

معرفی اتصال تیر به ستون فلزی با رفتار پلاستیک پایا

محمدجواد جبارزاده^{۱*}، منصور ضیائی^۲

۱- دانشجوی دکترای سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۲- دانشیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

*تهران، صندوق پستی ۳۹۱۳-۱۹۳۹۵

jabbarzadeh@iiees.ac.ir

(دریافت مقاله: دی ۱۳۸۴، پذیرش مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۸)

چکیده- با مطالعه تجربیات به‌دست آمده از عملکرد اتصالات خمشی در زلزله‌های گذشته، با نوعی از خرابی روبه‌رو می‌شویم که با شکست ترد جوش در محل اتصال بال تیر به ستون به‌وجود می‌آید. تحقیقات متعدد در زمینه علل وقوع این خرابی نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه تقید جانبی مصالح جوش در محل بیشترین تلاشهای مقطع (در کنار سایر عوامل مؤثر) است که رفتار شکل‌پذیر این مصالح را در برخی از اتصالات ناممکن می‌سازد. راه‌حلهای متعددی برای برطرف ساختن این نقص از طرف محققان ارائه شده که یکی از آنها استفاده از اتصالات با مقاطع کاهش یافته است. در این روش با انتقال مفصل پلاستیک از محل اتصال جوشی در مرز مشترک تیر و بال ستون به سمت مقطع کاهش مقاومت یافته‌ای در دهانه داخلی تیر، بروز تنش‌های بزرگ در اتصال جوش و شکست‌های ناگهانی در آن محدود شده و علاوه بر آن عملکرد رفتار غیرخطی المان تیر بهبود می‌یابد. در همین زمینه در تحقیق حاضر طرحی ارائه شده تا لنگر پلاستیک در اتصال تیر و ستون، از محدوده جوشکاری شده تیر و ستون دور شده و در محدوده‌ای با حفظ پیوستگی در ورقهای فولادی تشکیل شود. نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی در این تحقیق نشان داد که طرح ارائه شده علاوه بر پایایی رفتار غیرخطی از بروز شکست‌های ترد در محل اتصالات جوشی به جهت شکل هندسی قطعه و کاهش تنش‌های این محدوده، جلوگیری می‌کند.

کلید واژگان: فولاد، اتصال تیر به ستون، شکست ترد، مفصل پلاستیک.

۱- مقدمه

خمش مشاهده شد که انتظار وقوع آنها وجود نداشت. با اینکه بروز ترکها و گسیختگی اتصال منجر به آسیب دیدگی کلی سازه یا فروریختگی آن نشد، اما رفتاری که در هنگام زلزله برای اتصالات مشاهده شده بود، رفتاری غیرشکل‌پذیر، ترد و با قابلیت جذب انرژی کم در سازه طبقه‌بندی می‌شد.

پس از زلزله‌های نورث‌ریج^۱ و کوبه^۲ [۱، ۲] نوعی از شکست ترد در اتصالات تیر به ستون با جوش نفوذی بال در قابهای

1. Northridge
2. Kobe

ساختمان با قاب خمشی انجام شده، بیش از نیمی از آسیب‌ها به بروز ترک در ریشه جوش محدود شده و بروز شکست‌های امتداد یافته از ترکهای جوش در اجزای تیر و ستون، در $\frac{1}{3}$ موارد مشاهده شده است.

مشاهده عیوب نوع شکست و بدون شکل‌پذیری، منجر به ارائه راهکارهایی برای اصلاح رفتار اتصالات تیر به ستون در قابهای خمشی شد که از دو دیدگاه قابل بررسی است. در دیدگاه اول تقویت اتصال با استفاده از لوازم اتصال مدنظر بوده است. در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ روشهای تقویت این نوع اتصالات با استفاده از دستک‌های مستقیم و شیب‌دار یا ورقهای تقویتی بالا و پایین دیده می‌شود. نتیجه به دست آمده از این روشها در مقایسه با یکدیگر، شکل‌پذیری بیشتر اتصال با دستک مستقیم نسبت به دستک شیب‌دار و اجرای ساده‌تر و اقتصادی‌تر آن است. از طرف دیگر به‌کارگیری ورقهای تقویتی - علاوه بر شکل‌پذیری بالاتر نسبت به دو حالت قبل - امکان جاری شدن چشمه اتصال^۵ را نیز فراهم ساخته است [۱].



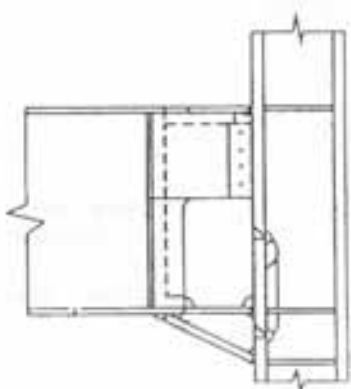
شکل ۱ امتداد ترکها در بال و جان ستون [۸]

5. Panel Zone

شکست اتصالات تیر به ستون به جوشهای نفوذی بالهای تیر به بال ستون تجربه‌ای بود که مهندسان را به سمت روشهایی برای تقویت اتصال یا بهبود رفتار آنها سوق داد. دلایلی را که توسط محققان مختلف برای شکست اتصالات ارائه شده می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- ۱- عدم طراحی مناسب اتصال [۳]؛
 - ۲- استفاده از الکترودهای نامناسب [۳]؛
 - ۳- وجود ترکهای میکروسکوپی^۱ در محل صفحات اضافه شده به اتصال برای کنترل مصالح مذاب جوش^۲ [۳، ۴]؛
 - ۴- بروز تنش‌های سه‌بُعدی در فلز جوش به علت مقید شدن آن در جهت طولی جوش و ظهور شکست‌های ترد [۵، ۶]؛
 - ۵- اعمال محدودیت در تغییرمکان نسبی طبقات^۳ به‌عنوان عاملی در افزایش سختی سازه و جلوگیری از رفتارهای پلاستیک اعضا [۵]؛
 - ۶- مشخصه‌های زلزله در رابطه با اعمال بارهای ضربه‌ای و سریع به سازه [۱]؛
 - ۷- ایجاد سوراخ^۴ در جان تیر برای جوش نفوذی بالها به ستون که منجر به کاهش مقاومت مقطع تیر در محل اتصال به ستون شده و سبب رفتار غیر شکل‌پذیر جوش می‌شود [۵].
- نمونه‌های متعددی از شکست اتصالات در زلزله نورث‌ریچ و کوبه توسط محققان گزارش شده که در آنها شکست اتصالات جوشی، از محل جوش بال تیر به ستون شروع شده است. در شکل‌های ۱ و ۲ نمونه‌هایی از این نوع شکست دیده می‌شود. در تحقیقی که در [۷] برای ۵۱

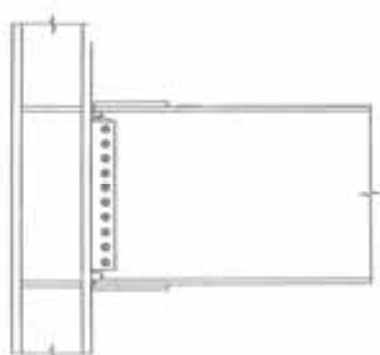
1. Notch
2. Backing Bar
3. Drift
4. Hole



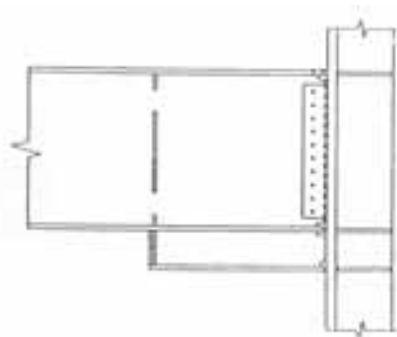
شکل ۴ تقویت اتصالات با استفاده از دستک شبیدار [۱]



شکل ۲ انتشار ترکهای مورب به سمت جان ستون [۸]



شکل ۵ تقویت اتصالات با استفاده از ورقهای تقویتی بالا و پایین [۱]



شکل ۳ تقویت اتصالات با استفاده از دستک مستقیم [۱]

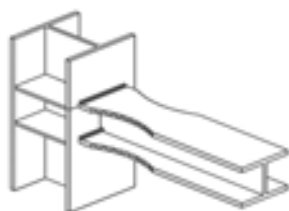
پوپوف (۱۹۹۴ - ۱۹۹۸)



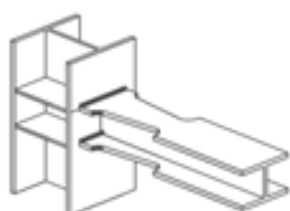
یه و چن (۱۹۹۴)



پلومیر (۱۹۹۱)



(ج)



(ب)

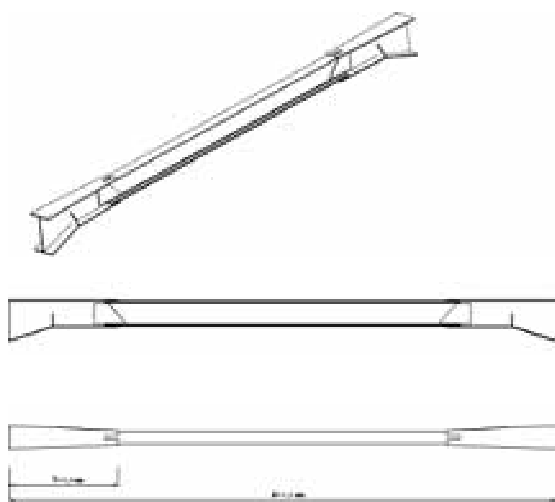


(الف)

شکل ۶ روند شکل‌گیری روشهای مختلف برای دور کردن مفصل پلاستیک از ناحیه اتصال جوشی [۳] الف) پلومیر (ب) یه و چن (ج) پوپوف

مذکور اجرای ساده‌تر و سریع‌تری داشته و قابلیت ساخت نیمه‌صنعتی و ارزان را نیز داشته باشد. در شکل ۷ نمای جانبی و بالایی اتصال نشان داده شده است. هم‌چنان‌که ملاحظه می‌شود در این شیوه، هر تیر به سه بخش جداگانه تقسیم شده که شامل دو بخش اتصال به ستون و یک بخش میانی است. بخش میانی، از پروفیل‌های معمول ساختمانی و دو بخش کناری از قطعات اتصال ساخته شده از ورق‌های فولادی - که به‌صورت نیمه‌صنعتی در کارگاه‌های کوچک فلزکاری قابل ساخت است - تشکیل شده است.

همان‌گونه که در شکل ۸ دیده می‌شود، از یک تغییر ناگهانی در ارتفاع و عرض مقطع^۵ در اتصال کناری استفاده شده (عرض بالهای بالایی و پایینی تیر متغیر است) به‌طوری‌که حداکثر عرض بالها در محل اتصال به ستون و حداقل عرض آن در محل اتصال به تیر میانی قرار داده شده است.



شکل ۷ نماهای جانبی و سه‌بُعدی مجموعه تیر و اتصالات

پیشنهاد شده به ستون

5. Kick

اما دیدگاه دوم به‌جای افزودن بر ظرفیت انتقال نیروهای اتصال، نوعی فیوز پلاستیک در نزدیکی اتصال ایجاد کرده تا با دور کردن مفصل پلاستیک از ناحیه اتصال جوشی - که قابلیت شکل‌پذیری کمتری دارد - تشکیل مفصل کامل پلاستیک با رفتار مطمئن در نزدیکی آن را فراهم سازد. در شکل ۶ روند شکل‌گیری این تفکر که اولین بار توسط پلومیر^۱ در [۳] ۱۹۹۱ مطرح شد نشان داده شده است، (شکل ۶- الف). تفکر کلی براساس کاهش سطح مقطع بال‌های تیر به فاصله کمی از اتصال آن به ستون پایه‌گذاری شده است. یه^۲ و چن^۳ اصلاحاتی روی این ایده انجام داده، (شکل ۶- ب) [۳] و پوپوف با ارائه شکل موسوم به استخوانی شکل^۴، به تکمیل روشهای طراحی تیر به این طریق نائل شد، (شکل ۶- ج) [۳]. مزیت کار پوپوف جلوگیری از افزایش تمرکز تنشهای حین بارگذاری بود که نسبت به روشهای قبلی ارجحیت داشت. یکی از اشکالات مهم این روش، پرهزینه بودن اجرای دالبرهای فلزی و لزوم به‌کارگیری فناوریهای خاص در ساخت آنها است و لذا نمی‌تواند برای ساختمانهای متداول عمومیت داده شود. با این حال استفاده از این روش منجر به رفتاری شکل‌پذیرتر در اتصالات تیر به ستون با دور کردن مفصل پلاستیک از محل اتصال جوشی می‌شود.

۲- اتصال تیر و ستون شکل‌پذیر با تغییر در هندسه اتصال

در تحقیق حاضر سعی شده با تغییر شکل هندسی اتصال، تشکیل مفصل پلاستیک در فاصله‌ای دورتر از محل اتصال تیر به ستون انجام شود. علاوه بر این در پی آنیم که اتصال

1. Plumier
2. Yeh
3. Chen
4. Dog Bone

شود. این امر منجر به افزایش کیفیت جوشکاری در محل‌های حساس اتصال قطعات مختلف اسکلت فلزی می‌شود.

۴- صرفه‌جویی اقتصادی با کاهش وزن کلی تیر با کم کردن فولاد مصرفی در بخش میانی و ورق‌های اتصال در دو انتها.

۵- سبک کردن و مجزاسازی قطعات تیر. این ترفند امکان اجرای اسکلت فلزی را در ساختمان‌های متداول کوتاه مرتبه، بدون به‌کارگیری ماشین‌آلات سنگین (مانند جراثقال) به‌وجود خواهد آورد. در این رابطه سعی بر آن است که وزن قطعات بین ۴۰ تا ۶۰ کیلوگرم به‌دست آید تا انتقال آنها توسط کارگر نیز ممکن باشد.

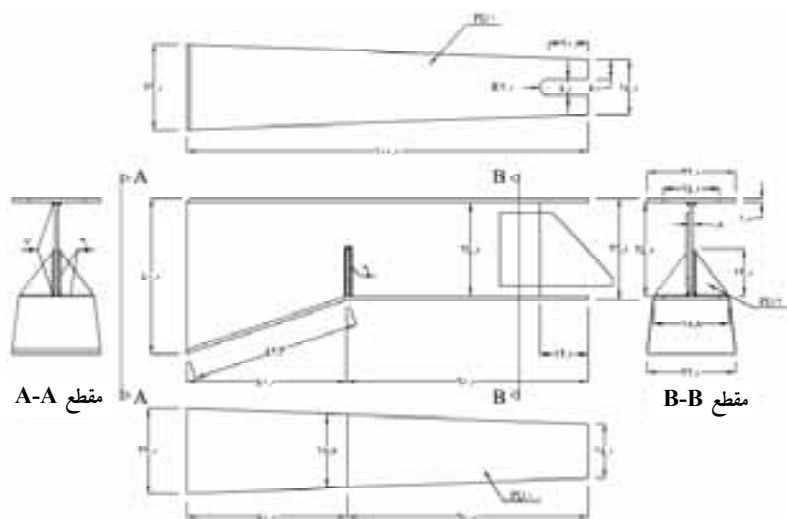
روش به‌کار رفته در تحقیق حاضر، در مرحله نخست بر مطالعات تحلیلی مبتنی بوده و سپس به طراحی قطعه اتصال پرداخته شده است. مرحله تجربی در این تحقیق از اهمیت زیادی برخوردار است که پس از معرفی مدل‌سازی، نحوه تنظیم آزمایش معرفی می‌شود. پس از انجام آزمایش‌ها نتایج حاصل تحت اثر بارگذاری تناوبی بررسی شده و فرضیاتی که برای رفتار شکل‌پذیر قطعه مدنظر بوده کنترل می‌شود.

مواردی که در طراحی این اتصال برای بهبود عملکرد لرزه‌ای آن مدنظر بوده به شرح زیر است:

۱- با ایجاد شکستگی در جان تیر و همچنین عرض متغیر بال‌های قطعه اتصال، انتقال محل مفصل پلاستیک به فاصله‌ای مشخص و از قبل تعیین شده میسر شده است. بدین طریق با دور کردن حداکثر تلاش‌ها از محل اتصال جوش، تنش‌های به‌وجود آمده در جوش نفوذی بال‌های تیر تقلیل داده شده تا از اثر مقیدسازی جوش و کاهش شکل‌پذیری آن در وقوع شکست‌های ترد جلوگیری شود.

۲- ساخت قطعات، فقط با استفاده از برش‌های مستقیم و ساده ورق‌های فولادی و جوشکاری‌های متداول امکان‌پذیر بوده و در کارگاه‌های کوچک امکان سری‌سازی این قطعات با حداقل تجهیزات (شامل یک دستگاه برش و یک دستگاه جوشکاری) و استفاده از کارگران ساده وجود داشته باشد.

۳- نصب اتصال در محل به‌گونه‌ای باشد که از جوش‌های سربالا در هنگام اجرای اسکلت فلزی جلوگیری



شکل ۸ ابعاد هندسی و جزئیات ساخت قطعه اتصال پیشنهادی (واحد سانتی‌متر)

۳- مطالعات تحلیلی

مطالعات و طراحی‌های انجام شده بر مبنای دو اصل طراحی اقتصادی و دستیابی به نوعی از اتصال با رفتار مناسب و شکل‌پذیر پی‌ریزی شده است. در این مطالعات که با بررسی بیش از ۲۰ مدل اجزای محدود و انجام تحلیل‌های غیرخطی به صورت تکرارهای متناوب برای تعیین بهترین شکل اتصال انجام شده (تنها نتیجه نهایی در این جا آورده شده)، هدف دستیابی به وزن کمتر قطعات فولادی است که علاوه بر مزایای اقتصادی، از مزیت اجرای ساده‌تر و ارزانتر نیز برخوردار باشد. علاوه بر این انتقال محل تشکیل مفصل پلاستیک از ناحیه اتصال جوش به منطقه‌ای با پیوستگی ورق‌های فولادی در بال و جان، مزیت اصلی این اتصال برای بروز رفتاری شکل‌پذیر بدون گسیختگی‌های ترد است.

با وجود استفاده از برشهای U شکل، نتایج آزمایشها نشان داد که هیچ‌گونه نقطه ضعفی در محل ایجاد این برشها در قطعه اتصال مشاهده نشده و می‌توان نتیجه گرفت که اثر تنشهای حرارتی در این نقطه قابل صرف نظر کردن است. در مراحل مطالعاتی برای طراحی اتصال مذکور مسائل ذیل به‌طور خاص مدنظر بوده است:

- کنترل تنشها در جوش نفوذی اتصال بال به ستون. این مسأله می‌تواند در محیط جوشکاری شده به‌علت مقیدشدگی جانبی، رفتاری ترد و شکننده را سبب شود.

- استفاده از بال متغیر بالا و پایین در اتصال مورد بحث می‌تواند در جهت کاستن از تنش جوش مؤثر باشد و از این طریق امکان تردشکنی را در محیطهای جوشکاری شده مقید کاهش دهد.

- انتقال مفصل پلاستیک به فاصله‌ای مشخص از اتصال جوش، می‌تواند راه‌حل اصلی در این ارتباط باشد. در این تحقیق در نظر است که از طریق استفاده از بال با

عرض متغیر و ایجاد شکستگی در جان تیر مسأله مورد بحث قرار گیرد تا با فناوری ساخت قطعات در داخل کشور هماهنگ باشد.

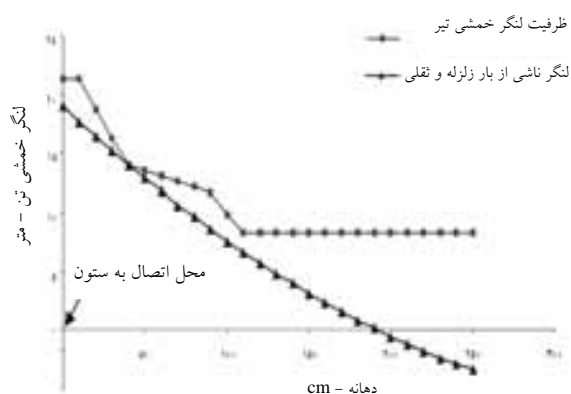
- عدم استفاده از جوشهای سربالا برای افزایش کیفیت جوشکاری در محیطهای اجرایی اسکلت فلزی.
- محدود نگاه داشتن وزن قطعه جهت حمل و نقل آسان آن و نصب آن در اسکلت فلزی.

۳-۱- هندسه قطعه اتصال

شکل عمومی این قطعه اتصال در شکل ۸ نشان داده شده است. حالت دوزنقه‌ای بالهای قطعه کناری همراه با تغییر ناگهانی در ارتفاع جان، امکان انتقال مفصل پلاستیک را از روی تکیه‌گاه و محل جوش به بخش مرکزی قطعه ممکن می‌سازد. به این ترتیب علاوه بر اینکه از رفتار ترد عضو در محل اتصال به ستون جلوگیری می‌شود، رفتار شکل‌پذیر در فاصله‌ای مناسب از محل اتصال تیر به ستون ایجاد می‌شود. همچنین نحوه اتصال قطعات طوری انتخاب شده که هیچ‌گونه جوش سربالایی در تمامی قطعات اتصال وجود نداشته باشد و تا حد امکان خطوط جوشکاری شده در معرض رفتار پلاستیک یا تحت اثر تنش بحرانی (در محدوده شکست ترد) قرار نگیرند. اتصال قطعه کناری به ستونها به صورت اتصال جوش در بال و اتصال پیچ و مهره در جان بوده و اتصال قطعه میانی به قطعه کناری به صورت جوش در بال و اتصال پیچی یا جوشی در جان طراحی شده است.

برای تعیین ابعاد اتصال، قاب ۵ طبقه تحت بارهای ثقلی و بارهای جانبی زلزله تحلیل شده و نیروها و لنگرهای حاصل در تحلیل و طراحی قطعات مورد استفاده قرار گرفته است. فلسفه روش طراحی اتصال (علاوه بر انتقال مفصل پلاستیک به مقطعی دورتر از محل اتصال به

است. نمونه‌ای از مدل ساخته شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مدل‌سازی در محدوده غیرخطی مصالح، به شکل رفتار تنش و کرنش دو خطی سخت‌شونده - و چند خطی سخت‌شونده در ۲۰ نمونه مدل‌سازی با استفاده از المان Shell 181 و Shell 43 با قابلیت رفتار غیرخطی هندسی در ابعاد واقعی انجام شده است. بارگذاری مدل به صورت ثقلی گسترده با اعمال لنگرهای دورانی در انتهای تیر به عنوان بارگذاری لرزه‌ای انجام شده است. در این حالت ابتدا نمونه تحت بارگذاری ثقلی تحلیل شده و پس از آن با ثابت نگاه داشتن بار ثقلی، بارگذاری لرزه‌ای اعمال شده است. پس از ساخت مدل اصلی در نرم‌افزار ANSYS رفتار $M-\theta$ آن تحت بارگذاری لرزه و بار ثقلی مطالعه شد. نمودار این رفتار در شکل ۱۲ آورده شده است. پس از مدل‌سازی‌های اجزای محدود و اعمال بارگذاری لرزه، نوعی از کماتش موضعی در بال تحتانی قطعه اتصال مشاهده شد که برای مهار آن از سخت‌کننده‌های مثلثی شکل در محل تغییر ارتفاع جان استفاده شده است. به‌کارگیری این سخت‌کننده‌ها به‌طور مؤثری مانع از بروز این نوع کماتش موضعی در محل موردنظر شد.



شکل ۹ نمودار ممانهای ظرفیت مقطع و بارهای ثقلی + زلزله

ستون)، وجود پیوستگی ورقهای بال و جان در محل مفصل پلاستیک بوده است. ابعاد مدل با ترسیم نمودارهای ظرفیت پلاستیک تیر با در نظر گرفتن اثر نیروهای زلزله و ثقلی به دست آمده است. در این روش با اعمال تغییراتی در مشخصه‌های طراحی و ابعاد قطعه اتصال و با استفاده از روش سعی و خطا، اندازه‌های بهینه به دست آمده است. طراحی‌ها و کنترل‌های ضخامت و ظرفیت تیر براساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان انجام شده است.

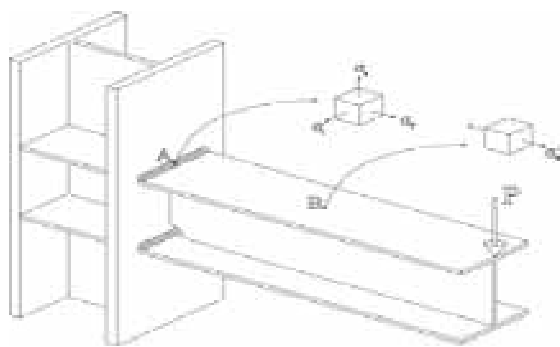
شکل ۹ نمودار ظرفیت پلاستیک مقطع (M_p) همراه با لنگر بارهای وارده (بار ثقلی و بار زلزله، M_L) است. در این شکل دیده می‌شود که با ازدیاد لنگر زلزله، لنگر کل از میزان حد الاستیک فراتر رفته و با منحنی ظرفیت پلاستیک تقاطع کرده است. محل تقاطع دو منحنی در محل تغییر ارتفاع جان قرار داشته و به این ترتیب رفتار پلاستیک اتصال در همین نقطه آغاز می‌شود و در نهایت به ایجاد مفصل پلاستیک در مقطع منجر می‌شود. در محاسبه لنگر پلاستیک مقطع میزان مشارکت جان تیر در لنگر مقاوم پلاستیک مقطع فقط ۵۰٪ از ظرفیت آن در نظر گرفته شده است. این ظرفیت شامل بخشهای بالایی و پایینی جان در مجاورت بال تیر است.

شکل ۱۰ الگوی تشکیل مفصل پلاستیک و گسترش منطقه پلاستیک را در طول اتصال بر مبنای مقایسه ظرفیت با لنگر استاتیکی (با توجه به فرض مشارکت جان در محاسبه لنگر مقاوم) نشان می‌دهد. هم‌چنان‌که دیده می‌شود تنش‌های پلاستیک، محدود به منطقه میانی اتصال بوده و در دو انتهای آن (اتصال به ستون و اتصال به عضو میانی) اثری از تنش پلاستیک دیده نمی‌شود.

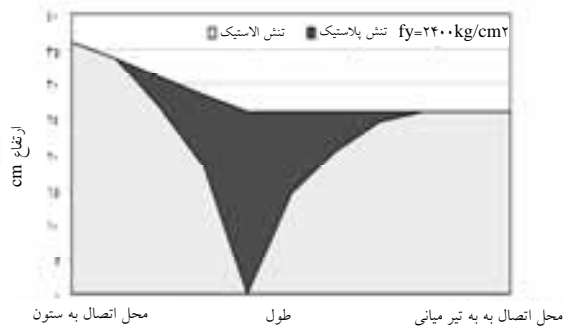
پس از اینکه به کمک تحلیل‌های استاتیکی، هندسه اولیه اتصال تعیین شد، بررسی عملکرد دقیق‌تر قطعه با استفاده از مدل اجزای محدود اتصال مزبور مدنظر قرار گرفت. در این بخش از مطالعات، از نرم‌افزار ANSYS استفاده شده

۳-۲- پایش تنشها

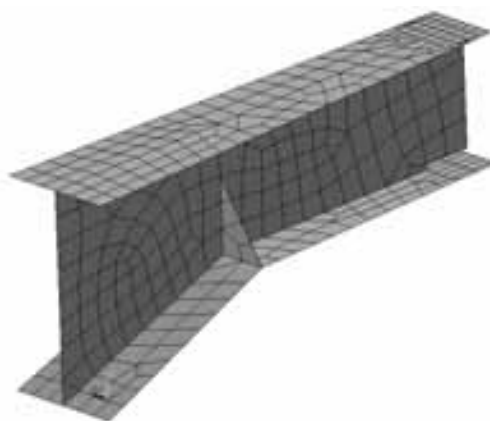
رفتار جوش در شرایط مقید شده و اثر آن بر رفتار اتصال با کاهش شکل پذیری و افزایش تردشکنی توسط محققان به اثبات رسیده است [۵، ۶]. در شکل ۱۳، یک نوع اتصال تیر به ستون با جوش نفوذی بال نشان داده شده است. دو نقطه A و B که در وسط بال فوقانی تیر قرار دارند در دو موقعیت جداگانه، اولی روی جوش و دومی به فاصله‌ای از اتصال جوش فرض شده‌اند. نتایج کار بلاجت [۶] و میلر [۵] نشان می‌دهد که رفتار پلاستیک این دو نقطه - حتی با فرض مشخصات مصالح یکسان - به علت شرایط متفاوت مقیدشدگی سه بُعدی کاملاً متفاوت است. مقید شدن جوش در نقطه A و در امتداد طول آن باعث می‌شود که قبل از رسیدن تنشهای برشی به حد تنش برشی بحرانی جاری شدن، تنشهای اصلی از حد مقاومت فولاد فراتر رفته و رفتار ترد و شکننده مصالح بروز کند. از طرف دیگر به علت عدم تقید فولاد در نقطه B قبل از اینکه تنشهای اصلی از حد مقاومت فولاد تجاوز کنند، تنشهای برشی به تنش برشی بحرانی جاری شدن رسیده و امکان وقوع کرنشهای پلاستیک و رفتار شکل پذیر در این نقطه وجود دارد.



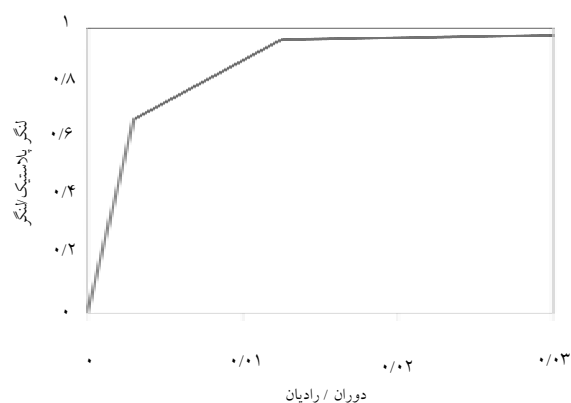
شکل ۱۳ چگونگی ایجاد تنشهای سه بُعدی در اتصال تیر به ستون با جوش نفوذی بال [۶]



شکل ۱۰ الگوی تشکیل مفصل پلاستیک با فرض رفتار الاستوپلاستیک کامل



شکل ۱۱ نمای سه بُعدی از مدل اجزای محدود



شکل ۱۲ نمودار M-θ اتصال

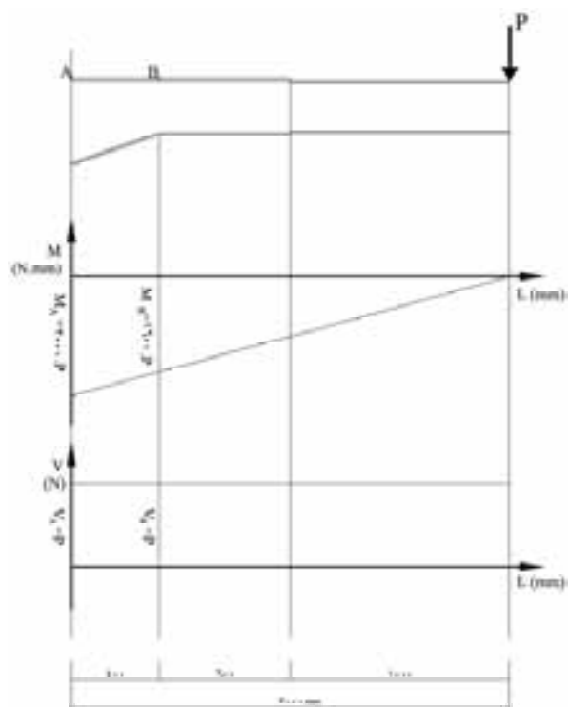
1. Control
2. Blodgett
3. Miller

در جدول ۱ مشخصات مقطع طرح نهایی در دو مقطع گذرنده از نقاط A و B برای هر دو حالت محدوده الاستیک خطی مصالح و محدوده غیرالاستیک و غیرخطی مصالح ارائه شده است.

با بارگذاری مفروض، لنگر خمشی در دو مقطع گذرنده از A و B (که با A و B نشان داده می‌شوند) عبارتند از:

$$M_A = 2000P \quad \text{N.mm}$$

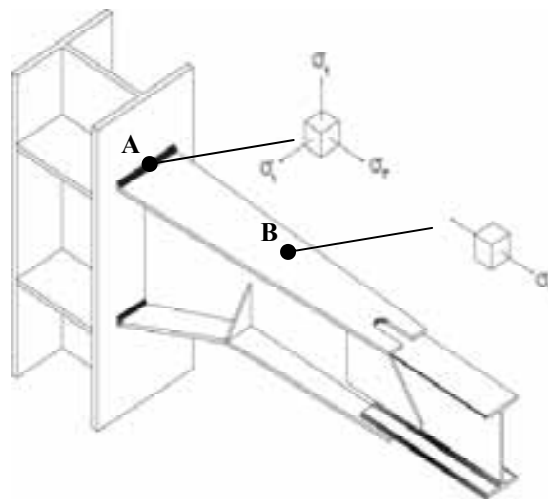
$$M_B = 1800P \quad \text{N.mm}$$



شکل ۱۵ مقاطع A-A و B-B و نمودارهای لنگر خمشی و برشی در تیر مورد بررسی

همچنان‌که ملاحظه می‌شود، همواره تنش با افزایش P در نقطه B بیشتر از نقطه A است. به این ترتیب نقطه B سریعتر از نقطه A به حد جاری شدن نزدیک می‌شود. برای بررسی تنشها در دو نقطه A و B مراحل زیر طی شده است.

به این ترتیب در صورتی‌که بتوان با کنترل شرایط تنش در محل اتصال بال به ستون از رفتار ترد فلز جلوگیری کرد می‌توان انتظار داشت که اتصال در شرایطی مناسب به محدوده غیرخطی تشکیل مفصل پلاستیک وارد می‌شود. در این تحقیق تنش در جوش به کمک دو پارامتر عرض متغیر بال و ارتفاع اضافه شده جان در نقطه اتصال تیر به ستون کاهش داده شده است. برای کنترل طراحی انجام شده توزیع تنشها همراه با اثر مقید شدگی در نمونه پیشنهادی مطالعه شده است. در شکل ۱۴ نقاط A و B بر روی نمونه پیشنهادی مشخص شده است.



شکل ۱۴ چگونگی ایجاد تنشهای سه‌بُعدی در اتصال تیر به ستون پیشنهادی با جوش نفوذی

۳-۲-۱- کنترل مقایسه‌ای تنشها

برای مقایسه دو نقطه فوق در قطعه اتصال موردنظر، دیاگرام لنگر ناشی از بار متمرکز P در فاصله ۲ متری (با فرض طول دهانه ۵ متر) از اتصال تیر به ستون فرض می‌شود که در شکل ۱۵ نشان داده شده است. فرض فوق مشابه شرایطی است که برای آزمایش منظور شده است.

۳-۲-۲- کنترل تنشها با در نظر گرفتن آثار مقیدشدگی

بر طبق روش بلاجت [۶] و میلر [۵] محاسبه تنشهای اصلی برحسب f_y در نقاط A و B انجام شده است. همانطور که در جدول ۱ ملاحظه می شود، نسبت لنگرهای وارد شده به لنگر پلاستیک در مقطع B-B بیشتر از نسبت متناظر در مقطع A-A در محل اتصال است.

به این ترتیب مفصل پلاستیک قبل از نقطه A در نقطه B رخ خواهد داد. با فرض اینکه لنگر ایجاد شده منجر به جاری شدن تارهای فوقانی مقطع B-B می شود، توزیع تنشهای سه بُعدی در دو نقطه A و B با یکدیگر مقایسه شده و آثار مقیدشدگی جانبی در نقطه A کنترل شده است. با پی گیری روش محاسباتی ارائه شده در [۶، ۵] در نقطه A داریم:

جدول ۱ مشخصات مقطع طراحی نهایی اتصال تیر به ستون پیشنهادی

مشخصات مقاطع در محدوده خطی	
$I_A = 18592 \times 10^4 \text{ mm}^4$ (با ملحوظ کردن اثر پیچها*) و بدون اثر جان	ممان اینرسی مقطع A-A
$I_B = 7739 \times 10^4 \text{ mm}^4$	ممان اینرسی مقطع B-B
$S_A = 885/3 \times 10^3 \text{ mm}^3$	اساس مقطع A-A
$S_B = 518 \times 10^3 \text{ mm}^3$	اساس مقطع B-B
$\sigma_{\dots} = \frac{\dots}{\dots} = 2/26 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$	تنش حداکثر در مقطع A-A
$\sigma_{\dots} = \frac{\dots}{\dots} = 3/9 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$	تنش حداکثر در مقطع B-B
مشخصات مقاطع در محدوده غیر خطی	
$M_{yA} = f_y S_A = 885/3 \times 10^3 f_y \text{ N.mm}$	لنگر متناظر با جاری شدن اولین تار در مقطع A-A
$M_{yB} = f_y S_B = 518 \times 10^3 f_y \text{ N.mm}$	لنگر متناظر با جاری شدن اولین تار در مقطع B-B
$M_{PA} = 922 \times 10^3 f_y \text{ N.mm}$ (اثر بالها + اثر پیچها)	لنگر پلاستیک مقطع A-A
$M_{PB} = 580/2 \times 10^3 f_y \text{ N.mm}$	لنگر پلاستیک مقطع B-B
$\frac{\dots}{\dots} = 0/217 \frac{\dots}{\dots}$	نسبت لنگر مقطع در هر لحظه نسبت به لنگر پلاستیک در مقطع A-A
$\frac{\dots}{\dots} = 0/276 \frac{\dots}{\dots}$	نسبت لنگر مقطع در هر لحظه نسبت به لنگر پلاستیک در مقطع B-B

* محل قرارگیری پیچها در شکل ۲۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۶ نمای کلی نمونه قبل از آزمایش

شکل ۱۶ نمای کلی نمونه را قبل از آزمایش نشان می‌دهد. برای نمایش چگونگی کرنشهای بزرگ از دوغاب آهک برای سفید کردن نمونه استفاده شده است. چهار جابه‌جایی سنج برای اندازه‌گیری جابه‌جایی جانبی در نقاط مختلف ارتفاعی بر روی نمونه نصب شده است. علاوه بر این جابه‌جایی سنج و نیروسنج موجود در جک هیدرولیکی نیز امکان اندازه‌گیری تغییر مکان و نیروی وارد به انتهای تیر را فراهم ساخته است.

۴-۱- نتایج آزمایش

آزمایش در دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول با افزایش دامنه سیکل‌های بارگذاری و تکرار آن در دامنه‌های بالاتر بارگذاری تا ۱۳ سیکل ادامه داده شد. با وجود استفاده از پیچهای پرمقاومت برای اتصال نمونه به قاب عکس‌العمل آزمایش در پایان مرحله اول نمونه موردنظر

نقطه A بررسی می‌شود. به این ترتیب فرض می‌شود که تنش $\sigma_{r.o}$ برابر مقاومت فولاد است:

$$\sigma_{r.o} = 0.0 = 1.05 f_y$$

$$\sigma_{l.o} = \sigma_{r.o} = 0.0425 \quad \sigma_{3A} = 0.0638 f_y$$

$$\tau = \frac{\sigma_{r.o} - \sigma_{l.o}}{2} = 0.0431 f_y < 0.5 f_y$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود علی‌رغم رسیدن $\sigma_{r.o}$ به مقاومت نهایی فولاد، تنش برشی نقطه A هنوز از تنش بحرانی جاری شدن کمتر بوده و امکان آنکه فولاد اجازه جاری شدن بیابد وجود نخواهد داشت. این مسأله سبب می‌شود که در عمل احتمال وقوع گسیختگی ترد در نقطه A به وجود آید.

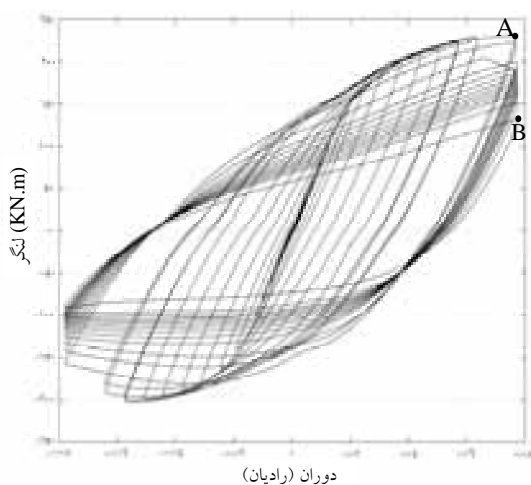
به‌عنوان جمع‌بندی نتایج می‌توان گفت که اتصال نمونه به‌نحوی عمل می‌کند که حتی با رسیدن لنگر خمشی به لنگر پلاستیک در مقطع گذرنده از نقطه B، تنشها در نقطه A با اعمال شرایط مقیدشدگی در جوش در محدوده الاستیک خطی و به دور از هر گونه احتمال رفتار ترد قرار می‌گیرند.

۴- مطالعات تجربی

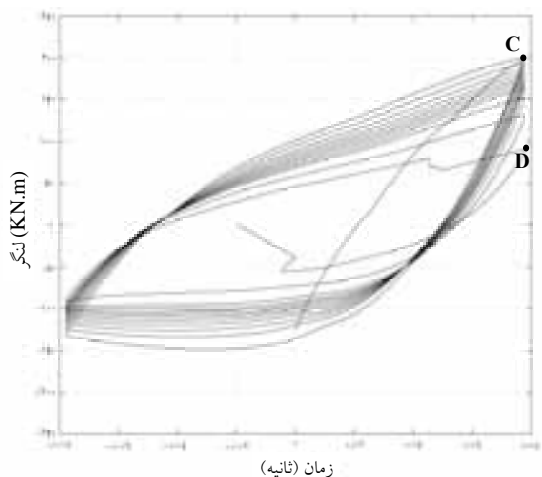
پس از طی مراحل مطالعاتی اولیه و طراحی اتصال پیشنهادی، چندین نمونه مطابق جزئیات اجرایی ارائه شده در شکل ۸ ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفت. در مقاله حاضر برای رعایت اختصار، نتایج فقط برای یک نمونه از آزمایشها ارائه شده است. خواننده می‌تواند برای مطالعه جزئیات به [۹] مراجعه نماید. آزمایشها در آزمایشگاه سازه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله با استفاده از جک هیدرولیکی با ظرفیت بارگذاری ۳۰ تن با قابلیت جابه‌جایی ± 15 سانتی‌متر به‌صورت سیکل‌های رفت و برگشتی انجام شده است.

به ترتیب نقاط حداقل مقاومت در مرحله‌های اول و دوم است. اثر شل‌شدگی مهره‌ها با کاهش مقاومت در مرحله اول به روشنی دیده می‌شود. با وجود این با محکم کردن مهره‌ها، آزمایش تا گسیختگی کامل نمونه ادامه یافته و بالاخره نمونه در نقطه D شروع به گسیختگی کرد. منحنی لنگر - دوران اتصال برای مرحله‌های اول و دوم به ترتیب در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است.

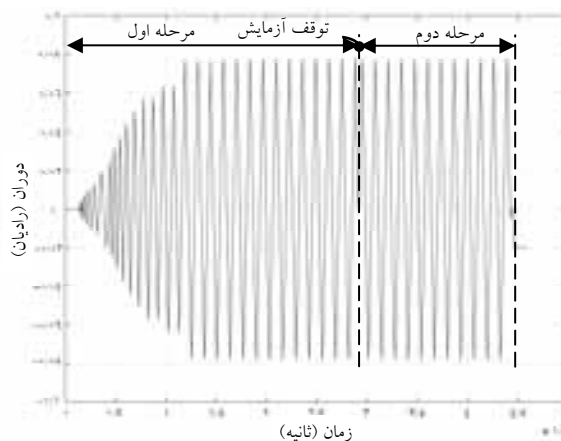
با شل‌شدگی مهره‌ها مواجه شد که با توقف آزمایش و محکم کردن مهره‌ها، بارگذاری تناوبی مجدداً در بالاترین دامنه (۱۲ سانتی‌متر) ادامه یافت. هدف از مرحله دوم، مشاهده رفتار نهایی و گسیخته شده نمونه در بارگذاری تناوبی در دامنه حداکثر بوده است. در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ به ترتیب نمودار دوران و لنگر خمشی تیر حول مفصل پلاستیک ترسیم شده است.



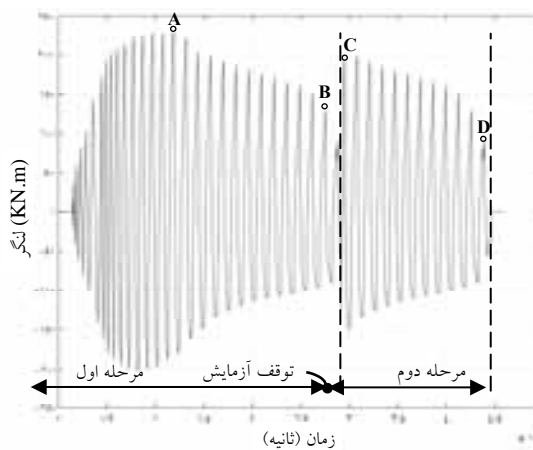
شکل ۱۹ نمودار لنگر - دوران اتصال پیشنهادی در مرحله اول آزمایش



شکل ۲۰ نمودار لنگر - دوران اتصال پیشنهادی در مرحله دوم آزمایش



شکل ۱۷ نمودار دوران نسبت به زمان



شکل ۱۸ نمودار لنگر خمشی نسبت به زمان

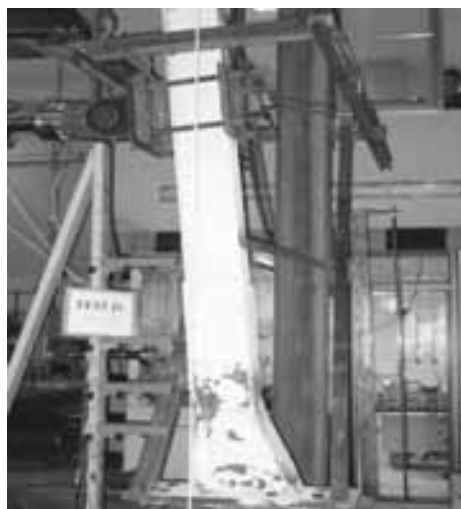
محدوده زمانی مرحله اول و دوم آزمایش در نمودارها مشخص شده است. نقاط A و C در شکل ۱۸ به ترتیب نقاط حداکثر مقاومت در مرحله‌های اول و دوم و نقاط B و D

از آنجاکه تعداد تناوبهای انتخابی در تنظیم آزمایش به منظور رسیدن به دوران $0/05$ رادیان بوده است، تا این حد از دوران هیچگونه اثری از نفوذ محدوده پلاستیک به محل اتصال تیر و ستون مشاهده نشد. با ادامه آزمایش تا دوران $0/08$ رادیان (نقطه A در شکل ۱۸) اولین اثر نفوذ محدوده پلاستیک در محل اتصال - که به سهولت قابل مشاهده نبود - به وقوع پیوست. این گسترش رفتار پلاستیک - که در بارگذاری فراتر از انتظار طراحی رخ داده - بر اثر سخت‌شدگی مجدد مصالح^۱ که مسأله‌ای طبیعی در فولاد است ایجاد شده. با ادامه آزمایش و اجرای تناوبهای بیشتر بارگذاری با دوران $0/08$ رادیان، محدوده مفصل پلاستیک توسعه یافته و پدیده خستگی پلاستیک^۲ مشاهده شد. این بارگذاری تا مرحله شکست اتصال ادامه یافته است. تکرار تناوبهای بارگذاری با دامنه زیاد، منجر به افزایش تجمعی کرنشهای پلاستیک و گسترش محدوده پلاستیک در منطقه اتصال تیر به ستون شد که به تدریج به ایجاد کمناش موضعی بال پس از عبور از نقطه A (در تصویر ۱۸) منجر شده و با هر تکرار بارگذاری مقدار آن افزایش یافته و نهایتاً باعث گسیختگی اتصال شد.

شکل ۲۳ توزیع کرنشها را در بالهای نمونه با توجه به الگوی روکش آهکی نشان می‌دهد. توزیع کرنشهای بزرگ در بخش میانی ارتفاع بال متمرکز شده است. در نزدیکی محل اتصال بال به ستون نیز ریزش روکش آهکی قابل تشخیص است که نشان‌دهنده وقوع کرنشهای بزرگی در این ناحیه در پایان آزمایش است. با وجود این تشکیل مفصل پلاستیک در بخش میانی قطعه از تمرکز تنش‌ها در

با وجود بارگذاری نمونه با سیکل‌های زیاد، زوال مقاومت و پایایی شکل‌پذیری نمونه قابل توجه است. نقاط A تا D نشان داده شده در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ متناظر با نقاط نامگذاری شده در شکل ۱۸ است.

در شکل ۲۱ نمای تغییرشکل یافته نمونه پس از پایان مرحله اول آزمایش نشان داده شده است. تغییرشکل‌های بزرگ در بخش تغییر ارتفاع جان قطعه اتصال به خوبی ملاحظه می‌شود. برای درک بهتر تغییرشکل‌ها از خط تراز با رنگ روشن کمک گرفته شده است. محل تلاقی خط تراز و امتداد بال قطعه اتصال مکانی است که مفصل پلاستیک در نمونه ایجاد شده؛ جایی که مطابق مطالعات تحلیلی انتظار داشتیم این مفصل تشکیل شود. در شکل ۲۲ تغییرشکل نمونه پس از پایان آزمایش نشان داده شده است. ریختگی روکش آهکی، توزیع کرنشهای بزرگ را در جان تیر نشان می‌دهد. توزیع کرنشهای بزرگ و پلاستیک در محدوده مفصل پلاستیک به فاصله کمی از محل تغییر ارتفاع جان مشهود است.



شکل ۲۱ الگوی تغییر شکل پس از مرحله اول آزمایش - نقطه تلاقی خط تراز با لبه بال قطعه اتصال محل تشکیل مفصل پلاستیک است. توزیع کرنشهای بزرگ در این ناحیه نیز گویای این موضوع است.

1. Hardening
2. Low Cycle Fatigue

سختی نمونه یا شیب اولیه منحنی کاسته شده است. نتیجه مشابهی برای مقاومت خمشی نمونه به دست آمده که عبارت است از:

$$(4) \quad (KN.m) \quad 250 - 4/5n = \text{مقاومت خمشی}$$

که به بیان دیگر، به ازای هر پنج تناوب، به طور تقریبی ۲۵ کیلونیوتن متر از مقاومت نمونه کاسته شده است.

نتایج مشابهی برای تعیین کاهش جذب انرژی در تناوبهای متوالی بارگذاری استخراج شده که در شکل ۲۷ نشان داده شده است. منحنی خطی برازش شده بر نتایج حاصل از این پارامتر عبارت است از:

$$(5) \quad (KJ) \quad 56 - n = \text{میزان جذب انرژی}$$

با نگاهی کلی به نتایج به دست آمده می توان دید که برای محدوده حداکثر چرخش ۰/۰۸ رادیان و تعداد سیکل‌های بارگذاری برابر ۸ (که در مطالعات گذشته معمولاً به عنوان معیار مناسبی برای بررسی اثر خستگی پلاستیک^۱ شناخته شده) کاهش مقاومت خمشی برای این معیار برابر است با:

$$214 = 250 - 4/5 \times 8 = 250 - 4/5n = \text{مقاومت خمشی}$$

$$14/4\% = \text{کاهش مقاومت خمشی}$$

و میزان کاهش سختی خمشی به روش مشابه برابر است با:

این ناحیه جلوگیری کرده و در مجموع رفتاری امن را برای اتصال بال به ستون موجب شده است. نکته مورد توجه دیگر، رفتار اتصال قطعه نمونه به تیر میانی است. در شکل ۲۴ ناحیه اتصال میانی بعد از آزمایش نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود هیچ گونه کرنش بزرگ یا گسیختگی در این ناحیه رخ نداده و وضعیت آن مناسب است.

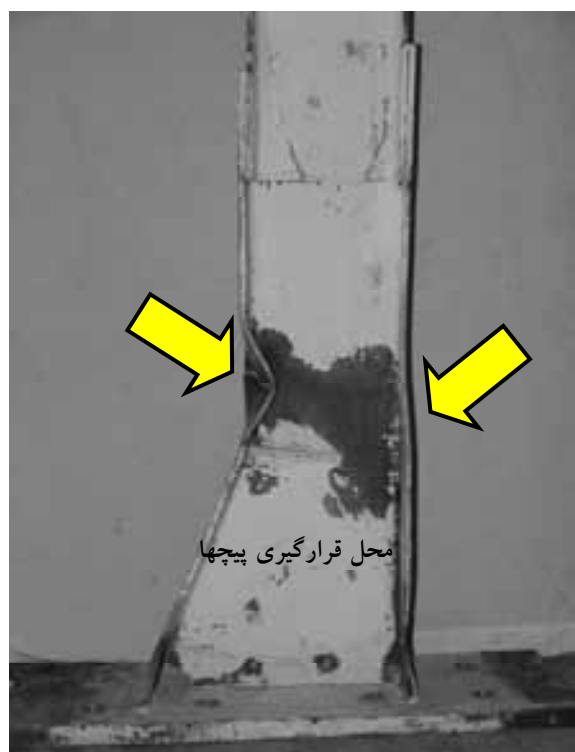
برای بررسی بیشتر نتایج آزمایش، میزان کاهش مقاومت و سختی نمونه در تناوبهای بارگذاری استخراج شده و نتایج آن به ترتیب در شکل های ۲۵ و ۲۶ آورده شده است. در شکل ۲۵ نتایج برای هر دو حالت پوش مثبت و منفی تناوبهای بارگذاری نشان داده شده است.

برای جلوگیری از تداخل نتایج مرحله اول - که بر اثر شل شدن مهره ها دچار زوال مقاومت شده - منحنی خطی برازش شده نتایج فقط برای مرحله دوم ترسیم شده است. این منحنی با میانگین گیری از دو منحنی خطی برازش شده به مقادیر مثبت و منفی مقاومت و سختی به دست آمده است. نتیجه حاصل برای مقادیر سختی خمشی در تناوبهای متوالی عبارت است از:

$$(3) \quad (KN.m/Rad) \quad 7300 - 125n = \text{سختی خمشی}$$

که n تعداد تناوبهای بارگذاری در حداکثر دامنه حرکتی جک (۱۲cm) است.

به بیان ساده تر برای هر چهار تناوب بارگذاری تناوبی در حداکثر دامنه (۱۲cm) ۵۰۰ کیلونیوتن متر بر رادیان از



شکل ۲۲ تغییر شکل بخش جانبی نمونه پس از انجام آزمایش

$$= 7300 - 125n = 7300 - 125 \times 8 = 6300$$

$$\text{کاهش سختی خمشی} = 13.7\%$$

همچنین میزان کاهش جذب انرژی در تناوب هشتم در قطعه اتصال برابر است با:

$$= 56 - n = 48$$

$$\text{میزان کاهش جذب انرژی} = 14.3\%$$

نتایج فوق با توجه به محدودیت جابه‌جایی جک به دست آمده و در صورتی که امکانات آزمایشگاهی قابلیت اعمال بارگذاری با دامنه‌های بالاتر را ممکن می‌ساخت، ظرفیتهای بیشتری از نمونه قابل دستیابی بود.

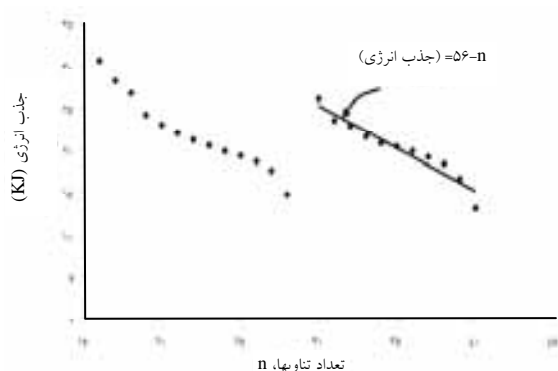


(ب) بال پایینی



(الف) بال بالایی

شکل ۲۳ توزیع کرنشها در بالهای قطعه اتصال با توجه به الگوی روکش آهکی دیده می‌شود



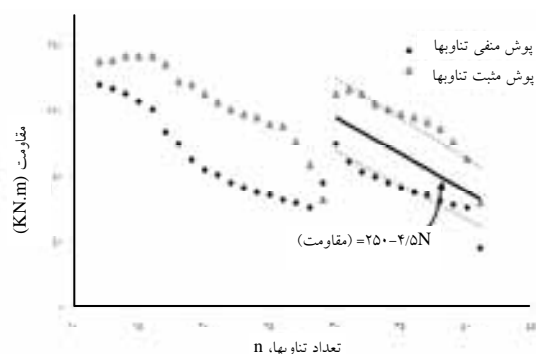
شکل ۲۷ نمودار میزان جذب انرژی اتصال در تناوبهای متوالی حاصل از آزمایش

۵- نتیجه گیری

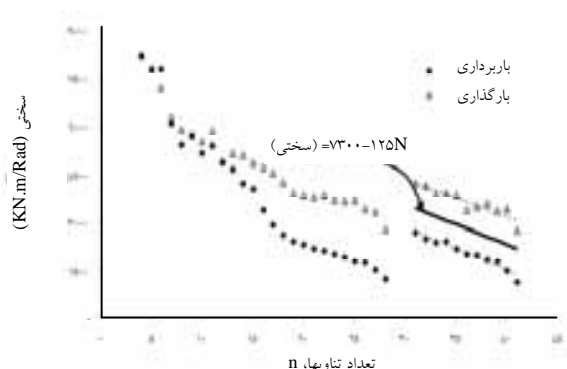
با مشاهده مشکلاتی که در عملکرد اتصالات خمشی در زلزله‌های گذشته رخ داده، نوعی از خرابی که ناشی از شکست ترد در محل جوش بال تیر به وجود می‌آید، مورد توجه محققان قرار گرفت. مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی متعددی برای شناسایی مشکل از سوی محققان مختلف انجام شده که بیشتر تحقیقات به سمت شرایط مقیدشدگی جوش سوق یافته است. راه‌حلهای مختلفی مانند استفاده از دستک‌های فلزی، ورقهای تقویتی و غیره در این زمینه پیشنهاد شده که از میان آنها کاستن از عرض بال تیر به‌عنوان راه‌حلی مؤثر برای دور کردن محل تشکیل مفصل پلاستیک از اتصال جوش، مؤثرتر از سایر روشها شناخته شده است. اما از آنجاکه در این روش به فناوری خاصی برای ساخت نمونه‌های کارگاهی نیاز است، در این مقاله راهکاری جدید ارائه شده که با فناوری ساده در ساخت قطعات می‌توان به مشخصه‌های موردنظر اتصالات فولادی شکل‌پذیر دست یافت. در این طرح با تغییر عرض بالها به‌طور خطی و ایجاد شکستگی در جان تیر نمونه‌ای از قطعه اتصال تیر به ستون به‌دست آمده که نتایج تحلیلی، گویای اثر مثبت طرح موردنظر در کاهش تنشها در جوش، ممانعت از رفتار ترد اتصال و بالاخره امکان ایجاد



شکل ۲۴ اتصال قطعه نمونه به تیر میانی پس از آزمایش



شکل ۲۵ نمودارهای مقاومت خمشی اتصال حاصل از آزمایش



شکل ۲۶ نمودارهای سختی اتصال حاصل از آزمایش

$$\varepsilon_{r0} = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \sigma_{r0} = 1.078 \times 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$

$$\sigma_{10} = \sigma_{r0} = \frac{\nu \varepsilon_{r0}}{(1+\nu)(1-2\nu)} = 0.096 \times 10^{-3} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau = \frac{\sigma_{r0} - \sigma_{10}}{2} = 0.065 \times 10^{-3} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{10} = \sigma_{r0} = 0.0475 \sigma_{rA}$$

لنگری که باعث جاری شدن تار اولیه در نقطه B می شود عبارت است از:

$$M_B = 1600P \quad \text{N.mm}$$

$$M_{yB} = 518 \times 10^3 f_y \quad \text{N.mm}$$

و نیروی متناظر با آن برابر است با:

$$F_{yB} = \frac{518 \times 10^3 \cdot 0}{1600} = 323750 \text{ N}$$

برای لنگر متناظر با جاری شدن تار بالایی مقطع B-B در مقطع A-A داریم:

$$M_A = 2000P$$

$$= 2000 \times 323750 f_y = 647500 f_y \quad \text{N.mm}$$

در نتیجه موقعیت تنشها در نقطه A برابر است با:

$$\sigma_{30} = \frac{M_A}{I} = 0.073 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{10} = \sigma_{r0} = 0.0475 \sigma_{3A} = 0.31 f_y \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau = \frac{\sigma_{r0} - \sigma_{10}}{2} = \frac{0.073 \cdot 0 - 0.31 \cdot 0}{2} = 0.21 f_y$$

پیوست ۲

با استفاده از تعادل نیروها، رابطه بین لنگر خمشی در نقطه A بر حسب لنگر خمشی پلاستیک در نقطه B و بار P تعیین می شود:

مفصل پلاستیک در محلی با پیوستگی ورقهای فولادی است. آزمایشهایی بر روی نمونه های ساخته شده اولیه انجام شد که نتایج برای نمونه آخر در این مقاله ارائه شده است. مطابقت رفتاری نتایج آزمایشگاهی و تئوری، نشان از دستیابی به اهداف طرح است. تشکیل مفصل در محلی بدون اتصال جوش و پایایی رفتار غیرالاستیک نمونه به صورتی که در چرخش ۰/۰۸ رادیان تحمل بیش از ۲۰ تناوب بارگذاری را داشته باشد از ویژگی مهم این اتصال است. جالب توجه آن است که اتصال مذکور در این حالت فقط ۱۵٪ زوال مقاومت و سختی را در ۸ تناوب اول نشان داده است.

۶- تشکر و قدردانی

این تحقیق با استفاده از کمکهای مالی کمیته فرعی - تخصصی مقابله با خطرهای ناشی از زلزله و لغزش لایه های زمین تحت قرارداد شماره ۲۶۶۲/۰۲/۲۷۰ ک به تاریخ ۷۹/۱۱/۳۰ در پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله انجام شده است.

انجام این تحقیق میسر نمی گردید مگر با کمک و همکاری آقایان مهندس محمدجواد صارم، مهندس فرامرز عالمی، مهندس مسعود میرابوطالبی، مهندس مجید جبارزاده، همکاران آزمایشگاه سازه، همکاران پژوهشکده مهندسی سازه به ویژه آقای حمید دوستی و سرکار خانم قیدی. بدین وسیله از زحمات این دوستان و همکاران صمیمانه تشکر و قدردانی می شود.

پیوست ۱

تنش در نقطه A تحت اثر بار P برابر است با:

$$\sigma_{r0} = \frac{M_A}{I} = \frac{2000P}{880/3 \times 10^3} = 203 \times 10^3 P \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

به علت مقیدشدگی جوش در نقطه A نتیجه می شود:

$$\varepsilon_{1A} = \varepsilon_{rA} = 0$$

- Japan”, Engineering structures, Vol. 20, Issues 4-6, 1998, pp. 310-322.
- [3] E. P. Popov, T. A. Balan and T. S. Yang, “Post Northridge Earthquake Seismic Steel Moment Connections”, Earthquake Spectra, Vol. 14, No. 4, November 1995.
- [4] R. H. R. Tide, “Stability of weld metal subjected to cyclic static and seismic loading”, Engineering Structures, Vol. 20, 1998, pp. 562-569.
- [5] D. K. Miller, “Lessons learned from the Northridge Earthquake”, Engineering Structures, Vol. 20, 1998, pp. 249-262.
- [6] O. W. Blodgett, “The Effect of Constraint on Ductility in welded Beam-to-column connection”, National Steel Construction Conference, 1998.
- [7] Youssef, N. F. G., D. Bonowitz, and J. L. Gross, “A Survey of Steel Moment – Resisting Frame Building Affected by 1994 Northridge Earthquake”, NISTIR 5625, 1995.
- [8] “Northridge Earthquake Reconnaissance”, Earthquake Spectra, Supplement C to Volume 11, Report. Vol. 2, January 1996.

[۹] گزارش «طراحی یک اتصال تیر و ستون با قابلیت ساخت نیمه صنعتی برای ساختمانهای فلزی متداول در ایران»، کمیته فرعی – تخصصی مقابله با خطرات ناشی از زلزله و لغزش لایه های زمین.

$$M_A = M_B + \epsilon \cdot V_B$$

$$M_B = M_{PB} = 160 \cdot P \Rightarrow P = \frac{M_{PB}}{160}$$

$$V_B = P$$

$$M_A = M_{PB} + \epsilon \cdot P$$

$$\dots + \frac{\epsilon \cdot P}{160} = 1025 M_{PB} < 1/589 = \frac{M_{PA}}{M_{PB}}$$

بنابراین همچنان از تشکیل مفصل پلاستیک در مقطع A-A فاصله وجود دارد. در این وضعیت تنشها در نقطه A برابر است با:

$$M_{yA} = 885/3 \times 10^3 f_y \quad \text{N.mm}$$

$$M_A = 1/25 M_{PB} = 725/3 \times 10^3 f_y \quad \text{N.mm}$$

$$\Rightarrow M_A < M_{yA}$$

هنوز تار بالایی در مقطع A-A جاری نشده و رفتار خطی از خود نشان می دهد. به این ترتیب توزیع مجدد تنشها در نقطه A تعیین می شود.

$$\sigma_{r0} = 0.819 f_y$$

$$\sigma_{10} = \sigma_{r0} = 0.425 \sigma_{3A} = 0.348 f_y$$

$$\tau = \frac{\sigma_{r0} - \sigma_{10}}{2} = 0.24 \cdot \dots$$

۷- منابع

- [1] J. O. Malley, “SAC steel project: summary of phase one testing investigation results”, Engineering Structures, Vol. 20, 1998, pp. 300-309.
- [2] H. Kuwamura, “Fracture of steel during an Earthquake – state – of – the – art in