



<http://journaliss.ir>

مقاومسازی اتصالات صلب تیر به ستون جعبه‌ای و بال پهن با سخت‌کننده‌های جانبی T شکل

محمد سهیل قبادی^{۱*}، محمدرضا ایوبی^۲

۱- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران-زلزله، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* قزوین، صندوق پستی ۹۶۸۱۸-۳۴۱۴۸، msgghobadi@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

در این مقاله به روش طراحی و ارائه جزئیات مقاومسازی اتصالات خمشی با ستون‌های جعبه‌ای و بال پهن پرداخته شده است. در اتصال پیشنهادی هر بال تیر با استفاده از سخت‌کننده‌های T شکل به بال ستون متصل و ورق‌های روسری و زیرسری به دلیل کیفیت نامطلوب جوش اتصال حذف شده‌اند. عملکرد لرزه‌ای اتصال معرفی شده به عنوان اتصال خمشی صلب به صورت تحلیلی با استفاده از روش اجزای محدود با دقت بالا ارزیابی شده است. سپس بررسی اتلاف انرژی با استفاده از تشکیل مفصل پلاستیک در تیر و خارج از ناحیه اتصال با توجه به معیار توزیع تنش فون میسز و کرنش پلاستیک معادل کنترل شده است. نتایج منحنی‌های هیستریزس نشان داد که نمونه‌ها قبل از تجربه ۲۰٪ کاهش مقاومت، به زاویه دوران ۶٪ رادیان رسیدند و اتصال تقویت شده به عنوان یک اتصال خمشی صلب برای استفاده در قاب‌های خمشی ویژه مطابق با آیین‌نامه AISC 341-22 قابل قبول است.

واژگان کلیدی

ستون جعبه‌ای و بال پهن، سخت‌کننده‌های تی، عملکرد لرزه‌ای، منحنی هیستریزس، اتلاف انرژی

Retrofitting of Beam to Box and H shape column Moment connections by T-Stiffeners

M.S. Ghobadi, M.R. Ayoubi

Abstract

This study presents a design method and detailing for seismic retrofitting of moment connections in box and wide-flange columns. The proposed connection attaches each beam flange to the column flange using T-shaped Stiffeners, and the top and bottom cover plates are eliminated due to poor welding quality. The seismic performance of the proposed connection as a fully rigid moment connection is evaluated with high accuracy using the finite element method. Then, energy dissipation is investigated by forming a plastic hinge in the beam and out of connection region, considering the von Mises stress distribution criterion and equivalent plastic strain. The results of the hysteresis curves show that the specimens reached a story drift angle of 6% radians before experiencing a 20% reduction in strength, and the proposed connection is acceptable as a fully rigid moment connection for use in special moment frames according to the AISC 341-22 code.

Keywords

Box and Wide Flange Columns, T-Stiffeners, Seismic Performance, Hysteresis Curve, Dissipation of Energy



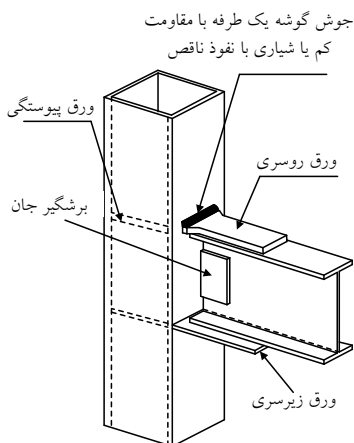
۱- مقدمه

پس از زلزله‌های نورتریج^۱ و کوبه^۲، آسیب‌های ساختاری جدی در اتصالات جوشی قاب‌های خمشی فولادی، از جمله شکست ترد به دلیل ایجاد ترک در جوش شیاری با نفوذ کامل، تشکیل مفصل پلاستیک در وجه ستون و کاهش مقاومت اتصالات، ضعف‌های قابل توجهی را در عملکرد لرزه‌ای این سیستم‌ها آشکار کرد [۱]. بنابراین این نوع اتصالات دارای نقص بوده و نیازمند مقاوم‌سازی بودند. به همین منظور تحقیقات گسترده‌ای برای ارتقای طرح‌های موجود و پیشنهاد راه‌حل‌های جدید انجام شد که منجر به بهبود عملکرد اتصالات خمشی در آن زمان از نظر مقاومت، سختی و تغییر مود شکست اتصالات گردید [۲].

SAC Joint Venture یکی از گسترده‌ترین مطالعات را بر روی قاب‌های خمشی فولادی برای کشف علت آسیب انجام داد. نتایج این مطالعات در سری انتشارات FEMA 350-355، شامل دستورالعمل‌ها و توصیه‌های طراحی منتشر شد [۳-۸]. همچنین بسیاری از محققان تلاش کرده‌اند تا رفتار اتصالات خمشی موجود پیش از زلزله نورتریج را با ارائه اتصالات خمشی جدید بهبود بخشند [۹-۱۳]. در اتصالات جدید، مقاومت خمشی اندازه‌گیری شده اتصال باید حداقل برابر با ۸۰٪ لنگر خمشی پلاستیک تیر متصل در زاویه دررفت طبقه ۴٪ رادیان باشد [۱۴] و اگر به‌عنوان اتصالات کاملاً صلب طبقه‌بندی شوند، باید دارای سختی چرخشی بیش از مقدار معین $20 \frac{EI}{L}$ نیز باشد [۱۵]. برخی از اتصالات پیشنهادی در آیین‌نامه اتصالات از پیش‌تأیید شده (AISC 358-22) گنجانده شده است [۱۶] که به‌طور کلی، شامل دو ایده می‌باشد: (الف) تقویت اتصال (ب) تضعیف بخشی از تیر. برخی از این اتصالات خمشی عبارتند از: BUEEP، RBS، BSEEP، WUF-W و WFP. در میان اتصالات مختلف از پیش‌تأیید شده، اتصالات با ورق روسری و زیرسری (WFP)^۳ به‌طور گسترده در ساخت قاب‌های خمشی متوسط (IMFs)^۴ مناطق لرزه‌خیز ایران استفاده می‌شود [۱۷].

علاوه بر توسعه اتصالات از پیش‌تأیید شده، محققان تحقیقات گسترده‌ای جهت تقویت و بهبود اتصالات معیوب انجام داده‌اند. در برخی از این مطالعات بهبود رفتار لرزه‌ای اتصالات خمشی WFP با استفاده از سخت‌کننده‌های جانبی T شکل در ستون‌های جعبه‌ای به‌صورت عددی و تجربی بررسی شده است [۱۸ و ۱۹].

و برخی دیگر نیز می‌توانند به‌عنوان گزینه‌هایی برای مقاوم‌سازی قاب‌های خمشی فولادی استفاده شوند [۲۰-۲۴]. در تحقیقات جدیدتر نیز از روش‌های نوین جهت مقاوم‌سازی اتصالات استفاده می‌شود [۲۵-۳۲]. تحقیقاتی با به‌کارگیری ستون‌های ساخته شده از مزدوج اشکل در بررسی اتصالات خمشی نیز صورت گرفته است [۳۳-۳۷]. شیرواند و همکاران [۳۸] به مطالعه آزمایشگاهی اتصالات خمشی ستون فولادی ساخته شده از دوپل اشکل با صفحات جانبی دوزنقه‌ای پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها حاکی از بهبود رفتار اتصال در صورت استفاده از ورق مضاعف در چشمه اتصال بود. ایوبی و قبادی [۳۹] در مطالعات اخیر خود جزئیات مقاوم‌سازی و روش طراحی عناصر سخت‌کننده T شکل را در یک اتصال خمشی معیوب WFP متصل شده به ستون‌های دوپل ساخته شده با ورق‌های پوشش ارائه کردند. نتایج نشان داد که اتصال با سخت‌کننده‌های مناسب، معیارهای اولیه طراحی لرزه‌ای را برآورده می‌کند و ضمن فراهم کردن مقاومت، سختی و ظرفیت چرخش کافی، مشکلات خاص مربوط به استفاده از ستون‌های دوپل I را بهبود می‌دهد. به‌طور کلی تحقیقات نشان داده است که پارامترهای مؤثر بر عملکرد اتصال عبارتند از: نوع و ابعاد سخت‌کننده‌ها، ابعاد تیر و ستون، نسبت سختی تیر به ستون و تنش‌های پسماند مواد جوشکاری. هر یک یا ترکیبی از این پارامترها می‌تواند به‌طور قابل توجهی رفتار و عملکرد اتصال را تحت تأثیر قرار دهد [۱۹، ۲۰، ۳۹ و ۴۰].



شکل ۱- جزئیات شماتیک اتصال WFP با جوش معیوب

علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه در بهبود رفتار لرزه‌ای اتصالات قاب‌های خمشی فولادی از طریق طرح‌های نوآورانه،

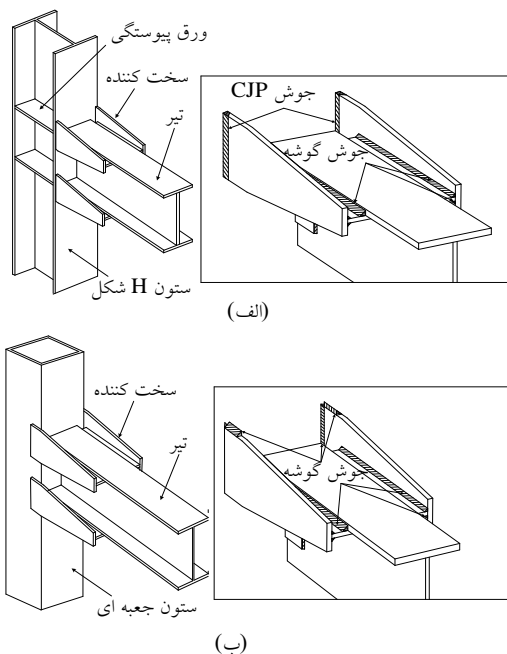
¹ Northridge

² Kobe

³ Welded Flange Plate

⁴ Intermediate Moment Frame System

آن [۳۹] و بررسی کفایت مدل‌های تقویت به تنهایی از نظر توزیع تنش و کرنش، مکانیسم انتقال بار در سخت‌کننده‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای با متغیرهای مختلف به‌منظور بهینه‌سازی جزئیات اتصال، کنترل ارضاء شرایط یک اتصال صلب برای پذیرش شرایط قاب خمشی ویژه بر اساس آیین‌نامه‌های AISC 360-22 [۱۵] و AISC 341-22 [۱۴]، کاهش استفاده از مصالح، افزایش سرعت نصب اتصال، افزایش و تسریع اتلاف انرژی در محل مفصل پلاستیک، کاهش آسیب به اجزا و محدوده حفاظت‌شده اتصال، ساخت و نصب اجزای اتصال در محل کارگاه می‌باشد.



شکل ۲- جزئیات شماتیک اتصال پیشنهادی: الف) با ستون بال‌پهن ب) با ستون جعبه‌ای

در این مقاله رفتار نمونه آزمایشگاهی RC9 معرفی شده توسط قبادی و همکاران [۳۹]، به دلیل شباهت ساختاری چشمگیر با اتصال جدید معرفی شده در تحقیق حاضر، در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس^۳ شبیه‌سازی و اعتبارسنجی می‌شود [۴۱]. سپس طراحی اتصال جدید انجام و پس از آن مدل‌های دقیق اجزای محدود شبیه‌سازی می‌شوند و رفتار اتصال پیشنهادی از روی آن ارزیابی می‌گردد.

۲- مفاهیم سازوکار رفتار اتصال و روش طراحی

سخت‌کننده T شکل از دو عضو عمودی و افقی تشکیل شده است که در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. عضو افقی با جوش

همچنان چالش‌هایی، به‌ویژه در اتصالات تیر به ستون‌های جعبه‌ای و بال‌پهن با توجه به کاربرد فراوان آن‌ها در ساخت‌وساز کشورهای آسیایی از جمله ایران و نیز ویژگی‌های مقاومت ذاتی آن‌ها، زمانی که تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار می‌گیرند، همچنان پابرجاست. ویژگی‌های اصلی مقاطع جعبه‌ای، از جمله سختی خمشی و پیچشی دوجوه‌ای بالا، شکل‌پذیری قابل‌توجه و ظرفیت پس‌کمانش زیاد، آن‌ها را به یکی از ارجح‌ترین مقاطع در مناطق لرزه‌خیز تبدیل کرده است [۴۰]. اگرچه رفتار چشمه اتصال و مسیر انتقال بار بین اتصال تیر به ستون‌های جعبه‌ای و بال‌پهن متفاوت است، با این حال استفاده از جزئیات اتصال مشابه با تأکید بر قراردادن ورق‌های پیوستگی در داخل ستون جعبه‌ای و در تراز بال تیر توصیه می‌شود [۸]. از طرف دیگر، عدم دسترسی به داخل ستون جعبه‌ای، هزینه‌های مربوط به نصب و جوشکاری ورق پیوستگی داخلی توصیه‌شده برای اتصال تیر به ستون جعبه‌ای را افزایش می‌دهد [۴۰].

جوش‌ها نقش مهمی در انتقال نیروها و تضمین پایداری اتصالات WFP دارند. با این حال، آن‌ها مستعد چالش‌هایی هستند. یکی از مشکلات رایج در اجرای اتصالات WFP، عدم اجرای صحیح جوش شیاری با نفوذ کامل (CJP)^۱ است. بدین معنی که در برخی موارد این جوش با نفوذ ناقص اجرا شده و می‌تواند به ایجاد ترک در ریشه جوش و کاهش مقاومت اتصال منجر شود. در روش دیگر به جای جوش CJP از جوش گوشه یک‌طرفه^۲ استفاده می‌شود که از مقاومت لازم برخوردار نیست (شکل (۱)). در نتیجه، این نقص‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد لرزه‌ای اتصال دارند و شرایط مندرج در آیین‌نامه‌ها [۱۴ و ۱۷] را برای تأیید به‌عنوان یک اتصال صلب تیر به ستون در قاب‌های خمشی ویژه برآورده نمی‌کنند. در این صورت اتصال نیازمند مقاوم‌سازی خواهد بود. با این حال، به دلیل هندسه خاص ستون، طراحی جزئیات ضروری است تا صلبیت لازم در اتصال تأمین شود.

مطالعه حاضر با هدف رفع این شکاف تحقیقاتی و با تکیه بر روش مقاوم‌سازی با استفاده از سخت‌کننده‌های جانبی T شکل [۳۹] به ارزیابی رفتار لرزه‌ای یک اتصال خمشی بدون در نظر گرفتن ورق روسری و زیرسری می‌پردازد (شکل (۲)) و تلاش می‌کند به این سؤال پاسخ دهد که آیا روش تقویت پیشنهادی اتصال در حضور ستون جعبه‌ای و بال‌پهن قابل‌اجرا است؟ در واقع هدف از حذف ورق‌های روسری و زیرسری، چشم‌پوشی از جوش اتصال تیر به ستون به سبب عیب‌های اساسی

^۳ Abaqus

^۱ Complete Joint Penetration

^۲ Single Fillet Weld

گوشه یک طرفه به بال تیر متصل می‌شود و دو عضو افقی و عمودی سخت‌کننده به یکدیگر نیز توسط جوش گوشه دوطرفه متصل می‌شوند. اتصال سخت‌کننده‌های عمودی به ستون نیز با توجه به مقطع آن متفاوت است. این کار در ستون‌های جعبه‌ای توسط جوش گوشه^۱ و در ستون‌های بال‌پهن توسط جوش‌های نفوذی^۲ انجام می‌شود.

مکانیسم انتقال بار در این اتصال به گونه‌ای است که نیروهای فشاری و کششی توسط سخت‌کننده‌های T شکل به دلیل تغییر شکل‌های نسبتاً انعطاف‌پذیر خارج از صفحه دیواره‌های ستون، مقاومت می‌کنند. در این حالت، سخت‌کننده‌های T شکل نقش اساسی در انتقال نیروها از بال‌های تیر به جان ستون دارند. با توجه به حالت‌های محتمل گسیختگی برشی و کششی به ترتیب برای عضوهای افقی و عمودی سخت‌کننده، باید کنترل‌های لازم جهت دستیابی به گسیختگی خمشی که سبب اتلاف انرژی است و مطلوب طرح پیشنهادی می‌باشد، انجام شود. تحقیقات قبلی که توسط ایوبی و قبادی [۳۹] انجام شده است، نشان داد که نیروی $T/2$ به صورت سری توسط عضوهای عمودی و افقی سخت‌کننده T شکل منتقل می‌شود. بنابراین، پارامترهای کلیدی برای طراحی سخت‌کننده T شکل، طول (l) عضو افقی و ارتفاع (h) عضو عمودی است. همان‌طور که در شکل (۳-ب) نشان داده شده است، لنگر خمشی پلاستیک تیر (M_p) توسط بال‌های تیر به شکل یک زوج نیرو (T) تحمل می‌شود. از این رو نیروی $T/2$ با ترکیب مقاومت برشی (P_h) عضو افقی و مقاومت کششی (P_v) عضو عمودی به ستون اعمال می‌شود. برای جلوگیری از گسیختگی برشی و کششی در عضوهای عمودی و افقی، معیارهای طراحی سخت‌کننده T شکل باید بر اساس آیین‌نامه سازه‌های فولادی [۱۵] برای اجزای کششی و برشی جهت رفتار مطلوب عضوهای آن در نظر گرفته شود. علاوه بر این، ضخامت عضو عمودی سخت‌کننده T باید بر اساس معادلات ناپایداری کنترل شود تا ناپایداری‌های کمانشی در آن‌ها اتفاق نیافتد. بنابراین در مطالعه حاضر، ضخامت اجزای سخت‌کننده با توجه به آیین‌نامه AISC360-22 [۱۵] طراحی شده است تا در محدوده الاستیک باقی بماند. مجموعه‌ای از معیارهای طراحی ساده برای سخت‌کننده‌های T شکل بر اساس معادلات (۱) تا (۸) انجام می‌شود:

کنترل تنش برشی در عضو افقی:

$$\tau_{\max} = 1.5 \frac{T}{t_h L_1} \leq 0.9 \times 0.6 F_y \times C_v \quad (1)$$

کنترل تنش خمشی در عضو افقی:

$$\sigma_{\max} = \frac{6TH_3}{t_h L_1^2} \leq 0.9 \times F_y \quad (2)$$

کنترل تنش صفحه‌ای عضو افقی:

$$f = \sqrt{3\tau_{\max}^2 + \sigma_{\max}^2} = \frac{T}{t_h L_1} \sqrt{\frac{36H_3^2}{L_1^2} + 6.75} \leq F_y \quad (3)$$

کنترل جوش گوشه متصل‌کننده عضو افقی به بال تیر:

$$\left(\frac{T}{2}\right) \leq 0.75 \times 0.6 F_{EXX} \times 0.707 \times L_1 \times D_2 \quad (4)$$

کنترل جوش گوشه دوطرفه:

$$\left(\frac{T}{2}\right) \leq 2 \times 0.75 \times 0.6 F_{EXX} \times 0.707 \times L_1 \times D_1 \quad (5)$$

کنترل عضو عمودی در کشش:

$$\left(\frac{T}{2}\right) \leq 0.9 \times F_y t_v H_1 \quad (6)$$

کنترل کمانش موضعی عضو افقی:

$$H_3/t_h \leq \min \left(1.1 \sqrt{\frac{5.34E}{F_y}}, 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right) \quad (7)$$

کنترل کمانش موضعی عضو عمودی:

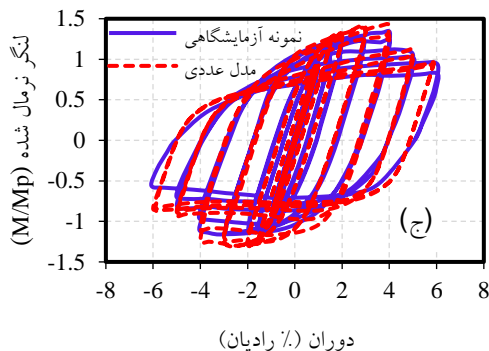
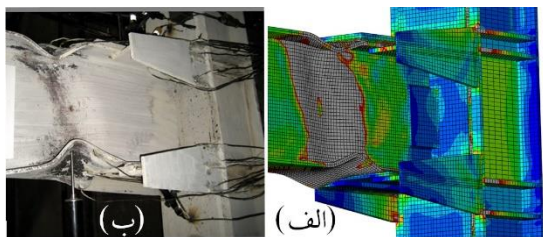
$$H_1/2t_v \leq \min \left(0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}, 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right) \quad (8)$$

در معادلات فوق، (T) کوپل نیروی حاصل از لنگر مورد انتظار تیر، (H_1) ضلع بزرگ‌تر عضو عمودی، (t_v) ضخامت عضو عمودی، (L_1) طول عضو افقی، (t_h) ضخامت عضو افقی، (H_3) عرض عضو افقی، (D_2) بعد جوش گوشه یک طرفه، (D_1) بعد جوش گوشه دوطرفه، (F_{EXX}) تنش کششی نهایی الکتروود، (σ_{\max}) تنش ناشی از خمش در عضو افقی و (τ_{\max}) تنش برشی حداکثر در عضو افقی می‌باشد. برای کنترل تنش برشی در عضو افقی، مقدار حداکثر برای آن در نظر گرفته شده است لذا استفاده از ضریب ۱/۵ در جهت اطمینان است.

¹ Filet weld

² Complete Joint Penetration Weld

آزمایشگاهی و نمونه عددی از نظر تغییر شکل های اتصال و منحنی هیستریزس مشاهده می شود. این شباهت ناشی از حداکثر دقت در مدل سازی اجزای محدود و ایجاد شرایط بسیار مشابه با شرایط نمونه آزمایشگاهی است.



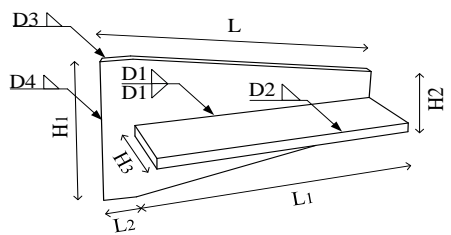
شکل ۴- صحت سنجی مدل آزمایشگاهی [۳۹]: (الف) مدل تغییر شکل یافته اجزای محدود (ب) نمونه آزمایشگاهی (ج) منحنی هیستریزس

۴- مدل سازی عددی

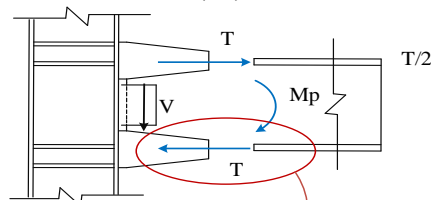
۴-۱- جزئیات مدل سازی اجزای محدود نمونه مرجع در این بخش ارزیابی و صحت سنجی اتصال آزمایشگاهی مرجع در نرم افزار آباکوس شرح داده شده است [۴۱]. پس از مدل سازی اجزای اتصال، نمودار تنش- کرنش مصالح فولادی و جوش، با معیار تسلیم فون میسز^۱ و با فرض امکان رفتار غیرخطی و تغییر شکل های بزرگ، به صورت دوخطی و با لحاظ نمودن سخت شونده گی جنبشی (کینماتیکی) معرفی شدند. مقدار سختی ناحیه پلاستیک مصالح فولادی و الکتروود به ترتیب $k_{py} = 311$ مگاپاسکال و $k_{py} = 553$ مگاپاسکال، چگالی فولاد 7850 کیلوگرم بر متر مکعب، مدول الاستیسیته 2×10^5 مگاپاسکال و نسبت پواسون برابر با 0.3 در نظر گرفته شد. به منظور شبیه سازی رفتار تقریباً واقعی اتصال، برای همه اجزای مونتاژ شده که در تماس با یکدیگر بودند، تماس سخت^۲ تعریف شد.

^۱ von Mises

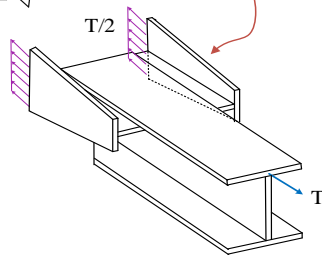
^۲ Hard Contact



(الف)



(ب)



(ب)

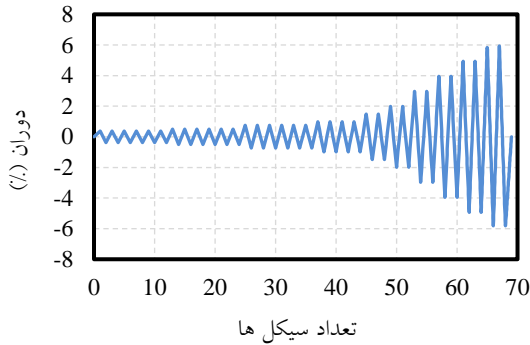
شکل ۳- (الف) شکل سه بعدی از هندسه سخت کننده T (ب) مکانیسم انتقال بار

۳- صحت سنجی مدل عددی با رفتار تجربی اتصال مرجع

جهت بررسی صحت مدل سازی، با توجه به عدم بررسی موضوع پیشنهادی در ادبیات فنی و همچنین عدم دسترسی به نمونه آزمایشگاهی این نوع از اتصالات، سعی شد نمونه آزمایشگاهی مرجع دیگری که مکانیزم رفتار آن مشابه اتصال پیشنهادی باشد، انتخاب شود. از این رو از نتایج آزمایشگاهی نمونه RC9 انجام شده توسط قبادی و همکاران به عنوان اتصال مرجع استفاده شد [۳۹]. با انتخاب این نمونه به عنوان اتصال مرجع، می توان عملکرد اتصالات پیشنهادی را مقایسه کرد. بدین معنی که اگر اتصالات پیشنهادی، عملکرد برتر و یا مشابهی نسبت به نمونه مرجع داشته باشد، نشان دهنده عملکرد قابل قبول آن به عنوان اتصال خمشی واجد شرایط است.

شکل (۴-الف) اعتبار سنجی عملکرد چرخه ای اتصال مرجع را نشان می دهد که در آباکوس مدل سازی شده است [۴۱]. جزئیات مدل سازی اجزای محدود در بخش بعد ارائه شده است. با توجه به شکل (۴-ب) و (۴-ج) تطابق بسیار خوبی بین نمونه

شرایط زلزله استفاده شد [۱۴]. این پروتکل و تعداد چرخه‌های آن در شکل (۶) نشان داده شده است. بارگذاری چرخه‌ای به صورت تغییر مکان به انتهای تیر اعمال شد.



شکل ۶- تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای

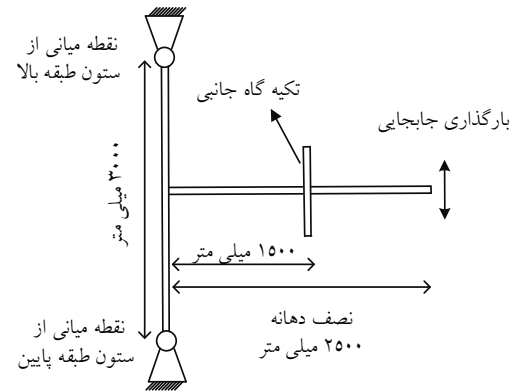
۴-۲- طراحی و مدل سازی نمونه‌های اتصال پیشنهادی

به منظور تأیید صحت کیفیت اتصال و بررسی رفتار آن لازم است تا اتصال با جزئیات متفاوت مدل‌سازی شود و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گیرد که بتوان رفتار هیستریزس، توزیع تنش، کرنش، سختی، شکل‌پذیری و مقاومت اتصال را با تغییر مقاطع تیر و ستون بر اساس آیین‌نامه‌های آمریکا طبقه‌بندی کرد [۱۴ و ۱۵]. از این‌رو اتصال پیشنهادی بر اساس روش طراحی ارائه شده در بخش ۲ و بر مبنای مفاهیم طراحی لرزه‌ای سازه‌های فولادی، به روش LRFD مطابق با بحث دهم که منطبق با آیین‌نامه‌های آمریکا می‌باشد [۱۴-۱۷]، برای قاب خمشی ویژه طراحی شد. در طراحی اتصالات، مشخصات مصالح فولادی به کاررفته برای مقاطع تیر، ستون و سخت‌کننده‌ها بر اساس استاندارد ASTM A36 (مشابه با فولاد S235JR) و فلز جوش نیز بر اساس مقادیر اسمی موجود در آیین‌نامه جوش آمریکا [۴۲] با الکتروود E7018 در نظر گرفته شد. خواص مکانیکی مصالح مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده است [۳۹].

جدول ۱- مشخصات مصالح به کاررفته در آزمایش

اعضا	F_y (MPa)	F_u (MPa)	F_y/F_u (%)	کشیدگی (%)
تیر، ستون و سخت‌کننده‌ها	۲۵۰	۳۴۳	۷۲	۳۰
الکتروود E7018	۵۴۰	۶۲۷	۸۶	۱۶

همچنین، از قید tie بین اجزای اتصال از جمله صفحات و جوش‌ها و صفحات با یکدیگر تعریف شد. در این مطالعه، علاوه بر استفاده از قید "پیوستگی کامل (Tie)" برای اتصال اجزا، جوش‌های سخت‌کننده‌ها به صورت کامل مدل‌سازی شده و رفتار غیرخطی و اثر مقاومت فلز جوش و ناحیه جوشکاری نیز لحاظ شده است. تمامی جوش‌ها بر اساس معیارهای طراحی آیین‌نامه AWS طراحی شده‌اند تا الزامات انتقال نیروهای ناشی از لنگر پلاستیک تیر را برآورده کنند [۴۲]. برای شبیه‌سازی دقیق، ویژگی‌های مکانیکی فلز جوش با استفاده از معیار تسلیم فون میسز و سخت‌شوندگی جنبشی (کینماتیکی) در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس تعریف شده است. در مدل‌سازی تماس اجزای اتصال، تمامی اجزا در حین بارگذاری چرخه‌ای اجازه جدا شدن داشتند. شرایط مرزی اتصال مطابق با شرایط نمونه آزمایشگاهی آن تعریف شد (شکل (۵)).



شکل ۵- شرایط مرزی نمونه مرجع

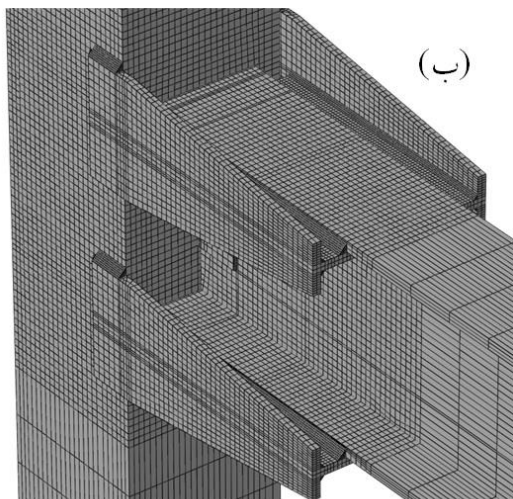
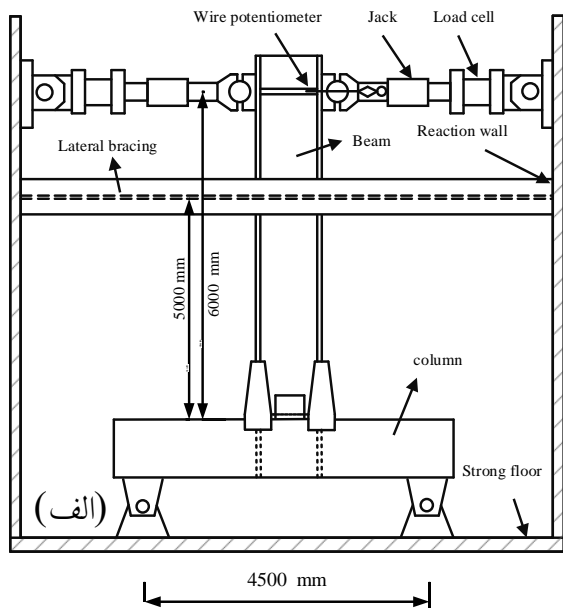
برای ساخت اجزای این نمونه از المان Solid 3D C3D8 جهت مش‌بندی تمام اجزای اتصال استفاده شد که یک المان مکعبی هشت‌گره‌ای با انتگرال‌گیری کامل^۱ است و قابلیت شبیه‌سازی پلاستیسیته، تغییر شکل و کرنش‌های بزرگ را دارد [۴۱]. برای شبکه‌بندی المان‌های شش‌وجهی^۲ از تکنیک Structural Method استفاده گردید. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، ابعاد بهینه مش‌ها با آزمون و خطا به دست آمد؛ در قسمت‌های تحت تنش بالا همچون جوش‌ها از مش‌های ریز و برای قسمت‌های با تنش کوچک که از محدوده اتصال دورتر هستند، از مش‌های بزرگ‌تر استفاده شد.

با توجه به آیین‌نامه لرزه‌ای آمریکا، از پروتکل بارگذاری شبه‌استاتیکی چرخه‌ای با نرخ کرنش ناچیز برای شبیه‌سازی

^۱ Full Integration

^۲ Hex

مدل ابزاربندی و مش‌بندی شده نمونه RCBox W24. در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷- (الف) مدل ابزاربندی (ب) الگوی مش‌بندی مدل عددی

در جدول (۲) مراحل طراحی یک نمونه اتصال RC Box W24 به صورت خلاصه ارائه شده است. با توجه به نیرو-کنترل بودن سخت‌کننده‌ها و نیاز به در نظر گرفتن حاشیه اطمینان بالا در طراحی این اجزا، محاسبات با فرض انتقال نیمی از نیروی بال تیر به هر یک از سخت‌کننده‌های T شکل چپ و راست صورت گرفته است. همچنین به دلیل ناچیز بودن تنش‌های ناشی از خمش در عضو افقی سخت‌کننده از آن صرف نظر شده است.

در جدول (۲)، (M_r) لنگر پلاستیک مورد انتظار تیر، (C_{pr}) ضریبی برای در نظر گرفتن حداکثر مقاومت اتصال، (Z) اساس مقطع پلاستیک عضو، (F_{ye}) تنش تسلیم مورد انتظار و (α_s) در روش LRFD برابر یک است. (V_{hr}) نیروی برشی مورد تقاضا، (S_h) طول ناحیه حفاظت‌شده، (ϕ) ضریب اطمینان، (F_y) تنش تسلیم، (T) کوبل نیروی ناشی از لنگر پلاستیک مورد انتظار تیر، (F_{EXX}) مقاومت اسمی الکتروود، (A_w) سطح مقطع مؤثر جوش، (R_n) مقاومت اسمی جوش، (L_1) طول عضو افقی سخت‌کننده، (t_{sh}) ضخامت عضو افقی سخت‌کننده، (D_2) بعد جوش گوشه اتصال بین بال تیر و عضو افقی سخت‌کننده، (D_1) بعد جوش گوشه دوطرفه، (H_1) طول عضو عمودی سخت‌کننده در وجه ستون، (H_3) عرض عضو افقی سخت‌کننده، (E) مدول الاستیسیته فولاد و (t_{vg}) ضخامت عضو عمودی سخت‌کننده می‌باشد.

پس از طراحی نمونه‌های اتصال پیشنهادی، آن‌ها با روش اجزای محدود مدل‌سازی شدند. مدل‌سازی، مونتاژ اعضا، تعریف تماس، شرایط مرزی، مش‌بندی، المان مورد استفاده و پروتکل بارگذاری مشابه روش ارائه شده در قسمت قبل است. در مدل‌سازی از اثرات تأخیر برشی صرف نظر شده است. مشخصات مصالح فولادی به کاررفته برای نمونه‌های عددی مطابق جدول (۱) می‌باشد.

جدول (۳) مشخصات هندسه تیر و ستون و جدول (۴) مشخصات هندسی مقاطع سخت‌کننده به کاررفته در نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در این مطالعه، مقطع جعبه‌ای ستون‌ها از نوع باکس ساخته شده است. با این حال، به منظور ساده‌سازی و کاهش زمان محاسبات، جزئیات مربوط به جوش این ناحیه به طور مستقیم مدل‌سازی نشده‌اند و با استفاده از قید Tie اجزا به یکدیگر متصل شده‌اند.

¹ Built-up Box Section

اعضا	مراحل طراحی اعضا	محاسبات (واحد: mm, N)	طراحی سخت کننده
			طراحی اتصال
		$M_r = \frac{C_{pr} Z_{F_y e}}{\alpha_s} + V_{hr} S_h = (1.186 \times 7670000 \times 250) + (874675 \times 800) = 2969740000$	۱- لنگر مورد انتظار تیر جهت طراحی
		$T/2 = 2458394.04 \leq \phi V_n = 0.9 \times 0.6 F_y L_1 t_{sh} = 0.9 \times 0.6 \times 250 \times 750 \times 25 = 2835000 \rightarrow OK$	۲- کنترل طول عضو افقی سخت کننده برای برش
		$H_3/t_n = \frac{170}{25} = 6.8 \leq \min \left(1.1 \sqrt{\frac{E_s A_f}{F_y}}, 1.49 \sqrt{\frac{F_u}{F_y}} \right) = \min(71.89, 42.14) = 42.14 \rightarrow OK$	۳- کنترل پایداری سخت کننده افقی در مقابل کماتش
		$T/2 = 2458394.04 \leq \phi \times 0.6 F_{EXX} \times 0.707 \times L_1 D_2 = 0.75 \times 0.6 \times 490 \times 0.707 \times 750 \times 22 = 2572242.75 \rightarrow OK$	۴- کنترل جوش گوشه بین بال تیر و عضو افقی سخت کننده
		$T/2 = 2458394.04 \leq 2 \times \phi \times 0.6 F_{EXX} \times 0.707 \times L_1 D_1 = 2 \times 0.75 \times 0.6 \times 490 \times 0.707 \times 750 \times 11 = 2572242.75 \rightarrow OK$	۵- کنترل جوش گوشه دوطرفه بین اعضای افقی و قائم سخت کننده
		$T/2 = 2458394.04 \leq 0.9 \times F_y t_{vs} H_1 = 0.9 \times 250 \times 450 \times 25 = 2531250 \rightarrow OK$	۶- کنترل عرض ورق عضو عمودی سخت کننده برای تنش کششی
		$H_1/2t_p = \frac{450}{2 \times 25} = 9 \leq \min \left(0.38 \sqrt{\frac{E_s}{F_y}}, 0.56 \sqrt{\frac{F_u}{F_y}} \right) = \min(10.74, 15.83) = 10.74 \rightarrow OK$	۷- کنترل پایداری سخت کننده قائم:
		$R_{n1} = (0.75 \times 0.6 \times 490 \times 0.707 \times 25 \times 450) + (2 \times 0.75 \times 0.6 \times 490 \times 0.707 \times 25 \times 110) = 2611216.125$	۸- کنترل جوش های گوشه سه طرفه بین عضو قائم سخت کننده و بال ستون
		$R_{n2} = (0.85 \times 2 \times 0.75 \times 0.6 \times 490 \times 0.707 \times 25 \times 110) + (1.5 \times 0.75 \times 0.6 \times 490 \times 0.707 \times 25 \times 450) = 3359505$	
		$R_n = \max(R_{n1}, R_{n2}) = 3359505 > T/2 = 2458394.04 \rightarrow OK$	

پلاستیک در مناطق بحرانی اتصال، مسائل اصلی در مورد اتصالات خمشی است که در ادامه بررسی می‌شوند.

۱-۵- عملکرد چرخه‌های اتصالات

نتایج منحنی هیستریزس نمونه‌های اتصال RC HW24، RC BoxW27 و RC BoxW24، RCHW27 تحت بارگذاری چرخه‌ای به‌دست آمد (شکل (۸)). در منحنی‌های هیستریزس نمونه‌ها، لنگر خمشی حاصل از اتصال بیش‌تر از ۸۰٪ ممان خمشی پلاستیک تیر تا زاویه دوران ۴٪ بود. بنابراین، اتصال پیشنهادی معیار مقاومت و شکل‌پذیری لازم جهت استفاده در قاب‌های خمشی ویژه مطابق با شرایط آیین‌نامه را برآورده می‌کند [۱۴].

۲-۵- مد گسیختگی اتصالات

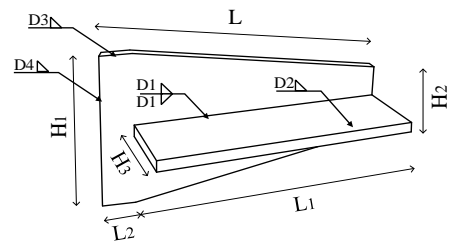
ارزیابی توزیع تنش فونمیسز تشکیل مفصل پلاستیک را درست پس از ناحیه اتصال و شرایط تنش آرام ناحیه اتصال تأیید می‌کند. تسلیم بال و جان و کمانش موضعی آن‌ها در این ناحیه از نمونه‌ها به وضوح در شکل (۹) دیده می‌شود و این کمانش باعث کاهش مقاومت در مفصل پلاستیک می‌شود. این موضوع در نمودارهای هیستریزس نیز مشهود است. مطابق شکل (۹)، هیچ تسلیمی در ناحیه اتصال و اجزای اتصال رخ نداده است و میزان زیادی از تسلیم‌شدگی در ناحیه مفصل پلاستیک اتفاق افتاده است. بنابراین شکست شکل‌پذیر اتصال از تشکیل مفصل پلاستیک دقیقاً بعد از محدوده اتصال نشأت می‌گیرد.

در تحلیل‌ها، گسیختگی جوش نیز به‌عنوان یکی از حالت‌های ممکن بررسی شده است. برای این منظور، تنش‌ها و کرنش‌های جوش در ناحیه اتصال تحت بارگذاری چرخه‌ای ارزیابی شده و امکان وقوع گسیختگی در نواحی بحرانی تحلیل شده است. نتایج نشان داد که در شرایط بارگذاری تعریف‌شده، جوش‌ها قادر به انتقال نیروهای مورد نیاز بوده و تنش‌ها و کرنش‌های موجود در جوش‌ها در محدوده مجاز قرار دارند و عملکرد مناسبی از خود نشان داده‌اند و هیچ نشانی از گسیختگی زودرس در آن‌ها مشاهده نشد.

جدول ۳- مشخصات هندسی تیر و ستون‌های نمونه‌های طراحی شده

نام نمونه	تیر		ستون	
	طول (mm)	مقطع	طول (mm)	مقطع
RC HW24	6000	W610x241	4500	H660x550x35x45
RC HW27	6000	W690x240	4500	H660x550x35x45
RC BoxW 24	6000	W610x241	4500	Box500x500x50
RC BoxW 27	6000	W690x240	4500	Box500x500x50

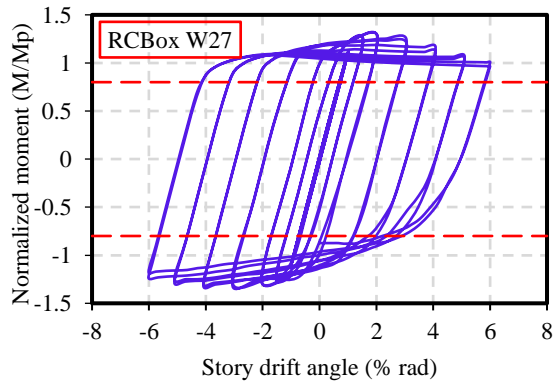
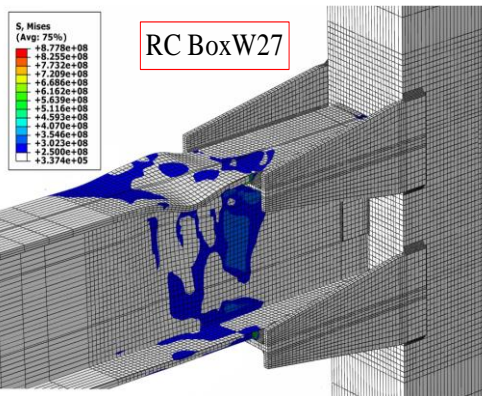
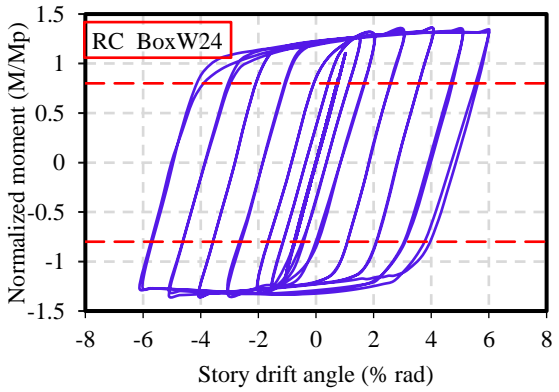
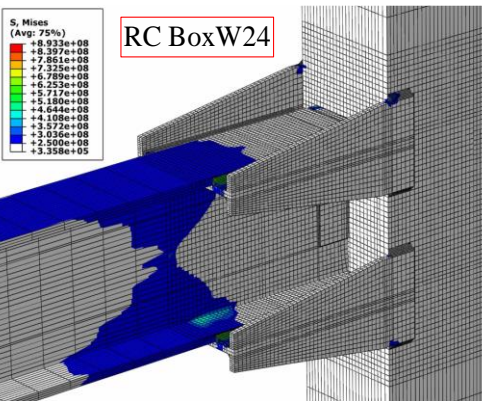
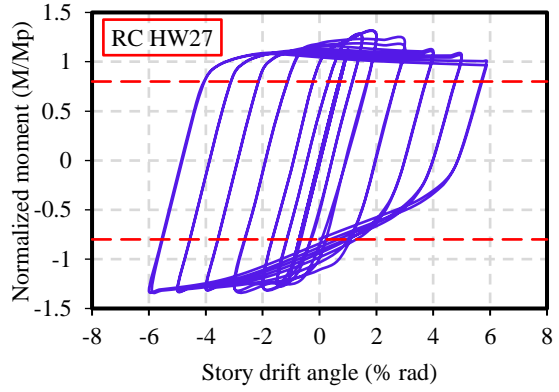
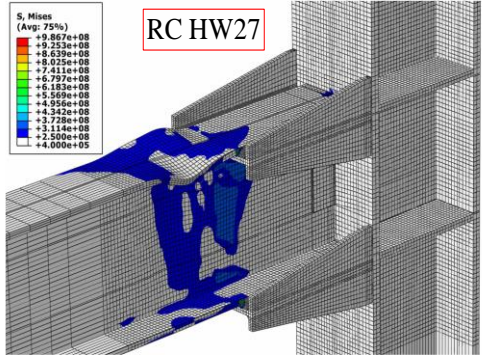
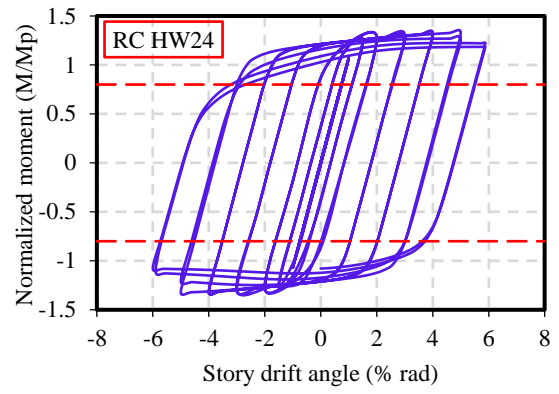
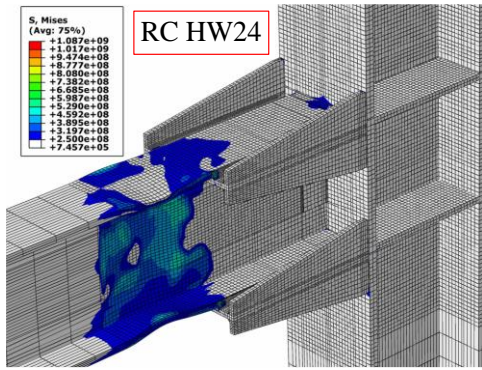
جدول ۴- مشخصات هندسی مقطع سخت‌کننده‌ها (واحد: mm)



specimen	H1	H2	H3	L	L1	L2	D1	D2	D3	D4
	H W24 H W27	400	150	170	800	750	50	11	22	.
Box W24 Box W27	400	150	170	910	750	160	11	22	25	25

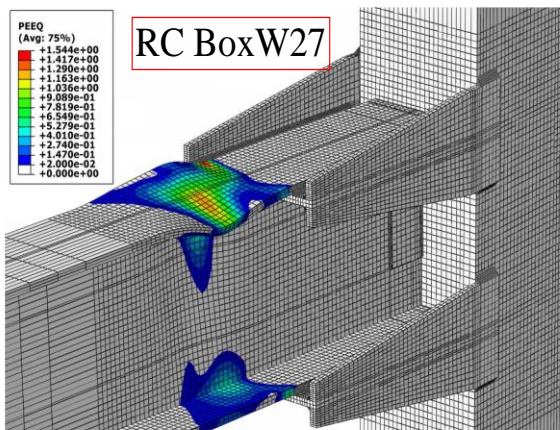
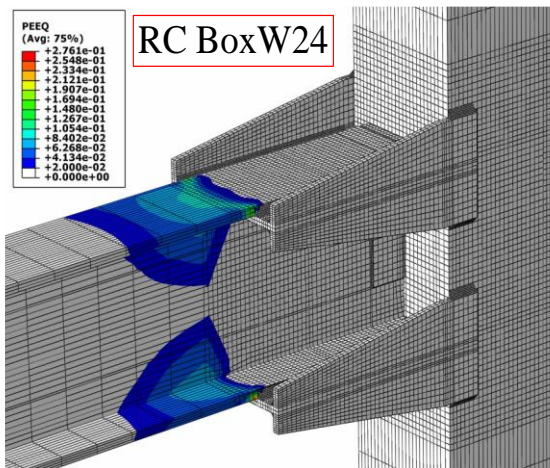
۵- کنترل معیارهای پذیرش اتصالات خمشی پیشنهادی

یک اتصال زمانی صلب است که تحت بارگذاری چرخه‌ای، ۸۰٪ ممان خمشی پلاستیک تیر را تا زاویه دوران ۴٪ حفظ کند [۱۴]. حالت خرابی اتصال، میزان سختی اتصال و تقاضای کرنش



شکل ۹- توزیع تنش فونمیسز و تغییر شکل های مفصل پلاستیک نمونه های عددی

شکل ۸- منحنی های هیستریزس نمونه های عددی



شکل ۱۰- تقاضای کرنش پلاستیک معادل نمونه‌های عددی

۵-۴- تعیین میزان صلیبیت اتصالات

آیین‌نامه AISC 360-22 [۱۴] سختی اتصال را بر اساس نمودار لنگر-دوران گره اتصال به سه دسته صلب، نیمه‌صلب و ساده طبقه‌بندی می‌کند. چنانچه $K_s \geq 20 \frac{EI}{L}$ اتصال از نوع صلب، $K_s \leq 2 \frac{EI}{L}$ اتصال از نوع ساده و در صورتی که $2 \frac{EI}{L} \leq K_s \leq 20 \frac{EI}{L}$ باشد، اتصال نیمه‌صلب خواهد بود.

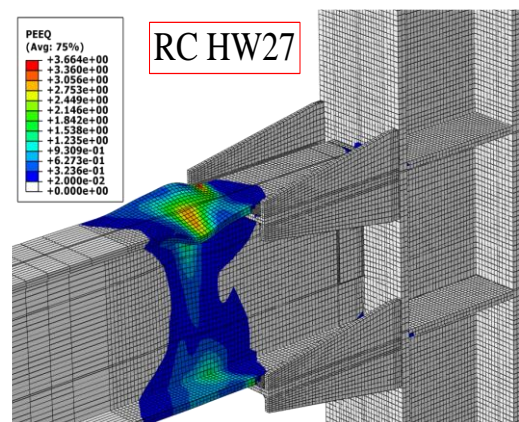
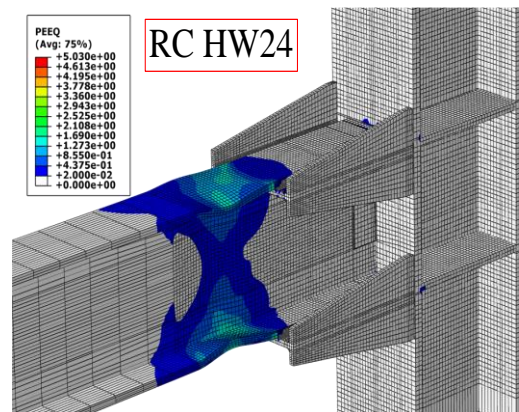
شکل (۱۱) پارامترهای هندسی مورد استفاده در معادلات محاسبه لنگر و دوران‌های مورد نیاز را نشان می‌دهد. معادله (۱۰) و (۱۱) به ترتیب نحوه محاسبه زاویه دریفت طبقه و لنگر در وجه ستون را نشان می‌دهد. دوران چشمه اتصال و دوران اجزای اتصال مطابق با معادله‌های (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شود و با جمع کردن این دو معادله، معادله (۱۴) حاصل می‌شود که چرخش گره اتصال است.

۵-۳- توزیع کرنش پلاستیک معادل در ناحیه اتصالات شاخص کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) محدوده کلی تقاضای کرنش پلاستیک را نشان می‌دهد که می‌تواند معیاری برای ارزیابی توزیع عملکرد در بخش‌های مختلف اتصال باشد. این معیار مطابق با معادله (۹) محاسبه می‌شود [۴۱ و ۴۳].

$$PEEQ\ Index = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij}^p \epsilon_{ij}^p}}{\epsilon_y} = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_y} \quad (9)$$

در این رابطه (ϵ_{ij}^p) کرنش پلاستیک عضو در امتداد i, j یا مقدار تانسور کرنش پلاستیک را مطرح می‌کند.

شکل (۱۰) توزیع شاخص PEEQ را در اتصالات RC HW24, RC HW27, RC BoxW24 و RC BoxW27 نشان می‌دهد. تقاضای کرنش پلاستیک بسیار ناچیز در ناحیه اتصال نمونه‌ها از جمله سخت‌کننده‌ها و جوش‌های اتصال وجود داشت. با این حال، مفصل پلاستیک تیر در این نمونه‌ها تقاضای کرنش‌های پلاستیک بالایی داشت. در ناحیه چشمه اتصال، کرنش پلاستیک مشاهده نشد. بنابراین آسیب ناحیه اتصال حداقل بوده و مفصل پلاستیک ایجادشده در تیر از آسیب به ناحیه اتصال جلوگیری می‌کند.



۶- نتیجه‌گیری

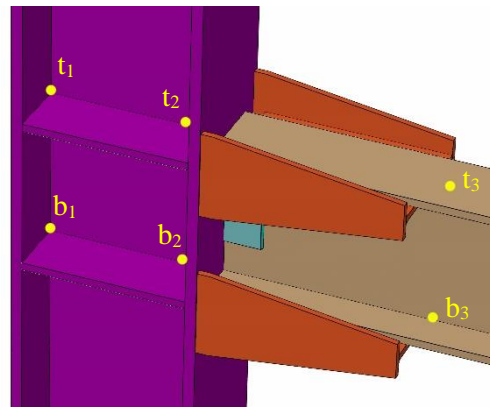
در این مقاله عملکرد لرزه‌ای اتصالات خمشی تقویت شده با سخت‌کننده جانبی T شکل ارزیابی و سعی شد عملکرد لرزه‌ای آن‌ها با حذف ورق‌های روسری و زیرسری بررسی شود. به همین منظور روش طراحی سخت‌کننده جانبی T شکل و مطالعات تحلیلی برای بررسی جزئیات روش مقاوم‌سازی انجام گرفت. در بخش حاضر خلاصه نتایج کلیدی حاصل شده از مطالعات تحلیلی ارائه می‌گردد:

روش پیشنهاد شده نه تنها سبب بهبود عملکرد لرزه‌ای می‌شود، بلکه از نظر ساخت، نصب و فرایند جوشکاری نیز ساده و قابل اجرا در مناطق زلزله‌خیز است و حذف ورق‌های روسری و زیرسری باعث کاهش مشکلات مرتبط با جوش شیارهای اتصال آن به ستون می‌شود.

بررسی منحنی‌های هیستریزس نشان داد که این اتصال به‌عنوان یک اتصال خمشی کاملاً صلب، مقاوم و شکل‌پذیر در قاب‌های خمشی ویژه، مطابق آیین‌نامه AISC 358-22 از نظر مقاومت، سختی و معیارهای شکست پذیرفته شده است.

بررسی توزیع تنش میسر در اتصالات بیانگر انتقال محل تشکیل مفصل پلاستیک از ستون به تیر و خارج از ناحیه اتصال می‌باشد که نشان‌دهنده عملکرد مناسب لرزه‌ای اتصال از نظر کاهش پتانسیل گسیختگی ترد و شکل‌پذیر شدن رفتار اتصال است. بررسی شاخص PEEQ در مفصل پلاستیک تیر، ناحیه اتصال و چشمه اتصال نشان داد که خطر خرابی در ناحیه اتصال و چشمه اتصال بسیار کم است.

بررسی سختی نمونه‌ها نشان‌دهنده این است که نمونه‌های تقویت شده به‌عنوان اتصالات کاملاً مقاوم و صلب در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۱۱- پارامترهای تغییر شکل محاسبه سختی

$$\theta_{InterstoryDrift} = \frac{\Delta}{L_{centerline}} \quad (10)$$

$$M_{centerline} = F \times L_{centerline} \quad (11)$$

$$\phi_{panel\ zone} = \frac{x_{b1} + x_{b2} - x_{t1} - x_{t2}}{2d_b} + \frac{y_{b1} + y_{b2} - y_{t1} - y_{t2}}{2d_c} \quad (12)$$

$$\phi_{Connection} = \frac{x_{b3} - x_{b2} - (x_{t3} - x_{t2})}{d_b} \quad (13)$$

$$\phi_{joint} = \phi_{Panel\ zone} + \phi_{Connection} \quad (14)$$

با در نظر گرفتن جدول (۵)، نسبت سختی چرخشی اتصالات به سختی خمشی تیر برای نمونه‌های RC HW24، RC HW27، RC BoxW24 و RC BoxW27 به ترتیب ۲۲/۴۵، ۲۳/۷۸، ۲۰/۵۰ و ۲۱/۳۰ به دست آمد که نشان می‌دهد اتصالات پیشنهادی به‌عنوان اتصالات کاملاً صلب قابل قبول هستند.

جدول ۵- محاسبات سختی دورانی اتصالات

MODEL	M_s kN.m	θ_s rad	k_s kN.m	L m	EI/L kN.m	$k_s L$ /EI
RC HW24	۱۶۹۷/۵	۰/۰۰۲۱	۸۰۸۳۳۳	۱۲	۳۶۰۰۰	۲۲/۴۵
RC HW27	۱۸۶۲/۵	۰/۰۰۱۸	۱۰۳۴۷۲۲	۱۲	۴۳۵۰۰	۲۳/۷۸
RC BoxW24	۱۶۹۷/۵	۰/۰۰۲۳	۷۳۸۰۴۳	۱۲	۳۶۰۰۰	۲۰/۵۰
RC BoxW27	۱۸۶۲/۵	۰/۰۰۲۰۱	۹۲۶۶۱۷	۱۲	۴۳۵۰۰	۲۱/۳۰

- [14] ANSI/AISC 341-22, (2022), "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings", American Institute of Steel Construction (AISC)
- [15] ANSI/AISC 360-22, (2022), "Specification for Structural Steel Buildings", Chicago, Illinois, USA.
- [16] ANSI/AISC 358-22, (2022), "Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications", Chicago, Illinois, USA.
- [17] مقررات ملی ساختمان ایران (۱۴۰۱) - مبحث دهم، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی، وزارت راه و شهرسازی، معاونت مسکن و ساختمان، ایران.
- [18] Ghobadi, M.S., Ghassemieh, M., Mazroi, A., and Abolmaali, A. (2009), "Seismic performance of ductile welded connections using T-stiffener", *Journal of Constructional Steel Research*, 65(4), pp.766-775.
- [19] Ghobadi, M.S., Mazroi, A., and Ghassemieh, M. (2009), "Cyclic response characteristics of retrofitted moment resisting connections", *Journal of Constructional Steel Research*, 65(3), pp.586-598.
- [20] Mehr, S.M.R.F., and Ghobadi, M.S. (2017), "Seismic performance of retrofitted WFP connections joined to box column using ribs", *Journal of Constructional Steel Research*, 137, pp.297-310.
- [21] Abar, B.M., Ghobadi, M.S., and Jazany, R.A. (2020), "Double shear bolted bracket moment connections, part 2: Four-bolt configuration response evaluation", *Journal of Constructional Steel Research*, 174, p.106281.
- [22] Ghobadi, M.S., and Ahmady Jazany, R. (2019), "Seismic demand assessment of code-designed continuity plate in panel zone", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17, pp.891-926.
- [23] Jazany, R.A., and Ghobadi, M.S. (2018), "Seismic evaluation and upgrading details of plate-reinforced moment-resisting connections", *Journal of Constructional Steel Research*, 150, pp.230-248.
- [24] Chen, C.C., Lin, C.C., and Tsai, C.L. (2004), "Evaluation of reinforced connections between steel beams and box columns", *Engineering Structures*, 26(13), pp.1889-1904.
- [25] Maleki, M., Ahmady Jazany, R., and Ghobadi, M.S. (2019), "Probabilistic seismic assessment of SMFs with drilled flange connections subjected to near-field ground motions", *International Journal of Steel Structures*, 19, pp.224-240.
- [26] Maleki, M., Jazany, R.A., and Ghobadi, M.S. (2019), "Seismic fragility assessment of SMRFs with drilled flange connections using ground motion variability", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23, pp.1733-1746.
- [27] Fanaie, N., and Moghadam, H.S. (2019), "Experimental study of rigid connection of drilled beam to CFT column with external stiffeners", *Journal of Constructional Steel Research*, 153, pp.209-221.
- [1] Mahin, S.A. (1998), "Lessons from damage to steel buildings during the Northridge earthquake", *Engineering Structures*, 20(4-6), pp.261-270.
- [2] Lee, S.L., Ting, L.C., and Shanmugam, N.E. (1993), "Use of external T-stiffeners in box-column to I-beam connections", *Journal of Constructional Steel Research*, 26(2-3), pp.77-98.
- [3] FEMA-350, (2000), "Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings", Prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management agency, Washington, DC.
- [4] FEMA-351, (2000), "Recommended Seismic Evaluation and Upgrade Criteria for Existing Welded Steel Moment-Frame Buildings", Prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management agency, Washington, DC.
- [5] FEMA-352, (2000), "Recommended Post earthquake Evaluation and Repair Criteria for Welded Steel Moment-Frame Buildings", Prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management agency, Washington, DC.
- [6] FEMA-353, (2000), "Recommended Specifications and Quality Assurance Guidelines for Steel Moment-Frame Construction for Seismic Applications", Prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management agency, Washington, DC.
- [7] FEMA-354, (2000), "A Policy Guide to Steel Moment-Frame Construction", Prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management agency, Washington, DC.
- [8] FEMA-355D, (2000), "State of the Art Report on connection performance", Prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management agency. California
- [9] Ting, L.C., Shanmugam, N.E., and Lee, S.L. (1991), "Box-column to I-beam connections with external stiffeners", *Journal of Constructional Steel Research*, 18(3), pp.209-226.
- [10] Shanmugam, N.E., Ting, L.C., and Lee, S.L. (1991), "Behaviour of I-beam to box-column connections stiffened externally and subjected to fluctuating loads", *Journal of constructional steel research*, 20(2), pp.129-148.
- [11] Lee, S.L., Ting, L.C., and Shanmugam, N.E. (1993), "Use of external T-stiffeners in box-column to I-beam connections", *Journal of Constructional Steel Research*, 26(2-3), pp.77-98.
- [12] Shanmugam, N.E., Ting, L.C., and Lee, S.L. (1994), "Non-linear analysis of I-beam to box-column connections", *Journal of Constructional Steel Research*, 28(3), pp.257-278.
- [13] Shin, K.J., Kim, Y.J., and Oh, Y.S. (2008), "Seismic behaviour of composite concrete-filled tube column-to-beam moment connections", *Journal of Constructional Steel Research*, 64(1), pp.118-127.

- Connection" and Moment Connection with Side Plates for Double-I Built-up Columns", In The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- [36] Rajabi, M.J.H., Karimi, M.S., and Kafi, M.A. (2016), "A new model for beam rigid connection to double I-shaped column's web", *Journal of Constructional Steel Research*, 127, pp.204-220.
- [37] Sazmand, E., and Aghakouchak, A.A. (2012), "Modeling the panel zone in steel MR frames composed of built-up columns", *Journal of Constructional Steel Research*, 77, pp.54-68.
- [38] Shiravand, M.R., and Deylami, A. (2016), "Experimental study on steel built-up column moment connections with top and bottom trapezoidal side plates", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 25(18), pp.1073-1088.
- [39] Ayoubi, M.R., and Ghobadi, M.S. (2023), "Seismic retrofitting of beam to double-I built-up column moment connections by lateral T-stiffeners: Experimental and numerical study", *Journal of Constructional Steel Research*, 205, p.107875.
- [40] Mirghaderi, S.R., Torabian, S., and Keshavarzi, F. (2010), "I-beam to box-column connection by a vertical plate passing through the column", *Engineering Structures*, 32(8), pp.2034-2048.
- [41] F.E.A. Abaqus, Analysis User's Manual 6.14, Dassault Systemes Simulia Corp, Providence, RI, 2011.
- [42] AWS D1.1/D1.1M. Structural Welding Code-Steel. (2015), American Welding Society.
- [43] Lemaitre, J., (2012), "A course on damage mechanics", Springer science & business media.
- [28] Oh, S.H., Kim, Y.J., and Ryu, H.S. (2009), "Seismic performance of steel structures with slit dampers", *Engineering Structures*, 31(9), pp.1997-2008.
- [29] Köroğlu, M.A., Köken, A., and Dere, Y. (2018), "Use of different shaped steel slit dampers in beam to column connections of steel frames under cycling loading", *Advanced Steel Construction*, 14(2), pp.251-273.
- [30] Banisheikholeslami, A., Behnamfar, F., and Ghandil, M. (2016), "A beam-to-column connection with visco-elastic and hysteretic dampers for seismic damage control", *Journal of Constructional Steel Research*, 117, pp.185-195.
- [31] Koetaka, Y., Chusilp, P., Zhang, Z., Ando, M., Suita, K., Inoue, K., and Uno, N. (2005), "Mechanical property of beam-to-column moment connection with hysteretic dampers for column weak axis", *Engineering Structures*, 27(1), pp.109-117.
- [32] Yan, J.B., Chen, Y., and Lin, X. (2020), "Finite element analysis and parametric studies on hysteretic behaviours of high strength steel T-joints with damage-control fuses", *Thin-Walled Structures*, 148, p.106574.
- [33] Mazroee, A., Simonian, W., and Eshghi, M.N. (1999), "Experimental evaluation of rigid welded connections used in IRAN", Building and Housing Research Center (BHRC).
- [34] Deylami, A., and Yakhchalian, M. (2008), "Behavior of Two-way Steel Moment Connections with Side Plates and Double-I Built-up Columns under Cyclic Loading", WCEE. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing: WCEE, pp.1-8.
- [35] Deylami, A., and Yakhchalian, M. (2008), "Comparison between Common Moment