بررسی تجربی عملکرد لرزه‌ای چشمه اتصال ستون‌های با مقطع قوطی شکل ساخته شده با اتصال کنج جوشی

علی یگانه فر[۱]، بهنام مهرپرور[۲*]، فرزان حداد شرق[۳]، حمیدرضا غلامیان[٤]

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران

۲- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران

۳- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران

٤- کارشناس ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران

[*] تهران، صندوق پستی ۱٤٦٨٧٦٣٧٨٥، mehrparvar.b@wtiau.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۲۱)

چکیده

استفاده از مقاطع قوطی در قاب‌های خمشی فولادی، به لحاظ شکل هندسی و دارا بودن مقاومت خمشی مناسب در دوجهت و نیز تامین سطح مناسب برای اتصال تیر، بسیار متداول می‌باشد. با توجه به تولید محدود مقاطع قوطی نورد شده در ایران، عموما از مقاطع جعبه‌ای ساخته شده با اتصال چهار ورق فولادی به یکدیگر با استفاده از جوش استفاده می‌شود. مطابق الزامات طرح لرزه‌ای، در ستون‌های قوطی شکل ساخته شده از ورق در محدوده اطراف محل اتصال تیر به ستون، جوشکاری جان به بال‌های مقطع باید با نفوذ کامل انجام شود. با توجه به دشواری‌ها و هزینه بالای انجام جوشکاری شیاری و نگرانی از عدم دستیابی به نفوذ کامل در این نوع جوش در مقاطع جعبه‌ای و نیز روش ساخت متداول این نوع مقاطع در ایران با استفاده از جوش گوشه در اتصال کنج بیرونی ورق‌ها، در پژوهش حاضر به مطالعه آزمایشگاهی عملکرد لرزه‌ای اتصال خمشی تیر I شکل به ستون‌های جعبه‌ای شکل ساخته شده با اتصال کنج جوشی پرداخته شده است. بدین منظور ۲ نمونه آزمایشگاهی معرف اتصال تیر به ستون قاب خمشی ویژه و ۲ نمونه آزمایشگاهی معرف قاب خمشی متوسط با ستون جعبه‌ای شکل ساخته شده با جوش گوشه و شیاری با نفوذ کامل طراحی و مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی لرزه‌ای نمونه‌ها با اعمال الگوی بار رفت و برگشتی مطابق آیین‌نامه AISC 341-16 انجام پذیرفته است. نتایج بررسی‌های صورت گرفته نشان داد هر ٤ نمونه ساخته شده قادر به گذراندن سیکل‌های بارگذاری تا حداکثر تغییرمکان نسبی مورد نیاز مطابق با الگوی آیین‌نامه می‌باشند.

واژگان کلیدی

چشمه اتصال، ستون‌های جعبه‌ای شکل ساخته شده، اتصال کنج جوشی، عملکرد لرزه‌ای

Experimental Assessment of Seismic Performance of Panel Zone in Built-Up Box Columns with Corner Welded Joints

A. Yeganehfar, B. Mehrparvar, F. Hadad Shargh, H.R. Gholamian

Abstract

Application of box columns in steel moment frames is very common due to its bidirectional flexural resistance and also its shape which provides suitable surfaces for connection of beams in both directions. In Iran, because of limited availability of rectangular HSS sections, typically built-up box columns are applied which are fabricated by welding four steel plates to each other. According to seismic provisions, within a zone adjacent to the connection point of beam to column, flange and web plates of built-up box columns shall be joined by CJP groove welds. Because of the cost and difficulty of groove welding and concerns about achieving full penetration of weld in box sections, besides the common practice for fabrication of box sections in Iran by means of fillet-welded corner-outside joints, in this research seismic performance of moment connections between I-Shaped beams and built-up box columns with corner welded joints was investigated experimentally. For this purpose, two specimens representative of special moment frames and two specimens representative of intermediate moment frames, all fabricated by built-up box columns using fillet welds or CJP groove welds, were designed and investigated. Investigation of the seismic performance of the specimens has been performed through applying the cyclic load pattern presented in AISC341-16 code. The results showed the capability of all 4 samples to satisfy the requirements for the required drift angle according to the specified load pattern.

Keywords

Panel zone, Built-up box columns, Corner welded joints, Seismic performance

۱- مقدمه

قاب‌های خمشی فولادی باید علاوه بر تأمین مقاومت در برابر بارهای ثقلی بتوانند شکل‌پذیری لازم را در برابر جابجایی‌های ناشی از زلزله از خود نشان دهند. یک مکانیسم متداول در این راستا، ایجاد مفصل‌های پلاستیک در دو انتهای تیرها بوده تا از تشکیل مفصل در ستون‌ها که عمدتاً منجر به بروز ناپایداری در سازه شده جلوگیری به عمل آید. این موضوع در ستون‌های قوطی که انتقال نیرو از تیر به ستون در یک مسیر خارج از صفحه رخ می‌دهد از اهمیت بالایی برخوردار است. انتظار مهم، از یک سیستم لرزه‌ای مطلوب، حفظ مقاومت و سختی اجزای آن در زلزله می‌باشد که تأمین این امر از طریق جزئیات مناسب اجزای خارج از مواضع شکل‌پذیر میسر می‌شود. در این میان اتصالات از نقش بسزایی در جهت تأمین پایداری و یکپارچگی کلی سازه و همچنین ایجاد شکل‌پذیری مناسب در سازه و جلوگیری از شکست‌های ترد برخوردارند [۱].

در ایران ستون‌های قوطی شکل در قاب‌های خمشی عمدتاً با استفاده از جوش ورق‌های فولادی به هم تولید می‌شود که با اتصال کنج جوشی صورت می‌پذیرد . بسیاری از ستون‌های قوطی شکل بدون ورق پیوستگی اجرا می‌شوند و یا اینکه ورق‌های پیوستگی آن‌ها با جوش گوشه به ستون متصل می‌شود. این در حالی است که بر اساس نکات موجود در مطالعات بعد از نورث ریج وجود ورق‌های پیوستگی با جوش نفوذی برای انتقال بارهای متمرکز بال تیر به ناحیه اتصال و چشمه اتصال مورد تأکید قرارگرفته است [۲].

بعد از گسیختگی تعداد زیادی از اتصالات صلب در زلزله نورث ریج ۱۹۹٤ آمریکا تحقیقات گسترده‌ای بر روی رفتار نامناسب اتصالات انجام گرفت و علت رفتار نامناسب و نحوه مقاوم‌سازی آن ارائه گردید. بر اساس این تحقیقات علت شکست در اتصالات جوشی عبارت‌اند از:

الف- عیب‌های به وجود آمده در جوش به علت عدم جوشکاری مناسب (نفوذ ناقص فلز جوش، وجود ترک در ریشه جوش)، ب- جزئیات نامناسب اتصالات (ایجاد تمرکز تنش در ریشه جوش)، ج- الکترود نامناسب (الکترود با چقرمگی کم)، د- وارد شدن انرژی لرزه‌ای بیش‌ازحد انتظار به سازه (زلزله‌های میدان نزدیک) [۳].

جوش شیاری[1] به جوشی گفته می‌شود که در شیار بین دو قطعه اجرا می‌گردد. انتخاب نوع جوش شیاری بستگی به عواملی چون دسترسی، هزینه‌های ساخت، نوع فرآیند جوشکاری، تطابق با طرح سازه و کنترل پیچیدگی دارد. معمولاً دسترسی به نفوذ کامل از یک طرف، فقط به قطعاتی باضخامت کمتر و مساوی ٦ میلی‌متر محدود می‌شود. به‌منظور جوشکاری قطعات ضخیم‌تر باید هندسه شیار به گونه‌ای باشد که علاوه بر دسترسی کافی جهت جوشکاری، سلامت و استحکام اتصال نیز تأمین گردد [٤]. به همین جهت اجرای جوش شیاری بانفوذ کامل به نحوه صحیح ازنظر اجرایی، دارای دشواری‌های خاص خود می‌باشد و در صورتی که امکان جایگزینی آن با جوش گوشه وجود داشته باشد باعث صرفه جویی قابل ملاحظه ای در هزینه و زمان ساخت خواهد گردید. مطابق الزامات طرح لرزه‌ای، در ستون‌های قوطی شکل ساخته شده از ورق در محدوده چشمه اتصال، جوشکاری جان به بال‌های مقطع باید با نفوذ کامل انجام شود.

به دلیل محدودیت دسترسی به مقاطع نورد شده بزرگ در ایران، استفاده از مقاطع ورقی و ترکیبی مانند مقـاطع جفت پروفیل و مقاطع قوطی شکل، رایج و معمول می باشد و این در حالی است که اسناد و مدارک مطمئنی بر روی عملکرد این نوع مقاطع و اتصالات وجود ندارد. در نتیجه بسیاری از محققین و مهندسین عمران کشور سعی بر تعمیم ضوابط طراحی مقاطع نورد شده بـرای مقـاطع ورقی و ترکیبی دارند [۵].

با توجه به عملکرد خوب مقطع جعبه‌ای به خاطر تقارن و نوع هندسه و استفاده متداول و مرسوم از این مقطع به عنوان ستون در قاب‌های خمشی و عدم ساخت آن به صورت مقطع گرم نورد شده در ابعاد مناسب جهت کاربرد در ساختمان‌های متعارف و بلند در کشورمان و در نتیجه ساخت این نوع مقاطع با استفاده از اتصال چهار ورق به یکدیگر با اتصال کنج جوش شده (عموماً جوش گوشه)، بررسی آزمایشگاهی عملکرد لرزه‌ای این نوع ستون‌ها خصوصاً در ناحیه چشمه اتصال ضروری می‌نماید، لذا در این پژوهش به مطالعه آزمایشگاهی اتصال خمشی تیر I شکل به ستون جعبه‌ای شکل ساخته‌شده با اتصال کنج جوشی پرداخته شده است.

۱-۲- مرور بر ادبیات فنی

Uang و همکارانش (۲۰۰۰)، در تحقیقی به تاثیر تاریخچه بارگذاری در عملکرد چرخه‌ای در اتصالات خمشی مقاطع کاهش یافته تیر پرداختند. چهار نمونه با ابعاد واقعی مورد آزمایش واقع شد که هیچ شکستی در جوش‌ها مشاهده نگردید و ظرفیت استهلاک انرژی در همه چهار نمونه تقریباً مشابه بود [٦].

Kim و همکارانش (۲۰۰۸) در تحقیقی با عنوان عملکرد لرزه‌ای جوش در اتصالات خمشی مقطع جعبه‌ای ساخته شده در سازه‌های قبل از زلزله نورث ریج، پاسخ لرزه‌ای اتصالات خمشی صلب مقطع W شکل و مقطع ستون جعبه‌ای شکل ساخته شده را با استفاده از نتایج تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند [۷].

Sazmand و همکارانش (۱۳۹۱)، در مقاله‌ای با نام مطالعه آزمایشگاهی و تحلیلی رفتار اتصالات در قاب‌های خمشی فولادی دارای ستون با مقطع جفت پروفیل، مشخصات رفتاری و اجزای این نوع اتصال و چشمه آن، با انجام آزمایش چرخه‌ای تمام مقیاس و مدل‌سازی عددی مورد مطالعه قراردادند. نتایج نشان داد رفتار این نوع اتصال عمدتاً متأثر از رفتار قطعه I شکل میانی متشکل از ورق پوشش ستون و ورق پیوستگی قائم می‌باشد که به دلیل تمرکز تنش‌های ایجادشده در جوش‌های نفوذی و گوشه اتصال، در صورت تقدم شکست در آن‌ها، مفاصل پلاستیک در تیر به نحو مطلوبی شکل نمی‌گیرد [۵].

Hashemi و همکارانش (۱۳۹۱)، تعدادی ستون با الگوهای مختلف جوشکاری شامل جوش شیاری و جوش گوشه با مقادیر همپوشانی و ساق جوش‌های متنوع، مدل‌سازی و رفتار غیرخطی آن‌ها را مورد بررسی قراردادند. طبق نتایج بدست آمده در این تحقیق جوش شیاری از لحاظ تامین ظرفیت و شکل پذیری ستون‌های جعبه‌ای بهترین عملکرد را داشته ولی بدلیل ملاحظات اجرایی و سهولت بیشتر، اجرای جوش گوشه در روند ساخت مقاطع فولادی جعبه‌ای پرکاربرد می‌باشد [۸].

Mirghaderi و همکارانش (۱۳۹۲)، در تحقیقی با عنوان بررسی حدی تقاضاهای موجود در چشمه اتصال تیر I شکل به ستون قوطی تحت خمش دو محوره، با بررسی حدی نیروهای ایجاد شده در این ناحیه ، تقاضاهای ورق‌ها را شناسایی کرده و بعد از مدل کردن آنها به صورت عددی، مقادیر تنش‌های بدست آمده برای این ورق‌ها را تحت خمش یک محوره و دو محوره با هم مقایسه کردند [۹].

Ahmadi و همکارانش (۲۰۱٤)، به بررسی سخت کننده‌های خارجی به عنوان جایگزینی برای ورق‌های پیوستگی در چشمه اتصال در ساختمان‌های فلزی با سیستم قاب خمشی و ستون‌های قوطی شکل پرداختند [۱۰].

Jahanbakhti و همکارانش (۲۰۱۷) در تحقیقی با نام مطالعه آزمایشگاهی بر روی قسمت پانل در اتصال صلب تیر به ستون جعبه‌ای، نتایج آزمایشگاهی سه مدل با اندازه و ابعاد واقعی از اتصال صلب تیر I شکل و ستون با مقطع قوطی را ارائه دادند. اساساً هدف این تحقیق حذف ورق‌های پیوستگی از اتصالات با کنترل ضخامت بال‌های ستون بوده و بر اساس نتایج به دست آمده، قسمت پانل، در همه نمونه‌ها الاستیک تعریف شد و مفاصل پلاستیک در تیر و نزدیک بال ستون تشکیل گردید [۱۱].

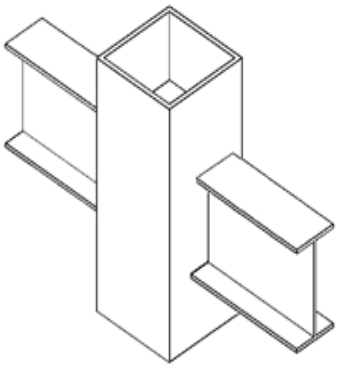
در تحقیق Urayer (۲۰۱۷)، با عنوان استفاده از جوش گوشه به جای جوش شیاری با نفوذ کامل در اتصال خمشی صلب بال تیر، یک مقایسه آزمایشگاهی بین دو نوع جوش مورد بررسی قرار گرفت. تعداد ۱۵ نمونه با استفاده از جوش لب به لب صفحات، اتصال سپری و اتصال روی هم ساخته شد. جوش‌های گوشه و شیاری نفوذی هر کدام به صورت مجزا برای این اتصالات استفاده شد. بعد از انجام آزمایش روی همه نمونه‌ها، نتایج نشان داد که به درستی جوش گوشه جایگزین مناسبی به جای جوش شیاری نفوذی در اتصال خمشی صلب بال می‌باشد [۱۲].

۲- روش تحقیق

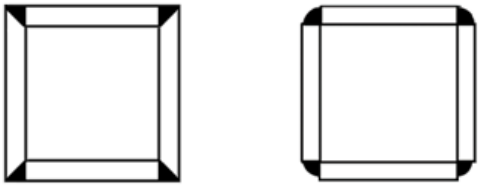
با توجه به نحوه تغییر شکل تیر و ستون در قاب‌های خمشی تحت اثر بار جانبی، نقاط عطف در وسط دهانه تیر وستون تشکیل می‌شوند، لذا برای آزمایش نصف طول تیر و دو برابر نصف ارتفاع ستون (یک ارتفاع کامل ستون) در نظر گرفته شد، کـه در آن انتهای تیر و انتهای ستون مفصل می‌باشد. باید اشاره داشت که مطابق مبحث دهم مقررات ملی ساختمان در ناحیه‌ای به فاصله ۳۰۰ میلی‌متر از بر ستون، جوشکاری مقاطع ساخته شده باید از نوع جوش شیاری با نفوذ کامل باشد و استفاده از جوش گوشه در این ناحیه مطابق آیین نامه قابل قبول نمی‌باشد، لذا به منظور بررسی موضوع، ٤ نمونه آزمایشگاهی ساخته شده (شکل (۱))، شامل ۲ نمونه شاهد (به منظور مقایسه با نمونه‌های مورد پژوهش) با مقطع ستون جعبه‌ای مورد تائید آیین‌نامه AISC 341 [۱۳] با جوش شیاری با نفوذ کامل[۲]، مطابق شکل (۲-ب)، که یک نمونه با تیر ضعیف و ستون قوی و یک نمونه با تیر قوی و ستون ضعیف طراحی و ۲ نمونه با مقطع ستون جعبه‌ای با جوش گوشه مطابق شکل (۲-الف) با تیر ضعیف و ستون قوی و همچنین با تیر قوی و ستون ضعیف ساخته شد. اتصال تیر به ستون با الهام گرفتن از اتصال از پیش تأیید شده مستقیم تقویت نشده‌ی جوشی[۳] انجام شده است.

۳- طراحی مقاطع

با استفاده از روابط طراحی قابهای خمشی مندرج در آیین‌نامه AISC 341 و مشخص شدن نیروهای وارده با تحلیل قاب،



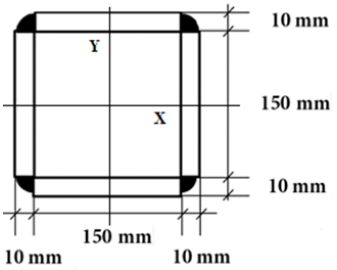
شکل ۱- نمونه آزمایشگاهی



الف) جوش گوشه ب) جوش شیاری با نفوذ کامل

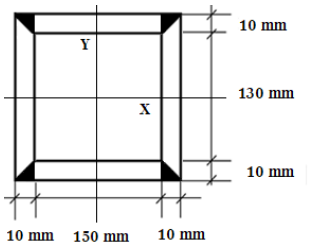
شکل ۲- مقطع جعبه‌ای ساخته‌شده از ورق با دو نوع جوش

مقاطع ستون و تیر ٤ قاب خمشی مورد آزمایش، طبق شکل (۲)، به شرح زیر طراحی و کنترل شد. مقاطع ستون در نظر گرفته شده برای نمونه‌ها در شکل (۳) و (٤) نمایش داده شده است:



$A = 60\ \text{cm}^2,\ Zy = 352.5\ \text{cm}^3$

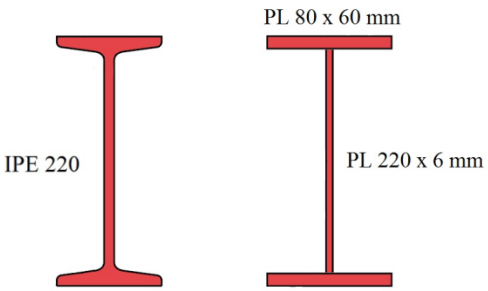
شکل ۳- مقطع ستون ساخته شده با جوش گوشه در اتصال کنج برای ۲ نمونه مورد آزمایش



$A = 60\ \text{cm}^2,\ Zy = 352.5\ \text{cm}^3$

شکل ٤- مقطع ستون ساخته شده با جوش شیاری با نفوذ کامل در ۲ نمونه شاهد آزمایش

همچنین مقاطع تیر برای نمونه‌ها در شکل (۵) و نیز نامگذاری و جزئیات هر ٤ نمونه مورد آزمایش در جدول (۱) قابل مشاهده است.



ب) تیر قوی الف) تیر ضعیف

شکل ۵- تیر برای نمونه‌ها

٤- جزئیات آزمایش

بررسی تجربی نمونه‌ها در این پژوهش در آزمایشگاه سازه مجهز به جک هیدرولیکی و سنسور بار و قاب عکس العمل ثابت به ابعاد ۲ متر طول و ۱/۵ متر عرض مطابق شکل (٦) انجام شده است. شرایط آزمایش و همچنین نحوه طراحی نمونه‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته شد که طی اعمال بارگذاری، نمونه‌ها تحت تغییر شکل‌هایی قرار گیرند که مشابه تغییر شکل‌های اعضای یک قاب خمشی تحت بار جانبی باشند. نمونه‌های آزمایشگاهی توسط تکیه‌گاه‌های مفصلی روی یک کف قوی نصب شدند. شرایط مرزی نمونه‌های آزمایشگاهی که توسط تجهیزات برپایش آزمایش تامین می‌شود، به گونه‌ای بود که رفتار نمونه‌ها تحت آزمایش تا حد ممکن به رفتار واقعی آن نزدیک باشد. جک هیدرولیکی با ظرفیت ۳۰ تن، بارگذاری چرخه‌ای را به سر آزاد ستون اعمال و مقدار بـار وارده توسط نیروسنج اندازه‌گیری گردید.

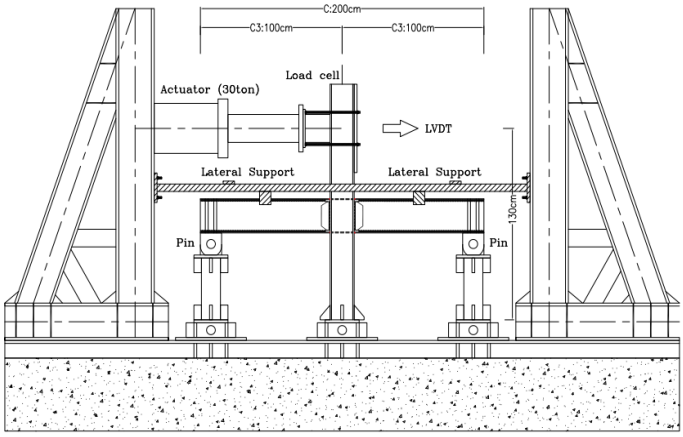
جهت انـدازه‌گیری تغییرمکان ها و دوران های مورد نیاز از تغییرمکان سنج[٤] با آرایش مناسب استفاده شد. همچنین بـه منظور ارزیابی دقیق رفتار نمونه‌ها نیاز بـه انـدازه‌گیری کرنش در اجزاء نمونه‌ها می‌باشد، لذا به این منظور در بالا و پایین بال تیرهای در هر دو طرف نمونه و برروی دو قطر چشمه اتصال در هر دو طرف تعداد ۸ کرنش سنج نصب شد. تمامی تغییرمکان سنج‌ها و کرنش سنج‌ها با استفاده از سیم‌های رابط به دستگاه ثبت مقادیر اتصال یافته و در هرگام بارگذاری مقادیر آنها ثبت گردید. روش بارگذاری چرخه‌ای جانبی نمونه‌ها بر اساس الگـوی پیشنهاد شده (بار چرخه‌ی رفت و برگشتی)

طبق بخش K آیین‌نامه AISC 341 می‌باشد [۱۲]. روش بارگذاری چرخه‌ای جانبی به شیوه کنترل تغییر مکان و بر مبنای شاخص تغییر مکان طبقه‌ای اعمال شد. باید اشاره داشت که فولاد مصرفی نمونه‌ها در ورق قبل از ساخت نمونه در آزمایشگاه مورد تست کشش قرار گرفت و پارامترهای موثر از قبیل استحکام کششی نهایی[۵]، استحکام تسلیم، درصد ازدیاد طول نسبی و ... تعیین شده است.

جدول ۱- جزییات و نامگذاری نمونه‌ها

شماره	نام نمونه	نوع ستون	نوع جوش طولی ستون	نوع تیر	نوع قاب
۱	SG	ستون جعبه‌ای ساخته شده 2×PL 170×10 mm 2×PL 150×10 mm	شیاری	تیر ورق PL 80×6 mm (Flanges) PL220×6 mm (Web)	قاب خمشی ویژه
۲	SF	ستون جعبه‌ای ساخته شده 4×PL 150×10 mm	گوشه	تیر ورق PL 80*6mm (Flanges) PL220*6mm (Web)	قاب خمشی ویژه
۳	IG	ستون جعبه‌ای ساخته شده 2×PL 170×10 mm 2×PL 150×10 mm	شیاری	IPE 220	قاب خمشی متوسط
٤	IF	ستون جعبه‌ای ساخته شده 4×PL 150×10 mm	گوشه	IPE 220	قاب خمشی متوسط

الف) نمایی از قاب آزمایش و نمونه ساخته شده



ب) جزئیات قاب آزمایش

شکل ۵- نمایش ست-آپ آزمایشگاهی

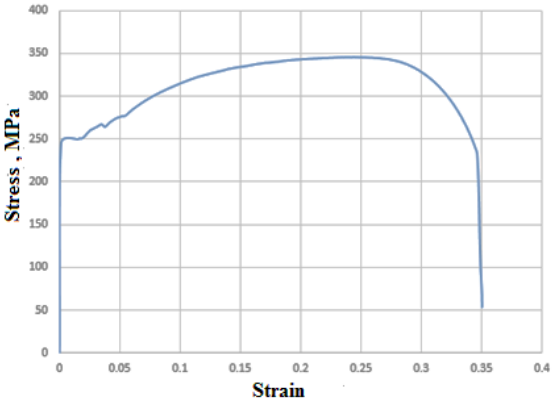
برای اتصال و ساخت اعضا از جوشکاری دستی با الکترود E6013 استفاده گردید. عملیات جوشکاری توسط جوشکار دارای صلاحیت مهارت و برای انجام جوش الکترواسلگ[۶] در اتصال وجه چهارم ورق پیوستگی به ستون از جوشکاری قوس الکتریکی بر روی سیم جوش مصرفی در زیر پودر استفاده و اجرا صحیح جوش‌ها در کلیه اتصالات، با بازرسی چشمی[۷] و تست امواج فراصوت[۸] کنترل شد. ضمناً به منظور ایجاد ورق پیوستگی، ورق فولادی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر در چشمه اتصال و در امتداد بال فوقانی و تحتانی تیرها در ستون جعبه‌ای تعبیه گردید.

۵- مشاهده رفتار نمونه‌ها

با انجام تست کشش بر روی فولاد مصرفی در آزمایش، نمودار تنش کرنش به صورت شکل (۷)، ترسیم و نوع فولاد مصرفی نمونه‌ها ST37 تعیین گردید.

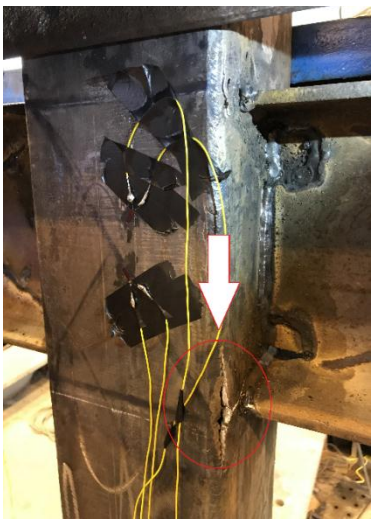
پس از مشخص شدن نوع فولاد، با توجه به طراحی نمونه‌ها و ابعاد قاب آزمایش و ساخت نمونه‌ها، به منظور اجرای صحیح آزمایش می‌بایست تکیه‌گاه‌های مفصلی زیر تیرهای جانبی و ستون، قابلیت حرکت رفت و برگشتی بدون وقفه داشته که نیرویی از جانب تکیه گاه به تیر و ستون در جهت بارگذاری اعمال نگردد. بدین منظور تکیه‌گاه‌های مورد نیاز در آزمایش

به دقت طراحی و به صورت مفصل کامل ساخته شد.



شکل ۷– نمودار تنش–کرنش فولاد مورد استفاده در آزمایش

بعد از اعمال بارگذاری چرخه‌ای بر روی ٤ نمونه مورد آزمایش این تحقیق، دو نمونه قاب خمشی ویژه با ستون جعبه‌ای ساخته شده با جوش شیاری و گوشه (SG و SF)، الگوی بار مورد نظر آیین نامه را با بیشترین سیکل بارگذاری معادل جابجایی ٤٨ میلی‌متر با نیرویی معادل ۱۳ تن، بدون بوجود آمدن گسیختگی و شکست در اتصالات و چشمه اتصال، گذراندند، اما در جابجایی فراتر از بارگذاری آیین نامه AISC341-16 در جابجایی حدود ۵۰ میلی‌متر در ناحیه اتصال تیر به ستون (اتصال مستقیم تقویت نشده‌ی جوشی) با تشکیل مفصل پلاستیک در تیرها، سطح نیرو به یکباره کاهش و جابجایی افزایش یافت که عملاً این بدین معنا بود که قاب عملکرد سازه‌ای خود را از دست داده و آزمون در همین حین به اتمام رسید. در دو نمونه قاب خمشی متوسط (IG و IF)، شرایط به گونه دیگری بود. این دو نمونه، علاوه بر سپری کردن الگوی بار گذاری چرخه‌ای آیین نامه (٤٨ میلی‌متر و نیرویی معادل ۱۰ تن) تا جابجایی ۹٦ میلی‌متر و نیرویی معادل با ۱۲ تن بارگذاری در نمونه با ستون جعبه‌ای شکل ساخته شده با جوش گوشه(IF) ادامه پیدا کرد که در این حین نمونه دچار پارگی جوش گوشه در امتداد محور بال پایینی تیر در ناحیه چشمه اتصال شد (شکل (۸)). در نمونه ستون جعبه‌ای شکل ساخته شده با جوش شیاری با نفوذ کامل (IG) پس از سپری کردن بارگذاری آیین نامه بدون هر گونه شکست، بارگذاری تا جابجایی ٨٤ میلی‌متر و نیرویی معادل ۱۱/۸ تن ادامه پیدا کرد که پس از آن در امتداد محور بال پایینی تیر در ناحیه چشمه اتصال ترک‌هایی مطابق شکل (۹) دیده شد.



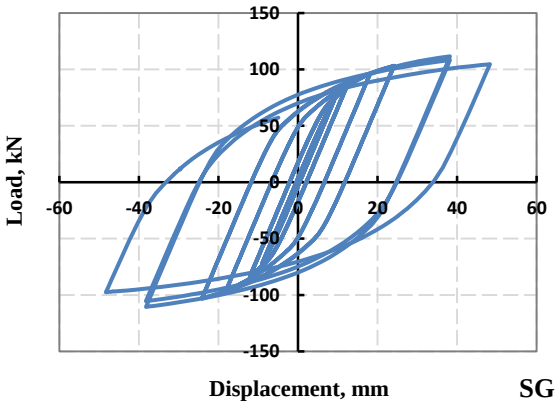
شکل ۸– نمونه قاب خمشی متوسط با جوش گوشه(IF) و گسیختگی جوش ستون ناحیه چشمه اتصال پس از اعمال بارگذاری در جابجایی نسبی ۹٦ میلی‌متر

شکل ۹– نمونه قاب خمشی متوسط با جوش شیاری (IG) و ایجاد ترک در جوش ستون ناحیه چشمه اتصال پس از اعمال بارگذاری در جابجایی نسبی ٨٤ میلی‌متر

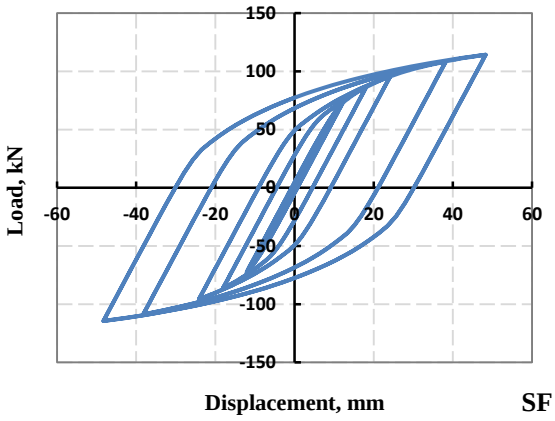
٦– نتایج بارگذاری رفت و برگشتی

در شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) نمودارهای نیرو–جابجایی برای نمونه‌های مورد آزمایش رسم شده است.

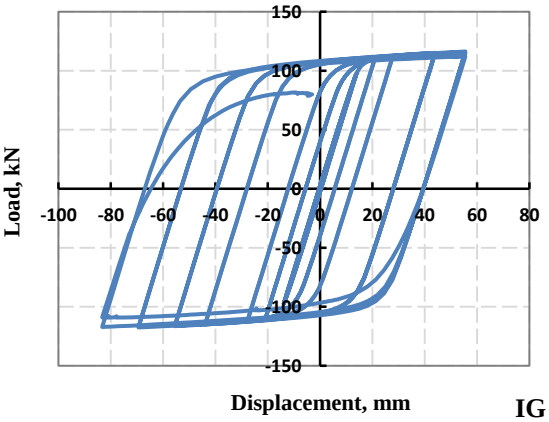
مطابق شکل (۱۰)، نمونه قاب خمشی ویژه با ستون جعبه‌ای ساخته شده با جوش شیاری (SG)، حداکثر زاویه دریفت دوران الگوی بار آیین نامه را با مقدار ۰/۰٤ رادیان (معادل ٤٨ میلی‌متر جابجایی نسبی) بدون گسیختگی و شکست طی نمود.



شکل ۱۰- منحنی نیرو–جابجایی (هیسترزیس) برای نمونه قاب خمشی ویژه با ستون جعبه‌ای ساخته شده با جوش شیاری (SG)



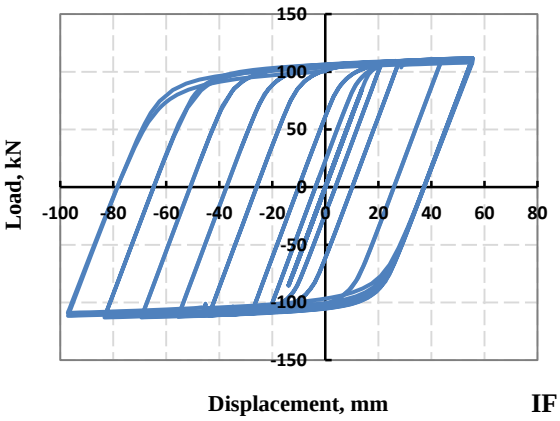
شکل ۱۱- منحنی نیرو–جابجایی (هیسترزیس) برای نمونه قاب خمشی ویژه با ستون جعبه‌ای ساخته شده با جوش گوشه (SF)



شکل ۱۲- منحنی نیرو–جابجایی (هیسترزیس) برای نمونه قاب خمشی متوسط با ستون جعبه‌ای ساخته شده با جوش شیاری (IG)

مطابق شکل (۱۱)، نمونه قاب خمشی ویژه با ستون جعبه‌ای ساخته شده با جوش گوشه (SF)، همانند نمونه قاب خمشی ویژه با ستون جعبه‌ای ساخته شده با جوش شیاری (SG)، حداکثر زاویه دریف دوران الگوی بارگذاری آیین نامه را با مقدار ۰/۰٤ رادیان، بدون گسیختگی و شکست با حفظ عملکرد سازه‌ای خود، گذراند.

مطابق شکل (۱۲)، نمونه قاب خمشی متوسط با ستون جعبه‌ای ساخته شده با جوش شیاری (IG)، علاوه بر گذارندن حداکثر زاویه دریفت دوران الگوی بار آیین نامه با مقدار ۰/۰٤ رادیان، به حرکت چرخه‌ای خود تا زاویه دریفت ۰/۰۷ رادیان (معادل ۸٤ میلیمتر جابجایی نسبی) بدون گسیختگی و شکست ادامه داد.



شکل ۱۳- منحنی نیرو–جابجایی (هیسترزیس) برای نمونه قاب خمشی متوسط با ستون جعبه‌ای ساخته شده با جوش گوشه (IF)

مطابق شکل(۱۳)، نمونه قاب خمشی متوسط با ستون جعبه‌ای ساخته شده با جوش گوشه (IF)، علاوه بر گذارندن حداکثر زاویه دریفت دوران الگوی بارگذاری آیین نامه با مقدار ۰/۰٤ رادیان، توانست بدون گسیختگی و شکست تا زاویه دریفت دوران معادل ۰/۰۸ رادیان (برابر ۹٦ میلی‌متر جابجایی نسبی) به حرکت رفت و برگشتی با حفظ عملکرد سازه‌ای خود ادامه دهد.

۷- بحث و نتیجه‌گیری

با مقایسه و بررسی نمونه‌ها و نتایج حاصله از آزمایش، نتایج زیر قابل بیان است:

- جوش گوشه همانند جوش شیاری در ستون جعبه‌ای شکل ساخته شده، در تامین الزامات لرزه‌ای بارگذاری

چرخه‌ای آیین نامه AISC341-16 عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد.

- در جابجایی‌های بالاتر از الگوی بار رفت و برگشتی آیین نامه AISC341-16، در دو نمونه تیر قوی و ستون ضعیف، علاوه بر تامین الزامات الگوی بار اعمالی، مقاومت تا جابجایی نسبی در حدود ۰/۰۷ رادیان توسط هر دو نمونه تامین می‌گردد.
- در جابجایی‌های بالاتر از الگوی بار رفت و برگشتی آیین نامه AISC341-16، با توجه به نوع گسیختگی و میزان نرخ رشد ترک در جوش گوشه، می‌توان بیان داشت که عملکرد جوش گوشه به نسبت جوش شیاری در شرایط خاص لرزه‌ای و اعمال حداکثر تنش به ناحیه چشمه اتصال، قدری ضعیف‌تر، اما پاسخگوی دوران مورد نیاز آیین نامه بوده است.
- نظر به این که اجرای جوش شیاری با نفوذ کامل در ساخت ستون جعبه‌ای شکل به دلیل عدم دسترسی به پشت جوش در این نوع ستون، امری بسیار سخت و نفوذ کامل امکان پذیر نمی‌باشد، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که امکان جایگزین نمودن جوش شیاری با جوش گوشه، با هزینه کمترو سهولت اجرای بهتر بدون کاهش عملکرد، میسور می‌باشد.

۸- تشکر و قدردانی

در انتها از راهنمایی جناب دکتر سید رسول میرقادری، دکتر عبدالله حسینی، دکتر فرهنگ فرحبد و دکتر محمد قاضی که در این راه همراه ما بودند، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

۹- مراجع

[۱] کافی، م. و طریقی، پ. (۱۳۹۷)، "پیشنهادهایی به‌منظور حذف ورق‌های پیوستگی ستون با مقطع قوطی"، مجله علمی-پژوهشی شریف، دوره ۳٤.۲، شماره ۲.۱، تابستان ۱۳۹۷، ص. ۱۵۱-۱٤۳.

[۲] میرقادری، س.ر.، ترابیان، ش. و کشاورزی، ف. (۱۳۸۸)، "مطالعه آزمایشگاهی اتصال خمشی تیر I شکل به ستون قوطی شکل با به‌کارگیری ورق میان‌گذر"، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

[3] FEMA, (2000), Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment–Frame Buildings, Report NO. FEMA-350, Federal Emergency Management Agency.

[4] AWS D1.1, (2006), American Welding Society, Structural Welding Code, Annex XI, (American Welding Society, Miami, Florida).

[۵] سازمند، ا.، آقا کوچک، ع.ا. و مزروعی، ع. (۱۳۹۰)، "مطالعه آزمایشگاهی و تحلیلی رفتار اتصالات در قاب‌های خمشی فولادی دارای ستون با مقطع جفت پروفیل"، نشریه علمی-پژوهشی سازه و فولاد، دوره هفتم، شماره دهم، ص. ۹۱-۷۳.

[6] Uang, C.M., Yu, Q.S. and Gilton, C.S. (2000), "Effects of Loading History on Cyclic Performance of Steel RBS Moment Connections", Proceedings of the 12th WCEE, Upper Hutt, New Zealand.

[7] Kim, T., Stojadinović, B. and Whittaker, A.S. (2008), "Seismic Performance of Pre-Northridge Welded Steel Moment Connections to Built-Up Box Columns", Journal of structural engineering, Vol. 134, pp. 289–299.

[۸] هاشمی، س.ش.، مسیح زاده، ا. و واقفی، م. (۱۳۹۱)، "مقایسه رفتار غیرخطی ستون‌های فولادی جعبه‌ای ساخته‌شده با جوش شیاری و گوشه"، دومین کنفرانس ملی سازه-زلزله-ژئوتکنیک، مازندران.

[۹] میرقادری، س.ر.، قاسمی، م. و سیفان، ف. (۱۳۹۲)، "بررسی حدی تقاضاهای موجود در چشمه اتصال تیر I شکل به ستون قوطی تحت خمش دو محوره"، چهارمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و چهارمین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه، انجمن سازه‌های فولادی ایران، تهران.

[۱۰] احمدی، م.، مسلم ا. و احمدی م. (۱۳۹۳)، "مقایسه اتصال تیرهای I شکل به ستون قوطی فولادی با سخت کننده‌های خارجی و ورق پیوستگی داخل ستون تحت بارگذاری چرخه‌ای"، دومین کنگره بین المللی سازه، معماری و توسعه شهری، تبریز.

[11] Jahanbakhti, E., Fanaie, N. and Rezaeian, A. (2017), "Experimental Investigation of Panel Zone in Rigid Beam to Box Column Connection", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 137, pp. 180–191.

[12] Uraiyer, F.A. (2017), "Using Fillet Welds Instead of CJP Groove Welds in Directly-Welded Flange FR Moment Connections", Kufa journal of Engineering, Vol. 8, pp.90–102.

[13] AISC 341-16, (2016), An American National Standard, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, Chicago, Illinois 60601-1802.

پی نوشت

[1] Groove weld

[2] Complete joint penetration (CJP)

[3] Welded nreinforced flange-welded web (WUF-W)

[4] Linear variable differential transformer (LVDT)

[5] Ultimate tensile strength (UTS)

[6] Electroslag welding

[7] Visual testing

[8] Ultrasonic testing