می‌باشد.

در شکل ۲۶، منحنی هیستریزیس لنگر-دوران انتهای تیر RBS با یک سخت کننده افقی و قائم نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، مقاومت خمشی اتصال با افزایش چرخه‌های بارگذاری کاهش می‌یابد. در



شکل ۲۷. توزیع تنش در چرخه ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی ± 0.045 ، در بال پایینی تیر در انتهای ثابت

Fig. 27. Stress distribution in the sixth loading cycle at relative displacement of -0.045, in the lower wing of the beam at the fixed end.

است. مطابق شکل ۲۹، در مقایسه با اتصال بدون تقویت، تنش فون میسر بیشینه در بال تحتانی تیر در محل کاهش مقطع در مدل‌های V1+H1، V2+H1، V3+H1، H2+V1 و H2+V2 به ترتیب ۸، ۲/۶، ۵/۸، ۶/۷ و ۶/۶ درصد افزایش یافته است. مطابق شکل ۳۰، در مقایسه با اتصال بدون تقویت، تنش فون میسر بیشینه در بال فوقانی تیر در محل کاهش مقطع در مدل‌های V1+H1، V2+H1، H2+V1 و H2+V2 به ترتیب ۹/۴، ۱/۶، ۶/۳ و ۶/۸ درصد افزایش یافته و در مدل V3+H1 ۳/۶ درصد کاهش یافته است.

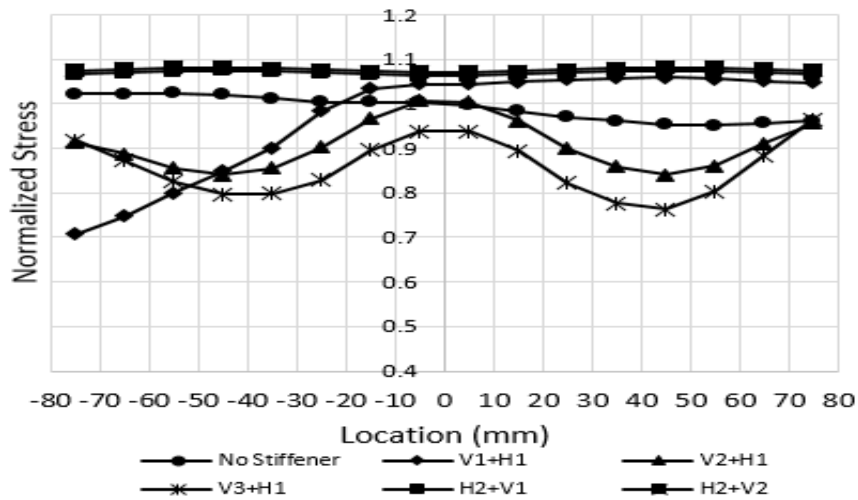
۳-۴- تأثیر ترکیب سخت کننده‌ها به شکل مستطیل

در ادامه‌ی این تحقیق اتصال RBS توسط ترکیبی از سخت کننده‌های افقی و قائم، که به شکل مستطیل چیده شده‌اند، تقویت گردیدند. یک حالت شامل استفاده از دو سخت کننده افقی دارای طول برابر با ۷۵ درصد طول ناحیه کاهش مقطع (۱۵۰ میلی‌متر) به همراه دو سخت کننده قائم دارای طول برابر با ۷۵ درصد ارتفاع جان تیر (۲۲۵ میلی‌متر) می‌باشد، که به شکل مستطیل چیده شدند. در حالت دوم یک سخت کننده قائم در وسط ناحیه کاهش مقطع به اتصال اضافه گردید. نحوه نام‌گذاری و مشخصات سخت کننده‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است.

در شکل ۳۱، ملاحظه می‌گردد، استفاده از هر دو روش، تأثیر تقریباً

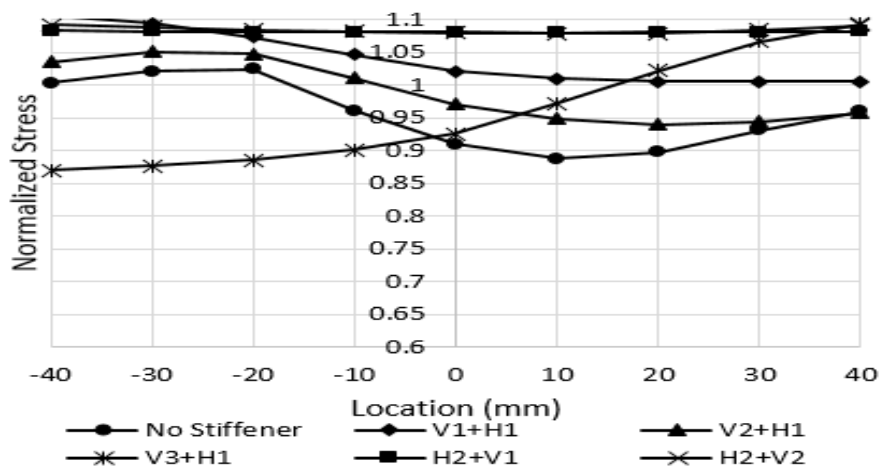
تیر می‌رسد، که نشان دهنده کاهش ۱۴/۲ درصدی مقاومت خمشی اتصال می‌باشد. در شکل ۲۶-ب، ج، ح و خ مقاومت خمشی اتصال به ترتیب ۱۵/۹، ۱۳/۷، ۴/۸ و ۳/۷ درصد کاهش یافته است.

در شکل‌های ۲۷ تا ۳۰، نمودار توزیع تنش‌های فون میسر در امتداد بال‌های فوقانی و تحتانی تیر، در انتهای ثابت و وسط ناحیه کاهش مقطع، در پایان چرخه ششم بارگذاری نشان داده شده است. در این حالت، بال فوقانی در کشش و بال تحتانی در فشار می‌باشد. در این نمودارها محور افقی نشان دهنده عرض بال تیر و محور قائم نشان دهنده نسبت تنش فون میسر به تنش تسلیم فولاد تیر می‌باشد. مطابق این شکل‌ها، با وجود تقویت اتصال RBS با استفاده از سخت کننده‌های افقی و قائم، توزیع تنش در بال تیر، به ویژه در محل کاهش مقطع، نسبتاً یکنواخت بوده و این سخت کننده‌ها سبب تمرکز تنش در ناحیه کاهش مقطع نمی‌شوند. مطابق شکل ۲۷، در مقایسه با اتصال بدون تقویت، تنش فون میسر بیشینه در بال تحتانی تیر در انتهای ثابت در مدل‌های V1+H1، V3+H1، H2+V1 و H2+V2 به ترتیب ۳۰، ۷/۸، ۳۱ و ۲۲ درصد افزایش یافته و در مدل V2+H1 ۳ درصد کاهش یافته است. مطابق شکل ۲۸، در مقایسه با اتصال بدون تقویت، تنش فون میسر بیشینه در بال فوقانی تیر در انتهای ثابت در مدل‌های V1+H1، H2+V1 و H2+V2 به ترتیب ۴/۳، ۵ و ۵/۷ درصد افزایش یافته و در مدل‌های V2+H1 و V3+H1 به ترتیب ۱/۶ و ۵/۸ درصد کاهش یافته



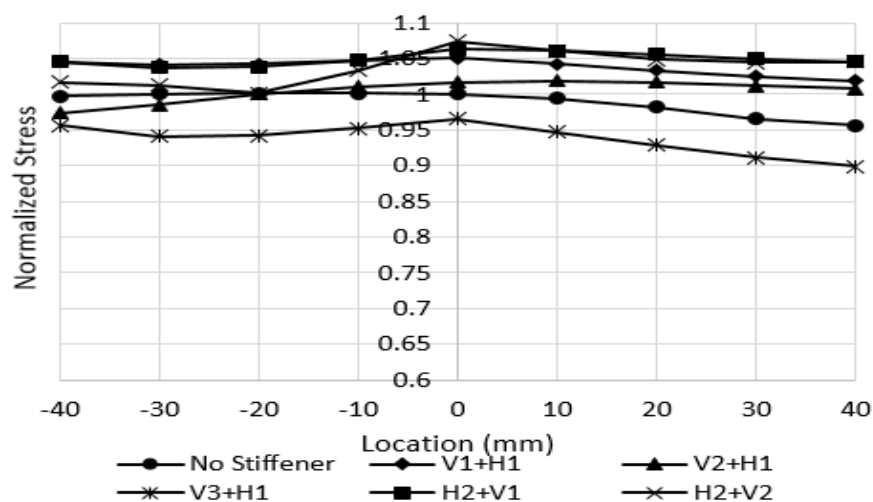
شکل ۲۸. توزیع تنش در چرخه ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی -0.045 ، در بال بالایی تیر در انتهای ثابت

Fig. 28. Stress distribution in the sixth loading cycle at relative displacement of -0.045 , in the upper wing of the beam at the fixed end.



شکل ۲۹. توزیع تنش در چرخه ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی -0.045 ، در بال پایینی تیر در وسط ناحیه کاهش مقطع

Fig. 29. Stress distribution in the sixth loading cycle at relative displacement of -0.045 , in the lower wing of the beam at the middle of reduced section area.



شکل ۳۰. توزیع تنش در چرخه‌ی ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی ۰/۰۴۵-، در بال بالایی تیر در وسط ناحیه کاهش مقطع

Fig. 30. Stress distribution in the sixth loading cycle at relative displacement of -0.045, in the upper wing of the beam at the middle of reduced section area.

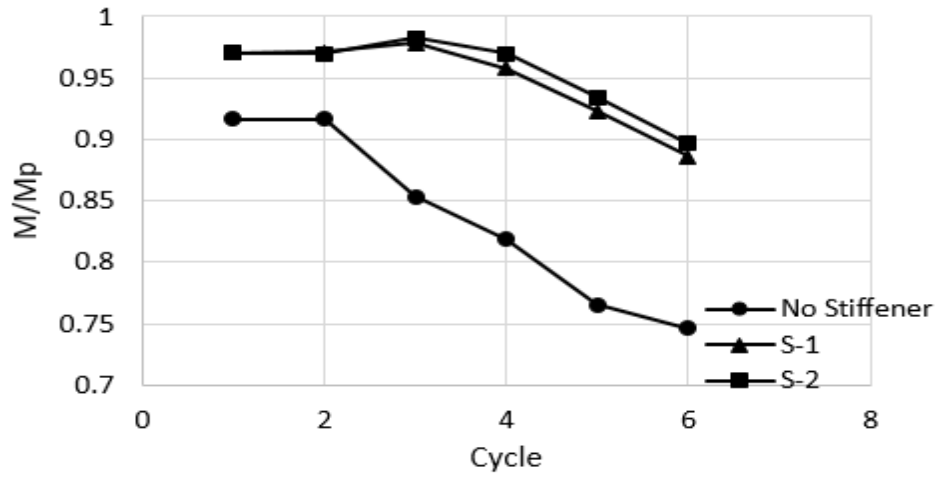
جدول ۶. مشخصات مدل‌های دارای ترکیبی از سخت‌کننده‌های افقی و قائم به صورت مستطیل

Table 6. The specifications of models with horizontal stiffener.

نام نمونه	روش تقویت	ضخامت سخت‌کننده (mm)	عرض سخت‌کننده (mm)	طول سخت‌کننده (mm)
S-1	دو سخت‌کننده قائم	۸	۴۰	۲۲۵
	دو سخت‌کننده افقی	۸	۴۰	۱۵۰
S-2	سه سخت‌کننده قائم	۸	۴۰	۲۲۵
	دو سخت‌کننده افقی	۸	۴۰	۱۵۰

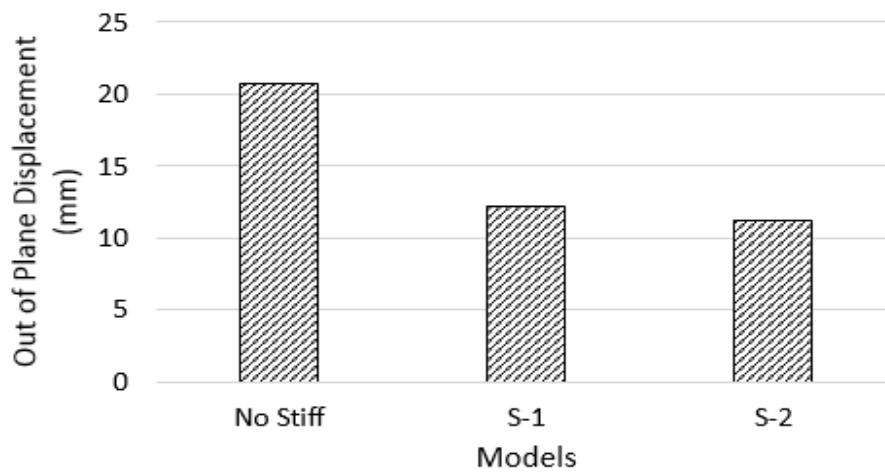
در شکل ۳۲، تأثیر سخت‌کننده‌ها در کاهش بیشینه تغییر شکل خارج از صفحه جان تیر در محل کاهش مقطع، که نشان‌دهنده کماتش موضعی جان تیر در اتصال RBS می‌باشد، نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با وجود تأثیر مثبت سخت‌کننده‌ها در کاهش تغییر شکل‌های خارج از صفحه جان تیر، اما مقدار این تغییر شکل‌ها، زیاد می‌باشد، که نشان‌دهنده کماتش جان تیر در محل اتصال می‌باشد. مطابق شکل ۳۳، کانتور تغییر شکل برای اتصال RBS با تعداد سخت‌کننده‌ی مستطیلی ارائه شده است. به عنوان نمونه برای تقویت اتصال با دو سخت‌کننده افقی و دو

برابری در افزایش مقاومت نهایی اتصال دارد. در پایان چرخه اول بارگذاری، مقاومت نهایی اتصالات S-1 و S-2 تقریباً برابر بوده و در مقایسه با اتصال بدون تقویت ۵/۹ درصد افزایش یافته است. در پایان چرخه‌ی آخر بارگذاری، مقاومت نهایی اتصالات S-1 و S-2 تقریباً برابر بوده و در مقایسه با اتصال بدون تقویت به ترتیب ۱۸/۸ و ۲۰/۲ درصد افزایش یافته است. علاوه بر افزایش مقاومت اتصالات تقویت شده، در اتصالات تقویت شده، زوال مقاومت اتصال در اثر چرخه‌های بارگذاری نیز تا حد بسیار زیادی کاهش یافته است.



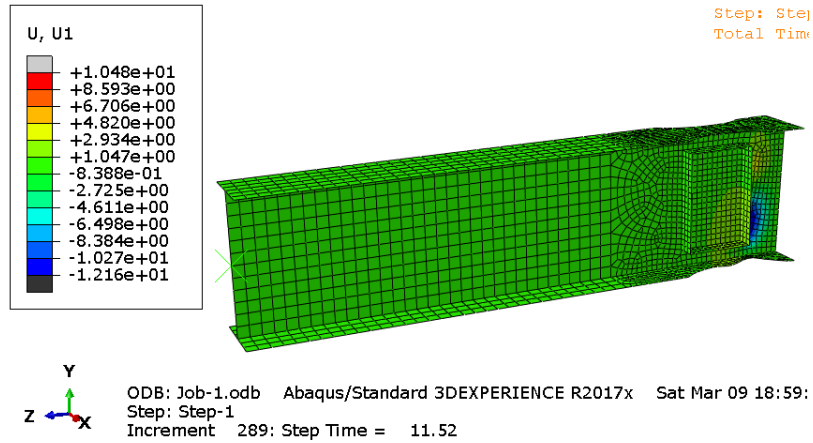
شکل ۳۱. مقایسه‌ی مقاومت نهایی در هر چرخه‌ی بارگذاری در اتصالات دارای سخت‌کننده‌ی مستطیلی

Fig. 31. The specifications of models with a combination of horizontal and vertical stiffeners in a rectangular shape.

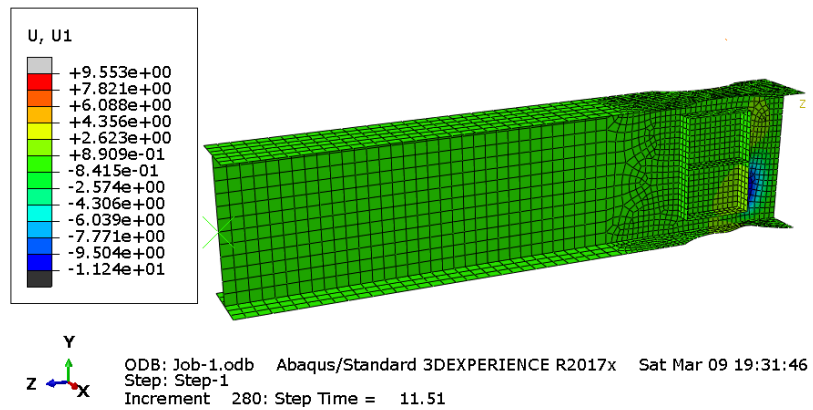


شکل ۳۲. بیشینه تغییر شکل خارج از صفحه جان تیر RBS در محل کاهش مقطع در اتصالات دارای سخت‌کننده‌ی مستطیلی

Fig. 32. Maximum out-of-plane deformation of RBS model at section reduction in connections with rectangular stiffener.



الف) تقویت اتصال با دو سخت کننده افقی و دو سخت کننده قائم



ب) تقویت اتصال با دو سخت کننده افقی و سه سخت کننده قائم

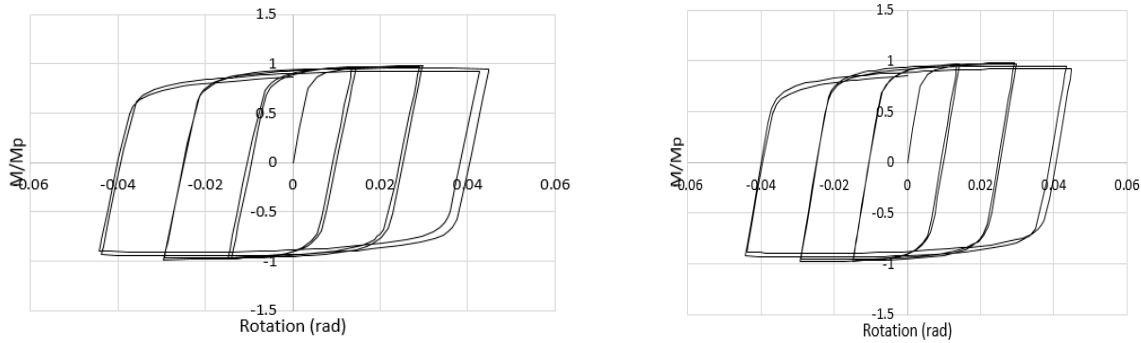
شکل ۳۳. تغییر شکل خارج صفحه اتصال در چرخه‌ی ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی 0.045 -

Fig. 33. Out-of-plane deformation of the connection in the sixth loading cycle in the relative displacement of -0.045 . A) Strengthen the connection with two horizontal stiffeners and two vertical stiffeners. B) Strengthen the connection with two horizontal stiffeners and three vertical stiffeners.

برابر با 0.971 مقاومت پلاستیک مقطع تیر می‌باشد. اما در پایان چرخه ششم بارگذاری مقاومت خمشی اتصال کاهش یافته و به 0.886 مقاومت پلاستیک تیر می‌رسد، که نشان دهنده کاهش $8/7$ درصدی مقاومت خمشی اتصال می‌باشد. در شکل ۳۴-ب، در پایان چرخه‌ی اول بارگذاری مقاومت خمشی اتصال برابر با 0.971 مقاومت پلاستیک مقطع تیر می‌باشد. اما در پایان چرخه‌ی ششم بارگذاری مقاومت خمشی اتصال کاهش یافته و به 0.896 مقاومت پلاستیک تیر می‌رسد، که نشان دهنده کاهش $7/7$ درصدی مقاومت خمشی اتصال می‌باشد.

سخت کننده قائم، در پایان چرخه‌ی ششم بارگذاری جان تیر در محل کاهش مقطع تیر دچار کمانش موضعی شده و مقدار تغییر شکل خارج از صفحه جان تیر در محل کاهش مقطع برابر با $11/24$ میلی‌متر می‌باشد.

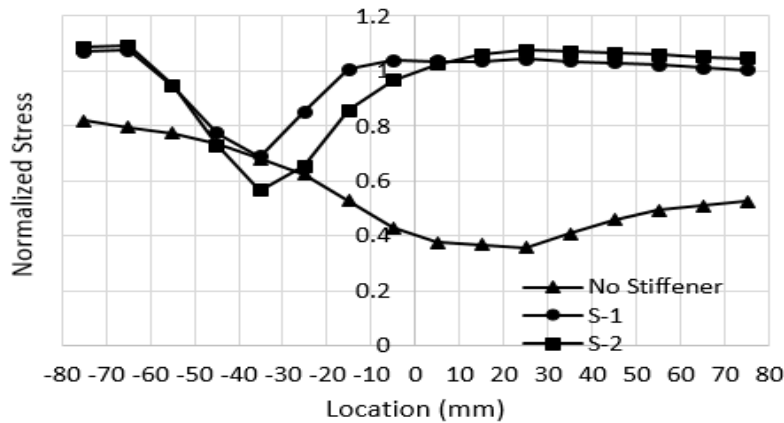
در شکل ۳۴، منحنی هیستریزیس لنگر-دوران انتهای تیر RBS با چهار سخت کننده مستطیلی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، مقاومت خمشی اتصال با افزایش چرخه‌های بارگذاری کاهش می‌یابد. در شکل ۳۴-الف مقاومت خمشی اتصال در پایان هر چرخه بارگذاری نشان داده شده است. در پایان چرخه‌ی اول بارگذاری مقاومت خمشی اتصال



الف) تقویت اتصال با دو سخت کننده افقی و دو سخت کننده قائم ب) تقویت اتصال با دو سخت کننده افقی و سه سخت کننده قائم

شکل ۳۴. منحنی هیستریزیس لنگر-دوران انتهای تیر در اتصال RBS

Fig. 34. Hysteresis curve of moment-rotation of end-of-beam at RBS connection. A) Strengthen the connection with two horizontal stiffeners and two vertical stiffeners. B) Strengthen the connection with two horizontal stiffeners and three vertical stiffeners.

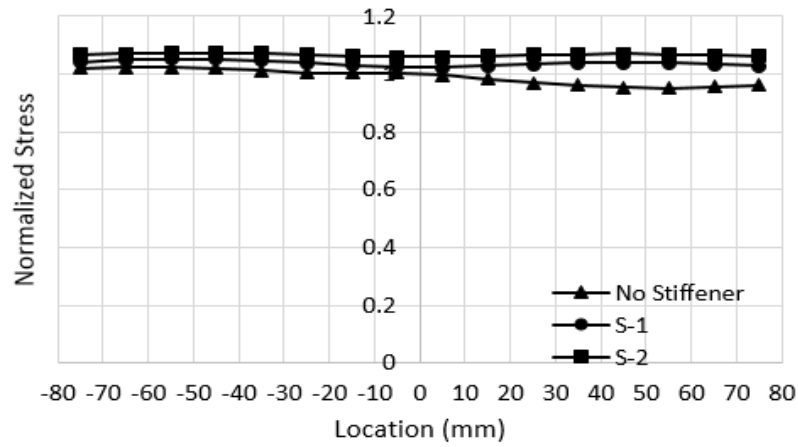


شکل ۳۵. توزیع تنش در چرخه ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی -0.045 ، در بال پایینی تیر در انتهای ثابت

Fig. 35. Stress distribution in the sixth loading cycle at relative displacement of -0.045 , in the lower wing of the beam at the fixed end.

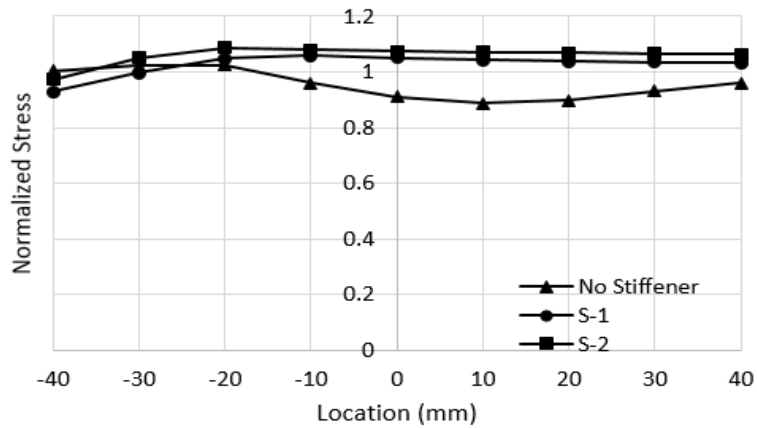
به تنش تسلیم فولاد تیر می‌باشد. مطابق این شکل‌ها، با وجود تقویت اتصال RBS با استفاده از سخت کننده‌ها، توزیع تنش در بال تیر، به ویژه در محل کاهش مقطع، نسبتاً یکنواخت بوده و این سخت کننده‌ها سبب تمرکز تنش در ناحیه کاهش مقطع نمی‌شوند. مطابق شکل ۳۵، در مقایسه با اتصال بدون تقویت، تنش فون میسرز بیشینه در بال پایینی تیر در انتهای ثابت در مدل‌های

در شکل‌های ۳۵ تا ۳۸، نمودار توزیع تنش‌های فون میسرز در امتداد بال‌های بالایی و پایینی تیر، در انتهای ثابت و وسط ناحیه کاهش مقطع، در پایان چرخه ششم بارگذاری نشان داده شده است. در این حالت، بال بالایی در کشش و بال پایینی در فشار می‌باشد. در این نمودارها محور افقی نشان دهنده عرض بال تیر و محور قائم نشان دهنده نسبت تنش فون میسرز



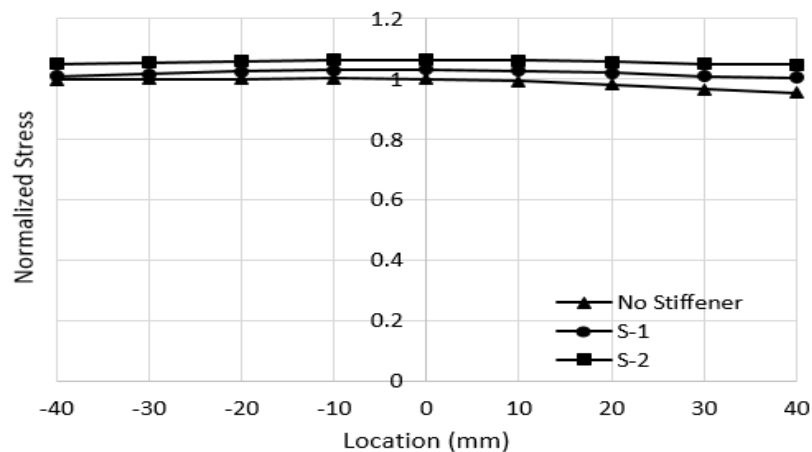
شکل ۳۶. توزیع تنش در چرخه ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی -0.045 ، در بال بالایی تیر در انتهای ثابت

Fig. 36. Stress distribution in the sixth loading cycle at relative displacement of -0.045 , in the upper wing of the beam at the fixed end.



شکل ۳۷. توزیع تنش در چرخه ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی -0.045 ، در بال پایینی تیر در وسط ناحیه کاهش مقطع

Fig. 37. Stress distribution in the sixth loading cycle at relative displacement of -0.045 , in the lower wing of the beam at the middle of reduced section area.



شکل ۳۸. توزیع تنش در چرخه‌ی ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی ± 0.045 ، در بال بالایی تیر در وسط ناحیه کاهش مقطع

Fig. 38. Stress distribution in the sixth loading cycle at relative displacement of -0.045, in the upper wing of the beam at the middle of reduced section area.

حاصل به ترتیب S-1-ST52، H-3-ST52 و V-3-ST52 نام‌گذاری گردید. در شکل‌های ۳۹ تا ۴۱، تأثیر جنس سخت کننده در مقاومت نهایی، در پایان هر چرخه‌ی بارگذاری مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، استفاده از فولادهای ST37 و ST52، تأثیر تقریباً برابری در افزایش مقاومت نهایی اتصال داشته و می‌توان از تأثیر جنس فولاد سخت کننده در افزایش مقاومت نهایی اتصال صرف نظر کرد.

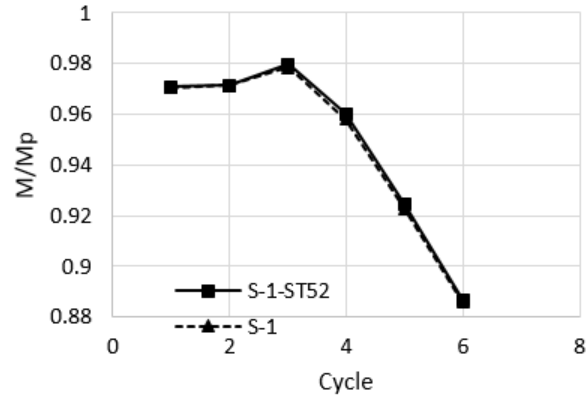
در شکل‌های ۴۲ و ۴۳، تأثیر جنس سخت کننده‌ها در کاهش بیشینه تغییر شکل خارج از صفحه جان تیر در محل کاهش مقطع، که نشان دهنده‌ی کماتش موضعی جان تیر در اتصال RBS می‌باشد، ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، کماتش موضعی خارج از صفحه جان تیر در محل کاهش مقطع، مستقل از جنس سخت کننده‌ها می‌باشد و بالاتر بردن مقاومت فولاد، تأثیری در کاهش کماتش جان ندارد.

در شکل ۴۴، منحنی هیستریزس لنگر-دوران انتهایی تیر RBS با در نظر گرفتن جنس سخت کننده نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، مقاومت خمشی اتصال با افزایش چرخه‌های بارگذاری کاهش می‌یابد. در شکل ۴۴-الف، مقاومت خمشی اتصال در پایان هر چرخه‌ی بارگذاری نشان داده شده است. در پایان چرخه‌ی اول بارگذاری مقاومت خمشی اتصال برابر با 0.942 مقاومت پلاستیک مقطع تیر می‌باشد. اما در پایان چرخه‌ی ششم بارگذاری مقاومت خمشی اتصال کاهش یافته و

S-2 و S-1 به ترتیب ۳۱ و ۳۳ درصد افزایش یافته است. مطابق شکل ۳۶، در مقایسه با اتصال بدون تقویت، تنش فون میسرز بیشینه در بال بالایی تیر در انتهای ثابت در مدل‌های S-1 و S-2 به ترتیب ۳ و ۵ درصد افزایش یافته است. مطابق شکل ۳۷، در مقایسه با اتصال بدون تقویت، تنش فون میسرز بیشینه در بال پایینی تیر در وسط ناحیه کاهش مقطع در مدل‌های S-1 و S-2 به ترتیب $3/4$ و $6/2$ درصد افزایش یافته است. مطابق شکل ۳۸، در مقایسه با اتصال بدون تقویت، بیشینه تنش فون میسرز در بال بالایی تیر در وسط ناحیه کاهش مقطع در مدل‌های S-1 و S-2 به ترتیب معادل $3/1$ و $6/3$ درصد افزایش یافته است.

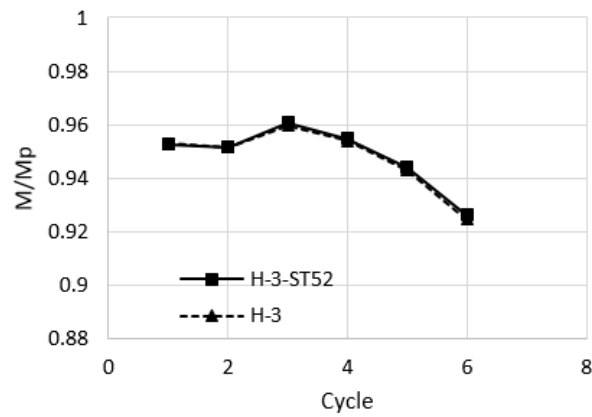
۳-۵- تأثیر جنس سخت کننده‌ها

در ادامه‌ی این تحقیق جنس فولاد در مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا، جنس فولاد در مدل‌ها از نوع ST37 با مقاومت تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال می‌باشد. جهت بررسی تأثیر جنس سخت کننده‌ها در سه حالت جنس سخت کننده‌ها به فولاد ST52 با مقاومت تسلیم ۳۶۰ مگاپاسکال تغییر داده شده و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از مدل‌های متناظر با سخت کننده از جنس فولاد ST37 مقایسه گردید. در سه مدل H-3، S-1 و V-3 جنس سخت کننده‌ها به فولاد ST52 تغییر داده شده و مدل‌های



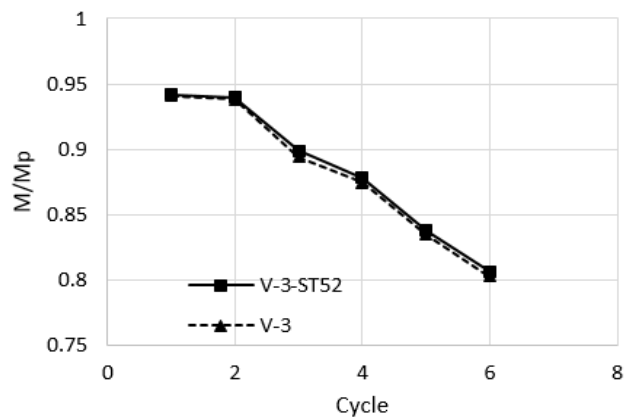
شکل ۳۹. مقایسه‌ی مقاومت نهایی در هر چرخه‌ی بارگذاری در مدل S-1 نسبت به جنس سخت کننده‌ها

Fig. 39. Comparison of the final strength in each loading cycle in the S-1 model with respect to the type of stiffeners.



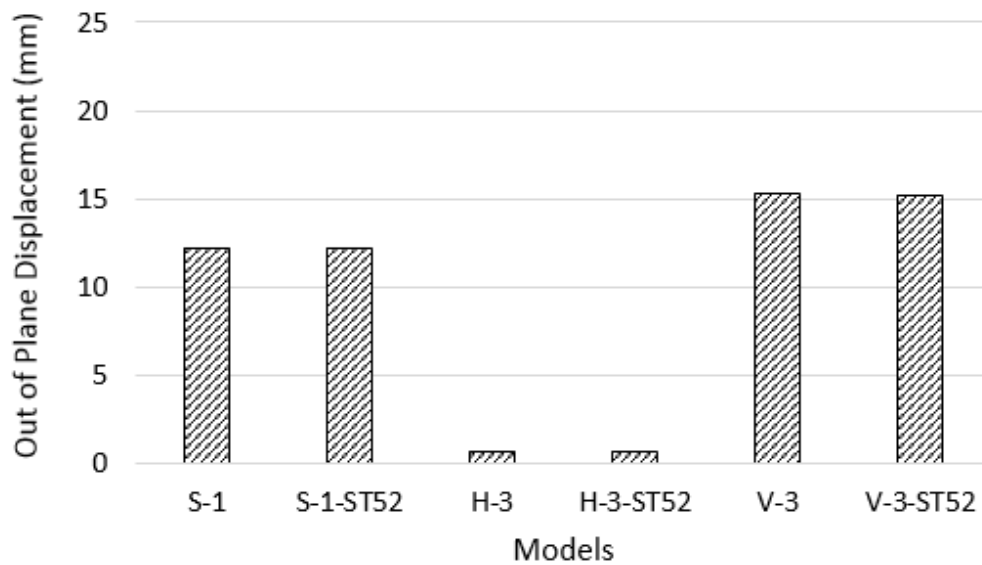
شکل ۴۰. مقایسه‌ی مقاومت نهایی در هر چرخه‌ی بارگذاری در مدل H-3 نسبت به جنس سخت کننده‌ها

Fig. 40. Comparison of the final strength in each loading cycle in the H-3 model with respect to the type of stiffeners



شکل ۴۱. مقایسه‌ی مقاومت نهایی در هر چرخه‌ی بارگذاری در مدل V-3 نسبت به جنس سخت کننده‌ها

Fig. 41. Comparison of the final strength in each loading cycle in the V-3 model with respect to the type of stiffeners.



شکل ۴۲. مقایسه‌ی بیشینه تغییر شکل خارج از صفحه جان تیر RBS در محل کاهش مقطع نسبت به جنس سخت کننده‌ها

Fig. 42. Maximum out-of-plane deformation of RBS model at section reduction in connections with type of stiffener.

سه سخت کننده در ابتدا، انتها و وسط ناحیه کاهش مقطع بیشترین تأثیر را در بهبود عملکرد اتصال داشته و مقاومت اولیه و نهایی اتصال در مقایسه با اتصال بدون سخت کننده به ترتیب $2/7$ و $7/6$ درصد افزایش می‌یابد. استفاده از دو سخت کننده قائم در ابتدا و انتهای ناحیه کاهش مقطع، هیچ تأثیری در افزایش مقاومت اتصال ندارد.

- با وجود افزایش مقاومت اتصالات تقویت شده با سخت کننده‌های قائم، اما شیب زوال مقاومت در اتصالات تقویت شده با استفاده از سخت کننده‌های قائم، همانند اتصال بدون تقویت بوده و کارایی سخت کننده‌های قائم در بهبود مقاومت کماتشی جان تیر کم می‌باشد.

- در تقویت اتصال با استفاده از سخت کننده‌های افقی، استفاده از سه سخت کننده افقی بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت نهایی اتصال داشته و استفاده از یک سخت کننده در وسط ارتفاع، کمترین تأثیر را در افزایش مقاومت اتصال دارد. در حالت استفاده از سه سخت کننده افقی، مقاومت اولیه و نهایی اتصال در مقایسه با اتصال بدون سخت کننده به ترتیب 4 و 24 درصد افزایش می‌یابد.

- علاوه بر افزایش مقاومت اتصالات تقویت شده با استفاده از سخت کننده‌های افقی، در اتصالات تقویت شده با استفاده از دو و سه سخت کننده، کماتش موضعی جان از بین رفته و زوال مقاومت اتصال در اثر چرخه‌های بارگذاری تا حد بسیار زیادی کاهش می‌یابد.

به $0/807$ مقاومت پلاستیک تیر می‌رسد، که نشان دهنده کاهش $14/3$ درصدی مقاومت خمشی اتصال می‌باشد. در شکل ۴۴-ب و ج، مقاومت خمشی اتصال به ترتیب $2/8$ و $8/6$ کاهش یافته است.

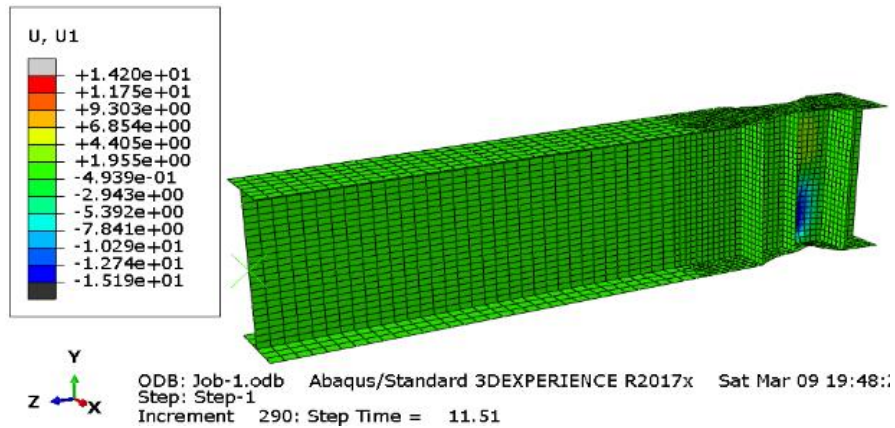
۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، رفتار اتصالات RBS تقویت شده با استفاده از سخت کننده‌های افقی و قائم تحت بررسی قرار گرفته و تأثیر سخت کننده‌ها در بهبود رفتار چرخه‌ای رفت و برگشتی اتصال مطالعه گردید. مطالعه‌ی پارامتری با تغییر جنس و نحوه‌ی آرایش سخت کننده‌ها در محل اتصال RBS انجام شد. خلاصه نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

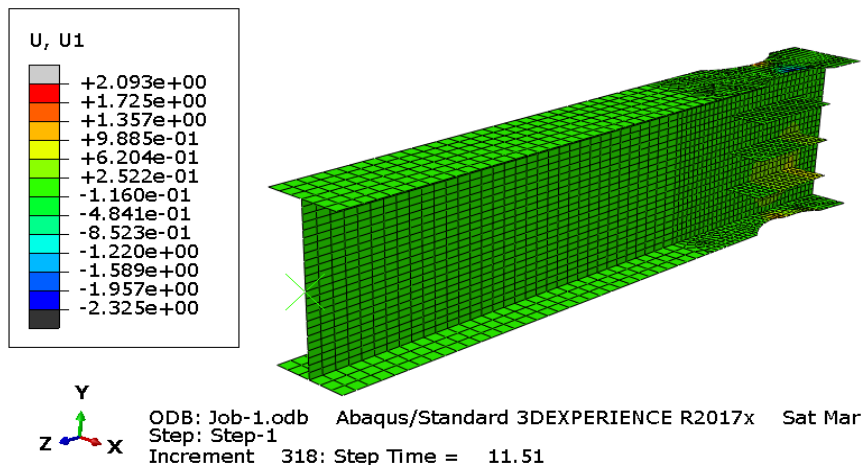
- در اتصالات RBS تقویت نشده، با وجود رعایت الزامات آیین‌نامه‌ای مانند ابعاد هندسی کاهش مقطع و تکیه‌گاه جانبی، کماتش موضعی جان در محل کاهش مقطع سبب زوال مقاومت اتصال در چرخه‌های بارگذاری متناوب می‌گردد. مقاومت نهایی اتصال تقویت نشده در چرخه نهایی، $18/5$ درصد کمتر از مقاومت چرخه‌ی اول می‌باشد.

- سخت کننده‌های افقی در مقایسه با سخت کننده‌های قائم، تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت اولیه و نهایی اتصال و کاهش زوال مقاومت اتصال دارد.

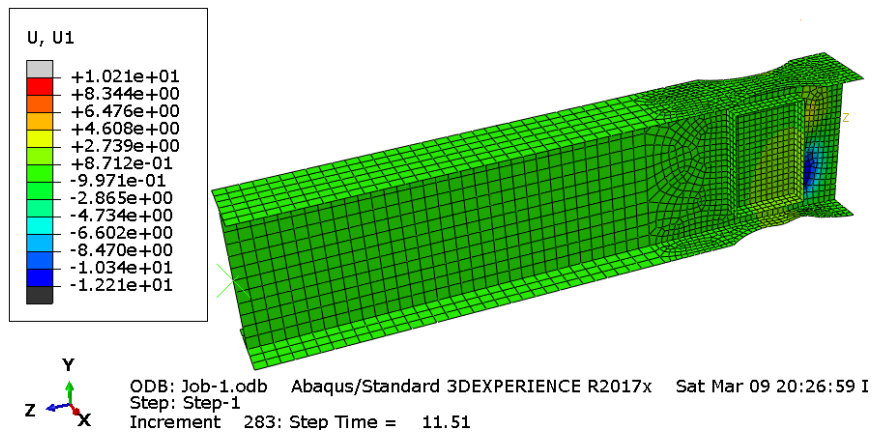
- در تقویت اتصال با استفاده از سخت کننده‌های قائم، استفاده از



الف) تقویت اتصال با سه سخت کننده قائم با جنس ST52



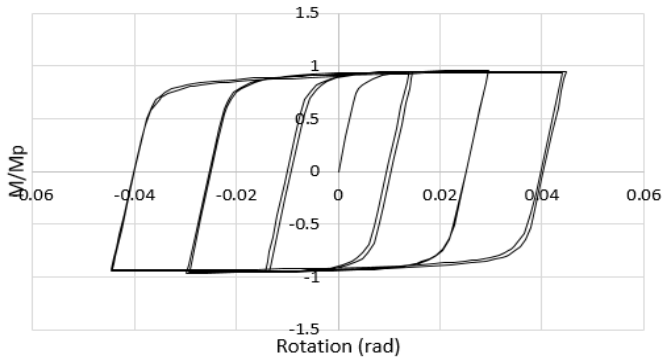
ب) تقویت اتصال با سه سخت کننده افقی با جنس ST52



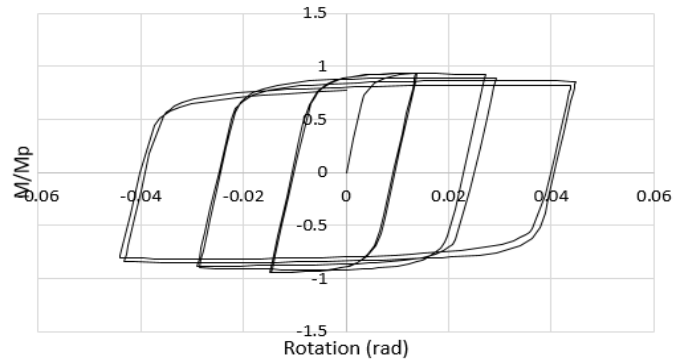
ج) تقویت اتصال با دو سخت کننده افقی و دو سخت کننده قائم با جنس ST52

شکل ۴۳. تغییر شکل خارج صفحه اتصال در چرخه‌ی ششم بارگذاری در تغییر مکان نسبی ۰/۰۴۵-.

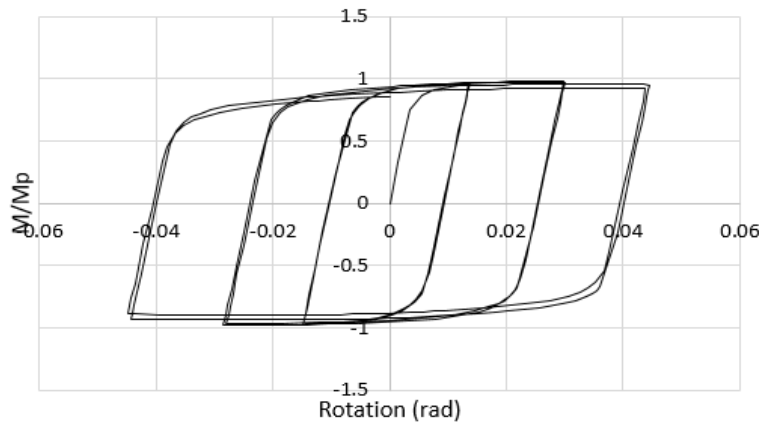
Fig. 43. Stress distribution in the sixth loading cycle at relative displacement of -0.045. A) Strengthen the connection with three vertical stiffeners of ST52. B) Strengthen the connection with three horizontal stiffeners of ST52. C) Strengthen the connection with two horizontal stiffeners and two vertical stiffeners of ST52..



ب) تقویت اتصال با سه سخت کننده افقی با جنس ST52



الف) تقویت اتصال با سه سخت کننده قائم با جنس ST52



ج) تقویت اتصال با دو سخت کننده افقی و دو سخت کننده قائم با جنس ST52

شکل ۴۴. منحنی هیستریزیس لنگر-دوران انتهای تیر در اتصال RBS

Fig. 44. Hysteresis curve of moment-rotation of end-of-beam at RBS connection. A) Strengthen the connection with three vertical stiffeners of ST52. B) Strengthen the connection with three horizontal stiffeners of ST52. C) Strengthen the connection with two horizontal stiffeners and two vertical stiffeners of ST52..

بارگذاری تا حد بسیار زیادی کاهش می‌یابد.

- در حالت استفاده از سخت کننده‌های افقی و قائم با چینش مستطیلی، با طول برابر با ۷۵ درصد طول ناحیه کاهش مقطع و ارتفاع برابر با ۷۵ درصد ارتفاع تیر، مقاومت اولیه و نهایی اتصال در مقایسه با اتصال بدون تقویت به ترتیب حدود ۶ و ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. با وجود تأثیر مثبت سخت کننده‌ها در کاهش تغییر شکل‌های خارج از صفحه جان تیر، اما مقدار این تغییر شکل‌ها، زیاد می‌باشد، که نشان دهنده کماتش جان تیر در محل اتصال می‌باشد.
- با وجود آن که، استفاده از سخت کننده‌ها سبب تغییر نحوه توزیع

- در تقویت اتصال با استفاده از ترکیب سخت کننده‌های افقی و قائم، استفاده از ترکیب دو سخت کننده افقی و دو سخت کننده قائم، بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت نهایی اتصال داشته و استفاده از ترکیب دو سخت کننده قائم و یک سخت کننده افقی، کمترین تأثیر را در افزایش مقاومت اتصال دارد. در حالت استفاده از ترکیب دو سخت کننده افقی و دو سخت کننده قائم، مقاومت اولیه و نهایی اتصال در مقایسه با اتصال بدون سخت کننده به ترتیب ۲/۶ و ۱/۲۶ درصد افزایش می‌یابد.
- در اتصالات تقویت شده با استفاده از ترکیب دو سخت کننده افقی و یک یا دو سخت کننده قائم، زوال مقاومت اتصال در اثر چرخه‌های

- [6] M. A. Morshedi, K. M. Dolatshahi, S. Maleki. Double reduced beam section connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 138 (2017) 283-297.
- [7] M. Tahamouli Roudsari, K. H. Jamshidi, M. M. Zangeneh. Experimental and Numerical Investigation of IPE Reduced Beam Sections with Diagonal Web Stiffeners. *Journal of Earthquake Engineering*, 22(4) (2016) 533-552.
- [8] R. Rahnavard, A. Hassanipour, N. Siahpolo. Analytical study on new types of reduced beam section moment connections affecting cyclic behavior. *Case Stud. Struct. Eng.*, 3(2014) 33-51.
- [9] A. K. Swati, V. Gaurang. Study of steel moment connection with and without reduced beam section. *Case Studies in Structural Engineering*, 1(2014) 26-31.
- [10] A. Deylami, A., & A. M. Tabar. Promotion of cyclic behavior of reduced beam section connections restraining beam web to local buckling. *Thin-Walled Structures*, 73(2013) 112-120.
- [11] S. W. Han, K. H. Moon, S. H. Hwang, B. Stojadinovic. Rotation capacities of reduced beam section with bolted web (RBS-B) connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 70(2012) 256-263.
- [12] S. R. Mirghaderi, S. Torabian, A. Imanpour. Seismic performance of the Accordion-Web RBS connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 66(2)(2010) 277-288.
- [13] A. Imanpour, S. R. Mirghaderi, F. Keshavarzi, B. Khafaf. Numerical Evaluation of New Reduced Beam Section Moment Connection. In *Structures Congress 2008: Crossing Borders* 1-10.
- [14] F. X. Li, I. Kanao, J. Li, K. Morisako. Local buckling of RBS beams subjected to cyclic loading. *Journal of structural engineering*, 135(12)(2009) 1491-1498.
- [15] ABAQUS/standard, Version 6.11. (2012). ABAQUS, Inc., Pawtucket, R.I.
- [16] INBC. Design and Construction of Steel Structures. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 10. (2013). (In Persian).
- تنش‌های فون‌میسز در بال‌های بالایی و پایینی تیر در محل کاهش مقطع و انتهای ثابت تیر می‌گردد، اما توزیع تنش تقریباً یکنواخت بوده و سخت‌کننده سبب تمرکز تنش و کاهش کارایی اتصال نمی‌گردد.
- با مقایسه استفاده از فولادهای ST37 و ST52 در سخت‌کننده‌ها، مشاهده گردید که هر دو حالت تأثیر یکسانی در افزایش مقاومت اتصال داشته و می‌توان از تأثیر جنس فولاد سخت‌کننده در افزایش مقاومت اتصال صرف نظر کرد.
 - با افزودن سخت‌کننده‌ها به اتصال، از گسترش کرنش‌های پلاستیک در جان تیر و در محل کاهش مقطع جلوگیری شده و احتمال وقوع کماتش جانبی جان کاهش می‌یابد.
 - نتایج این تحقیق برای مقاوم‌سازی اتصالات RBS با استفاده از سخت‌کننده‌های افقی و قائم با در نظر گرفتن تعداد، جنس و نحوه‌ی آرایش سخت‌کننده‌ها کاربردی و قابل تسری به سایر مقاطع اتصالات RBS می‌باشد.

منابع

- [1] V. Saberi, H. Saberi, A. Sadeghi, A. Collapse Assessment of Steel Moment Frames Based on Development of Plastic Hinges, *Journal of Science and Technology*, (2020). (In Persian).
- [2] A. Sadeghi, S. Hashemi, K. Mehdizadeh. Probabilistic Assessment of Seismic Collapse Capacity of 3D Steel Moment-Resisting Frame Structures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, (2020). (In Persian).
- [3] M. Tahamouli Roudsari, S. H. Moradi. Experimental and Numerical Assessment of Reduced IPE Beam Sections Connections with Box-Stiffener. *International Journal of Steel Structures*, 18(1) (2018) 255-263.
- [4] I. Kanao, T. He, Z. Yu, K. Morisako. Behavior of RBS Beams Reinforced by Stiffeners Subjected to Cyclic Loading. *Journal of Engineering*, 2018.
- [5] N. K. Berde, U. R. Awari, S. A. Kulkarni. Behavior of Reduced Beam Section Moment Connection with Varying Thickness of Continuity Plate. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 8(1) (2017) 77-83.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

V. Saberi, H. Saberi, M. Salimikia, A. A. Sadeghi, Investigation the cyclic behavior of rigid RBS connections with horizontal and vertical stiffeners in steel moment- resisting frame, Amir-kabir J. Civil Eng., 54(4) (2022) 1273-1310.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19405.7160](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19405.7160)

