

بررسی و مقایسه چند روش در بهسازی نامتقارن اتصالات قاب خمشی فولادی

محمد بحیرایی^۱ محسن گرامی^{۲*}

۱ دانشکده عمران- دانشگاه سمنان- سمنان

۲ دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

حضور دال بتنی در سازه‌های قاب خمشی فولادی همواره عملیات بهسازی را با مشکل مواجه می‌کند. از طرفی عمده‌ی خسارات زلزله‌ی نورتریج (۱۹۹۴) در بال پایین و نزدیک به بر ستون گزارش شده است. لذا به منظور کاهش هزینه‌های بهسازی میتوان این عملیات را تنها در بال پایین و یا جان تیر انجام داد. به عبارتی با تعریف و اعمال یک فیوز شکلپذیر در تیر از طریق تضعیف بال پایین آن میتوان تمرکز تنش در نواحی نزدیک به جوش در اتصال و شکست ترد در این نواحی را کاهش داد. در این مقاله یک اتصال قاب خمشی فولادی به صورت تحلیلی و پس از حصول اطمینان از دقت مدلسازی تحت بهسازی قرار گرفته است. روشهای بهسازی بر بال پایین و جان اعمال شده‌اند. دو روش کلی "کاهش مقطع" و "حرارت" به منظور تضعیف تیر در نظر گرفته شدند. در این تحقیق نفوذ ناقص جوش (تخلخل) در ناحیه اتصال بال پایین به ستون به عنوان نقص موجود در اتصال قرار داده شد. نتایج مدلسازی نشان دادند که اتصال دارای جوش ناقص، تحت دریافت ۴/۵ درصد متحمل شکست جوش در بال پایین شد و خرابی در بر اتصال رخداد. در اتصالاتی که به صورت نامتقارن بهسازی شدند با انتقال مفصل پلاستیک به ناحیه تضعیف شده، احتمال رخداد شکست ترد در ناحیه جوش کاهش یافت. در روش کاهش مقطع بال پایین کماتش خارج از صفحه موجب افت ناگهانی مقاومت تحت دریافت ۲/۵ درصد شد. در روش حرارتی که با آنیل کردن فولاد همراه است، کماتش خارج از صفحه در دریافت ۵ درصد اتفاق افتاد. اتصال بهسازی شده با این روش تغییر مکانهای فرا الاستیک ۳ درصد نشان داد و میتوان از آن رفتار مناسبی برای قابهای خمشی ویژه انتظار داشت.

کلمات کلیدی: قاب خمشی فولادی، بهسازی لرزه‌ای، اتصال با مقطع کاهش یافته، اتصال حرارت دیده، روش اجزای محدود

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2018.109293.1399	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://10.22065/jsce.2018.109293.1399	۱۳۹۸/۱۰/۱	۱۳۹۷/۰۲/۲۷	۱۳۹۷/۰۲/۲۷	۱۳۹۷/۰۱/۱۴	۱۳۹۶/۰۹/۱۸
محسن گرامی					*نویسنده مسئول:	
mgerami@semnan.ac.ir					پست الکترونیکی:	

Investigation and comparison of some techniques in asymmetrically retrofitting of steel frame connections

mohammad bahirai¹ Mohsen Gerami^{2*}

1 civil engineering faculty, Semnan university, Semnan, Iran

2 Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran 3- Associate Professor of civil

ABSTRACT

The presence of concrete slab in steel framing frame structures always makes retrofitting problems difficult. On the other hand, most of damages reported from Northridge earthquake (1994) has focused on the bottom flange of the beam. Therefore, in order to reduce the cost of retrofit, this operation can be done only at the bottom flange of the beam. In other words, by defining and applying a ductile fuse in the beam, by weakening the bottom flange of the bottom, it is possible to reduce the concentration of tension in the near-weld regions in connection and fracture failure in these areas. In this paper, a steel frame connection was analyzed numerically and after ensuring the modeling accuracy, it was under rehabilitation. Retrofit techniques have been made on the bottom flange of the beam. Two general "cut-off" and "heat" methods were considered to weaken the beam. In this research, incomplete penetration of the weld was placed in the bottom flange connection to the column as a deficiency in the joint. The modeling results showed that the connection with incomplete weld, underwent 4/4%, suffering a deflection in the weld area in the flange. In the specimens which were retrofitted asymmetrically, the possibility of brittle fracture in the weld region was decreased due to relocation of the plastic hinge in the weakened area of the beam. In the method of reducing the bottom flange, lateral buckling led to sudden decrease in flexural strength at 2.5 % inter story drift. In the heat-induction method accompanied with steel annealing, the out of buckling occurred at 5% drift. The retrofitted connection with this method showed a post elastic displacements of 3% and could be expected to be suitable for special moment frames.

ARTICLE INFO

Receive Date: 09 December 2017

Revise Date: 03 April 2018

Accept Date: 17 May 2018

Keywords:

*moment frame connection,
seismic retrofit,
heat treated beam section
(HBS),
reduced beam section (RBS),
Finite element method*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.109293.1399

*Corresponding author: Mohsen Gerami

Email address: mgerami@semnan.ac.ir

۱ مقدمه

پس از زلزله Northridge ($M_w=6.7$, 1994) تحقیقات زیادی برای بررسی دقیق اتصالات فولادی تیر به ستون به منظور ارزیابی دقیق رفتار این اتصالات و همچنین بهبود آنها صورت پذیرفته است. به این منظور روشهایی ارائه شده است که ضمن بهبود رفتار اتصال در رفتار کلی قاب تغییراتی ایجاد نموده است. عمده این تحقیقات بر انتقال مفصل پلاستیک (یا به طور کلی محل خرابی) به ناحیه داخل تیر تمرکز دارد.

با توجه به آنکه روش تضعیف مقطع تیر میتواند تقاضای تنش را در نواحی نزدیک به جوش و اجزای اتصال از جمله چشمه اتصال، ورقهای پیوستگی، پیچها، جوش و کاهش دهد بسیار مورد تحقیق قرار گرفته است. تضعیف مقطع تیر با روشهای مختلفی قابل انجام انجام است. کمیته SAC [۱] ۴۵ نمونه اتصال با مقطع کاهش یافته ۱ (RBS) را به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده است. در این بررسی مقطع تیرها با شکل دایره ۲، مستقیم ۳ و مخروطی ۴ کاهش پیدا کردند. نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن بود که رفتار اتصال با مقطع کاهش یافته دایره‌ای بهتر از دیگر روشهای کاهش مقطع تیر میباشد و همچنین رفتار این نوع اتصال به عمق مقطع تیر بسیار وابسته است.

در طراحی قابهای خمشی کنترل جابجایی نسبی یا دررفت قاب از اهمیت بسزایی برخوردار است. در آیین‌نامه‌های معتبر طراحی همچون FEMA350 [۲] به میزان افزایش دررفت قاب در نتیجه استفاده از تیر با مقطع کاهش یافته اشاره شده است. طبق این آیین‌نامه در غیاب محاسبات دقیق میتوان افزایش ۹ درصدی دررفت قاب را برای کاهش ۵۰ درصدی مقطع تیر متصور شد. Shen و همکاران [۳] به منظور بررسی رفتار قابهای فولادی با اتصالات RBS، هشت نمونه قاب (۳ و ۱۰ طبقه) دارای اشکال مختلف کاهش مقطع تیر را تحت تحلیل تاریخچه زمانی و استاتیکی غیر خطی مدلسازی کرده‌اند. آنها در تحقیقشان با استفاده از تغییر شکل پلاستیک و دررفت طبقات در مقیاس جزئی و کلی قاب، رفتار این اتصالات را بررسی کرده‌اند. کاهش مقطع ۴۰ و ۶۰ درصد تاثیرات مختلفی بر رفتار قابهای با شکلپذیری ویژه و متوسط داشته و کاهش ۶۰ درصدی منجر به دررفتهایی بیش از حد مجاز در قابها شده است.

علاوه بر برشهای متداول بال تیر روش سوراخکاری ۵ (DF) نیز میتواند به عنوان یک روش ساده و جایگزین مورد استفاده قرار گیرد. Atashzaban و همکاران [۴] تعداد ۳۰ نمونه اتصال تیر به ستون فولادی را به صورت عددی بررسی کرده‌اند. آنها در تحقیقشان نمونه‌ها را به سه گروه کلی اتصال مستقیم، اتصال RBS و اتصال DF تقسیم‌بندی کردند و در هر گروه چشمه اتصالهای ضعیف و قوی به کار گرفتند. همچنین شکلهای مختلف سوراخکاری بال (با قطرهای ۴۰، ۵۵ و ۶۰ میلی‌متر) در نمونه‌هایشان در نظر گرفته شد. نتیجه تحقیق نشان داده است که فاصله کم یا زیاد سوراخها از بر اتصال منجر به عدم انتقال مفصل پلاستیک میشود و خرابی‌ها در این دو حالت عمدتاً در بر اتصال رخ میدهد. از دیگر نتایج مهم تحقیق کاهش کرنشهای بر اتصال با استفاده از چشمه اتصال ضعیف‌تر میباشد.

با توجه به آنکه مکانیزم خرابی اتصال RBS کمناش خارج از صفحه و یا برش تیر در ناحیه تضعیف شده است، در تعدادی از تحقیقات به تقویت جان با روشهای مختلف پرداخته شده است تا از کمناش جان تیر جلوگیری به عمل آید. Roudsari و Moradi [۵] تعداد ۴ اتصال کاهش یافته را با و بدون سخت کننده جان تیر به طور آزمایشگاهی بررسی کردند و شکلپذیری به مراتب بالاتری برای اتصال دارای سخت کننده جان را نتیجه گرفتند. Saleh و همکاران [۶] نوعی جدید از اتصال با مقطع کاهش یافته را برای تیرهای عمیق به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده‌اند. در این روش در ناحیه‌ای نزدیک به بر اتصال به افزایش مقاومت برشی جان تیر از طریق ایجاد ناحیه‌ای به شکل موجدار ۶ مبادرت میشود. در این ناحیه تاب برشی اتصال بالا و در مقابل سختی و ظرفیت خمشی پایین است. دو نمونه اتصال تحت آزمایش قرار داده شده و علاوه بر مشاهده فیوز شکلپذیر در فاصله قابل قبول از بر ستون این نوع اتصال منجر به افزایش ظرفیت برای تحمل ۶ درصد اضافی دررفت نسبت حالت عادی شده است. در نتیجه مقایسه اتصال پیشنهادی با اتصال RBS متداول، افزایش سختی خارج از صفحه و پایداری پیچشی - جانبی بیشتری برای اتصال پیشنهادی نتیجه شده است.

¹ RBS (reduced beam section)

² Dog bone configuration

³ Straight configuration

⁴ Tapered configuration

⁵ DF (drilled flange)

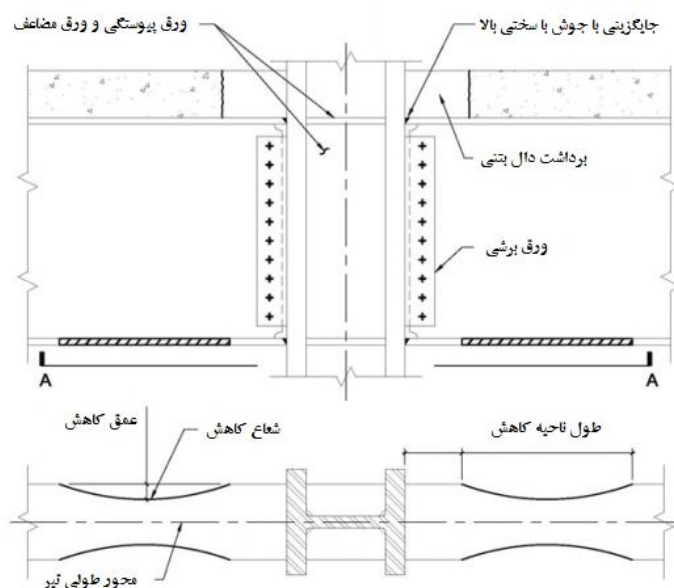
⁶ Tubular Web RBS

روشهای دیگری به منظور تضعیف مقطع تیر مورد توجه و استفاده محققین قرار گرفته است. Ohsaki و همکاران [۷] یک روش جدید برای تضعیف اتصال تیر به ستون در ناحیه تیر ارائه داده‌اند. آنها در تحقیقشان جان تیر را کاهش داده و اتصال را تحت بار سیکلی در آزمایشگاه قرار داده‌اند. نتایج آزمایشات ثمربخش بودن روش در انتقال مفصل پلاستیک به فاصله مطلوب و افزایش ظرفیت اتصال تا ۰/۰۵ رادیان حکایت دارد.

Sang و همکاران [۸] رفتار قابهای دارای سوراخ جان را به شکل آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار داده‌اند. در تحقیقشان یک قاب دوطبقه یک دهانه را در اندازه واقعی تحت رژیم بارگذاری استاتیکی و دینامیکی قرار داده‌اند. شکلپذیری قابل قبولی برای قاب که دارای اتصالات با سوراخهای دایره‌ای در اندازه‌های مختلف دارد نتیجه شده است. در ادامه به منظور بررسی رفتار قاب در مقیاس ماکرو، یک قاب ۱۷ طبقه تحت آنالیز پوش اور قرار داده و افزایش تقاضای تغییرمکانی برای قاب دارای اتصالات سوراخ شده نسبت به اتصالات بدون سوراخ نتیجه شده است.

Hedayat و Murude [۹] به منظور افزایش شکلپذیری و مقاومت اتصالات تیر به ستون فولادی، اعمال سوراخ جان را به عنوان یک روش کارآمد مورد بررسی قرار داده‌اند. در تحقیقشان عمق تیر ۴۵۰ تا ۹۱۲ میلی‌متر بوده است. سوراخهای در نظر گرفته شده در شکلها و اندازه‌های گوناگون بوده است. نتیجه مدلسازی‌ها نشان داده است که انتقال مفصل پلاستیک به داخل تیر در نتیجه تضعیف جان تیر صورت میگیرد. سطح کاهش یافته بیشتر اتصال را مستعد کماتش بیشتر کرده و استفاده از سخت کننده‌های جان در این حالت میتواند کارآمد باشد. Keunyeong و همکاران [۱۰] نوعی از اتصالات ستون درختی ۷ (طور معمول در کره و ژاپن) را با استفاده از تیر با مقطع کاهش یافته به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند. نتایج آزمایشگاهی رفتار شکلپذیر تا ۵ درصد رادیان را نشان دادند.

با توجه به سهولت روش تضعیف تیر، این روش را میتوان برای بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود به کار گرفت و با اعمال یک فیوز شکلپذیر در مقطع تیر، تقاضای شکلپذیری را در بر اتصال تیر به ستون کاهش داد. در آیین‌نامه FEMA547 [۱۱] اتصال با مقطع کاهش یافته به عنوان یک روش برای بهسازی لرزه‌ای اتصالات قاب خمشی در نظر گرفته شده است. به این منظور برای بهبود رفتار اتصال و افزایش شکلپذیری آن دو شرط برای آن قرار داده شده است؛ اولاً کاهش بال باید به صورت دایره‌ای بوده و بیش از ۵۰ درصد مقطع بال کاهش نیابد ثانیاً روش یاد شده باید مفصل پلاستیک را در فاصله‌ای از بر ستون قرار داده و ممان بر ستون را به میزان مطلوبی کاهش دهد. به این منظور نسبت ممان بر ستون به ممان پلاستیک مقاوم تیر نباید بیش از ۱/۰۵ باشد. چنانچه این نسبت بیش از ۱/۰۵ باشد تضعیف باید از طریق دو بال صورت گیرد. در شکل ۱ جزئیات کاهش مقطع بال پایینی اتصال نشان داده شده است.



شکل ۱: جزئیات کاهش مقطع بال پایینی اتصال FEMA 547 [۱۱]

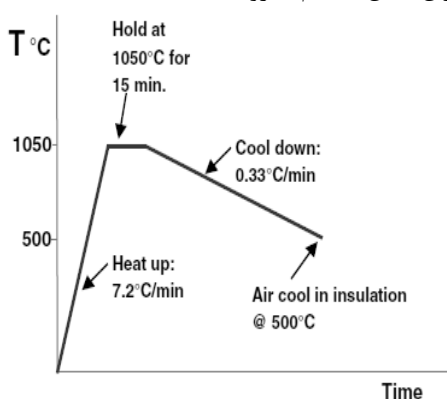
استفاده از روش کاهش مقطع تیر به جهت بهسازی ساختمانهای موجود یا تضعیف نامتقارن تیر، موضوعی است که تا حد کمی به آن پرداخته شده است. در تحقیقات قبلی عمدتاً تضعیف نامتقارن تیر با روشهای تقویتی نامتقارن اتصال (مانند لچکی^۸ و ماهیچه^۹) مقایسه شده است. Civgan و همکاران [۱۲] به منظور بهسازی اتصالات پیش از زلزله نورتریج (۱۹۹۴) (اتصالات مستقیم صلب تیر به ستون) دو روش کاهش مقطع تیر و ماهیچه را در قالب ۶ نمونه اتصال صلب فولادی بررسی کرده‌اند. آنها در تحقیقشان ۲ نمونه را با استفاده از روش تضعیف بال پایین و ۴ نمونه را با استفاده از ماهیچه در بال پایین بهسازی کرده‌اند. نتیجه آزمایشات چرخه‌ای نشان داده است که روش کاهش مقطع بال پایین به تنهایی نمیتواند از شکست ترد در ناحیه اتصال جلوگیری کند. از نظر مکانیزم خرابی و رفتار چرخه‌ای اتصالات بهسازی شده، بهترین عملکرد مربوط به اتصال بهسازی شده با ماهیچه بالا و پایین بوده است.

Brandon و همکاران [۱۳] در تحقیقی مشابه شش نمونه اتصال را با استفاده از دو روش تضعیف و ماهیچه بهسازی کرده و تحت بار چرخه‌ای قرار داده‌اند. در سه مورد از نمونه‌ها دال بتنی نیز به تیر اضافه شده است. نتایج آزمایشها نشان داد که روش تضعیف بدون تعویض جوش محل اتصال با جوش دارای سختی بالا بهبود عملکرد اتصال تیر به ستون را به دنبال ندارد. روش تضعیف با جایگزینی جوش با سختی بالا شکست شکلپذیر برای اتصال حاصل شد. روش ماهیچه نتایج بهتری از تضعیف نشان داده است.

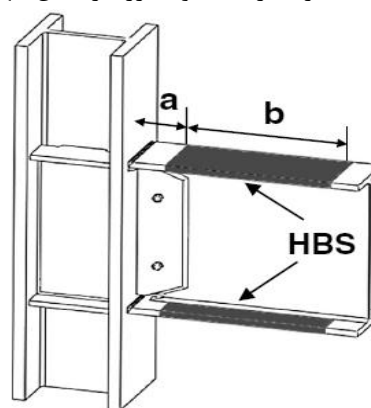
Engelhardt و Civjan [۱۴] به منظور بررسی تاثیر دال کامپوزیتی بر روی رفتار با اتصالات بهسازی شده به روش کاهش مقطع و ماهیچه شش نمونه را تحت بار چرخه‌ای قرار داده‌اند. نمونه‌ها به تفکیک یکبار با دال و یکبار بدون دال تحت بار چرخه‌ای قرار گرفتند. تاثیر مثبت دال بتنی در ممان حداکثر مورد تحمل اتصال در این آزمایشات نتیجه شده است.

۲ روش حرارتی در بهبود رفتار اتصالات فولادی

همانگونه که گفته شد ایده اصلی روش تضعیف مقطع تیر، ایجاد یک فیوز شکلپذیر در آن میباشد. حال آنکه از طریق فرایند آنیل کردن^{۱۰} میتوان شکلپذیری فولاد ساختمانی را افزایش داد. در روشی که اخیراً توسط یک تیم تحقیقاتی در دانشگاه کارولینای شمالی [۱۵] انجام شده است، برای بهبود عملکرد اتصالات فولادی به جای کاهش سطح ناحیه‌ای از تیر، به تضعیف تیر از طریق کاهش تنش تسلیم مبادرت میشود. این کاهش با استفاده از اعمال حرارت به ناحیه‌ای از بال بالا و پایین صورت میپذیرد. گرادیان حرارتی شامل حرارت‌دهی سریع و سرد شدن آهسته می‌باشد. در تحقیقشان از تابع حرارتی موجود در **Error! Reference source not found.** استفاده کرده‌اند. در این شکل ناحیه تضعیف شده با نام مقطع حرارت دیده (^{۱۱}HBS) نشان داده شده است. در واقع با استفاده از این گرادیان به آنیل شدن فولاد کمک میشود. در این فرایند، دانه‌های ریز فولاد^{۱۲} تغییر اندازه داده و با بزرگتر شدن آنها انتظار کاهش میزان تنش تسلیم میرود.



(b)



(a)

⁸ Rib⁹ Haunch¹⁰ Annealing¹¹ Heat treated beam section (HBS)¹² Sub grain

شکل ۲: تیر با مقطع حرارت داده شده توسط Morrison و همکاران [۱۵] (a) اتصال تیر به ستون و محل اعمال بارگذاری حرارتی (b) گرادیان حرارتی در نتیجه اعمال حرارت کنترل شده بر اتصال مفصل پلاستیک به ناحیه تضعیف شده انتقال یافته و شکلپذیری قابل قبولی برای اتصال تیر به ستون حاصل شده است.

۳ هدف از تحقیق حاضر

بهسازی اتصالات ممکن است به دلیل تغییر آیین‌نامه، تغییر کاربری یا ایراد در طراحی و اجرا انجام پذیرد. بهبود عملکرد اتصال در سازه‌های ساخته شده (در حال سرویس‌دهی) همواره از مشکل‌ترین بخشهای مقاوم‌سازی سازه بوده است. برداشتن دال بتنی و همچنین تخریب میانقابها از جمله مواردی است که اجرای بهسازی اتصالات فولادی را تا حد زیادی مشکل می‌سازد. همچنین از جمله مواردی که در FEMA547 [۱۱] مورد بحث قرار گرفته است، اطمینان یا عدم اطمینان از کیفیت جوش نفوذی در اتصال است. در صورت وجود نقص در جوش بال بالا، برداشتن ناحیه کوچکی از دال بتنی و تعویض جوش آن (مطابق شکل ۱) به راحتی صورت می‌گیرد. درحالی‌که تعویض جوش ناقص در بال پایین بسیار مشکل است. در تحقیقات گذشته اولاً روشهای متقارن تضعیف تیر بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است و ثانیاً بهسازی اتصال با وجود نقص در جوش مورد توجه قرار نگرفته است. در این مقاله روشهای بهسازی نامتقارن اتصال از طریق تضعیف بال پایین و جان تیر مورد بررسی قرار گرفته است و در کنار روش "کاهش مقطع" برای اولین بار روش "حرارتی" با هدف بهسازی نامتقارن اتصال معرفی و میزان اثرگذاری آن بر رفتار چرخهای اتصال مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین نقص موجود در جوش بال پایین به صورت نفوذ ناقص (به عنوان یک مورد رایج)، در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که نقایص جوش بسیار زیاد بوده و در این تحقیق یک مورد رایج آنها در اتصال قرار داده شده و تاثیر وجود آن بر رفتار اتصال پیش و پس از بهسازی مورد ارزیابی قرار گرفته است. فلذا این تحقیق میتواند شروعی برای تحقیقات بعدی در این حوزه باشد.

۴ صحت‌سنجی مدل اجزای محدود

پیش از بررسی رفتار اتصال ناقص و بهسازی شده، نیاز است تا مدل اجزای محدود صحت‌سنجی شود. با توجه به آنکه روش حرارتی و تحلیل مدل اجزای محدود تحت بارهای حرارتی و چرخهای زمانبر و دارای خطا است، در مرحله صحت‌سنجی دقت استفاده از مشخصات پس از حرارت فولاد به جای تحلیل حرارتی برآورد میشود. به این منظور اتصال مورد استفاده Morrison و همکاران [۱۵] در برنامه اجزای محدود اباکوس [۱۶] مدل شده است. در **Error! Reference source not found.** هندسه مدل عددی و آزمایشگاهی نشان داده شده است.

۴-۱ هندسه و شرایط گیرداری

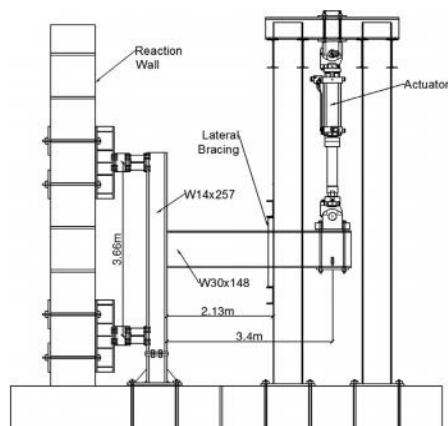
هندسه در نظر گرفته شده در مقاله حاضر مطابق تحقیق Morrison و همکاران [۱۵] میباشد. در دو انتهای تیر تکیه‌گاه غلظکی و مفصلی در نظر گرفته شده است. ستون از شماره W14*257 و تیر از شماره W30*148 میباشد. محل اعمال بارگذاری در انتهای تیر بوده است. به منظور مشبندی بهتر در ناحیه اتصال از شبکه بندی به اندازه ۵ سانتی‌متر در ناحیه دور از اتصال و ۲ سانتی‌متر در ناحیه نزدیک به اتصال استفاده شده است.

۴-۲ مدل رفتاری

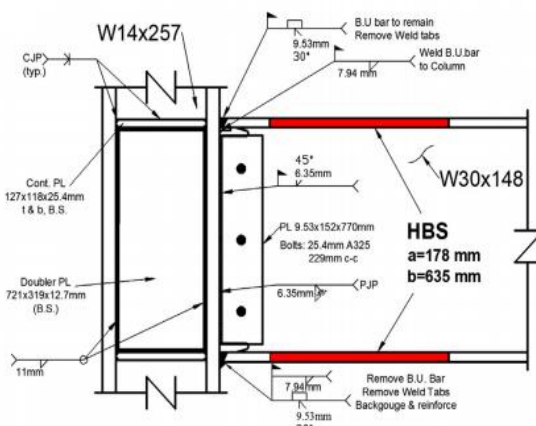
مصالح به‌کار رفته در اتصال و اجزای آن شامل تیر و ستون، پیچ و جوش مطابق مقاله مرجع [۱۵] میباشد. در **Error! Reference source not found.** مشخصات مصالح به‌کار رفته در مدل عددی دیده میشود. نکته قابل ذکر این است که در مدل تحلیلی به مشخصات پس آتش ۱۳ یا پس از حرارت نیاز میباشد. این مشخصات به مقدار زیادی به نحوه و سرعت سرد شدن فولاد دارد. طبق بررسی Morrison و همکاران [۱۵] چنانچه فولاد A992 با نرخهای مختلف سرد شود رفتار پس آتش مطابق **Error! Reference source not found.** خواهد بود. با توجه به آنکه هر اندازه سرد شدن فولاد با سرعت کمتری انجام شود، افت مقاومت بیشتر و شکلپذیری بیشتری مشاهده میشود.

¹³ Post fire

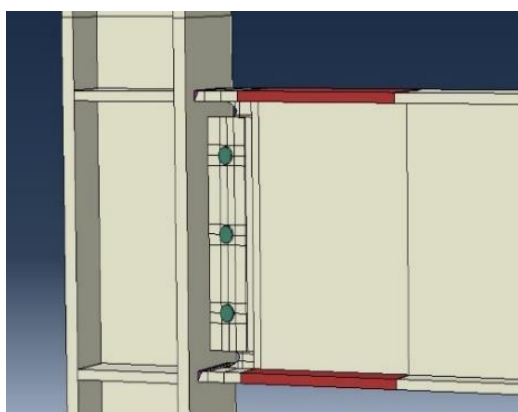
در این مقاله حالت سرد شدن با نرخ $0/01$ درجه بر ثانیه در نظر گرفته شده است. با استفاده از پدهای سرامیکی مورد استفاده توسط Morrison و همکاران [۱۵] این سرعت، آهسته ترین نرخ سرد شدن میباشد. در این حالت تنش تسلیم فولاد حدود $0/۶۵$ مقدار حرارت ندیده میباشد. پیچ‌ها از نوع پرمقاومت مطابق شکل بوده و برای آنها از سخت شوندگی کینماتیکی استفاده شده است.



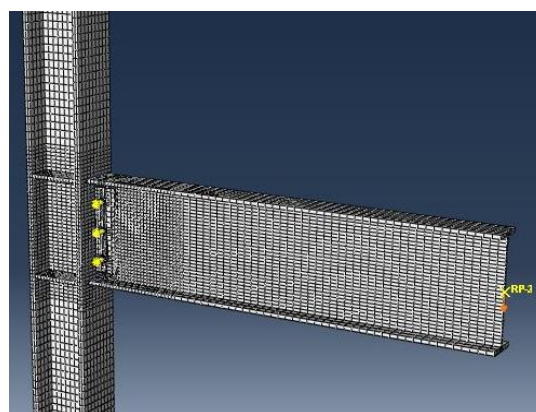
(b)



(a)

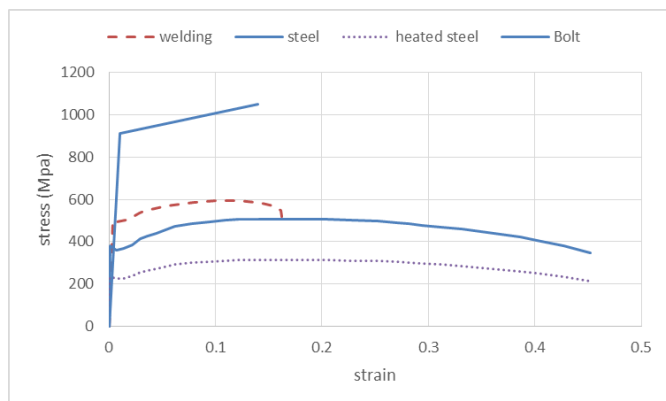


(d)

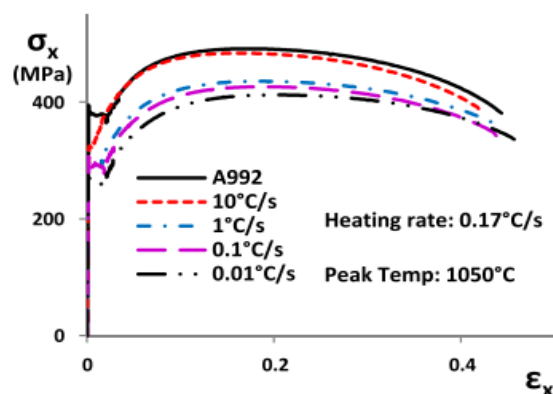


(c)

شکل ۳: هندسه اتصال مورد آزمایش Morrison و همکاران [۱۵]. (a) جزئیات اتصال (b) ست آپ آزمایش (c) مش بندی مدل نرم‌افزاری (d) مصالح اختصاص یافته به اتصال در نرم‌افزار



(b)



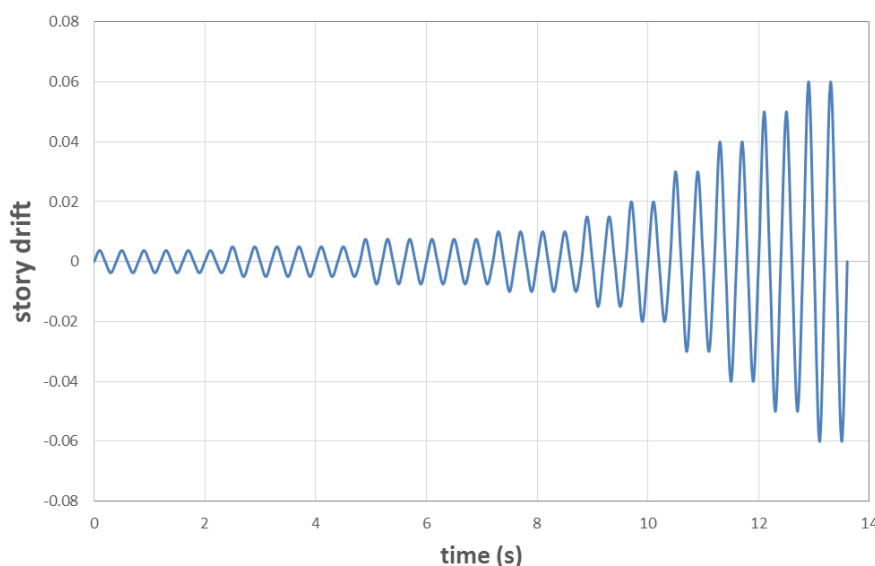
(a)

شکل ۴: مصالح به کار رفته در مدل عددی (a) رفتار فولاد تحت حرارت‌های مختلف (morrison و همکاران [۱۵]) (b) مشخصات در نظر گرفته شده در نرم‌افزار

۳-۴ بارگذاری

بارگذاری به کار رفته در تحلیل اجزای محدود مطابق با استاندارد ارائه شده توسط SAC [۱] و FEMA355 [۱۷] بوده و در Error! Reference source not found. نشان داده شده است. در این بارگذاری دریفت اعمال شده به قاب از ۰/۰۰۳۷۵ تا ۰/۰۰۶ ادامه پیدا می‌کند. این تاریخچه دریفت به صورت بارگذاری چرخشی به انتهای تیر وارد شده است. در شکل ۵ تعداد سیکل‌ها و دامنه بارگذاری اعمال شده به تیر نشان داده شده است.

دریفت	تعداد چرخه
0.00375	6
0.005	6
0.0075	6
0.01	4
0.015	2
0.02	2
0.03	2
0.04	2
0.05	2
0.06	2

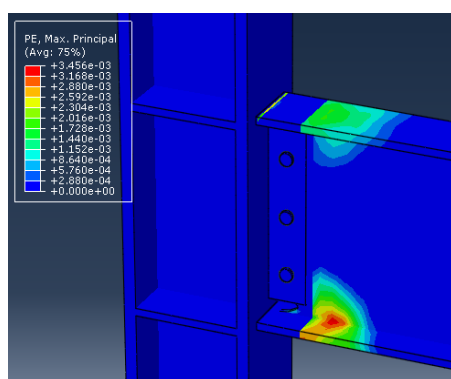


شکل ۵: بارگذاری شبه استاتیکی [۱]

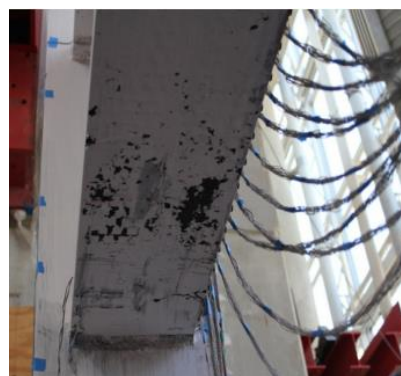
۴-۴ نتایج تحلیل

پس از انجام تحلیل تحت بارگذاری شبه استاتیکی، خروجی‌های بدست آمده از نرم‌افزار در مراحل مختلف بارگذاری در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. به منظور مقایسه مد خرابی بین مدل عددی و آزمایشگاهی از پارامتر کرنش پلاستیک استفاده شده است. ریختن رنگ در ناحیه تغییر شکل یافته در مدل آزمایشگاهی عمدتاً از دررفت ۲/۶ درصد شروع شده است. در مدل عددی نیز با توجه به اینکه کرنش تسلیم فولاد حرارت دیده برابر ۰/۰۵۵ / میباشد در مراحل بارگذاری میتوان از طریق کانتورهای کرنش پلاستیک نتایج عددی را تفسیر نمود. لازم به ذکر است کانتورهای کرنش مقیاس نشده به منظور تشخیص محل رخداد حداکثر در این مقاله استفاده شده است. با در نظر گرفتن این موضوع و انجام تحلیل غیرخطی و اعمال بارها در بازه‌های زمانی به مراتب کوچکتر از مدل آزمایشگاهی، تقارن یا عدم تقارن کانتورهای کرنش در تیر مورد توجه قرار نمیگیرد و تنها مقادیر آن به منظور تشخیص محل تسلیم مبنای مقایسه می‌باشد.

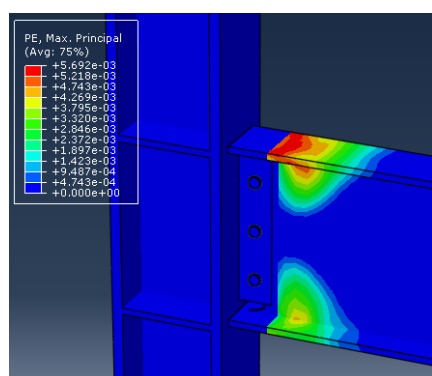
در **Error! Reference source not found.** کمانش موضعی در اتصال Morrison و همکاران [۱۵] و مدل عددی دیده میشود. همانطور که در شکل‌های ۶ و ۷ مشخص است با افزایش دامنه بارگذاری عمده خرابی‌ها به ناحیه حرارت دیده منتقل میشود. در مدل آزمایشگاهی با ادامه بارگذاری ناحیه وسیع‌تری از اتصال رنگ آن جدا شده است که در مدل عددی مبنایست با توجه به مقادیر کرنشها در کانتورهای کرنش پلاستیک به این مورد توجه کرد. همانطور که دیده میشود محل وقوع مفصل پلاستیک به فاصله حدود ۵۲ سانتی‌متر از بر ستون میباشد. به این ترتیب اتصال HBS از اتصال قبل از نورتریج که در آن مفصل پلاستیک در بر اتصال تشکیل میشود، رفتار بهتری نشان میدهد.



۱ درصد دررفت در مدل عددی



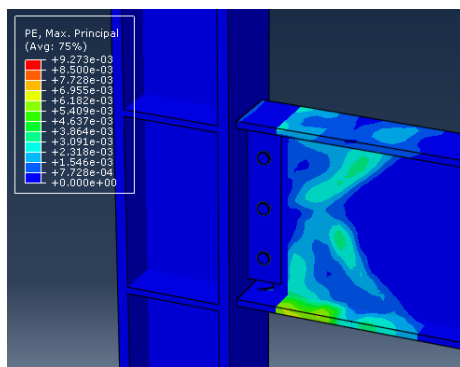
۱ درصد دررفت در مدل آزمایشگاهی [۱۵]



۳ درصد دررفت در مدل عددی



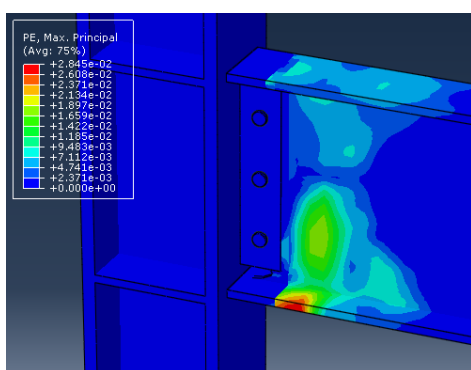
۳ درصد دررفت در مدل آزمایشگاهی [۱۵]



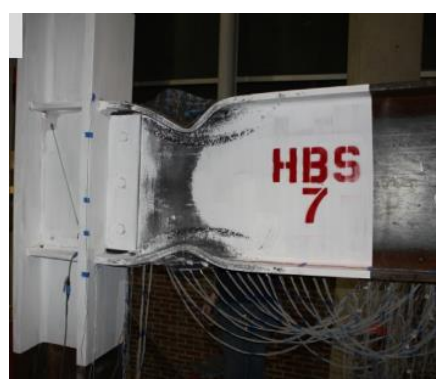
۴ درصد دریفت در مدل عددی



۴ درصد دریفت در مدل آزمایشگاهی [۱۵]

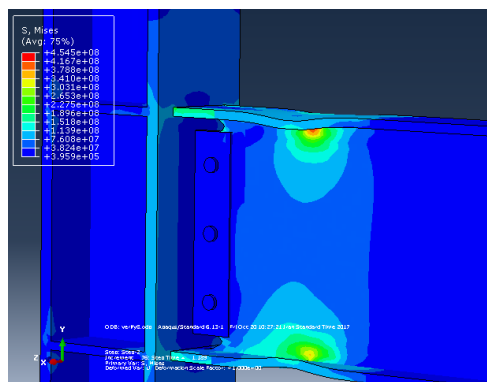


۶ درصد دریفت در مدل عددی



۶ درصد دریفت در مدل آزمایشگاهی [۱۵]

شکل ۶: توزیع کرنش پلاستیک در اتصال در دریفت ۱، ۳، ۴ و ۶ درصد در مدل عددی و آزمایشگاهی بدون تغییر شکل



شکل ۷: مقایسه کماتش موضعی در اتصال Morrison و همکاران [۱۵] و مدل عددی در چرخش ۴ درصد

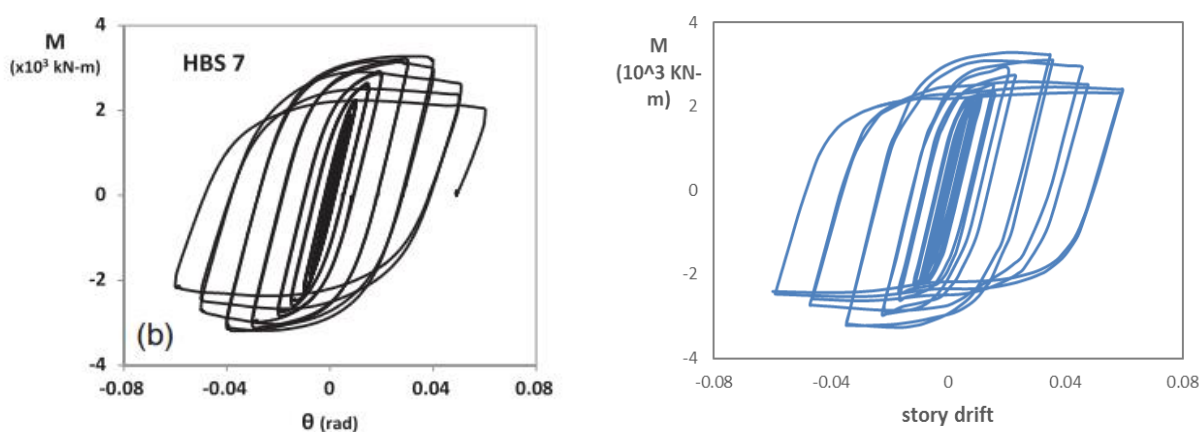
در یک اتصال قاب خمشی، چرخش کلی اتصال را میتوان مطابق رابطه (۱) به سه قسمت تقسیم نمود.

$$\theta_{interstory} = \theta_{total} = \theta_{joint} + \theta_{beam} + \theta_{column} \quad (1)$$

که در آن، $\theta_{interstory}$ زاویه دریفت میان طبقه، θ_{total} چرخش کلی اتصال، θ_{joint} چرخش اجزای اتصال، θ_{beam} چرخش تیر و θ_{column} چرخش ستون میباشد. با در نظر گرفتن دریفت اعمال شده به اتصال و ممان محاسبه شده توسط نرم افزار در طول مدت بارگذاری نمودار هیستریزیس (شامل دریفت اعمال شده و ممان در میان تار ستون) اتصال مطابق Error! Reference source not

found. بدست آمده است. در این شکل دریافت اعمال شده در مقابل ممان انتهایی تیر ترسیم شده است. حداکثر ممان وارده بر اتصال تقریباً برابر $3/2$ کیلو نیوتن-متر برآورد شده است. به منظور برآورد باربری چرخشی اتصال میبایست ممان پلاستیک تیر را طبق توصیه FEMA355 [۱۷] بدست آورده و ۸۰ درصد آن را از روی محور قائم با نمودارهای هیستریزس حداکثر چرخش محاسبه شود. البته این مورد در مقاله مرجع مورد بحث قرار نگرفته است.

به منظور مقایسه پارامتری منحنی‌های هیستریزس در حالت آزمایشگاهی و عددی جدول به عنوان پارامترهای نمودار دوخطی قابل ارائه است. در مدل آزمایشگاهی تحت چرخش $0/026$ رادیان اتصال وارد ناحیه پلاستیک شده است در حالی که در مدل اجزای محدود این چرخش $0/022$ رادیان محاسبه شد. سختی چرخشی اتصال پس از تسلیم کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد. این کاهش سختی در نمونه آزمایشگاهی $110/43$ درصد و در مدل عددی $102/86$ درصد بوده است. این میزان اختلاف میان مدل عددی و آزمایشگاهی را میتوان با سختی بالاتر مدل عددی نسبت به آزمایشگاهی توجیه نمود. با توجه به اینکه حصول گیرداری کامل در آزمایشگاه تا حدی غیر ممکن است همواره مدل عددی سختی چرخشی بیشتر و افت سختی کمتری نشان میدهد.



شکل ۸: چرخش کل اتصال در مقابل ممان (a) مدل عددی (b) مدل عددی آزمایشگاهی [۱۵]

جدول ۱: مقایسه پارامتری منحنی‌های هیستریزس عددی و آزمایشگاهی

	آزمایشگاهی [۱۵]				عددی			
	θ	M (10^6 N.m)	K (10^6 N.m/rad)	ΔK %	θ	M (10^6 N.m)	K (10^6 N.m/rad)	ΔK %
شروع	0	0			0	0		
تسلیم	0.026	2.21	84.61		0.022	2.43	110.4	
نهایی	0.06	1.93	-8.82	-110.43	0.06	2.31	-3.16	-102.86

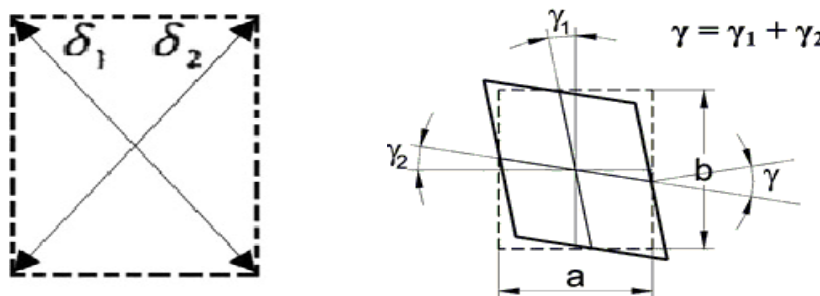
۱: چرخش کل ۲: ممان محاسبه شده در میان تار ستون ۳: سختی چرخشی ۴: افت سختی در انتهای بارگذاری

. تغییر شکل چشمه اتصال به دلیل وقوع کرنش‌های برشی رخ میدهد که این امر باعث چرخش چشمه اتصال می‌شود. نحوه محاسبه‌ی این چرخش، در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. همچنین مقدار چرخش چشمه اتصال θ_{pz} از فرمول زیر

محاسبه می‌شود. این فرمول براساس بسط دیفرانسیلی تشکیل شده بروی فرمول Mazzolani [۸] بدست آمده است. چرخش چشمه اتصال در این فرمول براساس تغییر در طول قطرهای چشمه اتصال مطابق رابطه (۲) می‌باشد.

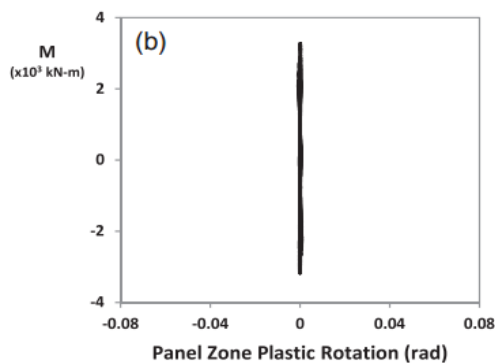
$$\theta_{pz} = \frac{a^2 + b^2}{2ab} (\delta_1 - \delta_2) \quad (2)$$

که در آن a و b ابعاد چشمه اتصال و δ_1 و δ_2 مقادیر تغییر طول قطرهای چشمه اتصال می‌باشند. در **Error! Reference source not found.** ابعاد مورد استفاده و محل قرارگیری و راستای تغییر طول قطرهای چشمه اتصال به صورت پارامتری نشان داده شده است.

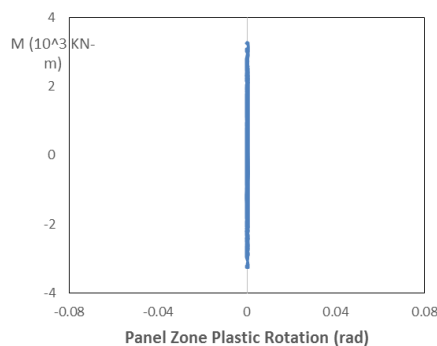


شکل ۹: تغییر شکل چشمه اتصال [۸]

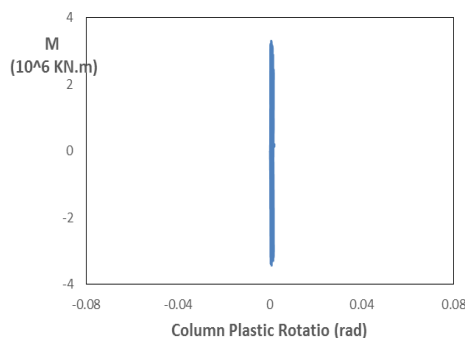
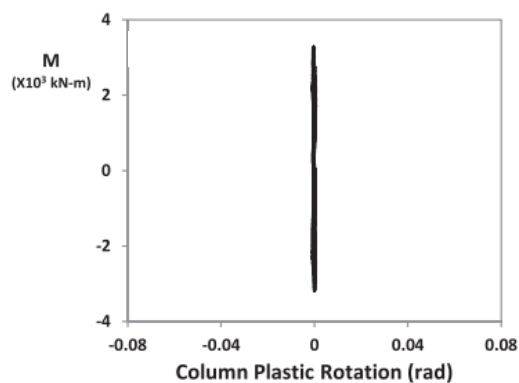
در مدل عددی با تعریف چهار گوشه چشمه اتصال و گرفتن خروجی‌های تغییر مکان میزان چرخش به‌وجود آمده در چشمه اتصال مطابق **Error! Reference source not found.** محاسبه شده است. همچنین با تعریف یک نقطه از وسط ستون سپس استخراج خروجی تغییر مکان و تقسیم بر طول ستون (۳/۶۶ متر) تغییرات چرخش ستون در مقابل ممان ترسیم شده است. همانطور که دیده می‌شود، میزان چرخش چشمه اتصال و ستون در مدل اجزای محدود و آزمایشگاه ناچیز می‌باشد.



تغییر شکل چشمه اتصال (آزمایشگاهی [۱۵])



تغییر شکل چشمه اتصال (عددی)

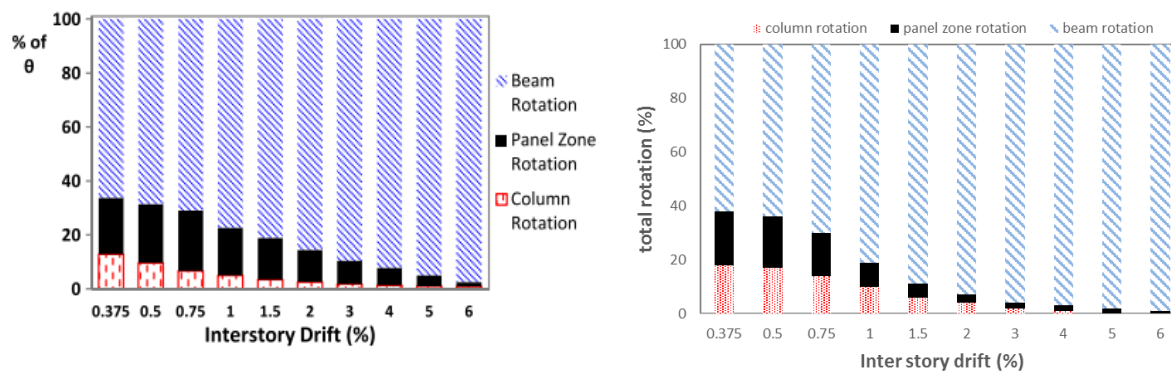


تغییر شکل ستون (عددی)

تغییر شکل ستون (آزمایشگاهی [۱۵])

شکل ۱۰: چرخش چشمه اتصال و ستون در مدل آزمایشگاهی [۱۵] و عددی

به جهت بررسی دقیق‌تر رفتار اتصال و سهم اجزای آن در چرخش کلی به وجود آمده، نمودار ستونی مطابق شکل ۱۱ به دست می‌آید. همانطور که دیده می‌شود در مدل آزمایشگاهی و عددی با افزایش دامنه بارگذاری، سهم ستون و چشمه اتصال در چرخش کل اتصال کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر هر اندازه رفتار اتصال فرا الاستیک می‌شود، اهمیت تیر بیش از سایر اجزای اتصال می‌شود. به این ترتیب با افزایش شکلپذیری تیر، شکلپذیری بیشتر اتصال و ظرفیت پذیرش تغییر شکل‌های فرا الاستیک توسط اتصال افزایش می‌یابد.



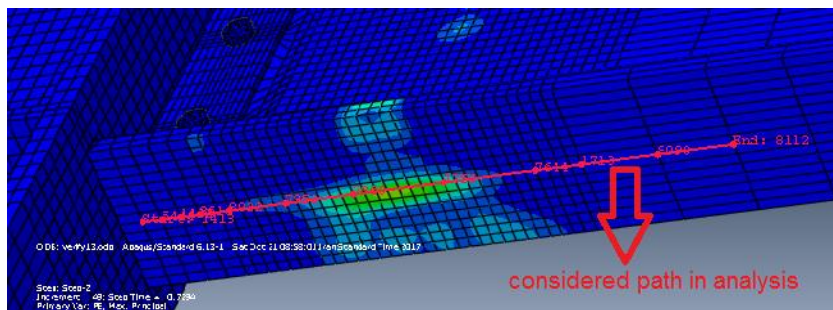
(b)

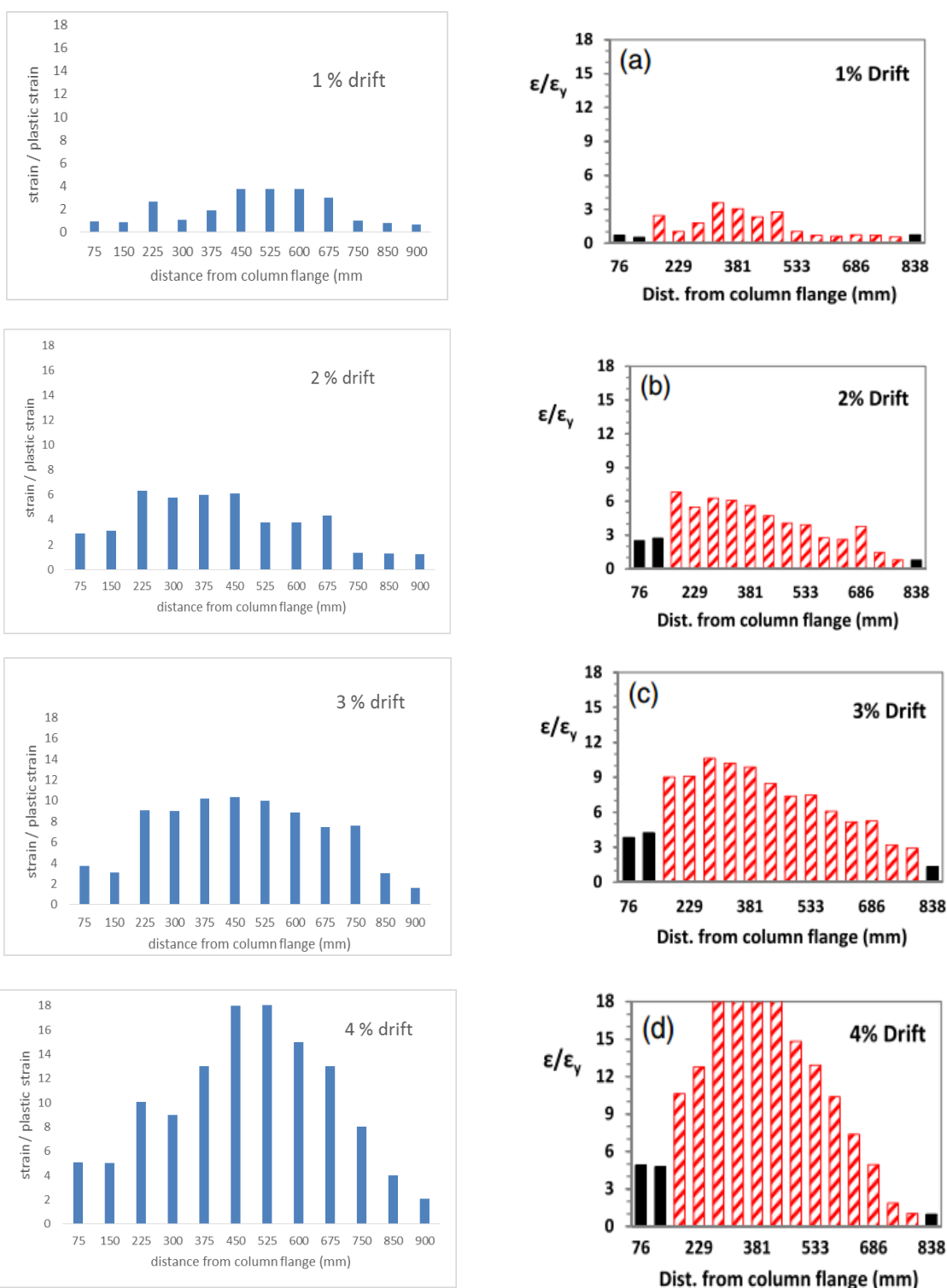
(a)

شکل ۱۱: سهم اجزای اتصال در چرخش کل (a) مدل اجزای محدود (b) مدل آزمایشگاهی [۱۵]

به منظور بررسی رفتار اتصال از جهت کرنش‌های به وجود آمده در بال بالا و پایین یک مسیر ۱۴ در نرم افزار مطابق شکل تعریف کرده و خروجی کرنش طولی را به کرنش تسلیم (برابر ۰/۰۰۵۵) برای مدل آزمایشگاهی و عددی با یکدیگر مقایسه شده است. این مقایسه در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است.

همانطور که دیده می‌شود مدل اجزای محدود با المانها، اندازه مش، نوع تحلیل غیر خطی بر مبنای مشخصات پس از حرارت فولاد از دقت لازم برخوردار بوده و به درستی رفتار چرخه‌ای اتصال را پیش‌بینی می‌کند. به این ترتیب در تحلیل اتصال حرارت دیده (HBS) به جای آنکه تحلیل حرارتی انجام شود، میتوان از مشخصات پس از حرارت فولاد استفاده نمود و جنبه‌های دیگر این اتصال (در این مقاله بهسازی) را به درستی بررسی کرد.





شکل ۱۲: مقایسه نسبت کرنشها در مدل عددی (ستون سمت چپ) و آزمایشگاهی (ستون سمت راست) [۱۵]

۵ بهسازی اتصالات قاب خمشی فولادی از طریق تضعیف بال پایین

بهسازی اتصالات قاب خمشی فولادی معمولاً با مشکلاتی از جمله برداشتن دال بتنی همراه است. در این مقاله روش تضعیف تیر اساس بهسازی میباشد. علاوه بر این، عدم اطمینان از کیفیت جوش از جمله مواردی است که در انتخاب روش بهسازی مورد توجه قرار میگیرد. در

اتصال مورد بررسی تخلخل جوش به عنوان یکی از نواقص متداول در جوش پایین را به صورت پیش فرض در اتصال قرار داده و سپس از طریق کاهش مقطع بال و جان و اعمال بارحرارتی اقدام به بهسازی میشود. علت قرار دادن نقص جوش در بال پایین این است که، چنانچه ایرادات جوشکاری در محل اتصالات مشاهده شود، در بال بالا میتوان این نقایص را با سنگ‌زدن و دوباره جوش‌دادن، رفع نمود اما در بال پایین این ایراد به راحتی قابل رفع کردن نیست. به همین ترتیب چنانچه در فرایند ساخت اتصالات قاب خمشی آزمایشات رادیوگرافی و اولتراسونیک نتایج منفی ارائه دهند، معمولاً طراحان با استفاده از روشهای تضعیف یا تقویت در دوبرال به انتقال مفصل پلاستیک به ناحیه‌ای دور از بر اتصال اقدام میکنند.

۱-۵ رفتار اتصال ضعیف تحت بار سیکلی

موضوع تاثیر نفوذ ناقص در جوش در مرجع [۱۸] به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. آنها ۴ نمونه اتصال تیر به ستون با جوش ناقص را تحت بار سیکلی قرار دادند. خرابی‌های غیر شکلپذیر و ترکهای ناگهانی در نتیجه جوش ناقص اتصال بوده است.

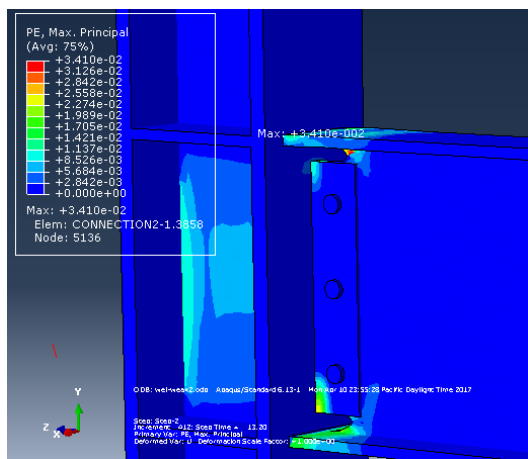
در تحقیق حاضر مقاومت جوشی که در بال پایین وجود دارد کمتر در نظر گرفته شده است. به همین ترتیب با فرض توزیع یکنواخت مصالح جوش در ریشه جوش، کاهش ۴۰ درصدی در میزان مصالح (تخلخل) با این میزان کاهش در مقاومت جوش تأثیر داده شده است. این فرض در تناسب با تحقیق مرجع [۱۸] میباشد. تخلخل جوش از جمله مواردی است که نیاز به انجام تست داشته و با بازدید ظاهری قابل تشخیص نیست. چنانچه گل جوش در پاس جوشکاری دستی برداشته نشود و پاس بعدی بر روی همان گل جوش اجرا شود ایجاد تخلخل در جوش اجتناب ناپذیر است.

در **Error! Reference source not found.** هندسه و نتایج تحلیل عددی اتصال ناقص دیده میشود. همانطور که مشخص است در این حالت محل رخداد کرنش حداکثر در ناحیه نزدیک اتصال بوده و میزان کرنش پلاستیک در نواحی اتصال قابل توجه میباشد. علاوه بر میزان کرنشهایی که در فلز پایه مشاهده شد، تنشهای جوش در بال بالا از تنش تسلیم فراتر رفته و ترکهایی سطحی و عمیق در این نواحی ایجاد خواهد شد. میزان انرژی مستهلک شده در این اتصال به اندازه ۲۷۸/۳۱ کیلوژول میباشد که عمده سهم استهلاک انرژی مربوط به تیر میباشد. در چرخش ۰/۱۶ رادیان اولین نقطه تسلیم رخ داد و رفتار چرخه‌ای در کشش و فشار این اتصال تقریباً یکسان بود. چشمه اتصال نیز دارای کرنشهای پلاستیک بالایی است. با این حال پیچ‌ها تنشهای زیادتر از مقاومت نهایی خود را تجربه نکرده‌اند.

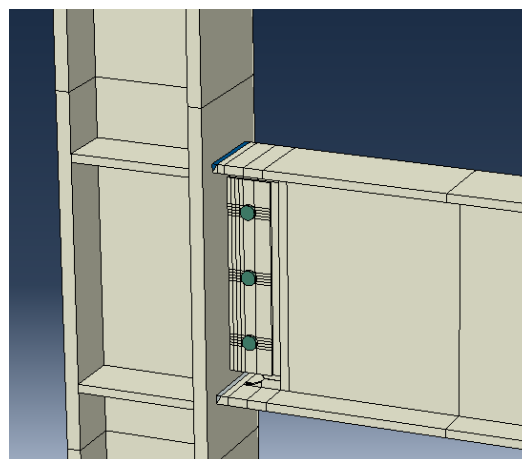
۶ بهسازی اتصال دارای نقص جوش با استفاده از روشهای تضعیفی تیر

تجارب بدست آمده از زلزله نورتریج (۱۹۹۴) عدم کفایت لرزه ای اتصالات قاب خمشی به اثبات رسانید. در اتصالات قبل از نورتریج محل وقوع مفصل پلاستیک در بر اتصال بود. پیشنهاد آیین‌نامه‌های جدید وقوع مفصل پلاستیک در فاصله مطلوب از بر اتصال میباشد. آیین‌نامه FEMA547 [۱۱] دو روش را برای این منظور مورد پذیرش قرار میدهد. یکی از طریق تقویت ناحیه اتصال و دیگری تضعیف تیر در ناحیه اتصال. در اتصال مورد بررسی با توجه به وقوع مد خرابی غیر قابل پذیرش در ناحیه نزدیک به بر اتصال برای بهبود مد خرابی و انتقال مفصل پلاستیک به ناحیه‌ای با فاصله مطلوب، از روش تضعیف استفاده میشود. یکی با استفاده از روش "کاهش مقطع" و دیگری با استفاده از "حرارت بال پایین". حرارت بال پایین مطابق با نمودار **Error! Reference source not found.** و کاهش مقطع با کاهش مساحت بال پایین به اندازه نصف و همینطور کاهش مقطع جان انجام شده است. جزییات این روشها در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است.

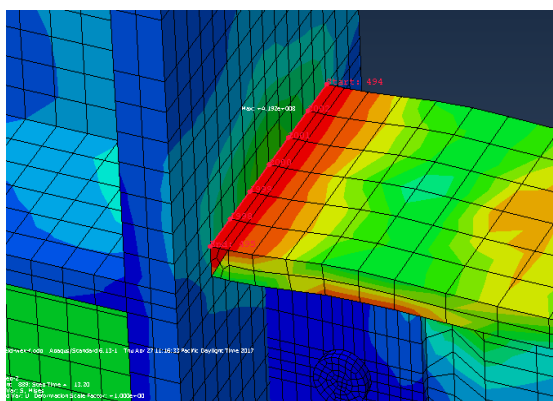
روشهای یاد شده بر اتصال مورد بررسی اعمال شده و این اتصال مجدداً تحت بار سیکلی مطابق **Error! Reference source not found.** قرار گرفته است. کانتورهای کرنش پلاستیک در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. همانطور که دیده میشود روشهای تضعیف تیر در اتصال میتوانند محل وقوع خرابی را از بر اتصال به ناحیه‌ای با فاصله از این ناحیه منتقل کنند.



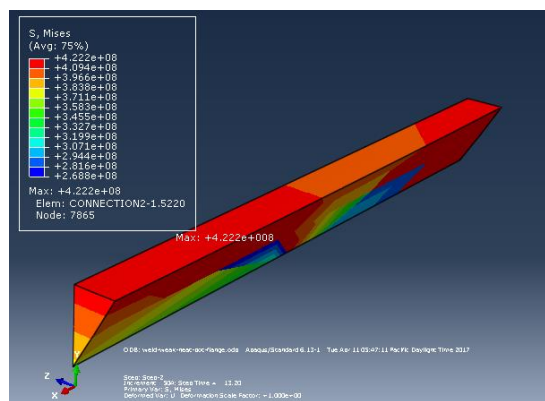
(b)



(a)

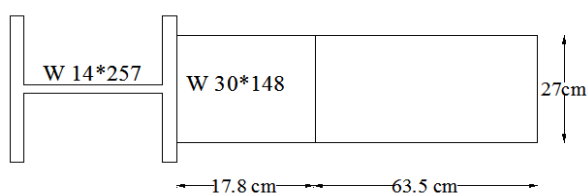


(d)

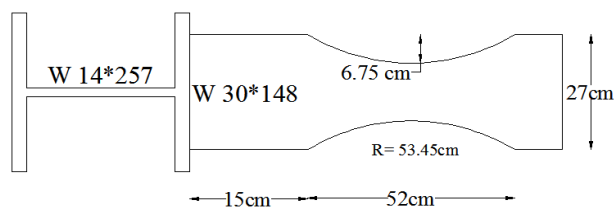


(c)

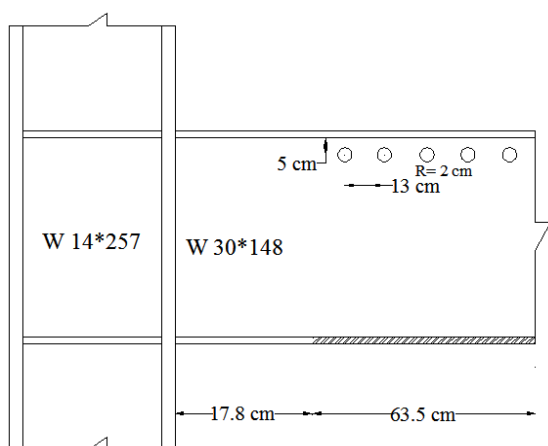
شکل ۱۳: تحلیل عددی اتصال دارای نقص تخلخل در بال پایین (a) هندسه و مصالح به کار رفته (b) توزیع کرنش پلاستیک (c) توزیع تنش وان میز در جوش بال بالا (d) انتخاب یک مسیر در نرم افزار به منظور کنترل پارامترهای خرابی



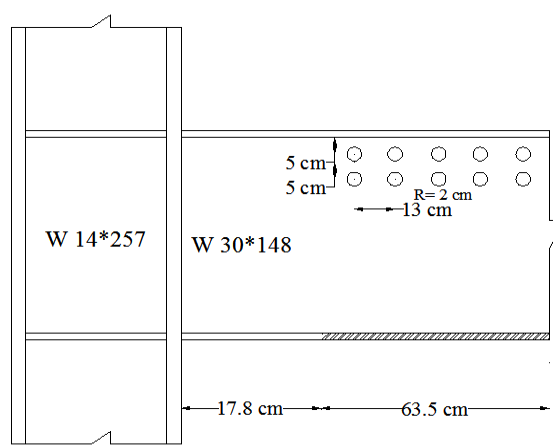
(a)



(b)

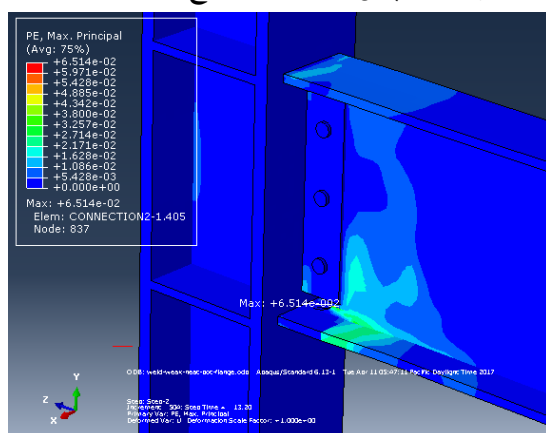


(c)

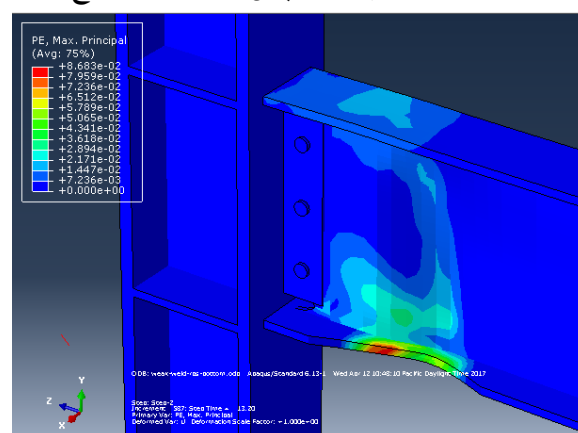


(d)

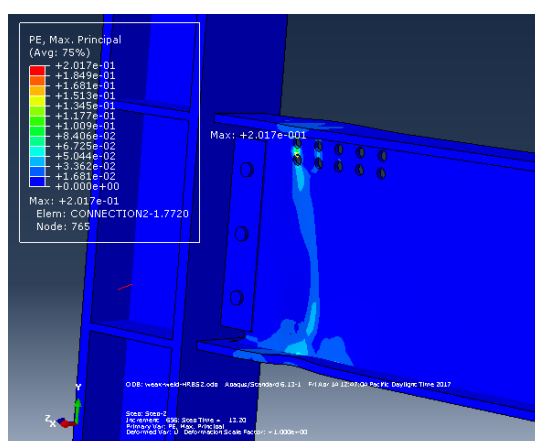
شکل ۱۴: جزئیات روشهای تضعیف مقطع به جهت بهسازی اتصال ضعیف (a) محل اعمال حرارت در روش HBS (b) جزئیات کاهش مقطع بال پایین RBS (c) حرارت بال پایین و یک ردیف سوراخ جان HRBS1 (d) حرارت بال پایین و دو ردیف سوراخ جان HRBS2



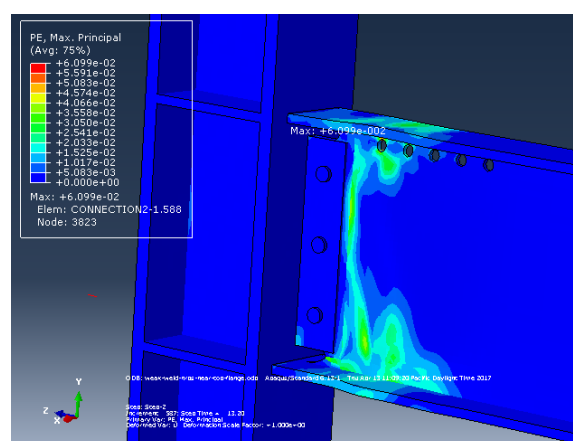
(b)



(a)



(d)



(c)

شکل ۱۵: نتایج تحلیل اتصال بهسازی شده با روشهای تضعیف (a) ۵۰ درصد کاهش مقطع در بال پایین (b) حرارت در بال پایین (c) حرارت در بال پایین و سوراخ در جان در نزدیکی بال بالا (d) حرارت در بال پایین و سوراخ در جان در نزدیکی بال بالا در دو ردیف

۶-۱ روش کاهش مقطع بال پایین (R-RBS)

در این حالت برش دایره‌ای در بال پایین به میزان کاهش ۵۰ درصد اعمال شده است. همانطور که دیده میشود در این حالت کمانش خارج از صفحه در انتهای بارگذاری به وجود آمده است. علی‌رغم اینکه توزیع کرنشهای پلاستیک محل وقوع حداکثر را در ناحیه کاهش یافته نشان میدهد، نمیتوان از اتصال انتظار تحمل بار را در ۶ درصد رادیان داشت بلکه چرخش نهایی این اتصال به مراتب پایین تر از این مقدار است. میزان انرژی مستهلک شده توسط این اتصال ۲۱۴/۴۷ کیلوژول میباشد که ۲۱۳/۸ آن سهم تیر میباشد. به این ترتیب میتوان با افزایش شکلپذیری تیر زمینه را برای استهلاک بیشتر اتصال فراهم آورد. در چرخش ۰/۰۱۵ رادیان تسلیم اتفاق افتاده و تا این محدوده تقریباً رفتار اتصال در کشش و فشار یکسان بوده است. اما پس از تسلیم رفتار متفاوت مشاهده شد. با در نظر گرفتن معیار FEMA 350 برای مقاومت اتصال چرخش ۰/۰۲۸ را میتوان برای این اتصال در نظر گرفت که ۰/۰۱۳ آن در ناحیه فرا ارتجاعی قرار دارد و در نتیجه این اتصال در محدوده اتصالات گیردار با شکلپذیری متوسط هم پذیرفته نمیشود.

۶-۲ روش حرارت بال پایین (R-HBS)

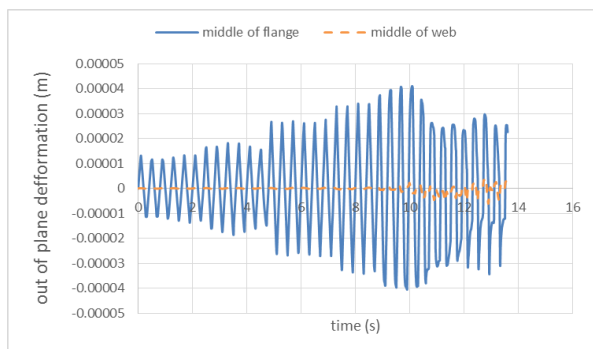
در حالت دوم که تنها حرارت بر بال پایین اثر کرده و فولاد تیر را آنیل کرده است میزان کرنش حداکثر کاهش یافته است. این پارامتر از ۰/۰۸۶ به ۰/۰۶۵ رسیده است و کمانش خارج از صفحه کمتری را نمونه تجربه کرده است. میزان انرژی مستهلک شده توسط این اتصال ۲۴۶/۱۳ کیلوژول میباشد که ۲۴۴/۸۵ آن سهم تیر میباشد. به این ترتیب میتوان با افزایش شکلپذیری تیر زمینه را برای استهلاک بیشتر اتصال فراهم آورد. در چرخش ۰/۰۱۴ رادیان تسلیم اتفاق افتاده و تا این محدوده تقریباً رفتار اتصال در کشش و فشار یکسان بوده است. همینطور پس از تسلیم رفتار نسبتاً یکسان مشاهده شد. با در نظر گرفتن معیار FEMA 350 برای مقاومت اتصال چرخش ۰/۰۰۶ را میتوان برای این اتصال در نظر گرفت که ۰/۰۴۶ آن در ناحیه فرا ارتجاعی قرار دارد و در نتیجه این اتصال در محدوده اتصالات گیردار با شکلپذیری ویژه پذیرفته میشود.

۶-۳ روش حرارت بال پایین و سوراخ جان (R-HRBS1)

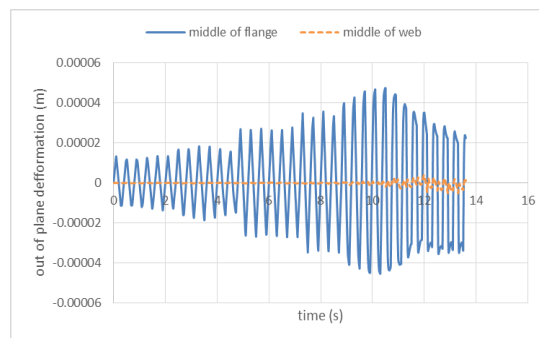
با توجه به مشاهده ۰/۰۱۶ به عنوان کرنش پلاستیک در نزدیکی بال بالا از راه حل دیگری به منظور انتقال بهتر کرنشهای پلاستیک استفاده شد. ۵ عدد سوراخ به قطر ۲ سانتی‌متر در نزدیکی بال بالا و در جان تیر در نظر گرفته شد. در حالت سوم باز هم میزان کرنش پلاستیک حداکثر کاهش پیدا کرده و به میزان ۰/۰۶۱ رسید. با این حال در نواحی نزدیک به اتصال همچنان کرنشها میزان قابل ملاحظه داشتند. میزان انرژی مستهلک شده توسط این اتصال ۲۲۰/۳۳ کیلوژول میباشد که ۲۱۹/۸۱ آن سهم تیر میباشد. در چرخش ۰/۰۱۴ رادیان تسلیم اتفاق افتاده و تا این محدوده تقریباً رفتار اتصال در کشش و فشار یکسان بوده است. اما پس از تسلیم رفتار متفاوت مشاهده شد. با در نظر گرفتن معیار FEMA 350 [۲] برای مقاومت اتصال چرخش ۰/۰۳۲ را میتوان برای این اتصال در نظر گرفت که ۰/۰۱۸ آن در ناحیه فرا ارتجاعی قرار دارد و در نتیجه این اتصال در محدوده اتصالات گیردار با شکلپذیری متوسط هم پذیرفته نمیشود.

۶-۴ روش حرارت بال پایین و سوراخ جان (R-HRBS2)

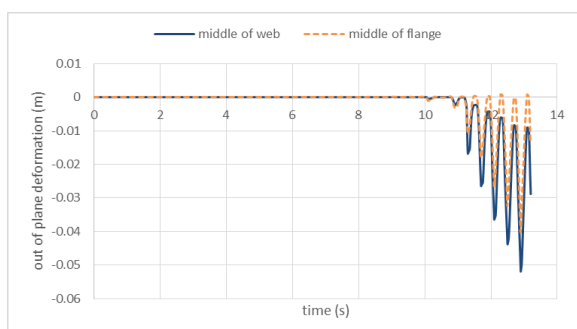
در حالت چهارم که از دو ردیف در جان تیر استفاده شده است میزان کرنش حداکثر افزایش یافته و به مقدار ۰/۲ رسیده است. محل رخداد کرنش حداکثر در ناحیه‌ای با فاصله مطلوب از بر اتصال بوده است. اما همچنان کمانش خارج از صفحه برای این اتصال نیز مطرح است. در این حالت انرژی مستهلک شده کمتر از حالت قبلی و برابر ۲۰۶/۸ کیلو ژول بوده است. چرخش نهایی این اتصال را طبق معیار FEMA350 نمیتوان بیشتر از ۰/۰۲۸ در نظر گرفت. با توجه به اهمیت کمانش خارج از صفحه در برآورد رفتار اتصالات بهسازی شده، تاریخچه زمانی این پارامتر در شکل ۱۶ ارائه شده است.



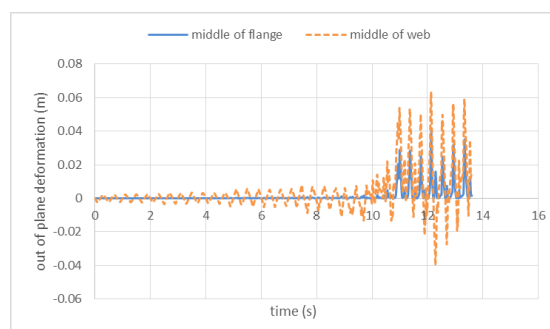
(hbs retrofitted)



(weak)

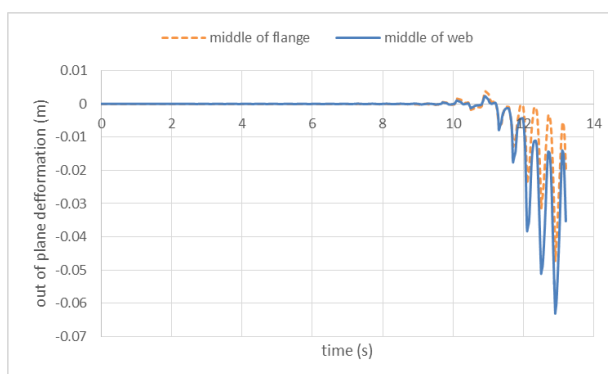


(HRBS1)



(RBS)

شکل ۱۶: کمانش خارج از صفحه اتصالات مورد بررسی در وسط بال و وسط جان

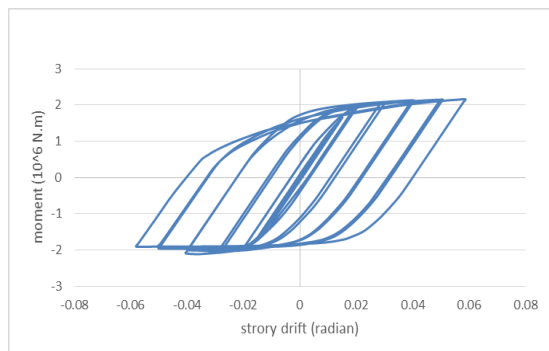


(hrbs2)

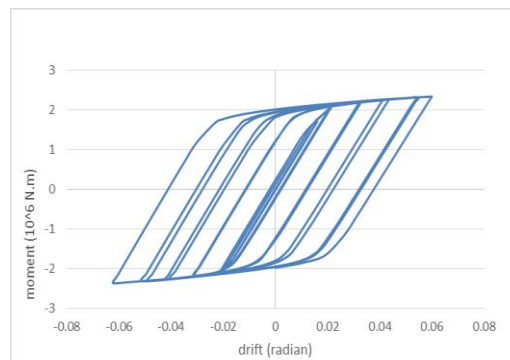
شکل ۱۶: کمانش خارج از صفحه اتصالات مورد بررسی در وسط بال و وسط جان (ادامه)

به منظور مقایسه بین نتایج میزان تغییر مکان یک نقطه از بال و یک نقطه از جان از نرم افزار گرفته میشود. این نقاط وسط بال و وسط جان در ناحیه تضعیف شده است. همانطور که دیده میشود اتصالاتی که در آنها ناحیه از تیر برداشته میشود، تغییر مکان خارج از صفحه در آنها به مراتب بیشتر از اتصال اولیه است. تغییر مکانهای وسط جان تیر عموماً از وسط بال بیشتر میباشد. این اختلاف در اتصال با کاهش از بال پایین، بیشتر نمود دارد. به منظور مقایسه رفتار چرخه‌ای اتصالات بهسازی شده مختلف **Error! Reference source not found.** ارائه شده است.

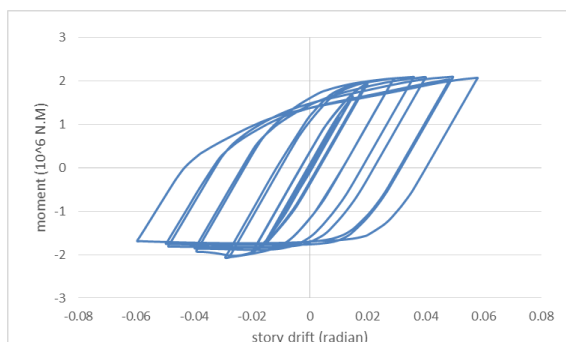
همانطور که دیده میشود اتصالات بهسازی شده رفتار غیرمتمقارن در ناحیه کششی و فشاری از خود نشان میدهند. چنانچه معیار ۸۰ درصد مقاومت FEMA350 [۲] برای اتصالات مختلف به منظور دستیابی به چرخش نهایی به کار گرفته شود، چرخش نهایی اتصال RBS در بال پایین برابر ۰.۲۵ / درصد به دست می‌آید که ضعیف ترین اتصال محسوب میشود.



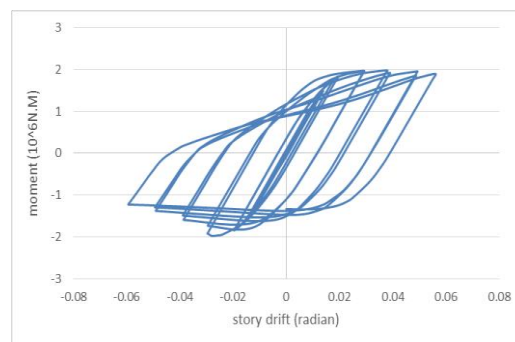
Bottom HBS



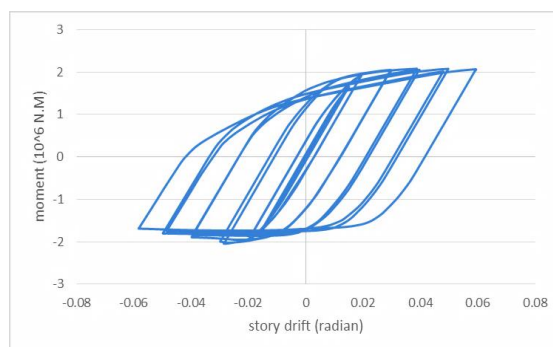
weak



HRBS1



Bottom RBS



HRBS2

شکل ۱۷: مقایسه رفتار چرخه‌ای اتصالات بهسازی شده

خلاصه نتایج محاسبات مربوط به اتصالات در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. در این جدول ممان حداکثر اعمال شده به تیر تا میان تار ستون محاسبه شده است. ممان پلاستیک مقطع تیر با فرض کاهش مقطع در اتصالات کاهش یافته و همچنین با فرض کاهش تنش تسلیم در اتصالات حرارت دیده در نظر گرفته شده است. همانطور که قبلاً گفته شد برای آنکه روش کاهش

مقطع به صورت نامتقارن مورد پذیرش FEMA 547 قرار گیرد باید این روش مفصل پلاستیک را در فاصله‌ای از بر ستون منتقل کرده و ممان بر ستون را به میزان مطلوبی کاهش دهد. به این منظور نسبت ممان بر ستون به ممان پلاستیک تیر نباید بیش از ۱/۰۵ باشد. همانطور که دیده میشود تنها روش حرارتی در بال پایین این شرط را اکتان میکند. اتصال بهسازی شده حرارتی و دو ردیف سوراخ جان زودتر از سایر اتصالات وارد ناحیه پلاستیک میشود. چرخش نهایی این اتصال و اتصال بهسازی شده با کاهش مقطع بال پایین کمترین چرخش نهایی را به میزان ۰/۰۲۸ رادیان نشان دادند. علی‌رغم اعمال روشهای نامتقارن بهسازی، سختی چرخشی اتصال در نواحی مثبت و منفی تنها برای اتصال حرارتی مقادیر متفاوتی (با تفاوت ناچیز) نشان دادند. به این ترتیب رفتار کششی و فشاری اتصالات بهسازی شده در ناحیه الاستیک عمدتاً یکسان خواهد بود.

جدول ۱: خلاصه نتایج تحلیل اتصالات

گروه	نمونه	M_{max}^1	M_{max}/M_p^2	اقتاع شرط FEMA 547	θ_y^3	θ_u^4	K_y^5 فشاری (KN.m/rad)	کششی K_y (KN.m/rad)
مینا	نقص در جوش بال بالای تیر	2.3	0.94	-	0.016	0.06	1168.8	1168.8
بهسازی شده با کاهش مقطع بال پایین	R-rbs	-1.98	1.12	خیر	0.015	0.028	1066.7	1061.4
بهسازی شده با حرارت بال پایین	R-hbs	2.2	1.03	بله	0.014	0.06	1121.4	1121.4
بهسازی شده با حرارت بال پایین و یک ردیف سوراخ جان	R-hrbs1	2.1	1.18	خیر	0.014	0.032	1032.4	1032.4
بهسازی شده با حرارت بال پایین و دو ردیف سوراخ جان	R-hrbs2	2.1	1.23	خیر	0.013	0.028	1029.6	1029.6

۱: ممان حدکثر محاسبه شده در بر اتصال ۲: ممان پلاستیک مقطع تیر در ناحیه تضعیف شده ۳: چرخش تسلیم ۴: چرخش نهایی ۵: سختی چرخشی اتصال در نواحی مثبت و منفی

مدهای خرابی و انرژی مستهلک شده توسط اجزای اتصالات در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. انرژی مستهلک شده با استفاده از مساحت منحنی‌های هیستریزس اجزای اتصالات محاسبه شده است. کمترین مقدار این پارامتر مربوط اتصال کاهش یافته در بال پایین و به میزان ۲۱۴/۴۷ کیلوژول است. در همه‌ی اتصالات، سهم تیر در استهلاک انرژی به مراتب بیشتر از سایر اجزا میباشد که نشان میدهد با افزایش شکلپذیری و توانایی تیر برای تحمل تغییر شکلهای فرا الاستیک، اتصال مورد نظر میتواند انرژی بیشتری را مستهلک کند.

بیشترین میزان استهلاک انرژی توسط چشمه اتصال، در نمونه دارای نقص جوش و به مقدار ۳/۳۶ کیلوژول بوده و بیشترین میزان انرژی مستهلک شده توسط ستون در اتصال حرارتی با دو ردیف سوراخ جان به مقدار ۱/۶۷ کیلوژول اتفاق افتاد. مدها و مکانیزمهای خرابی که در بخش قبل تشریح شد، در **Error! Reference source not found.** به صورت خلاصه آورده شده است. هدف این مقاله جلوگیری از

ایجاد شکست ترد در اتصال و تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه‌ای با فاصله از بر اتصال میباید. به دنبال تشکیل مکانیزم خرابی در ناحیه تضعیف شده، کمانش موضعی و کمانش خارج از صفحه را میتوان برای اتصال متصور شد. هر اندازه خرابی‌ها در نواحی جوش و نزدیک به جوش کمتر باشد، روش بهسازی کارآمدتر خواهد بود. با در نظر گرفتن این موضوع اگر از اتصال بهسازی شده انتظار شکلپذیری ویژه (تحمل ۳ درصد دررفت در ناحیه فرا الاستیک) وجود داشته باشد، اتصال حرارت دیده در بال پایین مورد پذیرش قرار میگیرد. به این ترتیب اتصالی که در محل جوش بال پایین آن نقص ۴۰ درصدی وجود دارد را میتوان طوری با روش حرارتی بهسازی نمود که از لحاظ مد خرابی و تغییر شکل‌های پلاستیک قابل پذیرش باشد. این یک دست‌آورد مهم و کاربردی در بهسازی ساختمانهای فولادی موجود میباشد.

جدول ۲: مدهای خرابی و انرژی مستهلک شده توسط اجزای اتصالات

گروه	نمونه	E^l (Kj)	$(Kj) E_b^2$	E_c^3 (Kj)	E_p^4 (Kj)	مد خرابی اتصال
مبنا	نقص در جوش بال بالای تیر	278.31	274.6	0.89	3.36	شکست ترد در ناحیه جوش بال بالا و پایین به دلیل تمرکز تنش
بهسازی شده با کاهش مقطع بال پایین	R-rbs	214.47	213.8	0.55	0.12	کمانش خارج از صفحه در ناحیه تضعیف شده و کمانش موضعی بال در نزدیک اتصال و ناحیه تضعیف شده و جان، پلاستیک شدن ناحیه تفتیده در جوش
بهسازی شده با حرارت بال پایین	R-hbs	246.13	244.85	0.2	1.08	کمانش خارج از صفحه در ناحیه تضعیف شده
بهسازی شده با حرارت بال پایین و یک ردیف سوراخ جان	R-hrbs1	220.33	219.81	0.33	0.19	تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه تضعیف شده، کمانش خارج از صفحه و موضعی بال پایین در ناحیه تضعیف شده
بهسازی شده با حرارت بال پایین و دو ردیف سوراخ جان	R-hrbs2	206.8	204.71	0.42	1.67	تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه تضعیف شده و کمانش خارج از صفحه بال پایین

۱: انرژی مستهلک شده کل ۲: انرژی مستهلک شده توسط تیر ۳: انرژی مستهلک شده توسط ستون ۴: انرژی مستهلک شده توسط چشمه اتصال

۷ نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی روشهای "کاهش مقطع" و "حرارتی" در حوزه بهسازی اتصالات قاب خمشی فولادی پرداخته شده است. پس از صحت‌سنجی مدل اجزای محدود و امکان استفاده از مشخصات پس از حرارت فولاد به جای مدلسازی حرارت، ایرادی در جوش بال بالا در اتصال قرار داده شده است و سپس با استفاده از روشهای تضعیفی اقدام به بهسازی اتصال شده است. این روشها شامل کاهش مقطع بال پایین

(R-RBS)، حرارت بال پایین (R-HBS)، حرارت بال پایین و سوراخ جان در یک و دو ردیف (R-HRBS1&2) بوده‌اند. بر اساس نتایج مدل سازی نتایج زیر قابل استنتاج است:

- در بخش صحت سنجی مدل اجزای محدود، نشان داده شد که به منظور شبیه‌سازی اثر حرارت و آنیل شدن فولاد بر رفتار اتصال میتوان از مشخصات پس از حرارت فولاد استفاده کرد. به این ترتیب با در نظر گرفتن کاهش ۳۵ درصدی تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد A992 (طبق آزمایشات کششی morisson و همکاران [۱۵])، میتوان با دقت قابل قبولی اتصال بهبود یافته با حرارت را بررسی کرد. طبق نتایج کاهش سختی چرخشی در نمونه آزمایشگاهی ۱۱۰/۴۳ درصد و در مدل عددی ۱۰۲/۸۶ درصد بوده است. این میزان اختلاف میان مدل عددی و آزمایشگاهی را میتوان با گیرداری بالاتر مدل عددی نسبت به آزمایشگاهی توجیه نمود.
- در اتصال ضعیف محل وقوع خرابی در نزدیکی بال بالا بوده است. با این حال کمانش خارج از صفحه کمی در این اتصال مشاهده شد. میزان انرژی مستهلک شده در این اتصال به اندازه ۲۷۸/۳۱ کیلوژول و عمده سهم استهلاک انرژی مربوط به تیر بود. در چرخش ۰/۰۱۶ رادیان اولین نقطه تسلیم رخ داد و رفتار چرخه‌ای در کشش و فشار این اتصال تقریباً یکسان بود. در این حالت محل وقوع مفصل پلاستیک در بر اتصال و در ناحیه جوش بود.
- در اتصال بهسازی شده R-RBS که ۵۰ درصد بال پایین اتصال ضعیف کاهش پیدا کرد، میزان انرژی مستهلک شده اتصال ۲۱۴/۴۷ کیلوژول محاسبه شد که ۲۱۳/۸ آن سهم تیر بود. در چرخش ۰/۰۱۵ رادیان تسلیم اتفاق افتاده و تا این محدوده تقریباً رفتار اتصال در کشش و فشار یکسان بوده است. اما پس از تسلیم رفتار متفاوت مشاهده شد. با در نظر گرفتن معیار مقاومت، چرخش ۰/۰۲۸ را میتوان برای این اتصال به عنوان چرخش نهایی در نظر گرفت که ۰/۰۱۳ آن در ناحیه فرا ارتجاعی قرار داشت.
- در اتصال بهسازی شده با حرارت R-HBS، میزان کرنش حداکثر کاهش یافت. این پارامتر از ۰/۰۸۶ به ۰/۰۶۵ رسید و نمونه کمانش خارج از صفحه کمتری را تجربه کرد. میزان انرژی مستهلک شده توسط این اتصال ۲۴۶/۱۳ کیلوژول بوده که ۲۴۴/۸۵ آن سهم تیر میباشد. در چرخش ۰/۰۱۴ رادیان تسلیم اتفاق و با در نظر گرفتن معیار مقاومت برای اتصال چرخش ۰/۰۰۶ را میتوان به عنوان چرخش نهایی اتصال در نظر گرفت که ۰/۰۴۶ آن در ناحیه فرا ارتجاعی قرار دارد و در نتیجه این اتصال در محدوده اتصالات گیردار با شکلپذیری ویژه پذیرفته میشود.
- در اتصال بهسازی شده با حرارت بال و یک ردیف سوراخ جان R-HRBS1 میزان کرنش پلاستیک حداکثر کاهش پیدا کرده و به میزان ۰/۰۶۱ رسید. با این حال در نواحی نزدیک به اتصال همچنان کرنشها میزان قابل ملاحظه داشتند. میزان انرژی مستهلک شده توسط این اتصال ۲۲۰/۳۳ کیلوژول میباشد که ۲۱۹/۸۱ آن سهم تیر میباشد. در چرخش ۰/۰۱۴ رادیان تسلیم اتفاق افتاده و تا این محدوده تقریباً رفتار اتصال در کشش و فشار یکسان بود. اما پس از تسلیم رفتار متفاوت مشاهده شد. با در نظر گرفتن معیار مقاومت برای اتصال چرخش ۰/۰۳۲ را میتوان برای این اتصال در نظر گرفت که ۰/۰۱۸ آن در ناحیه فرا ارتجاعی قرار دارد.
- در اتصال بهسازی شده با حرارت بال و دو ردیف سوراخ جان R-HRBS2 میزان کرنش حداکثر افزایش یافته و به مقدار ۰/۰۲ رسید است. محل رخداد کرنش حداکثر در ناحیه‌ای با فاصله مطلوب از بر اتصال بوده است. اما همچنان کمانش خارج از صفحه برای این اتصال نیز مطرح بود. در این حالت انرژی مستهلک شده کمتر از حالت قبلی و برابر ۲۰۶/۸ کیلو ژول محاسبه شد. چرخش نهایی این اتصال را نمیتوان بیشتر از ۰/۰۲۸ در نظر گرفت.

مراجع

- [1] SAC Hinge Venture. (2000). cyclic response of RBS moment connections: loading sequence and lateral bracing effects. Rep. No. SAC/BD-00/22.
- [2] FEMA-350, Federal Emergency Management Agency. (2000). Recommended seismic design criteria for new steel moment frame buildings. Washington DC
- [3] Shen, J., Kitjasetanaphun, T., Srivanich, W. (2000). Seismic performance of steel moment frames with reduced beam sections. *Engineering Structures*, 22(8), 968–983.
- [4] Atashzaban, A., Hajirasouliha, I., Jazany, R. A., and Izadinia, M. (2015). Optimum drilled flange moment resisting connections for seismic regions. *Journal of Constructional Steel Research*, 112, 325-338.
- [5] Roudsari, M. T., and Moradi, S. H. (2018). Experimental and Numerical Assessment of Reduced IPE Beam Sections Connections with Box-Stiffener. *International Journal of Steel Structures*, 18(1), 255-263.
- [6] Saleh, A. Mirghaderi, S. R., Zahrai, S.M. (2016). Cyclic testing of tubular web RBS connections in deep beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 117(3), 214–226.
- [7] Ohsaki, M. Tagawa, H., Pan, P. (2009). Shape optimization of reduced beam section under cyclic loads. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(7), 1511–1519.
- [8] Sang, W. H, Ki-Hoon M., Seong-Hoon H., Bozidar S. (2012). Rotation capacities of reduced beam section with bolted web (RBS-B) connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 70(1), 256–263.
- [9] Hedayat, A., Murude C. (2009). Post-Northridge connection with modified beam end configuration to enhance strength and ductility. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(7), 1413-1430
- [10] Keunyeong, O. (2015). Seismic performance evaluation of weak axis column-tree moment connections with reduced beam section. *Journal of Constructional Steel Research*, 105(1), 28-38.
- [11] Fema 547, Federal Emergency Management Agency. (2006). Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Washington DC.
- [12] Civjan, M., Engelhardt, D. and Gross, J. (2000). Retrofit of Pre-Northridge Moment-Resisting Connections. *Journal of Structural Engineering*, 4(3), 445- 452.
- [13] Brandon, Chi. Uang, Ch. and Chen, A. (2006). Seismic rehabilitation of pre-Northridge steel moment connections: A case study. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(8), 783-792.
- [14] Civjan, A., Engelhardt, M. D. (2001) .Slab effects in SMRF retrofit connection tests. *Journal of structural engineering*, 127 (3), 230-237.
- [15] Morrison, M., Schweizer, D. Tasnim, H.. (2015). an innovative seismic performance enhancement technique for steel building moment resisting connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 109(2), 34–46.
- [16] ABAQUS/PRE. (1997). Users manual. Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc.
- [17] FEMA-355D, Federal Emergency Management Agency. (2000). State of the art report on connection performance. Washington DC.
- [18] Azuma, K., Kurobane, Y., & Makino, Y. (2000). Cyclic testing of beam-to-column connections with weld defects and assessment of safety of numerically modeled connections from brittle fracture. *Engineering Structures*, 22(12), 1596-1608.