

بهبود ظرفیت دوران پلاستیک اتصال لینک‌های خمشی متصل به ستون در قاب‌های مهاربندی واگرا با استفاده از اتصالات باجان کاهش یافته

امیراحمد هدایت^{۱*}، علیرضا کلانتری خاندانی^۲

۱- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان

* کرمان، صندوق پستی ۷۶۳۵۱۳۱۱۶۷، amirahmad1356@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۱۸)

چکیده

در دهه‌های گذشته آئین نامه سازه‌های فولادی آمریکا (AISC) مقرر می‌کرد که اتصال تیر پیوند در قاب‌های مهار بند واگرا (EBF) مطابق قاب‌های خمشی ویژه طراحی گردد ولی پس از وقوع زلزله نورتریج ۱۹۹۴ بسیاری از قاب‌هایی که به این شکل طراحی و اجرا شده بودند دچار تخریب گردیدند. در این تحقیق به صورت تئوریک سعی شده تا با بهره برداری از ایده تیر ضعیف شده در جان (RBW) با سوراخ‌های مستطیلی بلند ضمن دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون (مقطع بحرانی) ظرفیت دوران پلاستیک اتصال نیز افزایش یابد. پارامترهای در نظر گرفته شده در مدل‌های اجزای محدود شامل قطر - شعاع انحناء - طول و فاصله عمودی و افقی سوراخ‌ها از یکدیگر می‌باشد. به منظور اعتبار سنجی نتایج بدست آمده، نمونه کالیبره با نتایج آزمایشگاهی که توسط Okazaki و همکارانش در سال ۲۰۰۴ در کشور آمریکا انجام شده مقایسه گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که با اعمال ایده RBW، در اکثر اتصالات مدل شده مفصل پلاستیک از مقطع بحرانی دور و دوران پلاستیک مد نظر آئین نامه نیز در محل اتصال تأمین می‌گردد. مطابق این بررسی، مدل‌های انجام شده با تشکیل سریع‌تر مفصل پلاستیک در ناحیه جان کاهش یافته، وقوع تسلیم شدگی تیر پیوند در بر ستون را به تأخیر می‌اندازند و همچنین تا قبل از رسیدن نیروی برشی در ناحیه جان کاهش یافته به ظرفیت برشی مورد انتظار (مقاومت اسمی تیر پیوند)، در بر ستون تسلیم شدگی رخ نخواهد داد.

واژگان کلیدی

مهاربندهای EBF، اتصال تیر پیوند به ستون، آنالیز اجزای محدود

Enhancement of the rotational capacity of moment links in EBFs using reduced beam web connections

A.A. Hedayat, A. Kalantari-Khandani

Abstract

In the past decades, although the regulations of American Institute of Steel Construction (AISC) ordained that the link to column in Eccentrically Braced Frames (EBF) had to conform with the moment frames designed specially, unfortunately most of them got destroyed after Northridge earthquake in 1994. From this point, therefore, the regulations of AISC regarding the fore mentioned designed and performed links reconsidered more carefully; the final results have not been included in revised regulations of AISC yet. In recent studies, different ways have been put forward to solve this problem; almost all of them believe in keeping away the critical section of links to columns from common sections. The present research does its utmost to find the most useful dimensional limits for holes made in steel joist; it is going to be done through making use of RBW, holding the plastic joint at a special distance from the critical section and increasing the capacity of plastic joint circulation. To validate the results, calibrated samples were compared with Okazaki and colleagues' experimental results in 2004 in America. This article shows that applying RBW in plastic joints, modeled in most of the links, causes critical sections to be kept away and plastic joint circulation be also observed. Based on this study, RBW models can make the joints very quickly and delay the failure of link-to-column connections. Therefore, before reaching shear force to resisting link in RBW, the failure does not happen.

Keywords

EBF, Link to column, Finite-element analysis

مهاربندهای واگرا به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی زلزله به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مهمترین مزیت قاب‌های با این نوع مهاربند سختی مناسب، شکل پذیری بالا و قابلیت جذب انرژی زیاد می‌باشد. آئین نامه AISC [۱] ضوابطی را برای اطمینان از عملکرد نرم اتصالات این نوع مهاربند و اینکه تغییر شکل پلاستیک، ابتدا در تیرهای پیوند اتفاق بیفتد تعیین می‌کند. اما در حال حاضر جزئیات اتصال تیر پیوند به ستون برای مهاربندهای واگرای تک قطری که بتواند این ضوابط را اثناء کند در آیین‌نامه فوق یا کم است و یا اصلاً وجود ندارد. بنابر این طراحی جزئیات اتصال تیر پیوند به ستون مشکل حل نشده‌ای را در استفاده از این نوع قاب‌ها باقی گذاشته است، و مقررات لرزه‌ای آمریکا توصیه به استفاده محدود از سیستم مهاربند واگرای را می‌کند که در آن تیر پیوند به ستون متصل می‌باشد، تا زمانی که تحقیقات بعدی اتصال مناسب تیر پیوند به ستون را نشان دهند.

در این راستا اقداماتی از جمله استفاده از سیستم‌های جداگر پایه یا وسایل الحاقی میراگر، تغییر در پیکربندی اتصال و اتصالات کاهش یافته پیشنهاد گردید. تغییر در پیکربندی اتصال به دو صورت تقویت کردن اتصال یا ضعیف کردن تیر انجام می‌پذیرد. تقویت کردن اتصال بوسیله ورق روسری، لچکی مثلی یا صاف، پشت بند قائم، پشت بند طولی، براکت‌های پیچی و ورق‌های کناری صورت می‌گیرد. اکثر روش‌های فوق سبب تحمیل هزینه‌های اضافی، بالا رفتن تقاضای لرزه‌ای ستون‌ها و پیچیده شدن اتصال تیر به ستون می‌گردد. مشکل دیگر کارایی پایین آنها در بهسازی سازه‌های موجود است. ضعیف کردن مقطع تیر می‌تواند با برش دادن بخشی از بال تیر به وسیله ایجاد انحنا یا فرم‌های برشی متداول دیگر (اتصالات RBS^۱)، یا برش دادن بخشی از جان به وسیله سوراخ‌های دایره‌ای، شکاف‌های سینوسی شکل، بازشوی تخم مرغی شکل، یا فرم‌های متداول دیگر (اتصالات RBW^۲) انجام گیرد. مشکل عمده اتصالات RBS کاهش مقاومت اتصال در برابر کماتش جانبی - پیچشی می‌باشد. همچنین در تغییر مکان‌های بزرگ توانایی تحمل بار آن کاهش می‌یابد. برای ساختمان‌های جدید RBS به صورت الگووار برای بال‌های بالا و پایین برش داده می‌شود اما این نوع اتصال برای بهسازی نسبتاً پر هزینه است (مخصوصاً برای ساختمان‌های با دال بتنی) زیرا نیاز به برش دادن بال‌ها در ۴ لبه آنها است.

در این مقاله به معرفی اتصالات RBW که با ایجاد بازشوهای مستطیلی در جان تیر ایجاد می‌گردد، می‌پردازیم. که علاوه بر دارا بودن مزایای اتصالات مشابه باعث افزایش مقاومت جانبی در مقابل کماتش شده و همچنین امکان بهسازی سازه‌های موجود را نیز افزایش می‌دهد. اتصال با بازشو مستطیلی در جان در دور کردن مفصل پلاستیک از سوراخ دسترسی جوش عملکرد مناسبی داشته و با توجه به شکل مطلوبی که داراست نیاز به برشکاری دشواری ندارد.

برای این منظور نمونه آزمایش شده توسط Okazaki با نام MWM^۳ (اتصال نورتریج اصلاح شده خمشی) شامل تیر پیوند با مقطع $W40 \times 18$ و ستون با مقطع $W12 \times 120$ به عنوان مدل کالیبره جهت صحت سنجی و اعمال ایده RBW با فرم سوراخ‌های پیشنهاد شده مورد مطالعه قرار گرفت و بهترین فرم و ابعاد برای سوراخ‌ها با رویکرد اتلاف انرژی و افزایش شکل پذیری اتصال معرفی شد. همچنین برای بارگذاری نمونه کالیبره از مدل بارگذاری Old در آیین‌نامه AISC 2002 که همان بارگذاری استفاده شده در رساله Okazaki است [۲] استفاده شده و در ادامه از پروتکل بارگذاری Revised که مورد تأیید آئین نامه AISC 2016 می‌باشد، استفاده گردیده است.

در ادامه در این مقاله در بخش بعدی به مروری بر تحقیقات گذشته در این زمینه پرداخته می‌شود. بخش سوم به نحوه مدل سازی اتصال می‌پردازد. در بخش چهارم معیار شکست در نظر گرفته شده تشریح می‌گردد و در بخش پنجم نتایج به دست آمده ارائه می‌شود. در نهایت، بخش ششم به خلاصه مقاله و نتیجه گیری اختصاص دارد.

۲- مروری بر تحقیقات پیشین

۲-۱- مطالعات انجام شده بر روی اتصال لینک‌های متصل به ستون

فکر استفاده از قاب‌های مهاربندی واگرا اولین بار توسط Popov مطرح و مزیت‌های منحصر به فرد سیستم شناخته شد. اما بعد از زمین لرزه نورتریج آمریکا و کوبه ژاپن بسیاری از این قاب‌ها دچار تخریب شدند لذا از آن به بعد آئین نامه AISC طرح و اصلاح این اتصال را در برنامه تحقیقاتی خود قرار داد. با این وجود توجه کمتری به اتصال تیر پیوند به ستون نسبت به سایر اعضا شده است، هر چند که این اتصال نقش مهمی به عنوان یک جزء اصلی در بهبود عملکرد اتصال پیوندهای خمشی و برشی دارد و به لحاظ فرم بادبند نیز مد نظر معماران می‌باشد.



در نظر گرفته شده در مقررات لرزه‌ای AISC 2002، برای اتصال تیر پیوند به ستون بسیار محافظه کارانه است، به طوریکه اتصال قبل از رسیدن به دوران مقرر، نیازمند گذراندن سیکل‌های غیر الاستیک بسیار زیادی است. این محققان در سال ۲۰۰۴، یک بارگذاری اصلاح شده پیشنهاد کردند که در نهایت در مقررات لرزه‌ای AISC 2005 منتشر شد. در این مطالعه نیز از همین پروتکل بارگذاری که در آیین‌نامه اخیر نیز مورد تأیید است استفاده شده است [۶].

Okazaki در سال ۲۰۰۴ ایده‌های متفاوتی منجمله اصلاح نوع جوش، اصلاح سوراخ دسترسی جوش، استفاده از اتصالات با بال آزاد و استفاده از اتصالات بدون سوراخ دسترسی جوش را مورد بررسی قرار داد ولی تست‌های انجام شده نشان دهنده عدم حصول ظرفیت دوران مناسب در اکثر نمونه‌ها بود [۲].

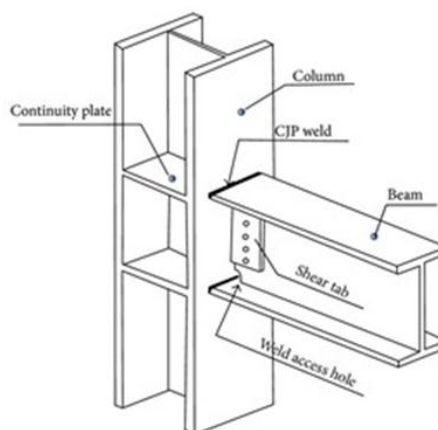
در ادامه Okazaki و همکارانش، یک جفت ورق تقویتی جان را به یک اتصال تیر پیوند به ستون اضافه کردند، این سخت‌کننده‌ها در پانل اول تیر پیوند در مجاورت ستون و به موازات جان قرار گرفتند و از یک طرف به ستون و از طرف دیگر به سخت‌کننده‌های تیر پیوند متصل بودند. نمونه‌های آزمایش شده با این جزئیات شکل‌پذیری مناسبی داشتند و توانستند دوران پلاستیک مقرر در AISC را برآورده نمایند [۷].

Bermann و همکارانش ایده‌ی تیر با مقطع کاهش‌یافته RBS را روی تیرهای پیوند مجزا اعمال کردند و روندی برای طراحی آن ابداع نمودند، مطالعه‌ی پارامتری به کمک اجزای محدود روی تیرهای پیوند مجزا نشان داد که اعمال کاهش مقطع می‌تواند کرنش‌های پلاستیک در انتهای تیر پیوند به مقدار زیادی کاهش دهد [۸].

۲-۲- مطالعات انجام شده روی اتصالات RBW

در سال ۲۰۰۹، Hedayat و همکارانش ایده استفاده از اتصالات با جان کاهش یافته را جهت بهبود رفتار لرزه‌ای اتصالات در قاب‌های خمشی مورد مطالعه قرار داده و دریافته‌اند که با اعمال این ایده ضمن دور شدن مفصل پلاستیک از بر ستون ظرفیت دورانی اتصال نیز افزایش می‌یابد. بر همین مینا و به دلیل تشابه رفتار اتصالات در قاب‌های خمشی با لینک‌های خمشی در قاب‌های EBF در این تحقیق با استفاده از ایده RBW سعی در توزیع بهتر رفتار پلاستیک در طول تیر پیوند، کاهش کرنش‌های پلاستیک و افزایش ظرفیت دورانی اتصال شده است [۹]. سایر تحقیقات انجام شده در این زمینه بیشتر تکمیل و مقایسه

نمایی از اتصالات پیش از نورتریج در شکل (۱) نشان داده شده است در این اتصالات مفصل پلاستیک در بر ستون تشکیل می‌شود. مطالعات بیشتر نشانگر وجود نقطه ضعف‌هایی در جوش و شکست ترد اتصالات جوشی این قاب‌ها بود، عموماً شروع این گسیختگی‌های ترد از ناحیه جوش شیاری بال پایین تیر بوده است.



شکل ۱- جزئیات اتصال قبل از زلزله نورتریج

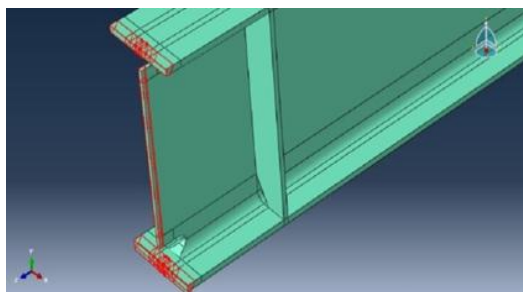
پیش از زلزله نورتریج تحقیقات اندکی در زمینه اتصالات تیر پیوند به ستون صورت گرفته بود. در سال ۱۹۸۴ Malley و Popov رفتار چند اتصال تیر پیوند به ستون در قاب‌های مهاربند و اگرایی که دارای بال جوش شده و جان بولت شده بودند، بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که اتصال با بال جوش شده و جان بولت شده عملکرد ضعیفی را نشان می‌دهد و اتصال به علت لغزش مکرر بولت‌ها، مستعد شکست در بال تیر پیوند، پیش از رسیدن به دوران پلاستیک مطلوب می‌باشد. لذا استفاده از اتصال تمام جوش پیشنهاد گردید [۳].

همچنین Popov و Engellhardt در سال ۱۹۹۹، با مقایسه رفتار نوسانی قاب‌های EBF که دارای تیرهای پیوند با طول کوتاه، متوسط و بلند بودند نشان دادند که تیرهای پیوند کوتاه قابلیت استهلاک انرژی بیشتری دارند [۴].

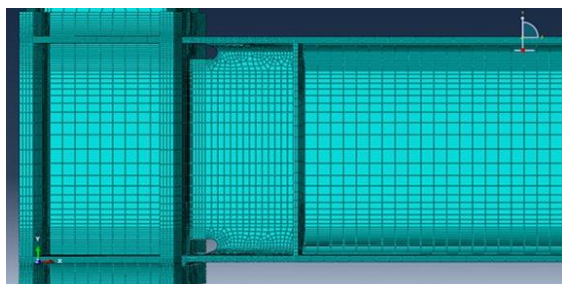
Tsai و همکارانش در سال ۲۰۰۰، عملکرد لرزه‌ای تیر پیوند برشی متصل به ستون قوطی شکل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که اکثر نمونه‌ها با شکست بال تیر پیوند در نزدیکی جوش شیاری مواجه و تنها قادر به تحمل نیمی از دوران غیر الاستیک مورد نظر شدند [۵].

Richards و Uang در سال ۲۰۰۴ نشان دادند که بارگذاری

محاسبه و بعد از پایان مش‌بندی همانگونه که ملاحظه می‌گردد تمامی مش‌ها با دقت بالایی به صورت هماهنگ به هم رسیده است. مش‌ها همانگونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود در نواحی غیرالاستیک فشرده تر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- جزئیات سوراخ دسترسی جوش



شکل ۳- مش بندی اتصال در نواحی الاستیک و غیر الاستیک

۲-۳- بررسی صحت مدل سازی

برای ارزیابی روش مدل کردن در این مطالعه، مدل کنترل کاملاً مشابه نمونه آزمایشگاهی MWM (اتصال نورتریج اصلاح شده خمشی) که توسط Okazaki و همکارانش [۲] بررسی شده بود شبیه سازی شد و تحت بار سیکلیک قرار گرفت (شکل (۴)). نتایج کلی از قبیل دوران پلاستیک اتصال، شاخص شکست و شکست اولیه بال تیر پیوند با نتایج تحقیق Okazaki مقایسه گردید که صحت و انطباق آن با مدل آزمایشگاهی با دقت بالا قابل قبول بود. نمونه آزمایش شده توسط Okazaki با نام MWM به عنوان نمونه پایه در این تحقیق شامل تیر پیوند با مقطع $W18 \times 40$ و ستون با مقطع $W12 \times 120$ تشکیل شده است و سایر جزئیات شامل فرم و ابعاد سوراخ دسترسی جوش، مشخصات فنی جوش‌های مصرفی، ورق برشگیر، ورق‌های پیوستگی و غیره دقیقاً مطابق شکل (۲) مدل سازی شده است. رفتار مصالح نیز بر اساس فولاد A992 با تنش تسلیم ۳۵۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و ضریب پواسون ۰/۳ مدل سازی گردیده است.

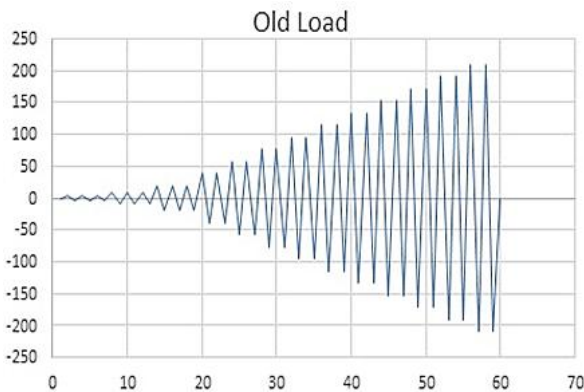
مدهایی است که مطرح شد اما آیین‌نامه AISC تا کنون اتصالی را که مورد تأییدش باشد، ارائه نداده است. شایان ذکر است که ایده جان کاهش یافته در قاب‌های خمشی نیز مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است که می‌توان به مطالعات Hedayat و همکارانش (۲۰۱۳ و ۲۰۱۵) [۱۰ و ۱۱] و Hedayat و Celikag (۲۰۱۱) [۱۲] اشاره کرد.

۳- نحوه مدل سازی

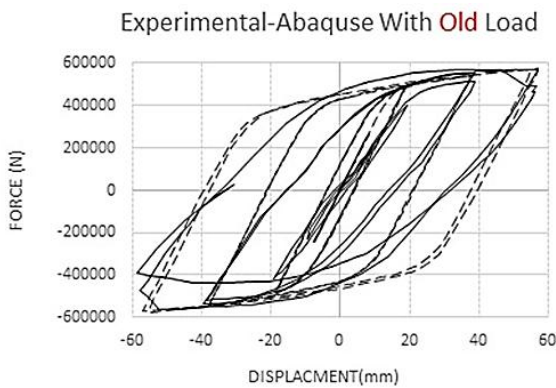
۳-۱- مدل سازی در برنامه Abaqus

در تحقیق حاضر به منظور مدل سازی جوش‌های نفوذی، سوراخ‌های دسترسی جوش، جوش برشگیر متصل به ستون، خود لینک و همچنین ستون و ناحیه چشمه اتصال از المان SOLID با ۴ درجه آزادی در هر گره و مابقی قسمت‌ها از المان SHELL با ۶ درجه آزادی استفاده شده است. از آنجایی که در بلت‌ها شکستی رخ نمی‌دهد و غالباً به منظور مونتاژ استفاده می‌گردند، بلت‌ها مدل نشده و فقط جوش جان متصل به ستون مدل گردیده است که در شکل (۲) نشان داده شده است. بارگذاری نمونه‌ها به صورت اعمال تغییر مکان در انتهای ستون است که طی دو مرحله زیر اعمال گردید. مرحله اول، بارگذاری برای ایجاد نقص اولیه در سیستم است. به همین منظور، در این مرحله یک آنالیز کماتش، صورت گرفته تا مدهای کماتشی تیر پیوند در بادبند و اگر در اثر بار اعمالی تعیین گردد. در این تحقیق ابتدا ده مد برای آنالیز کماتشی در نظر گرفته شد که بعد از انجام آنالیز، مدهای مؤثر برای اعمال نقص اولیه به قاب انتخاب گردید. با مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی، بهترین نتیجه با ترکیب کردن مدهای اول و دوم کماتشی حاصل شد که مد اول با ضریب ۰/۵٪ و مد دوم با ضریب ۰/۵٪ ضخامت بال تیر پیوند در نمونه غیر کاهش یافته به عنوان نقص اولیه به قاب و اگر اعمال گردیدند. البته در قاب‌های و اگر با تیر کاهش یافته مقدار نقص اولیه با استفاده از ضخامت جان تیر پیوند بدست آمد. با تحمیل این نقص، تیر پیوند آماده کماتش است. مرحله دوم، بارگذاری چرخه‌ای است. در این مرحله یک بار چرخه‌ای به صورت تغییر مکان به انتهای ستون اعمال گردید. مش‌بندی با المان‌های مکعبی ۸ گرهی که برای آنالیزهای خطی و غیر خطی، دوران‌ها و کرنش‌های بزرگ مناسب می‌باشند و می‌تواند اثرات تغییر شکل‌های بزرگ و کماتش‌های موضعی را در نظر بگیرد، انجام شده است. در این تحقیق مش‌بندی به صورت دستی مدل گردیده به طوری که تمامی تقسیم‌بندی‌ها (سید بندی‌ها) قبل از اعمال به صورت دستی

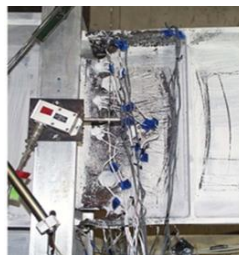
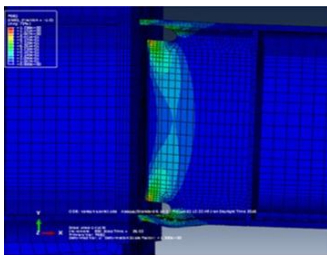
تخریب با کماتش موضعی در بال پائین آغاز و کنتورهای تنش نشان داده شده یکسان می‌باشند.



شکل ۶- پروتکل بارگذاری مطالعه Okazaki (سال ۲۰۰۴)



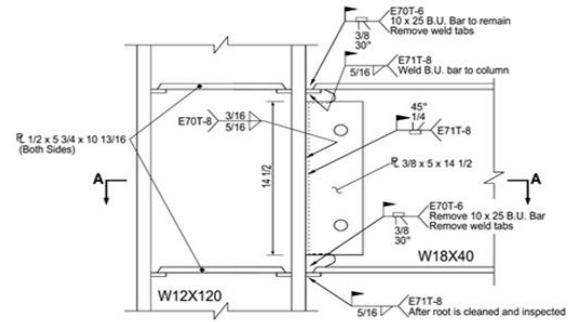
شکل ۷- صحت انطباق نمونه آزمایشگاهی با مدل ایجاد شده در برنامه ABAQUS



شکل ۸- مقایسه خروجی ABAQUS با نمونه آزمایشگاهی در لحظه شکست

۳-۴- تعریف مدل

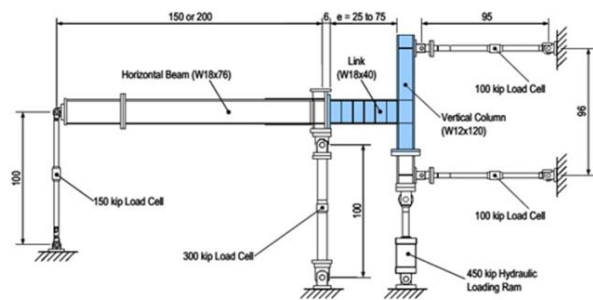
هندسه کلی مدل RBW با گشایش سوراخ‌های مستطیلی مطابق شکل (۹) است.



شکل ۹- اتصال نورتریج اصلاح شده خمشی [۲]

۳-۳- قیود تکیه گاهی و بارگذاری مدل

قیود در برابر جابه جایی در نمونه آزمایشگاهی در شکل (۵) که شامل تکیه گاه‌های غلطکی در پائین و بالای ستون و همچنین دو تکیه گاه غلطکی دیگر در تیر که مانع از جابه جایی قائم آن می‌گردد، نشان داده شده است. در پائین ستون نیز یک هیدرولیکی که بارگذاری را شبیه سازی می‌کند، مشخص است. مدل آزمایشگاهی مزبور با لحاظ کلیه شرایط تکیه گاهی و تحت بارگذاری سیکلیک در برنامه ABAQUS مدل سازی شده است.

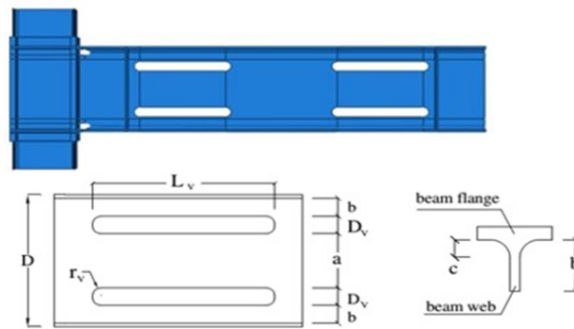


شکل ۱۰- ساختار مدل ایجاد شده در برنامه ABAQUS

بارگذاری اولیه مدل مطابق پروتکل بارگذاری Okazaki بوده است که در این تحقیق با نام Old Load آورده شده است (شکل (۶)). منحنی های نیرو - تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی و نمونه مدل سازی شده در برنامه ABAQUS تحت پروتکل بارگذاری مذکور ترسیم و همانگونه که در شکل (۷) ملاحظه می‌گردد انطباق نسبتاً خوبی بین نتایج وجود دارد. اما به دلیل تفاوت در سختی‌های مدل شده در تکیه گاه‌ها که در نمونه نرم افزاری به صورت کاملاً صلب می‌باشد مقدار کمی عدم انطباق مشاهده می‌گردد. شکل (۸) که مقایسه شماتیک انطباق لحظه شکست در برنامه ABAQUS و محیط آزمایشگاهی می‌باشد صحت و صدق مدل سازی را نشان می‌دهد که در هر دو نمونه،

۴- معیار شکست

در مقاله حاضر با توجه به اینکه نمونه آزمایشگاهی در 1N-0.03 (زایوه دوران ۰/۰۳ رادیان) دچار شکست گردیده است همین لحظه در نرم افزار پیدا و شکل خرابی ملاحظه گردید. با توجه به اینکه معیار اصلی شکست کرنش‌های پلاستیک معادل در نظر گرفته شده ملاحظه شد که بخشی از اتصال جوش بال پایین تیر در لحظه شکست دچار کرنش‌های پلاستیک بیش از حد بوده است لذا سعی شد با نسبت‌های متفاوت همانگونه که در شکل (۱۰) ملاحظه می‌گردد تمامی عرض جوش را در بال پایین به این حد از کرنش پلاستیک رساند و این عدد به عنوان معیار شکست انتخاب گردید که در نهایت در نمونه‌های سیکلیک این عدد ۰/۶۹ و در نمونه‌های مونوتونیک ۰/۱۷ بدست آمد. سپس با استفاده از روش POST PROCESSING تحلیل مدل‌ها پیگیری شد.



شکل ۹- هندسه کلی مدل

در شکل (۹) طول سوراخ‌ها بر اساس نسبتی از عمق تیر (D)، فاصله سوراخ‌ها از بال بالا و پایین تیر آهن بر اساس ضریبی از طول ناحیه K AREA محاسبه گردیده است. همچنین شعاع انحنا سوراخ‌ها بر اساس حداقل مورد نیاز آیین‌نامه و D_v قطر سوراخ‌ها که برای تقریب اولیه بر اساس حداقل نیاز برشی تیر مطابق رابطه زیر محاسبه شده است.

$$V_{demand} = \frac{2M_p}{L_v}, \quad V_{capacity} = \phi \times 0.6 \times F_y \times A_g,$$

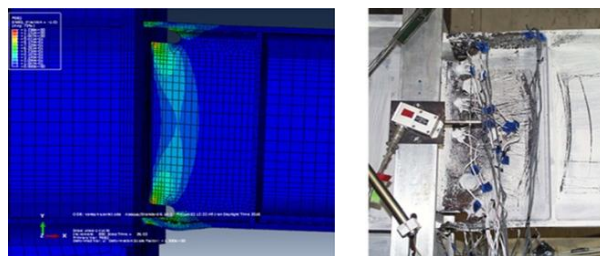
$$\text{If } V_{demand} = V_{capacity}$$

$$0.9 \times 0.6 \times F_y \times (D_b - 2D_v) \times t_w = 2 \times Z \times \frac{F_y}{L_v}, \quad (1)$$

$$D_v = (D_b - \frac{Z}{0.084L_v}) \times 12.7$$

بر اساس رابطه (۱) مقدار تقریبی اولیه برای D_v برابر ۲۰ میلیمتر بدست می‌آید. همچنین، در رابطه فوق Z مدول پلاستیک مقطع می‌باشد.

با ذکر توضیحات فوق و تقریب اولیه قطر سوراخ‌ها به میزان ۲۰ میلیمتر جمعاً ۳۵ نمونه در مرحله اول جهت تحلیل نتایج مطابق جدول (۱) مدل گردید.



شکل ۱۰- لحظه شکست (بال پایین) در نرم افزار ABAQUS

۵- نتایج

۵-۱- بررسی اولیه فرم سوراخ‌های انتخاب شده

همانگونه که ذکر گردید یکی از روش‌های دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون ایده تیر با جان کاهش یافته می‌باشد که در این اتصال تضعیف در جان تیر و در نزدیکی اتصال ایجاد می‌شود که با کاهش ظرفیت برشی تیر در این نقطه مفصل پلاستیک تشکیل می‌گردد.

از آنجایی که ایده‌های متفاوت در خصوص شکل بازشوهای در جان می‌توان ارائه کرد ابتدا چندین امکان مختلف بررسی و مناسب‌ترین متد جهت پیاده سازی طرح نهایی انتخاب گردید. تمامی نمونه‌های ارزیابی شده اولیه، تحت بار سیکلیک و تا ۴ درصد چرخش اتصال بازگذاری گردیده‌اند.

تایید نمونه انتخاب شده با رعایت نکات زیر انجام شده است:

۱- کرنش‌های پلاستیک در بر اتصال از معیار (شکست) تعیین شده تجاوز ننماید و مفصل پلاستیک نیز از بر اتصال

جدول ۱- ابعاد مدل‌های ساخته شده

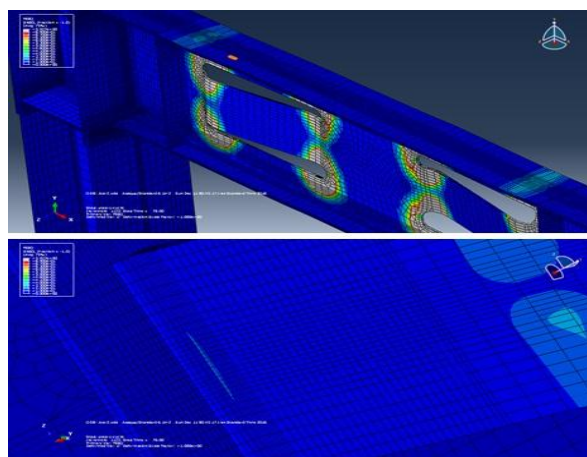
مدل	۱	۲	۳	۴	۵
نمونه	$0.8D$	$0.9D$	$1D$	$1.1D$	$1.25D$
۲C	۳۳/۲۷	۳۳/۲۷	۳۳/۲۷	۳۳/۲۷	۳۳/۲۷
۳C	۴۹/۹۱	۴۹/۹۱	۴۹/۹۱	۴۹/۹۱	۴۹/۹۱
۴C	۶۶/۵۴	۶۶/۵۴	۶۶/۵۴	۶۶/۵۴	۶۶/۵۴
۵C	۸۳/۱۸	۸۳/۱۸	۸۳/۱۸	۸۳/۱۸	۸۳/۱۸
۶C	۹۹/۸۲	۹۹/۸۲	۹۹/۸۲	۹۹/۸۲	۹۹/۸۲
۷C	۱۱۶/۴۶	۱۱۶/۴۶	۱۱۶/۴۶	۱۱۶/۴۶	۱۱۶/۴۶
۸C	۱۳۳/۱	۱۳۳/۱	۱۳۳/۱	۱۳۳/۱	۱۳۳/۱



دور گردد.

۲- ضوابط شکل پذیری آیین‌نامه برای اتصال تیر پیوند (دوران حداقل ۰/۰۲ رادیان) تامین شود.

در مرحله اول سوراخ‌های دایره‌ای بزرگ و همچنین سوراخ‌های دایره‌ای کوچک متعدد مدل سازی شد و به علت مشاهده کرنش‌های پلاستیک بزرگ در بر اتصال این فرم بازشو مقبول نشد و همان ایده اولیه مد نظر که بازشوی مستطیلی بلند بود با یک طرح اولیه مدل سازی و ارزیابی گردید. همانگونه که در شکل (۱۱) ملاحظه می‌گردد خروجی‌ها هیچگونه کرنش پلاستیکی را بر اساس معیار شکست تعریف شده چه در بر اتصال و چه در محل اتصال جوش بال پایین به بال ستون که نقطه بحرانی در شکست‌های مشاهده شده در اتصال بوده است را نشان ندادند و همانگونه که در منحنی نیرو جابه جایی مشاهده می‌گردد اتصال ۰/۰۶ رادیان (معادل ۱۵۰ میلیمتر جابه جایی) را بدون خرابی گذرانده است.



شکل ۱۱- کنترل کرنش‌های پلاستیک با فرم سوراخ‌های مستطیلی بلند

بر این اساس نسبت به مدل سازی ۳۵ نمونه اولیه با مشخصات جدول (۱) و قطر اولیه ۲۰ میلیمتر اقدام و اثرات تغییر پارامترهای مندرج در جدول مذکور را بر رفتار اتصال و همچنین ظرفیت چرخه‌ای غیر الاستیک آن بررسی و نتایج حاصل شده با الزامات آیین‌نامه مقایسه گردید.

پس از انجام آنالیز در نرم افزار ABAQUS، ۳۵ منحنی ممان دوران تحت بار سیکلیک بدست آمد. میزان چرخش غیر الاستیک اتصال و همچنین ماکزیمم نیروی برشی قابل انتقال به اتصال بررسی و این مقادیر با اعداد آیین‌نامه مورد مقایسه قرار گرفت. مشاهدات نشان داد که تغییر در دوران پلاستیک اتصال، میزان نیروی برشی و ممان انتقالی به اتصال و همچنین

تغییرات سختی الاستیک سیستم تابعی از متغیرهای b (فاصله بر اتصال از زیر بال تیر که بین $2C$ تا $8C$ متغیر است) و L_v (طول سوراخ مستطیلی ایجاد شده که از $0.8C$ تا $1.25C$ متغیر می‌باشد) می‌باشد که نتایج این مشاهدات در ادامه خواهد آمد.

۲-۵- حد اکثر دوران تیرهای پیوند RBW

یکی از معیارهای عملکرد صحیح تیرهای پیوند در کارهای آزمایشگاهی، میزان توانایی اتصال تیرهای پیوند در کسب دوران‌های غیر الاستیک مورد نیاز آیین‌نامه‌ای است. حد اکثر ظرفیت دوران مورد نیاز اتصال تیرهای پیوند متصل به ستون، دورانی معادل ۰/۰۲ رادیان مشروط بر عدم تسلیم شدگی تیر پیوند در بر ستون می‌باشد. که در این بررسی با عنایت به تضعیف تیر در برش، اتصال بایستی ظرفیت دورانی ذکر شده را قبل از تسلیم تیر پیوند در برش طی کرده و در لحظه مزبور تسلیم خمشی نیز رخ نداده باشد.

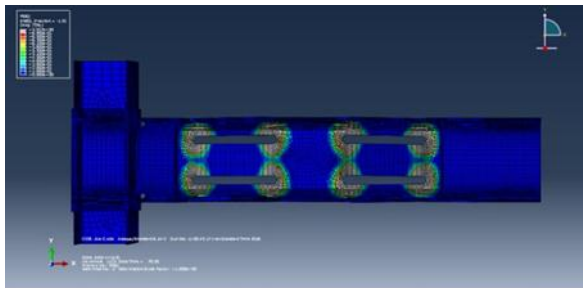
ظرفیت برشی تعیین شده برای اتصال و تیر طبق آیین‌نامه برای این تحقیق معادل ۱۰۹ kips معادل ۴۸۴ kN می‌باشد. ظرفیت خمشی پلاستیک مقطع نیز معادل $4/077e8$ N.mm می‌باشد.

جدول (۲) تغییرات سختی و نیروی برشی موجود در سیستم در لحظه دوران ۲ درصد را در بر اتصال نشان می‌دهد.

جدول ۲- تغییرات M ، K و V در لحظه ۰/۰۲ رادیان

نمونه	K (kN/mm)	V (kN)	M (kN.m)
SP21	۲۷/۷	۴۸۳/۴	۴۱۷
SP23	۲۵/۲	۴۲۲/۸	۳۵۳
SP25	۲۱/۵	۳۲۶/۸	۲۷۱
SP41	۲۶/۷	۴۴۰/۹۷	۳۸۸
SP43	۲۳/۶	۳۶۶/۸	۳۰۷
SP45	۱۹/۴۶	۲۸۹/۲	۲۴۱
SP61	۲۵/۹	۴۲۹/۹	۳۸۲
SP63	۲۲/۴۵	۳۵۲/۵	۳۰۵
SP65	۱۷/۱۸	۲۶۹/۴	۲۲۵
SP81	۲۵/۹۶	۴۳۲/۶	۳۸۵
SP83	۲۲/۶۱	۳۸۱/۹۹	۳۳۷
SP85	۱۸/۳	۲۸۴/۷	۲۳۷

همانگونه که ملاحظه می‌گردد تقریباً تمامی نمونه‌ها تا قبل



شکل ۱۳- توزیع مفاصل پلاستیک در طول تیر

کمانشی ملاحظه نشد، اما بال‌های تیر مقداری کمانش موضعی نشان دادند. تحلیل‌ها در لحظه‌های دوران بیش از $0/02$ رادیان اگر چه در بر اتصال کرنش پلاستیک قابل ملاحظه‌ای را نشان ندادند اما جان تیر دچار کمانش‌های موضعی محسوسی گردید، هر چند که این کمانش‌ها جزء مودهای گسیختگی نسبتاً شکل پذیر محسوب می‌شود و از طرفی نیاز چرخشی اتصال در $0/02$ رادیان تأمین می‌گردد.

۵-۵- طراحی بهینه تیر پیوند

ظرفیت برشی و خمشی مورد انتظار برای لینک موجود در لحظه دوران $0/02$ رادیان برای تمام نمونه‌ها کمتر و یا نزدیک به ظرفیت اسمی لینک می‌باشد که نشان دهنده صحت طرح اولیه تیر پیوند است.

همچنین ظرفیت‌های برشی و خمشی ایجاد شده در لحظه دوران مطلوب (به جز نمونه SP21) در بر اتصال قریب به 80% درصد ظرفیت خمشی و برشی تیر رسیده و این موضوع نشان می‌دهد که اتصال تا قبل از رسیدن لینک به ظرفیت خمشی حداکثر دچار شکست نگردیده است. فلذا از آنجایی که نیروی طراحی بادبند - تیر خارج پیوند - خود اتصال و ستون تابعی از تیر پیوند می‌باشند، طراحی بهینه‌تری برای اعضای مزبور و کاهش وزن سازه به دنبال خواهد داشت.

۵-۶- تغییر ممان خمشی و نیروی برشی بر اتصال با افزایش طول سوراخ

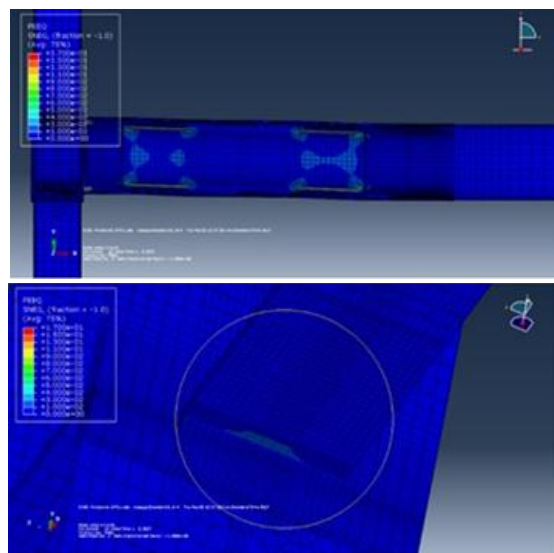
همانگونه که در شکل (۱۴) و (۱۵) مشاهده می‌گردد نیروی برشی و ممان خمشی بر اتصال با افزایش طول سوراخ کاهش می‌یابد که این مهم باعث امکان طراحی بهینه برای مجموعه اتصال و اعضای وابسته خواهد شد.

لازم به ذکر است که تغییر پارامتر b تغییرات محسوسی در نیروی برشی و ممان خمشی بر اتصال ایجاد نکرد اما افزایش b و L_v بعضاً باعث کاهش ناچیز سختی می‌گردد که به دلیل

از رسیدن تیر به ظرفیت برشی و لنگر خمشی مورد انتظار، بدون شکست (بر اساس معیار شکست مطرح شده) زاویه دوران $0/02$ رادیان را گذرانده و ظرفیت شکل پذیری مورد نظر را تأمین می‌کنند.

۵-۳- کرنش‌های پلاستیک

همانگونه که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود کرنش‌های پلاستیک بر اتصال تقریباً برای تمام نمونه‌ها بر اساس معیار شکست تعریف شده در دوران پلاستیک $0/02$ رادیان، ناچیز می‌باشد. هر چند با افزایش طول سوراخ‌ها کرنش‌های پلاستیک در بر ستون کمتر و مفصل پلاستیک نیز در بر سوراخ‌ها توزیع بهتری می‌یابد، اما با کاهش b کرنش‌های بر اتصال افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲- کرنش‌های پلاستیک به اتصال در $0/02$ رادیان

توزیع مفاصل پلاستیک به جای یک نقطه در چندین نقطه و در طول تیر انجام شده است و این موضوع امکان استفاده از ظرفیت برشی تیر را در طول آن فراهم می‌آورد. همچنین کلیه نمونه‌های ارزیابی به خوبی دوران پلاستیک مورد نیاز آیین‌نامه را گذرانده اند ($0/02$ رادیان) و این موضوع ظرفیت شکل پذیری بسیار خوبی را برای اتصال مهیا می‌سازد.

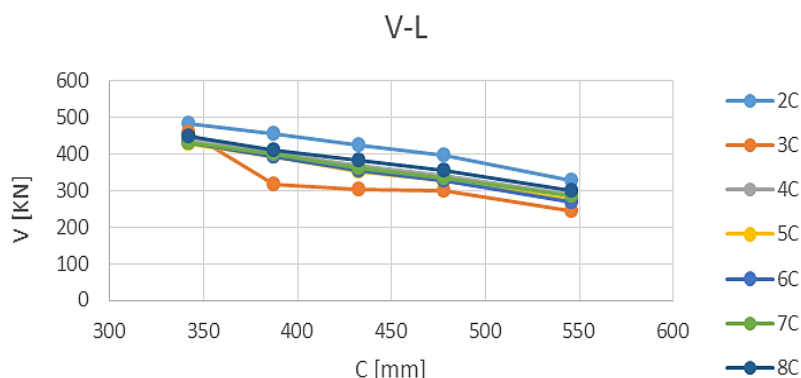
تشکیل مفاصل پلاستیک در بر سوراخ‌ها باعث دور شدن مقطع بحرانی از بر اتصال و همچنین افزایش ظرفیت لینک در محل اتصال تیر پیوند به ستون گردید (شکل (۱۳)).

۵-۴- کمانش‌های موضعی

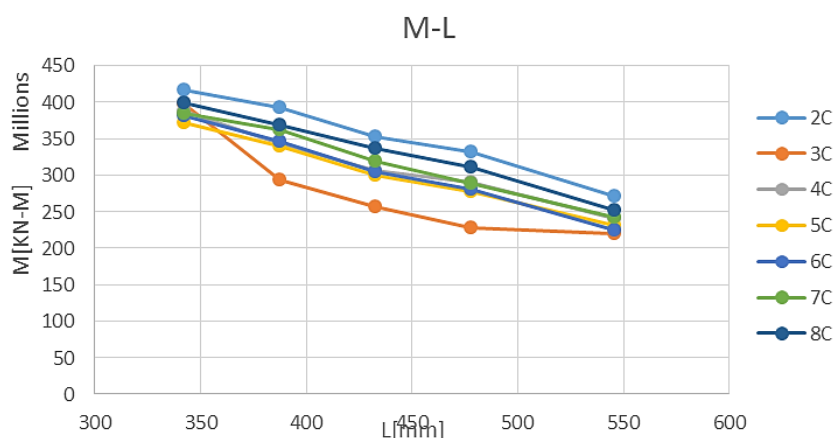
در لحظه دوران $0/02$ رادیان در اطراف سوراخ‌ها یا جان تیر



حضور بادبند در قاب در حالت کلی اثر گذار نخواهد بود.



شکل ۱۴- توزیع مفاصل پلاستیک در طول تیر



شکل ۱۵- توزیع مفاصل پلاستیک در طول تیر

۶- نتیجه گیری

برای جلوگیری از شکست ترد در محل اتصال تیر به ستون مطالعات گسترده‌ای صورت پذیرفته است و به دنبال آن روش‌هایی نیز پیشنهاد شده است. دسته اول شامل روش‌هایی جهت تقویت اتصال تیر به ستون و کاهش تمرکز تنش در آن بوده و در دسته دوم راه کارهایی جهت انتقال محل تسلیم تیرها از ناحیه اتصال تیر به ستون، به داخل تیر پیشنهاد شده است. در روش دوم به جهت تشکیل مفصل پلاستیک در فاصله معینی در داخل تیر، مقطع تیر در آن ناحیه باید کاهش داده شود. این کاهش در مقطع می‌تواند در بال یا جان رخ دهد. در این پژوهش نمونه‌هایی با اتصال RBW بازشو در جان به صورت مستطیلی مدل سازی و رفتار آنها با نرم افزار ABAQUS مدل سازی و مورد بررسی قرار گرفته است.

همچنین با استفاده از روش تخمین کمترین مربعات، رابطه ریاضی بین نیروی برشی (V_{ph}) و ممان خمشی (M_{ph}) بر سوراخ‌ها با b و L_v به صورت زیر تعیین گردید.

$$V_{ph} = 250.74 \times L_v^{-0.972} \times b^{-0.036} \times V_{pbr}, \quad (2)$$

$$M_{ph} = 619.8 \times L_v^{-1.08} \times b^{-0.028} \times M_{pbr}$$

در روابط فوق V_{pbr} و M_{pbr} به ترتیب نیروی برشی پلاستیک و ممان پلاستیک بر سوراخ‌ها می‌باشند.

از آنجایی که نیروهای طراحی سایر المان‌های متصل به تیر پیوند، تابعی از نیروهای به وجود آمده در آن می‌باشد لذا تشکیل مفاصل پلاستیک در لینک باعث می‌گردد ضمن اینکه خود، سهم بیشتری از نیروی زلزله را جذب نماید سهم انتقالی به سایر اعضا (طبق محاسبات) تا ۲۰ درصد کاهش یابد و این مهم سبب عملکرد ایمن تر سایر اعضا می‌گردد.

طول تیر مفاصل پلاستیک ایجاد شده در این نواحی باعث تسلیم برشی تیر می‌گردد که نسبت به تسلیم خمشی شکل پذیری بهتر و بالاتری دارد و این مزیت به طور مشخص ایده RBW را نسبت به سایر اتصالات پیشنهاد شده از این جهت متمایز می‌گرداند.

■ کمترین نیروی برشی و ممان خمشی در $b = 5C$ و بهینه‌ترین حالت برای طول سوراخ‌ها با لحاظ سختی کاهش یافته در $1D$ مشاهده گردید. لذا مناسب‌ترین نمونه، نمونه SP51 پیشنهاد می‌گردد.

برای مطالعات آتی موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

۱- هر چند استفاده از تیرهای RBW منجر به حصول دوران غیر الاستیک مورد نیاز آیین‌نامه و همچنین دور کردن مفصل پلاستیک از بر اتصال شد اما کاهش سختی ایجاد شده در مجموعه لینک می‌تواند به عنوان یک موضوع تحقیقاتی جدید به منظور بررسی رفتار کلی این ایده در یک قاب ساختمانی مورد مطالعه قرار گیرد.

۲- نتایج حاصل از این تحقیق پایه و اساس تئوریک داشته و این نیاز احساس می‌گردد که گزینه ساخت مدل آزمایشگاهی این ایده به منظور تطابق نتایج تئوری و عملی در برنامه‌های بعدی تحقیقاتی قرار گیرد.

۳- همچنین می‌توان مشارکت تیر خارج از پیوند را به عنوان عنصری برای جذب بیشتر نیروی زلزله و بهبود رفتار اتصال تیر به ستون مورد مطالعه قرار داد.

۷- مراجع

- [1] American Institute of Steel Construction (AISC), (2016), Seismic provisions for structural steel building, Chicago.
- [2] Okazaki, T. (2004), "Seismic performance of link-to-column connections in steel eccentrically braced frames", The University of Texas.
- [3] Malley, J.O. and Popov, E.P. (1984), "Shear links in eccentrically braced frames", Journal of Structural Engineering, Vol. 110, pp. 2275-2295.
- [4] Engelhardt, M.D. and Popov, E.P. (1999), "On design of eccentrically braced frames", Earthquake spectra EERI, Vol. 5, pp. 495-511.
- [5] Tsai, K.C., Engelhardt, M.D., and Nakashima, M. (2000), "Cyclic performance of link to-box column connections in steel eccentrically braced frames", The First International Conference on Structural Stability and Dynamics, Taipei, Taiwan.
- [6] Richards, P. and Uang, C.-M. (2004), "Development of testing protocol for links in eccentrically braced frames", The Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.
- [7] Okazaki, T., Engelhardt, M.D., Drolas, A., Schell, E., Hong, J.-K. and Uang, C.-M. (2009), "Experimental investigation of

به این منظور ۳۵ نمونه، با قطر ۲۰ میلیمتر و طولهای $0.8D$ تا $1.25D$ تحت بارگذاری سیکلیک قرار گرفتند، خلاصه نتایج بدست آمده از ارزیابی این مدل‌ها عبارتند از:

■ حضور تیر پیوند مطابق طرح پیشنهادی، می‌تواند تسلیم شدگی در بر ستون را به تاخیر بباندازد. مشاهدات نشان داد که تیر با جان کاهش یافته توانایی بسیار مطلوبی در دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون را دارد. همچنین کرنش‌های پلاستیک در بر اتصال (بر اساس معیار تعریف شده) در غالب نمونه‌ها با تقریب بسیار خوبی برابر صفر است، و این موضوع نشان می‌دهد که هدف طراحی به خوبی برآورد شده و اتصال نیز به خوبی عمل می‌کند.

■ تمامی نمونه‌ها زاویه دوران پلاستیک مورد نیاز آیین‌نامه (0.02 رادیان) را به خوبی تامین می‌کنند و این موضوع بیانگر ظرفیت بالای شکل پذیری تیرهای پیوند متصل به ستون با ایده RBW است.

■ نیروی برشی و ممان خمشی بر اتصال (به جز نمونه SP21)، در لحظه دوران 0.02 رادیان نسبت به مقادیر تعریف شده آیین‌نامه ای تا ۲۰ درصد کمتر می‌باشد و این موضوع می‌تواند باعث طرح بهینه بادبند، تیر خارج پیوند و ستون که وابسته نیرویی به لینک می‌باشند، گردد.

■ شکل بازشوهای مستطیلی بلند ایجاد شده در جان باعث توزیع مفاصل پلاستیک در طول تیر (طول سوراخ‌های ایجاد شده) و استفاده حداکثری از ظرفیت‌های پلاستیک تیر و همچنین کاهش نیروهای ورودی به اتصال می‌گردد.

■ مطالعات پارامتریک نشان می‌دهد که افزایش طول بازشوهای ایجاد شده تا $1D$ کرنش‌های پلاستیک در بر اتصال را کاهش می‌دهد، افزایش فاصله b نیز باعث کاهش کرنش‌ها و احتمال شکست ترد در بر اتصال می‌گردد اما افزایش قطر سوراخ تا حداکثر مجاز تقریباً تغییر قابل توجهی در کرنش‌های ایجاد شده در نمونه‌های مشابه نشان نداده است.

■ این ایده می‌تواند گزینه مناسبی برای مقاوم سازی ساختمان‌ها در برابر زلزله و اصلاح اتصالات معمول گیردار تیر به ستون باشد. از آنجایی که معمولاً بال بالایی تیر در دال بتنی کف قرار دارد و تنها بال پایینی تیر در دسترس می‌باشد، RBW سهولت اجرایی بیشتری را نسبت به اتصالات استخوانی یا تقویت شده ایجاد می‌نماید.

■ به علت حضور سوراخ‌های ایجاد شده در ناحیه جان در



- "Behavior of steel reduced beam web (RBW) connections with archshape cut", *Advances in Structural Engineering*, Vol. 16, pp. 1645-1662.
- [11] Hedayat, A.A., Saffari, H. and Hadi, A. (2015), "Ductility of post-Northridge connections with Angelina beams", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, Vol. 169, pp. 184-209.
- [12] Hedayat, A.A. and Çelikağ, M. (2011), "Reduced beam web (RBW) connections with circular openings", *Structural Steel: Shapes and Standards, Properties and Applications*, Editor: Becker, L.M., 2011, Nova Science Publishers, Inc., pp. 1-56.
- link-to-column connections in eccentrically braced frames", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, pp. 1401-1412,
- [8] Berman, J.W., Okazaki, T. and Hauksdottir, H.O. (2010), "Reduced link sections for improving the ductility of eccentrically braced frame link-to-column connections", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 136, pp. 543-553.
- [9] Hedayat, A.A. and Celikag, M. (2009), "Post-Northridge connection with modified beam end configuration to enhance strength and ductility", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, pp. 1413-1430.
- [10] Hedayat, A.A., Saffari, H. and Mousavi, M. (2013),

پی نوشت

- ¹ Reduce beam section
- ² Reduce beam web
- ³ Modified welding moment