

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به پدر و مادر عزیزم که با مهربانی همراهی و همدلی
دشواریها و مشکلات این مسیر را برایم آسان ساختند.

در این جا بر خود لازم می دانم از راهنمایی ها و مشاورت استاد راهنمایم جناب آقای دکتر بهرخ حسینی هاشمی که همواره با سعه صدر و دلسوزی مرا در این مسیر راهنمایی و یاری فرمودند تشکر و قدردانی نمایم همچنین از تمامی پرسنل آزمایشگاه سازه و اساتید و کارکنان پژوهشکده سازه که امکان این تحقیق را فراهم آوردند کمال امتنان را دارم .



پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

رساله دکتری

مهندسی عمران - مهندسی زلزله

مطالعه رفتار چشمه اتصال در قاب‌های خمشی با تیرهای نابرابر

روح الله احمدی جزنی

استاد راهنما:

دکتر بهرخ حسینی هاشمی

چکیده

قاب‌های خمشی ویژه یکی از پرکاربردترین سیستم‌های ساختمانی در مناطقی با لرزه‌خیزی بالا هستند. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای بر روی کارایی و رفتار لرزه‌ای و شکل‌پذیری این نوع سیستم سازه‌ای انجام شده است. نتایج و مشاهدات این تحقیقات حاکی از رفتار قابل اعتماد این سازه‌ها در جذب بالای انرژی است. اغلب تحقیقات گذشته بر روی اتصالات خمشی در ستون‌های داخلی با تیرهای برابر در طرفین یا برای ستون‌های خارجی با تیرهای یک‌طرفه انجام شده است و تحقیقات جامعی بر روی ستون‌های داخلی با تیرهای نابرابر انجام نشده است. آیین‌نامه‌های ساختمانی با وجود احتمال برخورد به این موارد در کارهای مهندسی آن را مسکوت گذشته‌اند و به آن نپرداخته‌اند. در این تحقیق ۸ آزمایش در مقیاس کامل انجام شد تا به تفاوت‌های رفتاری محتمل اتصال تیرهای داخلی با عمل نابرابر پردازد که شامل بر ۶ نمونه با تیرهای با عمق نابرابر مشخص و ۲ نمونه با تیرهای با عمق برابر بود.

انتخاب اتصال برای تیرهای نابرابر شامل بود بر «ورق پوششی، ورق بال و ماهیچه» که با آرایش مستقیم و مورب ورق پیوستگی، می‌تواند گزینه‌های متفاوتی را برای اتصال تیر کوچکتر به تیر بزرگتر ایجاد کند. این جزئیات در مجموعه ۶ نمونه گنجانده شدند و ۲ نمونه با تیرهای برابر به این مجموعه اضافه شد که جزئیات آنها نیز متفاوت بود و هدف از آن بررسی تفاوت‌های محتمل شکست تیرهای نابرابر با تیرهای برابر بود.

نتایج این تحقیق حاکی از تاثیر چشمگیر جزئیات اتصال در تیرهای نابرابر بر رفتار و مودهای شکست محتمل و تفاوت‌های رفتاری و مودهای شکست آن با تیرهای با عمق برابر است. آزمایشات نشان داد که وجود ماهیچه با ترکیب آن با ورق بال می‌تواند یکی از گزینه‌های پیشنهادی برای جلوگیری مود شکست در بال پایینی تیر بزرگتر باشد. همچنین تحلیل‌های تکمیلی و شاخص‌های شکست موید این مطلب بودند که جزئیات اتصال مناسب برای جلوگیری شکست ناشی از عدم تقارن هندسه این حالت خاص نسبت به محور تیر بزرگتر که ناشی از انباشتگی کرنش پلاستیک در تیر بزرگتر است تابعی از تفاوت عمق تیرهای نابرابر و ضخامت چشمه اتصال است.

واژه‌های کلیدی: قاب خمشی ویژه، تیر با عمق نابرابر، ورق پوششی، ورق بال

پیشگفتار

قاب‌های خمشی فولادی ویژه یکی از پرکاربردترین و ایمن‌ترین سیستم‌های ساختمانی هستند. در این میان قاب‌های خمشی فولادی با ورق پوششی و یا قاب های خمشی با ورق بال یا قاب خمشی ویژه با ماهیچه و ترکیبات این جزئیات از جمله پرکاربردترین و سریع‌ترین راه فراهم کردن این نوع از اتصال می‌باشند. در این میان فراهم کردن جزئیات برای اجزای شکل‌پذیر مانند تیر و چشمه اتصال از مهمترین عوامل در فراهم کردن جذب پایدار انرژی با حاشیه ایمنی مناسب است. شکل‌پذیری مناسب قاب‌های خمشی ویژه که حاصل از شکل‌پذیری اجزای تشکیل دهنده آن است، عامل مهمی در فراهم کردن ایمنی مناسب برای این نوع سیستم سازه‌ای در برابر تحریکات جانبی از جمله زلزله است. یکی از عوامل مخرب که ممکن است جذب پایدار انرژی را در این نوع سیستم‌های سازه‌ای تحت تاثیر قرار دهد مودهای شکست اتصال در این نوع سیستم‌ها می‌باشد. از انواع جزئیات اتصال پیشنهاد شده برای قاب‌های خمشی ویژه «ورق پوششی و ورق بال» و «سیستم ماهیچه» یکی از پرکاربردترین جزئیات در آیین‌نامه‌های ساختمانی متداول سراسر دنیا هستند که می‌توانند نیازها و استانداردهای متداول قاب خمشی را فراهم کنند.

بعد از زلزله نورتریج تحقیقات گسترده‌ای بر روی اتصالات خمشی با جزئیات متفاوت انجام شد و مشاهدات گسترده‌ای بر روی خرابی ناشی از زلزله‌های گذشته نشان داد که شکست جوش نفوذی اتصال به بال ستون حتی در سیکل‌های آغازین زلزله عامل اصلی خرابی این نوع اتصال است، آزمایشات گسترده بر روی اتصالات خمشی با جزئیات ورق پوششی یا ورق بال مشاهدات گذشته را تأیید کرد. همچنین شکست بال ستون در ناحیه جوش نفوذی اتصال از جمله مودهای شکست گزارش شده است. اغلب آزمایشات و تحقیقات انجام شده بر روی آزمایش و مطالعه برای اتصالات با ستون‌های داخلی با تیرهای برابر بر روی اتصالات خمشی انجام شده است و اغلب تحقیقات بر روی فرم‌های ایده‌آل قاب‌های خمشی صورت گرفته است ولی تاکنون تحقیقات قابل توجه برای اتصالات خمشی در ستون‌های داخلی با تیرهای نابرابر انجام نشده است و تأثیر جزئیات اتصال بر رفتار لرزه‌ای آنها دیده نشده است. شاید در ابتدا این حدس و گمان به نظر آید که تفاوت رفتار لرزه‌ای چندانی بین این حالت خاص و حالت‌های دیگر از نظر رفتار لرزه‌ای وجود نداشته باشد و جزئیات و تفاوت‌های اتصال تأثیر زیادی بر عملکرد لرزه‌ای و رفتار چرخه‌ای اتصالات موجود نباشد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که تفاوت‌های لرزه‌ای و مودهای شکست تا حدی با حالت تیرهای برابر در ستون‌های داخلی متفاوت است. علاوه بر آن رفتار لرزه‌ای و مودهای شکست اتصال خمشی با تیرهای نابرابر با رفتار لرزه‌ای اتصال خمشی در ستون‌های خارجی متفاوت است.

تحقیقات آزمایشگاهی این مطالعه شامل ۸ تست در مقیاس کامل است که ۶ نمونه از آنها با تیرهای نابرابر و ۲ نمونه با تیرهای برابر در این مجموعه گنجانده شده است. قبل از آزمایشات تعداد ۳۰ عدد نمونه تست کششی از مصالح فولاد انجام شده است. آزمایشات در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله انجام شد. نتایج حاکی از این است که ۴ نمونه از ۶ نمونه با تیرهای نابرابر با جزئیات اتصال متفاوت دچار شکست در بال پایینی تیر بزرگتر شدند ولی ۲ نمونه دیگر با تیرهای نابرابر با جزئیات متفاوت دیگر برای تیرهای نابرابر دچار شکست در هیچکدام از اعضای باربر جانبی نشدند که تاثیر انتخاب جزئیات مناسب برای تیرهای نابرابر بیش از پیش در این تحقیق مشخص شده است همچنین ۲ آزمایش آخر با تیرهای نابرابر دچار شکست در جوش نفوذی و گسترش آن در ستون شدند که مود شکست آنها متفاوت با نمونه تیرهای نابرابر مشاهده شد. در ادامه مطالعات تحلیلی متنوعی با نظریه تغییر پارامترهای هندسی انجام شد تا حساسیت شکست به تغییر پارامترهای هندسی و مقاومتی مورد مطالعه قرار گیرد.

در پایان لازم است از مشاورت اساتید محترم جناب آقای دکتر سیدرسول میرقادری ، دکتر آقا کوچک ، دکتر منصور ضیایی فر ، دکتر حسین زاده کمال امتنان و تشکر را داشته باشم. همچنین از پرسنل آزمایشگاه پژوهشگاه جناب آقای مهندس مرتضایی، آقای جوالی و آقای مهندس فرشچی و جناب آقای گرجی که با همکاری و همفکری این تحقیق را میسر ساختند تشکر نمایم.

نگارنده - زمستان ۱۳۸۹

تهران

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ج	چکیده
د	پیشگفتار
و	فهرست مطالب
ط	فهرست اشکال
م	فهرست جداول
۳	فصل اول مروری بر تحقیقات و مطالعات انجام شده در اتصالات قاب های خمشی
۳	۱-۱- مقدمه
۸	۲-۱- مطالعات انجام شده بر روی اتصالات گیردار خمشی
۱۰	۱-۲-۱- مودهای گسیختگی ورق پوششی و مکانیسم های تسلیم آنها
۱۳	۲-۲-۱- مودهای گسیختگی ورق بال و مکانیسم های تسلیم آنها
۱۵	۳-۲-۱- مودهای گسیختگی و مکانیسم های تسلیم اتصالات ماهیچه دار
۱۷	۴-۱- بررسی عملکرد لرزه ای چشمه اتصال
۲۱	۵-۱- تأثیر خواص مصالح فلز پرکننده جوش بر کارایی اتصال و قاب خمشی
۲۴	۶-۱- موضوعات عمومی راجع به مدل سازی و مشخصات اتصالات
	فصل دوم معرفی نمونه ها و سازوکار و جزئیات آزمایشگاهی
۲۷	۱-۲- مقدمه
۲۷	۲-۲- معرفی نمونه های آزمایشگاهی
۲۷	۱-۲-۲- معرفی نمونه های آزمایشگاهی با تیرهای نابرابر
۲۸	۱-۱-۲-۲- نمونه $U_1 - FUW_1$
۲۸	۲-۱-۲-۲- نمونه $U_1 - FUW_2$
۲۹	۳-۱-۲-۲- نمونه $U_1 - FUW_3$
۲۹	۴-۱-۲-۲- نمونه $U_1 - FW_1$
۳۰	۵-۱-۲-۲- نمونه $U_1 - FW_2$
۳۰	۶-۱-۲-۲- نمونه $U_1 - FW_3$
۳۹	۲-۲-۲- معرفی نمونه های آزمایشگاهی با تیرهای برابر
۳۹	۱-۲-۲-۲- نمونه $E_1 - FW_1$

۳۹	۲-۲-۲-۲- نمونه E ₁ - FW ₂
۴۰	۳-۲- مبنای طراحی نمونه‌های آزمایشگاهی
۴۱	۴-۲- مشخصات کلی ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی
۴۱	۵-۲- تعیین مشخصات مصالح آزمایشگاهی
۴۴	۶-۲- کنترل نمونه‌ها براساس آیین‌نامه‌های طراحی
۴۵	۱-۶-۲- کنترل براساس (۲۰۰۵) AISC - ASD
۵۴	۲-۶-۲- کنترل نمونه‌ها براساس (۲۰۰۵) AISC-LRFD
۶۰	۳-۶-۲- کنترل اجزاء ماهیچه
۶۱	۴-۶-۲- کنترل چشمه اتصال بر مبنای اصل تعادلی
۶۲	۷-۲- جزئیات و سازوکار آزمایشگاهی (Set up)
۶۵	۸-۲- جزئیات و محل نصب کرنش‌سنج‌ها
۶۷	۹-۲- الگوی بارگذاری و جزئیات آن

فصل سوم مشاهدات و نتایج آزمایشگاهی

۷۰	۱-۳- مقدمه
۷۰	۲-۳- تعریف ضرائب لنگر نرمال پلاستیک محتمل
۷۱	۳-۳- لنگر تسلیم نرمال
۷۲	۴-۳- اعوجاج برشی چشمه اتصال
۷۴	۱-۴-۳- محاسبه پارامترهای تغییر شکل قاب استفاده از داده‌های آزمایش
۷۷	۵-۳- شرح و مشاهدات آزمایشات
۷۷	۱-۵-۳- نمونه آزمایشگاهی U ₁ -FUW ₁
۸۱	۲-۵-۳- نمونه آزمایشگاهی U ₁ -FUW ₂
۸۵	۳-۵-۳- نمونه آزمایشگاهی U ₁ -FUW ₃
۸۹	۴-۵-۳- نمونه آزمایشگاهی U ₁ -FW ₁
۹۱	۵-۵-۳- نمونه آزمایشگاهی U ₁ -FW ₂
۹۴	۶-۵-۳- نمونه آزمایشگاهی U ₁ -FW ₃
۹۶	۷-۵-۳- نمونه آزمایشگاهی E ₁ -FW ₁
۱۰۱	۸-۵-۳- نمونه آزمایشگاهی E ₁ -FW ₂
۱۰۲	۶-۳- مقایسه مودهای شکست نمونه با تیرهای برابر و تیرهای نابرابر
۱۰۲	۷-۳- بررسی مودهای رفتاری نمونه‌ها با تیرهای نابرابر
۱۰۸	۸-۳- بررسی کرنش‌سنج سه‌پر داخل چشمه اتصال
۱۰۹	۹-۳- بررسی علل پارگی بال پایینی تیر بزرگتر بر اساس شواهد و نتایج آزمایشگاهی
۱۱۴	۱۰-۳- بررسی رفتار اتصال با ورق پوششی بر اساس نتایج آزمایشگاهی

فصل چهارم مطالعات تحلیلی در مورد اتصالات خمشی با تیرهای نابرابر با

جزئیات اتصال متفاوت

۱۲۱	۱-۴- مقدمه
۱۲۱	۲-۴- معرفی روش اجزاء محدود
۱۲۳	۳-۴- معرفی و تاریخچه نرم افزار ANSYS
۱۲۴	۴-۴- معرفی مدل های اصلی و شرح مدلسازی
۱۲۹	۵-۴- راست آزمایی مدل های تحلیلی
۱۳۵	۶-۴- معرفی پارامترهای شکست در مصالح
۱۳۶	۴-۶-۱- شاخص های تنش و کرنش
۱۳۸	۴-۶-۲- شاخص فشار
۱۳۹	۴-۶-۴- شاخص میسر
۱۳۹	۴-۶-۵- شاخص سه محوری
۱۳۹	۴-۶-۶- شاخص گسیختگی
۱۴۰	۷-۴- ارائه شاخص های شکست برای نمونه های اصلی تحلیلی
۱۴۵	۸-۴- معرفی نمونه های تحلیلی با شرایط هندسی متفاوت
۱۴۹	۹-۴- تحلیل و بررسی اثر پارگی براساس کرنش پلاستیک معادل بر روی پارامترهای تحلیلی
۱۵۸	۱۰-۴- بررسی اثر ضخامت های مختلف ورق پوششی و ورق بال بر روی پتانسیل شکست بال پایینی تیر بزرگتر
۱۵۹	۱۱-۴- بررسی اثر نسبت $\frac{V_{pzm}}{V_y}$ بر پاسخ های لرزه ای چشمه اتصال

فصل پنجم نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد برای تحقیقات آینده

۱۶۲	۱-۵- نتیجه گیری
۱۶۵	۲-۵- پیشنهاد برای کارهای تحقیقاتی آینده
۱۶۶	مراجع

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۴	شکل (۱-۱): نمونه اتصال مقاوم خمشی تا سال ۱۹۹۴ (قبل از نورتریج)
۱۰	شکل (۲-۱) دو روش متداول در اتصال ورق پوششی به ستون
۱۱	شکل (۳-۱) مودهای تسلیم و گسیختگی ورق پوششی
۱۳	شکل (۴-۱) نمای یک اتصال داخلی اقتباس شده از قاب خمشی
۱۴	شکل (۵-۱) مکانیسم تسلیم و مودهای شکست اتصال ورق بال
۱۶	شکل (۶-۱) مودهای شکست و تسلیم اتصال ماهیچه
۲۰	شکل (۷-۱) اثر ضخامت چشمه اتصال بر پارامترهای پاسخ آزمایشگاهی چشمه اتصال [۴۵] (نشان‌های مربع نتایج دانشگاه UM و نشان‌های دایره نتایج دانشگاه Lehigh می‌باشد)
۲۱	شکل (۸-۱) مشارکت چشمه اتصال در دوران نهایی اتصال (نشان‌های مربع نتایج آزمایشات UM و نشان-های دایره نتایج آزمایشات دانشگاه Lehigh است)
۲۵	شکل (۹-۱) طبقه بندی اتصال بر اساس گیردار کامل و نیمه گیردار و مفصل
۲۶	شکل (۱۰-۱) تنزل مقاومت قابل قبول براساس آیین‌نامه AISC
۳۶	شکل (۱-۲) آرایش جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی با تیرهای نابرابر
۳۷	شکل (۲-۲) چند نمونه آزمایشگاهی ساخته شده یا در حین مراحل ساخت قبل از آزمایش
۳۸	شکل (۳-۲) جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی با تیرهای نابرابر
۴۰	شکل (۴-۲) آزمایش جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی با تیرهای برابر
۴۰	شکل (۵-۲) جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی با تیرهای برابر
۴۲	شکل (۶-۲) مشخصات هندسی نمونه‌های کششی
۴۲	شکل (۷-۲) نمونه‌های مورد استفاده جهت تست کشش مصالح (a,b) قبل از تست (c,d) بعد از تست
۴۳	شکل (۸-۲) نمونه نصب شده در دستگاه بارگذاری جهت تست کشش
۶۳	شکل (۹-۲) سازوکار (Set up) اصلی آزمایش
۶۴	شکل (۱۰-۲) جزئیات شماتیک سازوکار (Set up) آزمایش (a) نگهدارنده جانبی نیمه تیر (b) نگهدارنده جانبی سر ستون (c) reaction support
۶۴	شکل (۱۱-۲) جزئیات آزمایش شامل بر جک استاتیکی و نگهدارنده اصلی و نگهدارنده جانبی در حین آزمایش (a) جک استاتیکی (b) Load cell (c) نگهدارنده جانبی تیر (d) پمپ دستی هیدرولیکی جک استاتیکی
۶۶	شکل (۱۲-۲) محل نصب کرنش‌سنج‌های سه پر در چشمه اتصال
۶۷	شکل (۱۳-۲) جزئیات نصب کرنش‌سنج‌های بر روی اتصالات

۶۸	شکل (۱۴-۲) الگوی بارگذاری
۷۲	شکل (۱-۳) آرایش تغییر مکان سنج‌ها در چشمه اتصال در نمونه‌های آزمایشگاهی
۷۶	شکل (۲-۳) مولفه‌های تغییر شکلی نمونه سرهم‌بندی شده با یک چشمه اتصال
۷۶	شکل (۳-۳) مولفه‌های تغییر شکلی نمونه سرهم‌بندی شده با دو چشمه اتصال
۷۸	شکل (۴-۳) منحنی رفتار لرزه‌ای تیر عمیق و تیر کم‌عمق و چشمه اتصال نمونه U ₁ -FUW ₁
۷۹	شکل (۵-۳) نمایی از قبل و بعد از آزمایش نمونه U ₁ -FUW ₁
۸۰	شکل (۶-۳) نمایی از بال پایینی تیر بزرگتر نمونه U ₁ -FUW ₁
۹۰	شکل (۷-۳) چشمه اتصال نمونه U ₁ -FUW ₁
۸۲	شکل (۸-۳) منحنی رفتار لرزه‌ای تیر عمیق، تیر کم‌عمق و چشمه اتصال نمونه U ₁ -FUW ₂
۸۳	شکل (۹-۳) نمای کلی نمونه آزمایشگاهی قبل و بعد از آزمایش
۸۳	شکل (۱۰-۳) پارگی بال پایینی تیر بزرگتر در نمونه U ₁ -FUW ₂
۸۴	شکل (۱۱-۳) نمای ریختن رنگ آهک در چشمه اتصال
۸۵	شکل (۱۲-۳) دیاگرام کرنش ثبت شده در چشمه اتصال
۸۶	شکل (۱۳-۳) منحنی لرزه‌ای تیر عمیق، تیر کم‌عمق و چشمه اتصال برای نمونه U ₁ -FUW ₃
۸۷	شکل (۱۴-۳) نمای کلی نمونه قبل و بعد از آزمایش
۸۸	شکل (۱۵-۳) وضعیت بال تیر کوچکتر و بزرگتر بعد از آزمایش
۹۰	شکل (۱۶-۳) منحنی لرزه‌ای تیر کوچک و تیر بزرگ و چشمه اتصال برای نمونه U ₁ -FW ₁
۹۰	شکل (۱۷-۳) نمونه U ₁ -FW ₁ بعد از آزمایش
۹۱	شکل (۱۸-۳) شکست بال پایینی تیر بزرگتر
۹۳	شکل (۱۹-۳) پارگی بال پایینی تیر بزرگتر
۹۵	شکل (۲۰-۳) منحنی لرزه‌ای تیر کوچک و تیر بزرگ و چشمه اتصال برای نمونه U ₁ -FW ₃
۹۶	شکل (۲۱-۳) نمونه U ₁ -FW ₃ بعد از آزمایش
۹۶	شکل (۲۲-۳) شکست بال پایینی تیر
۹۷	شکل (۲۳-۳) منحنی لرزه‌ای تیر و چشمه اتصال برای نمونه U ₁ -FW ₁
۱۰۰	شکل (۲۴-۳) نمای قبل و بعد از آزمایش و تسلیم و کمانش تیر (بدون پارگی بال تیرها)
۱۰۰	شکل (۲۵-۳) پارگی بال ستون در پشت ورق پوششی اتصال
۱۰۱	شکل (۲۶-۳) منحنی لرزه‌ای تیر و چشمه اتصال برای نمونه E ₁ -FW ₂
۱۰۲	شکل (۲۷-۳) نمونه E ₁ -FW ₂ بعد از آزمایش و کمانش بال تیر
۱۰۳	شکل (۲۸-۳) منحنی لرزه‌ای نمونه‌ها با تیر نابرابر (به صورت نرمال نشده)
۱۰۴	شکل (۲۹-۳) منحنی لرزه‌ای چشمه اتصال نمونه‌ها (به صورت نرمال نشده)
۱۰۵	شکل (۳۰-۳) مکان نصب کرنش‌سنج‌ها در نمونه‌ها با تیرهای نابرابر
۱۰۶	شکل (۳۱-۳) ماکزیمم کرنش در نقاط اندازه‌گیری کرنش‌سنج
۱۰۷	شکل (۳۲-۳) کرنش بر روی اتصالات تیر بزرگتر بر حسب دوران تغییر مکان نسبی طبقه (Drift) storey angle

- شکل (۳۳-۳) اعوجاج برشی کلی در نقطه ۷
- شکل (۳۴-۳) تفاوت رفتاری در چشمه اتصال بالایی و پایینی نمونه U₁-FUW₁
- شکل (۳۵-۳-۱) منحنی رفتاری در چشمه اتصال بالایی و پایینی نمونه ها با چشمه اتصال دو گانه
- شکل (۳۵-۳-۲) پوش منحنی رفتاری در چشمه اتصال بالایی و پایینی نمونه ها با چشمه اتصال دو گانه
- شکل (۳۶-۳) مدل های پیشنهادی برای توجیه رفتار چشمه اتصال و توزیع کرنش نا متوازن در تیر ها
- شکل (۳۷-۳) تغییر شکل نسبی بین بال تیر و ورق پوششی در مطالعات تحلیلی Kim [۳۸]
- شکل (۳۸-۳) نصب تغییر مکان سنج بین بال تیر و ورق پوششی
- شکل (۳۹-۳) تغییر مکان بین بال تیر و ورق پوششی بدست آمده از تغییر مکان سنج (بر حسب سانتی متر)
- شکل (۴۰-۳) کرنش ثبت شده در ورق پوششی پایینی تیر کوچکتر و ورق پوششی بالایی تیر بزرگتر در نمونه U₁-FW₁
- شکل (۴۱-۳) جزئیات ماهیچه در سمت تیر کوچکتر
- شکل (۴۲-۳) ماهیچه در سمت تیر کوچکتر نمونه U₁-FUW₃ بعد آزمایش
- شکل (۴۳-۳) ماهیچه در سمت تیر کوچکتر نمونه U₁-FW₃ بعد از آزمایش
- شکل (۴۴-۳) کرنش های ثبت شده بر روی اجزا اتصال ماهیچه در نمونه های U₁-FUW₃ و U₁-FW₃
- شکل (۴۵-۳) کرنش های ثبت شده بر روی اجزا اتصال ماهیچه در نمونه های U₁-FUW₃ و U₁-FW₃
- شکل (۱-۴) مدل های تحلیلی نمونه U₁-FUW₁, U₁-FUW₂, U₁-FUW₃
- شکل (۲-۴) مدل های تحلیلی نمونه U₁-FW₁, U₁-FW₂, U₁-FW₃
- شکل (۳-۴) رفتار تحلیلی و آزمایشگاهی تیر بزرگتر نمونه U₁-FUW₃
- شکل (۴-۴) رفتار تحلیلی و آزمایشگاهی تیر کوچکتر نمونه U₁-FUW₃
- شکل (۵-۴) رفتار تحلیلی و آزمایشگاهی چشمه اتصال نمونه U₁-FUW₃
- شکل (۶-۴) رفتار تحلیلی و آزمایشگاهی تیر بزرگتر U₁-FW₂
- شکل (۷-۴) رفتار تحلیلی و آزمایشگاهی تیر کوچکتر نمونه U₁-FW₂
- شکل (۸-۴) رفتار تحلیلی و آزمایشگاهی چشمه اتصال نمونه U₁-FW₂
- شکل (۹-۴) رفتار تحلیلی و آزمایشگاهی تیر بزرگتر نمونه U₁-FW₁
- شکل (۱۰-۴) رفتار تحلیلی و آزمایشگاهی تیر کوچکتر نمونه U₁-FW₁
- شکل (۱۱-۴) رفتار تحلیلی و آزمایشگاهی چشمه اتصال نمونه U₁-FW₁
- شکل (۱۲-۴) (a) توزیع تنش فون میس برای نمونه U₁-FW₂، (b) ریختن رنگ آهک برای نمونه U₁-FW₂، (c) توزیع تنش معادل پلاستیک برای چشمه اتصال U₁-FUW₁ (d) ریختن رنگ آهک و ریختن رنگ آهک در چشمه اتصال نمونه U₁-FUW₁
- شکل (۱۳-۴) توزیع تنش پلاستیک معادل برای نمونه تحلیلی و نمونه آزمایشگاهی در نمونه U₁-FUW₁ و U₁-FUW₃

- ۱۴۲ شکل (۱۴-۴) نقاط بحرانی برای نمونه $U_1 - FUW_3$ و $U_1 - FUW_3$
- ۱۴۳ شکل (۱۵-۴) شاخص کرنش پلاستیک معادل بر دوران تغییر مکان نسبی طبقه (Storey drift angle)
- ۱۴۳ شکل (۱۶-۴) شاخص سه محوری بر حسب دوران تغییر مکان نسبی طبقه (Storey drift angle)
- ۱۴۴ شکل (۱۵-۴) شاخص شکست بر حسب دوران تغییر مکان نسبی طبقه (Storey drift angle)
- ۱۴۶ شکل (۱۸-۴) تعریف زاویه تمایل
- ۱۴۷ شکل (۱۹-۴) ابعاد مقطع تیرهای بکار رفته در تحلیل
- ۱۴۹ شکل (۲۰-۴) نقاط بحرانی برای نمونه تحلیلی $U_1 - FUW_3$
- ۱۵۰ شکل (۲۱-۴) منحنی‌های کرنش پلاستیک برای سری ۵۰-۳۰
- ۱۵۰ شکل (۲۲-۴) منحنی‌های کرنش پلاستیک برای سری ۵۰-۴۰
- ۱۵۲ شکل (۲۳-۴) کرنش پلاستیک معادل برای نسبت‌های مختلف $\frac{V_{pzmy}}{V_y}$ و آرایش‌های متفاوت اتصالات و سری ۵۰-۳۰ در دوران نسبی طبقه ۰/۰۶ رادیان
- ۱۵۳ شکل (۲۴-۴) کرنش پلاستیک معادل برای نسبت‌های مختلف $\frac{V_{pzmy}}{V_y}$ و آرایش‌های متفاوت اتصالات و سری ۵۰-۴۰ در دوران نسبی طبقه ۰/۰۶ رادیان
- ۱۵۴ شکل (۲۵-۴) پاسخ‌های نرمال شده برای سری $U_1 - FUW_1$
- ۱۵۴ شکل (۲۶-۴) پاسخ‌های نرمال شده برای سری $U_1 - FUW_3$
- ۱۵۶ شکل ۲۷-۴ کرنش پلاستیک بر حسب نسبت $\frac{V_{pzmy}}{V_y}$ برای زاویه‌های تمایل متفاوت (Beam to column depth angle)
- ۱۵۷ شکل ۲۸-۴ تاثیر تغییر ضخامت ورق پوششی بر کرنش معادل پلاستیک در نقاط بحرانی برای سری ۳۰-۵۰
- ۱۵۸ شکل ۲۹-۴ تاثیر تغییر ضخامت ورق بال بر کرنش معادل پلاستیک در نقاط بحرانی برای سری ۵۰-۳۰
- ۱۵۹ شکل ۳۰-۴ رفتار لرزه ای چشمه اتصال برای نسبت ها مقاومتی و آرایش اتصالات متفاوت برای سری ۳۰-۵۰
- ۱۶۱ شکل ۳۱-۴ میانگین کرنش برشی چشمه اتصال برای نمونه های آزمایشگاهی
- ۱۶۱ شکل ۳۲-۴ میانگین کرنش برشی چشمه اتصال برای نمونه های تحلیلی برای سری ۵۰-۳۰

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۴۴	جدول (۱-۲) مقادیر مشخصات مکانیکی مصالح ورق‌های فولادی برای ضخامت‌های متفاوت
۱۱۰	جدول (۱-۳) مشخصات دورانی اعضا نمونه‌ها (بر حسب رادیان)
۱۱۰	جدول (۲-۳) مشخصات نیرویی و علت پایان آزمایش
۱۴۷	جدول (۱-۴) خصوصیات مقاومتی و هندسی نمونه‌های تحلیلی
۱۵۵	جدول (۲-۴) مشخصات تیرهای استفاده شده برای آرایش U _۱ -FUW _۳
۱۵۵	جدول (۳-۴) مشخصات نمونه‌های تحلیلی استفاده شده برای آرایش U _۱ -FUW _۳

فصل اول

مروی بر تحقیقات ومطالعات انجام
شده براتصالات روی قاب های خمشی

۱-۱- مقدمه

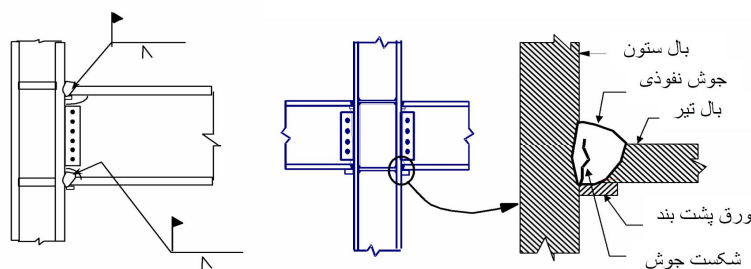
مسائل سازه‌های فولادی به علت عملیات ساخت و نصب نسبتاً آسان در گذشته تا حال مورد اقبال و توجه بیشتری بوده‌اند با افزایش روند سریع رشد تکنولوژی تولید مصالح فولادی خصوصاً پرکننده‌های فولادی «الکترودها» میزان رشد استفاده از مصالح فولادی، بیشتر شده است. میزان استقبال از کاربرد انواع فولاد در صنعت ساختمان هنگامی به اوج خود رسید که میزان ایمنی پایدار محصولات فولادی در برابر عوامل طبیعی مانند سیل، زلزله و عوامل جوی مورد سوال قرار گرفت. همچنین با رشد شهرنشینی و نیاز به بلند مرتبه‌سازی و استفاده از فضای کم، قابلیت استفاده از این محصول را بیش از پیش آشکار ساخت. نیاز به تنوع در نوع ساخت در محصولات فولادی و استفاده از فضاهای ساختمانی و نیاز به سطوح ایمنی متفاوت منجر به ابداع سیستم‌های متنوع سازه‌ای شده است، سیستم قاب خمشی یکی از پرکاربردترین این سیستم‌ها می‌باشد، قابلیت تنوع در اجرا و انعطاف‌پذیری در انطباق مناسب با طرح-های معماری از جمله خصوصیات این سیستم ساختمانی است. وقوع زلزله‌ها با دامنه و شدت و بزرگای متنوع در سال‌های اخیر در گوشه و کنار دنیا، منجر به مطالعات وسیعی بر روی سیستم‌های ساختمانی از جمله سیستم قاب خمشی شده است، نتایج این تحقیقات حاکی از قابلیت اعتماد مناسب این سیستم‌ها در مقابل بارهای جانبی است بر این اساس جزئیات طراحی مشخصی از سوی آیین‌نامه‌ها الزامی شده است تا رفتار شکل‌پذیر و قابل اطمینانی را برای این نوع از سیستم‌های ساختمانی تضمین و پیش‌بینی کند. بر این مبنای قاب‌های خمشی براساس جزئیات مذکور در آیین‌نامه‌های سراسر دنیا به معمولی، متوسط، ویژه طبقه‌بندی می‌شود. قاب‌های خمشی ویژه در این راستا به عنوان یکی از پرکاربردترین سازه‌ها در سازه‌های با ارتفاع متوسط و بلند در مناطق با لرزه‌خیزی بالا می‌باشند. بر این اساس برای سازه‌های خمشی ویژه جزئیات متنوع تعریف شده است از جمله این جزئیات می‌توان به اتصال با جوش نفوذی بال و با برشگیر جان (WUF) و اتصال با ورق پوششی (Coverplate) اتصال با ورق بالا بالا و پایین (Flange Plate) و اتصال ماهیچه (haunch Connection) اشاره کرد. اتصالات مذکور به عنوان اتصال با گیرداری کامل تلقی می‌شوند. تحقیق حاضر شامل بررسی مودهای شکست اتصالات گیردار با تیرهای نابرابر است. در این تحقیق مروری بر کارهای انجام شده بر روی اتصالات گیردار و چشمه اتصال انجام می‌شود سپس نمونه‌های آزمایشگاهی تعریف می‌شود و شرح کامل آزمایش و نتایج آن ارائه می‌شود و سپس تحلیل‌های همراه انجام می‌شود تا حساسیت مدل‌ها به پارامترهای هندسی و مصالح بررسی شود.

در طول سال‌های متمادی، آیین‌نامه‌های لرزه‌ای با هدف افزایش مقاومت ساختمان‌ها در برابر زلزله بدون فروریزش، رفته رفته تکمیل تر شده‌اند. برای این منظور یکی از اصول اساسی در آیین‌نامه‌های پیشرفته، بکار بردن پیکربندی صحیح ساختمان، سیستم‌های سازه‌ای مواد و جزئیات اجرایی مناسب برای داشتن رفتاری شکل‌پذیر می‌باشند. زمانی به یک سازه، شکل‌پذیر گفته می‌شود که قابلیت تحمل تغییر شکل‌های بزرگ و همچنین کاهش غیر قابل توجه در مقاومت ناپایداری یا گسیختگی را داشته باشد. نیروهای طراحی اختصاص یافته به وسیله آیین‌نامه‌های ساختمان برای سیستم‌های سازه‌ای خاص نسبت به مقداری از شکل‌پذیری که فرض می‌شود سازه دارای سطح خاصی از آن است بدست می‌آید. عموماً به علت اینکه سیستم‌های شکل‌پذیر بر نیاز بیشتر پارامتر قابلیت استهلاک جذب انرژی نسبت به مقاومت الاستیک حادی می‌باشد سازه‌های دارای شکل‌پذیری بیشتر برای نیروهای کمتری طراحی می‌شود.

از سال ۱۹۶۰ به بعد بسیاری از مهندسين با ملاحظه ساختمان‌های قاب خمشی جوشی فولادی بر این اعتقاد بودند که چنین ساختمان‌هایی الزاماً در برابر زلزله آسیب‌ناپذیر می‌باشند و خسارت در آنها به تسلیم شکل‌پذیر در اعضا و اتصالات محدود می‌شود و انتظار زلزله‌ای که در برگیرنده گسیختگی سازه باشد را نداشتند. بر پایه چنین باوری، ساختمان‌هایی صنعتی، تجاری و اداری زیادی به خصوص در ایالات متحده غربی ساخته شد که دارای سیستم قاب خمشی بودند.

زلزله نورتریج در ۱۷ ژانویه ۱۹۹۴ این باور را در هم ریخت. متعاقب این زلزله تعدادی از ساختمان‌های دارای قاب خمشی یافت شدند که شکست ترد در ناحیه اتصالات آنها صورت گرفته بود. ساختمان‌های خسارت دیده شامل ساختمان‌های دارای ارتفاع ۱ تا ۲۶ طبقه و دارای عمر ۳۰ سال تا سازه‌های در حال ساخت در زمان زلزله می‌شدند. خسارات در ناحیه وسیعی گسترده شده بود که حتی نواحی با تکان‌های لرزه‌ای متوسط را نیز شامل می‌شد. با وجود اینکه ساختمان‌های نسبتاً کمی جنبش شدید زمین را تجربه کردند ولی خسارت ساختمانها در سطح وسیعی بود. اتصالات در قابها دچار شکست ترد شده بودند که اغلب (نه همیشه) همراه با خسارات کم به اجزای معماری بودند. مشاهدات بعدی، خساراتی را که قبلاً توسط زلزله‌های گذشته در تعداد محدودی از ساختمان‌ها بوجود آمده بودند را نیز نشان داد.

ساختمان‌های خمشی فولادی که در زلزله نورتریج آسیب دیدند عموماً ضوابط آیین‌نامه‌های ساختمانی را ارضا می‌کردند. به این دلیل بود که این ساختمان‌ها خسارات کمی دیدند ولی فرو نریختند. با این حال سازه‌ها آنچنان که پیش‌بینی می‌شد رفتار نکردند و در اغلب موارد خرابی در اتصالات حتی در زلزله‌های خفیف‌تر از زلزله طرح رخ داد. ساختمان‌های با قابهای خمشی فولادی بر پایه این فرض طراحی می‌شوند که برای تسلیم گسترده و تغییر شکل پلاستیک بدون افت شدید در مقاومت مناسب می‌باشند. تغییر شکل پلاستیک شامل دوران‌های پلاستیک تولید شده بوسیله تیرها در ناحیه اتصال آنها به دور از ستون‌ها می‌باشد و دارای قابلیت اتلاف انرژی وارد شده از زلزله به ساختمان می‌باشند. بعلاوه انتظار می‌رود که خسارات شامل تسلیم متوسط و کم‌اندام موضعی اعضای فولادی (و نه شکستهای ترد) باشد. شکل‌پذیری در ساختمان‌های قاب خمشی فولادی با تسلیم در اجزای اتصالات تیر ستون حاصل می‌شود. این تسلیم ممکن است به شکل تشکیل مفصل پلاستیک در تیرها و (بندرت در ستونها)، تغییر شکل برشی پلاستیک در چشمه‌های اتصال و یا با ترکیبی از این مکانیزم‌ها اتفاق بیفتد. قبلاً تصور می‌شد که اتصال نمونه بکار گرفته شده در شکل (۱-۱) برای ایجاد دوران‌های پلاستیک ۰/۰۲ رادیان یا بزرگتر بدون افت قابل ملاحظه‌ای در مقاومت مناسب باشد.



شکل (۱-۱): نمونه اتصال مقاوم خمشی تا ۱۹۹۴



مشاهده خسارات وارد شده به ساختمانها در سال ۱۹۹۴ با زلزله نورتریج روشن کرد که برخلاف رفتار مورد انتظار، در بسیاری موارد، شکستهای ترد در اتصالات در سطح دورانهای پلاستیک بسیار پایین تر از نیاز و در بعضی موارد حتی هنگامی که سازه‌ها الاستیک باقی مانده‌اند روی داده است.

عموماً (نه همیشه) گسیختگی، در جوش با نفوذ کامل بین بال پایین تیر و بال ستون رخ می‌دهد و بسته به شرایط در امتداد مسیرهای مختلفی پیشروی می‌کنند. اشکال صفحه بعد انواع ترکهای مشاهده شده در اتصالات را نشان می‌دهد. زمانیکه چنین ترک‌هایی رخ می‌دهد، اتصال تیر به ستون کاهش قابل توجهی در صلبیت ارتجاعی و مقاومت در برابر نیروهایی که تمایل به باز کردن ترک دارند، نشان می‌دهد.

مقاومت ارتجاعی پس‌ماند و صلبیت باید در ازای یک کوپل تشکیل شده از نیروهای انتقالی در امتداد اتصال باقیمانده بال بالا و پیچ‌های جان تامین شود. اما در تولید این مقاوت خود اتصالات پیچی جان می‌توانند تحت گسیختگی واقع شوند که می‌تواند به شکل ترک جوش صفحه برش به ستون، ترک جوش‌های تکمیلی به جان تیر، و یا ترک در امتداد مقطع ضعیف صفحه برش در امتداد سوراخ‌های پیچ باشد. زمانیکه چنین ترک‌هایی رخ می‌دهد، اتصال تیر به ستون کاهش قابل توجهی در صلبیت ارتجاعی و مقاومت در برابر نیروهایی که تمایل به باز کردن ترک دارند، نشان می‌دهد. مقاومت ارتجاعی پس‌ماند و صلبیت باید در ازای یک کوپل تشکیل شده از نیروهای انتقالی در امتداد اتصال باقیمانده بال بالا و پیچ‌های جان تامین شود.

با وجود اینکه ترکها اثر محسوسی در مقاومت دارند بسیاری از ساختمانهای آسیب دیده علائم مشخصی از آسیب‌های سازه‌ای مانند تغییر شکلهای دائمی یا خسارت به اجزای معماری از خود بروز نمی‌دهند که این امر ارزیابی مطمئن خسارات پس از زلزله را دشوار می‌سازد. برای تعیین اینکه آیا ساختمان دچار آسیب در اتصالات شده است یا نه، لازم است که اجزای معماری و محافظ در برابر آتش برداشته شده و بازرسی جامعی از اتصال صورت گیرد. حتی اگر خسارتی یافت نشود، این امر یک روند هزینه بر است. البته تعمیر اتصالات آسیب دیده دارای هزینه بیشتری است و احتمالاً سازه ممکن است بقدری دچار آسیب شده باشد که خراب کردن آن از تعمیرش منطقی‌تر به نظر برسد.

بنابراین در راستای توسعه ساخت صنعت ساختمانهای فولادی، گروه (SEAOC - ATC - SAC) AISC، موسسه آهن و فولاد آمریکا و موسسه بین‌المللی استانداردها و فن‌آوری مشترکاً شروع به فعالیت در این زمینه برای رسیدگی منظم و حل مسئله کردند. به دنبال این کار گروهی FEMA [۱] آغاز به همکاری با گروه SAC نمود تا مطالعات متمرکزی در این رابطه و عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های قاب خمشی فولادی و ایجاد توصیه‌هایی برای مقاصد حرفه‌ای را صورت دهد (فاز ۱ از پروژه فولادی SAC). در این پروژه عموماً قصدبر توصیه‌های عملی بوده است. این توصیه‌ها عموماً قصد تأمین این اهداف را داشتند:

۱- بررسی ساختمانهای تحت اثر زلزله برای تعیین اینکه آیا تحت خسارت قابل ملاحظه‌ای واقع شده‌اند یا نه

۲- تعمیر ساختمانهای آسیب دیده

۳- بهبود ساختمانهای موجود، برای تقویت عملکرد احتمالی‌شان در آینده و طراحی ساختمانهای جدید با حصول

عملکرد لرزه‌ای قابل اطمینان

در نیمه اول سال ۱۹۹۵ یک برنامه فشرده تحقیقی برای این منظور تشکیل شد. این تحقیق شامل مقالات تحقیقاتی، جمع‌آوری اطلاعات از سازه‌ها تحت تاثیر زلزله، ارزیابی آماری اطلاعات جمع‌آوری شده، مطالعه تحلیلی ساختمانهای خسارت دیده و سالم و آزمون‌های آزمایشگاهی تیر - ستون‌ها با مقیاس واقعی برای طرحهای نمونه

پیش از زلزله نورتریج و فعالیت‌های صورت گرفته برای تعمیرات متنوع و بهینه کردن جزئیات طرحها بود. که تمام این فعالیتها در قالب نشریه ۲۶۷ - FEMA [۱] (راهنمای موقت برای ارزیابی تعمیر و شناخت و طراحی سازه‌های دارای قاب‌های خمشی فولادی جوشی) استخراج شد و در آگوست ۱۹۹۵ انتشار یافت. بنابراین FEMA ۲۶۷ [۱]، اولین توصیه‌های تعریف شده (هر چند موقتی) برای اجرا، به دنبال کشف صدمات اتصالات در زلزله ۱۹۹۴ نورتریج می‌باشد. در سپتامبر ۱۹۹۵، گروه SAC در یک توافق قراردادی با FEMA آغاز به تهیه فاز دوم پروژه فولادی SAC، نمود. در فاز دوم SAC آزمایشات گسترده خود را بر روی عملکرد قابهای خمشی فولادی و اتصالات اجزای مختلف با هدف توسعه حاشیه طراحی لرزه‌ای قابل اطمینان برای ساختمانهای فولادی ادامه داد. این کار شامل تحلیل‌های گسترده از ساختمانها، تحقیقات مفصل با استفاده از المان‌های محدود و مکانیک ترک در اتصالات مختلف برای تعیین اثرات ترک در اتصالات ساختمان، مقاومت مصالح و طاقت و کیفیت اتصال جوشی روی رفتار اتصال در بیش از ۱۲۰ نمونه آزمایشی با مقیاس واقعی بود.

با استفاده از نتایج این مطالعات و نیز تحقیقات مستقل انجام شده توسط دیگران، هم اکنون می‌دانیم که اتصال نمونه قاب خمشی فولادی که تا سال ۱۹۹۴ و زلزله نورتریج استفاده می‌شد و در شکل ۱-۱ نشان داده شده، دارای خصوصیتی است که آن را برای شکست ترد مستعد می‌سازد و عبارتند از:

- تنش‌های مخرب در اتصال در محل اتصال تیر به ستون رخ می‌دهد که متاسفانه ضعیف‌ترین محل در کل اتصال است. در این محل، لنگرهای خمشی و نیروهای برشی در تیر باید به وسیله عمل ترکیبی اتصالات جوش شده بین بالهای تیر و ستون و صفحه برش انتقال یابد. خواص مقطع ترکیبی این المان‌ها (مانند مساحت مقطع و عرض و مدول مقطع) معمولاً کمتر از آن چیزی است که به تیر وصل شده، در نتیجه تنشها بطور موضعی در این محل تقویت می‌شوند.

- اتصال بین بال پایین تیر و بال ستون عموماً بوسیله جوش کارگاهی دست پایین بوسیله جوشکاری که روی بال بالایی تیر آهن نشسته است صورت می‌گیرد (موقعیت گره و حشی). برای جوشکاری از این موقعیت هر پاس جوش باید در مقطع جان تیر قطع شود و شروع و قطع هر جوش در این نقطه خواهد بود. این تکنیک جوشکاری معمولاً جوشی با کیفیت ضعیف به همراه تجمع گل جوش، عدم ذوب کامل و عیب‌های دیگر را در این منطقه بحرانی نتیجه می‌دهد. این نقص‌ها می‌توانند شرایط را برای آغاز ترک، زمانیکه اتصال تحت تنش‌ها و کرنشهای جمع شونده لرزه ای قرار می‌گیرد فراهم کنند.

- پیکربندی اصلی این اتصالات شرایط را برای یافتن نقص‌های پنهان در ریشه جوش اتصال بال تیر به بال ستون مشکل می‌کند. پشت بند که معمولاً بعد از اتمام جوش در محل باقی می‌ماند مانع از مشاهده ریشه جوش می‌شود. بنابراین جستجوی اولیه نقص‌ها در چنین اتصالاتی به وسیله کاربرد آزمایش‌های فراصوتی (ULT testing) صورت می‌پذیرد. با وجود این، هندسه اتصال تشخیص مطمئن نقص‌ها را بخصوص در مرکز اتصال مشکل می‌کند. نتیجه اینکه بیشتر این اتصالات جوشی، نقص‌های عمده غیرقابل شناسایی دارند که می‌توانند آغازگر ترکهای مخرب باشند.

- مدل‌های طراحی نمونه برای این اتصال فرض می‌کنند که تقریباً تمام تنش‌های خمشی بوسیله بال‌ها و تمام نیروی برشی بوسیله جان انتقال می‌یابد. در شرایط واقعی، به علت شرایط مرزی که به علت تغییر شکل ستون اعمال می‌شود بالهای تیر مقدار قابل ملاحظه‌ای از برش تیر را تحمل می‌کنند که نتیجه آن تنش‌های خمشی قابل توجه در

