



ارزیابی الزامات لرزه‌ای اتصال گیردار براکت پیش ساخته پیچ و مهره‌ای

حامد نعمتی^۱، محمد سهیل قبادی^{۲*}

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

۲- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

* قزوین، صندوق پستی ۱۶۸۱۸-۳۴۱۴۹، msgghobadi@eng.ikiu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۱۳)

چکیده

در ایران استفاده از اتصالات جوشی بسیار متداول است. این اتصالات در صورت اجرای نامناسب دچار گسیختگی سریع تردشکن می‌گردند. در این تحقیق اتصال جدید پیچ و مهره‌ای ارزیابی شده است که بر مبنای اتصالات پیچ و مهره‌ای کایزر معرفی شده است. اتصال از پیش تأیید شده کایزر توسط مخترع آن ثبت اختراع شده است و کاربرد بدون اجازه آن می‌تواند ممنوع باشد. اتصال معرفی شده در این مقاله قابلیت ساخت به صورت ریخته‌گری دارد و می‌تواند پایانی برای مشکلات اجرایی ساخت اتصالات در کارگاه باشد. رفتار این اتصال از نظر نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها، ضخامت براکت مورداستفاده، تعداد پیچ‌ها و پهنای براکت به صورت عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در تحلیل اتصال برای دستیابی به دقت بالا سطوح مختلف ورق‌های اتصال و پیچ و مهره‌ها با سطوح تماس و ضریب اصطکاک مشخص مدل‌سازی شده‌اند. بارگذاری چرخه‌ای حوزه دور استاندارد مبنای بارگذاری نمونه‌ها بوده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که اتصال جدید ارائه‌شده می‌تواند الزامات لرزه‌ای شکل‌پذیر ویژه را از نظر مقاومت و شکل‌پذیری ارضاء نماید. نتایج بر اساس منحنی‌های هیستریزیس، منحنی‌های انرژی آزادشده تجمعی و شاخص‌های شکست ماده و لغزش پیچ‌ها بسط داده شده است.

واژگان کلیدی

اتصال گیردار، مدل‌سازی اتصال اصطکاکی، بارگذاری چرخه‌ای، براکت‌های پیش‌ساخته، نمودار هیستریزیس

Seismic Performance of Bolted Bracket Moment Resisting Connections

H. Nemati, M.S. Ghobadi

Abstract

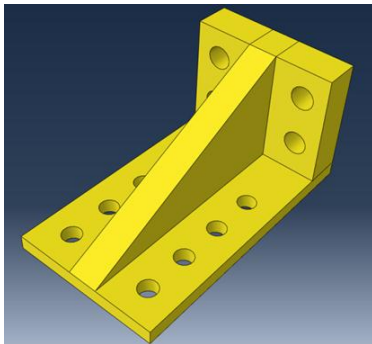
Construction of welded moment resisting connection is common. These connections have high potential for brittle failure of welds if quality of welding is not controlled. In this research new bolted bracket connection similar to Kaiser bolted bracket connection is introduced. Kaiser connection has invention patent so construction society can't utilize them without authority. Proposed connection of this paper can be manufactured by both casting and welding methods and can eliminate patent problems. In this evaluation connection performance, pretension force of bolts, height of bracket, number of bolts and length of bracket have been evaluated. In modeling of connection in order to accuracy of results between different connected area and bolts faces contact elements were created. The standard cyclic history was selected for loading of specimens. The results shows that proposed connection can be accepted by connection code for using in special moment resisting frames from both ductility and strength aspects. Findings are extended as hysteresis curves, released energy of connection, rupture index indicators and slip of bolts.

Keywords

Moment resisting connection, Slip-critical bolt modeling, Cyclic loading, Pre-fabricated bracket, Hysteresis curves



لازم به ذکر است که در اکثر مطالعات پیشین، اتصال جوشی به نحوی در اتصالات به کار برده شده است. مسئله ترد شکنی بعد از وقوع زلزله نورث ریج در آمریکا و به دنبال آن در زلزله کوبه ژاپن به طور جدی مطرح گردید. تا قبل از وقوع زلزله نورث ریج، طراحان سازه های فولادی بر این باور بودند که قاب های خمشی فولادی در مقابل حرکت زلزله آسیب ناپذیر می باشد و چنانچه آسیبی بیند این آسیب محدود به تسلیم شکل پذیر در اعضای اتصال خواهد بود [۷ و ۸]. اما وقوع زلزله نورث ریج این باور را زیر سؤال برد. سازه های بسیاری در این زلزله در نواحی اتصال تیر و ستون دچار شکست ترد شدند. این شکست ها در بسیاری از موارد برای سطوح بسیار پایین تغییر شکل غیر ارتجاعی و حتی در برخی از موارد برای سطوح ارتجاعی گزارش شده بود. به همین علت هدف اصلی این مقاله مطالعه روی یک اتصال پیچ و مهره ای گیردار می باشد که از جوش کارگاهی بین تیر و ستون در ساخت آن استفاده نشده باشد و با تضمین کیفیت ساخته شده باشد. نمای قطعه اتصال گیردار بین تیر و ستون در شکل (۱) دیده می شود.

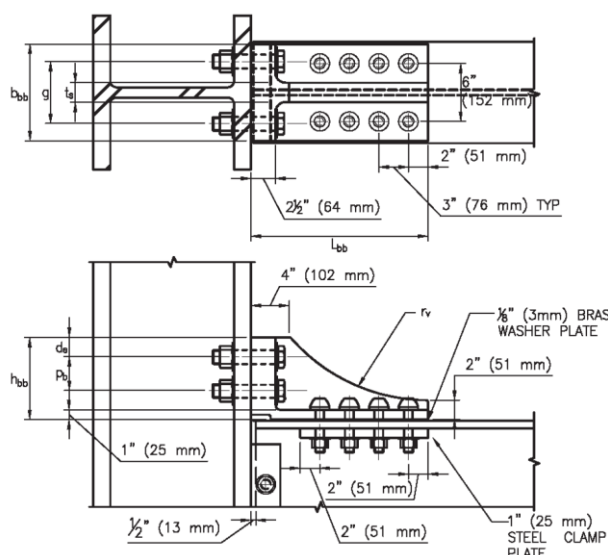


شکل ۱- قطعه اتصال گیردار پیش ساخته پیشنهاد شده در این مقاله

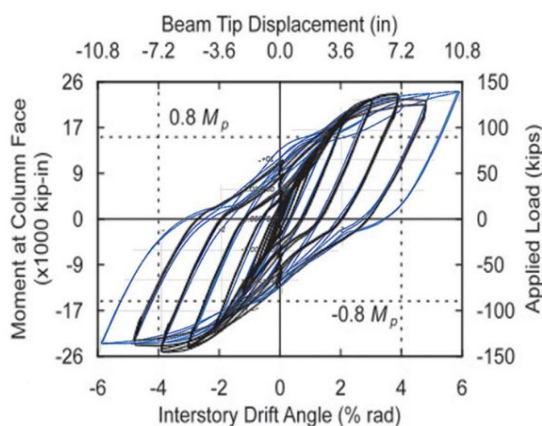
برای انجام این تحقیق از نتایج مدل آزمایشگاهی آزمایش وایلی به منظور اعتبارسنجی استفاده شده است [۶]. اعتبارسنجی توسط نرم افزار ABAQUS/CAE 6.13-1 [۱۲] انجام شده است. هرچقدر نتایج مدل نرم افزاری با مدل آزمایشگاهی تطابق بیشتری داشته باشد می توان به دقت روش المان محدود بیشتر اعتماد نمود [۹]. اختلاف اصلی اتصال پیشنهاد شده و اتصال کایزر در قوس ضلع افقی و عمودی برکت می باشد که آن ها را متمایز می نماید و می تواند به جای اتصال کایزر استفاده شود و مشکل ثبت اختراع آن را نداشته باشد. در واقع این تحقیق پاسخ می دهد آیا اتصال کایزر بدون داشتن قوس برکت آن می تواند عملکرد لرزه ای مطلوبی داشته باشد؟ مطالعات نشان داده است

در طراحی ایده آل اتصالات گیردار قاب های خمشی فولادی، نقش تشکیل مفصل پلاستیک پایدار انکارناپذیر است. همواره تلاش بر این است که طراحی به گونه ای باشد که حین زلزله، مفصل پلاستیک در تیر به موقع تشکیل شود. برای پی بردن به وقوع مفصل پلاستیک و محل تشکیل آن دو روش وجود دارد. اولی استفاده از آزمایش های تمام مقیاس و دیگری استفاده از نرم افزار المان محدود می باشد. زمان و محل تشکیل مفصل پلاستیک به عوامل متعددی وابسته است [۱ و ۲].

Shi و همکارانش [۳] در آزمایش بر روی اتصال با ورق انتهایی تحت بارگذاری پوش آور دریافتند که سخت کننده ی ورق انتهایی و سخت کننده بال ستون نقش حیاتی در رفتار اتصال دارند، این سخت کننده های ورق انتهایی همراه با ورق پیوستگی جان ستون باعث تغییر مد شکست اتصال می شوند. همچنین دریافتند که استفاده از سخت کننده ادامه دار (Extended stiffeners) می تواند باعث افزایش ظرفیت اتلاف انرژی شود و این سخت کننده مانع از تشکیل پلاستیسیته در ناحیه ی انتهای تیر می شود. Seradj و همکارانش [۴] بر روی هشت نمونه اتصال تیر و ستون با ورق انتهایی تحت بارگذاری لرزه ای آزمایش هایی را انجام دادند. نتایج آزمایش ها آشکار ساخت که گیردار یا نیمه گیردار بودن اتصال به ضخامت ورق انتهایی و قطر پیچ ها وابسته است. همچنین اتصالات با ورق انتهایی کوچک تر و پیچ های پهن تر می تواند منجر به اتصال نیمه گیردار شود و تعبیه سخت کننده بیرونی باعث افزایش مقاومت خمشی اتصال و بالا رفتن ظرفیت اتلاف انرژی می شود. آزمایش هایی در دانشگاه لیث [۵] با هدف توسعه اتصال و کاهش هزینه ها با استفاده از اتصال پیچی صورت پذیرفت و هدف اصلی آن احیای اتصالات آسیب دیده زلزله نورث ریج و ایجاد شرایط گیرداری اولیه است. طرح بهسازی بر روی هشت آزمایش صورت پذیرفت. نتایج نشانگر آن بود که استفاده از سخت کننده های ویژه باعث افزایش چشمگیر شکل پذیری خواهد شد و همچنین برکت های پیچی توان بهسازی اتصالات آسیب دیده را دارند و عملکردی قابل قبول در برابر زلزله های آتی خواهند داشت. حضور واشر بین برکت و تیر در حصول نتایج با کیفیت، آن چنان ضروری نیست ولی حضور آن ها به خصوص واشرهای میانی جهت شکل پذیری بهتر و جلوگیری از شکست اتصال مهم است. این مطالعه یکی از پایه های ایده ساخت برکت کایزر می باشد [۶].



شکل ۳- پارامتر بندی ابعادی براکت [۶]



شکل ۴- منحنی هیستریزس مدل آزمایشگاهی [۶] و نمونه نرم‌افزاری جهت اعتبارسنجی مطالعات عددی

مورد استفاده قرار گرفته است و هر دو براکت دارای ابعادی یکسان هستند.

بر طبق جدول (۳)، در شش PRCOL، ابعاد براکت مشابه مدل اصلی بوده و تنها اختلاف بر میزان نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها می‌باشد. در دو مدل BH1 و BH2 مقدار ارتفاع براکت ۳۰٪ اضافه و کم شده است. در دو مدل BL1 و BL2 نیز مقدار طول براکت ۳۰٪ اضافه و کاسته شده است؛ این تغییر طول مستقل از تعداد پیچ‌ها اعمال شده است تا رفتار براکت به طور مجزا مورد مطالعه قرار گیرد. در مدل BN6 از ۶ پیچ با قطر ۳۴ میلی‌متر و در مدل BN10 از ۱۰ پیچ با قطر ۲۴ میلی‌متر در اتصال براکت و بال تیر استفاده شده است. لازم به ذکر است که در تمام انواع براکت، قوس براکت به خط صاف تبدیل شده است.

۳- طراحی و معرفی نمونه‌های انتخاب‌شده

دوازده نمونه برای مطالعه انتخاب شده‌اند. جهت طراحی نمونه مورد مطالعه از ضوابط طراحی اتصال کایزر استفاده شده است. ضوابط طراحی مذکور در آیین‌نامه اتصالات از پیش تأیید شده آمریکا [۱۰ و ۱۱] وجود دارد. برای تحقیق بیشتر یکی از پارامترهای مهم طراحی در آن تغییر یافته تا رفتار اتصال در نمونه‌های بیشتری بررسی گردد. در این نمونه‌ها طول براکت، ارتفاع براکت، نیروی پیش‌تنیدگی پیچ تیر، نیروی پیش‌تنیدگی پیچ ستون، تعداد پیچ بال تیر مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در جدول (۳) ویژگی‌های ابعادی انواع مدل‌ها آورده شده است. مقادیر جدول (۳) جهت ساخت هر دو براکت فوقانی و تحتانی

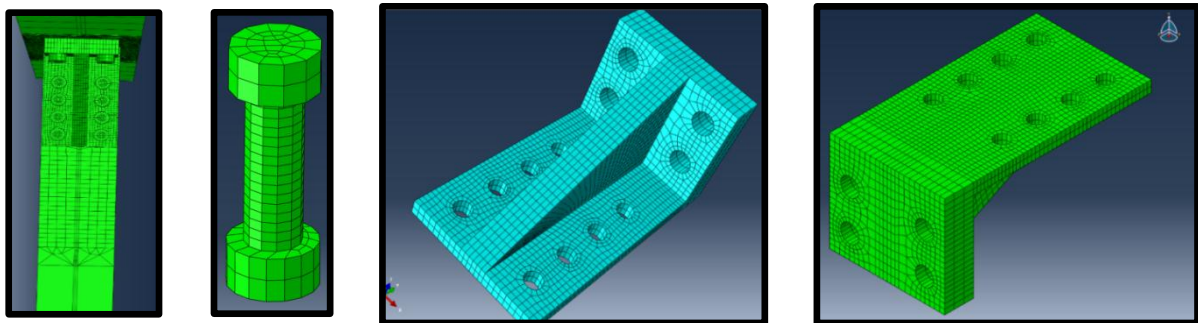
۳-۱- نحوه مش بندی

و محدوده‌ی اطراف براکت در تیر و همچنین اطراف سوراخ‌ها مش بندی ریزتری دارند. سایر نقاط که در تحلیل الاستیک می‌ماند مش بندی درشت انتخاب شده تا زمان محاسبات کاهش یابد [۹ و ۱۲].

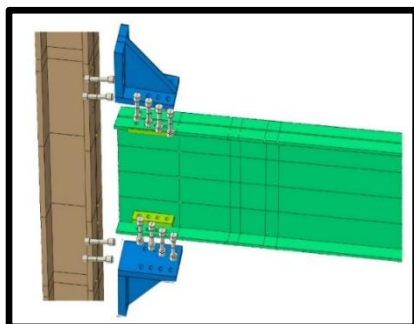
مطابق اشکال (۵)، (۶) و (۷)، المان بندی مدل سه بعدی از نوع ۸ وجهی C3D8R با انتگرال کاهش یافته می‌باشد. محدوده تشکیل مفصل پلاستیک، نزدیک به چشمه اتصال در ستون

جدول ۳- مشخصات مدل‌های نرم‌افزاری (ابعاد برحسب میلی متر و کیلو نیوتن می‌باشد).

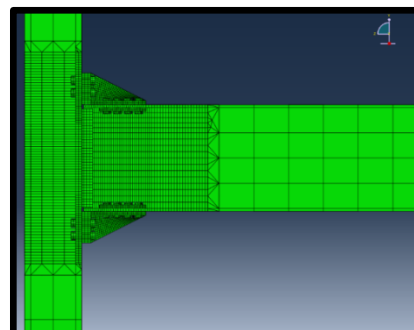
نام مدل	تعداد پیچ بال تیر	تعداد پیچ بال ستون	نیروی پیش‌تنیدگی پیچ تیر	نیروی پیش‌تنیدگی پیچ ستون	ارتفاع براکت	طول براکت	عرض براکت	قطر پیچ تیر	ضخامت سخت کننده‌ی براکت
PRCOL1	۸	۴	۱۵۰	۲۵۰	۲۲۲	۴۵۷	۲۵۴	۲۹	۲۵
PRCOL2	۸	۴	۲۵۰	۲۵۰	۲۲۲	۴۵۷	۲۵۴	۲۹	۲۵
PRCOL3	۸	۴	۲۵۰	۳۵۰	۲۲۲	۴۵۷	۲۵۴	۲۹	۲۵
PRCOL4	۸	۴	۳۵۰	۳۵۰	۲۲۲	۴۵۷	۲۵۴	۲۹	۲۵
PRCOL5	۸	۴	۳۵۰	۴۵۰	۲۲۲	۴۵۷	۲۵۴	۲۹	۲۵
PRCOL6	۸	۴	۳۵۰	۵۵۰	۲۲۲	۴۵۷	۲۵۴	۲۹	۲۵
BH1	۸	۴	۳۵۰	۳۵۰	۲۸۵	۴۵۷	۲۵۴	۲۹	۲۵
BH2	۸	۴	۳۵۰	۳۵۰	۱۵۵	۴۵۷	۲۵۴	۲۹	۲۵
BL1	۸	۴	۳۵۰	۵۵۰	۲۲۲	۵۷۷	۲۵۴	۲۹	۲۵
BL2	۸	۴	۳۵۰	۵۵۰	۲۲۲	۳۳۷	۲۵۴	۲۹	۲۵
BN6	۶	۴	۴۵۰	۵۵۰	۲۲۲	۴۵۸	۲۵۴	۳۴	۲۵
BN10	۱۰	۴	۲۵۰	۵۵۰	۲۲۲	۴۵۸	۲۵۴	۲۴	۲۵



شکل ۵- نمایشی از مش بندی براکت و پیچ و مهره اتصال



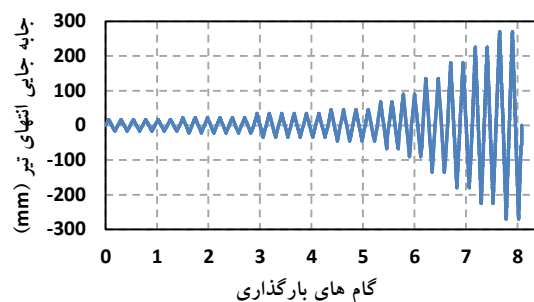
شکل ۷- نحوه مونتاژ مدل



شکل ۶- نمایشی از مش بندی کلی مدل

۲-۳- بارگذاری

در مدل نرم‌افزاری دو مرحله بارگذاری ایجاد شده است. اولی بارگذاری پیش‌تندگی ابتدایی پیچ‌ها و تعادل مدل می‌باشد. سپس در مرحله بعدی بارگذاری چرخه‌ای مطابق ضمیمه آیین‌نامه AISC [۱۰] اعمال شده است. در شکل (۸) تاریخچه بارگذاری نشان داده شده است.



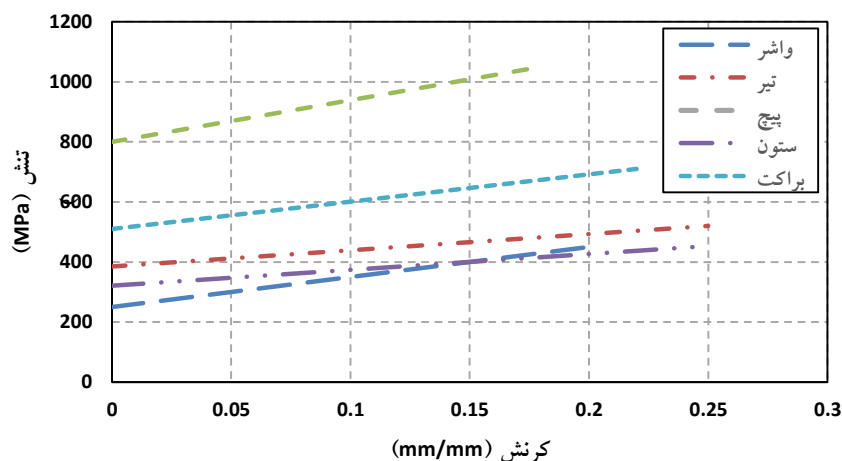
شکل ۸- تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای اعمال شده

۳-۳- مشخصات مصالح و جزئیات مدل‌سازی نمونه‌ها

تمامی اجزای مدل نرم‌افزاری از نوع تغییر شکل‌پذیر و سه‌بعدی می‌باشد. نرم‌افزار چون واحد ندارد، تمامی ابعاد و نیروها بر اساس یکسری واحدهای مرجع بایستی وارد شوند و نتایج نیز پیرو واحدهای انتخابی می‌باشد. در قسمت ویژگی‌های

الاستیک نسبت پواسون $0/3$ مدول یانگ 210000 نیوتون بر میلی‌متر مربع و نوع آن همسان (isotropic) انتخاب می‌شود. در قسمت پلاستیک نیز نحوه سخت‌شدگی از نوع همسان (isotropic) انتخاب شده است. در قسمت داده‌های پلاستیسیته از منحنی دوخطی تنش - کرنش در حوزه پلاستیک و الاستیک استفاده شده است. در این پروژه به دلیل عدم وابستگی نتایج به جرم، نیازی به وارد کردن چگالی نیست ولیکن مقدار آن معرفی شده است.

Popov و همکارانش برای شبیه‌سازی تغییر شکل پلاستیک معیار سخت‌شدگی همسان چندخطی را تحت بارگذاری چرخه‌ای بسیار مناسب می‌دانند [۹]. همچنین Yang و همکارانش نیز همین معیار را جهت ارزیابی رفتار چرخه‌ای اتصال، با نبشی دویل در مدل المان محدود، استفاده نموده است [۱۳]. در شکل (۹) رفتار غیرخطی مصالح به‌کاررفته شده نشان داده شده است [۶]. در مشخصات مربوط به برکت و پیچ که از آلیاژ پر مقاومت استفاده شده است مقدار کشیدگی کمتر از سایر اجزا است و تردتر هستند که این مورد در مدل‌سازی آباکوس لحاظ شده است. با توجه به این‌که فولاد پیچ و برکت از نوع خشکه هستند، پس دارای کشیدگی‌های به مراتب کمتری از فولاد تیر و ستون می‌باشند که در آباکوس توجه شده است و در خروجی نرم‌افزار دقت شده است تنش آن از حد تنش نهایی فراتر نرود.



شکل ۹- مشخصات مصالح

۴-۳- چگونگی استفاده از المان‌های تماس

با توجه به شکل (۱۰) در قسمت درهم‌کنش نرم‌افزار بین سطوح ذیل تماس از نوع صفحه به صفحه برقرار شد:

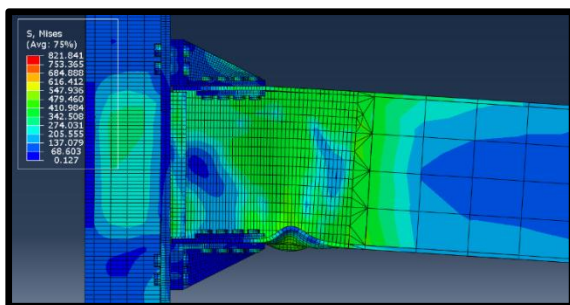
۱. بین قسمت زیرین پیچ‌های تیر و ستون و سطح رویی قطعه برکت
۲. بین قسمت زیرین پیچ‌های تیر و ورق کلمپ



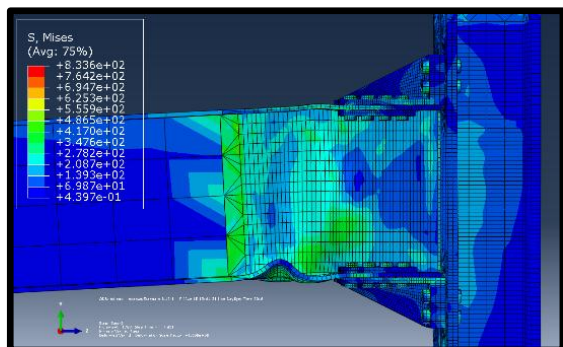
انتخاب شود. گزینه اجازه جدا شدن اتصال بعد از تماس نیز بایستی فعال شود. این مشخصه تماس بایستی برای تمامی سطوح تماسی انتخاب شود، به جز قسمت تماس بین جداره پیچ و جداره داخلی سوراخ، به این دلیل که این مشخصه بایستی در مواردی بکار گرفته شود که دو سطح تماس از ابتدا تحت فشار و نیروی پیش‌تیدگی قرار گرفته باشند. تنها تفاوت این قسمت از تماس، عدم انتخاب گزینه‌ی *behavior normal* است. زیرا اتصال به صورت *hard contact* اعمال نمی‌شود و بین جداره پیچ و سوراخ فاصله وجود دارد.

۳-۵- نتایج تحلیل‌های عددی

در شکل (۱۱) و (۱۲) نمای تغییرشکل یافته مدل PRCOL4 به عنوان نمونه آورده شده است. در این شکل کانتور تنش‌های فون میسز، کماتش‌های موضعی، مکانیزم تشکیل مفصل پلاستیک و وضعیت توزیع تنش براکت و پیچ‌ها ملاحظه می‌گردد. در شکل (۱۳) نحوه‌ی کماتش موضعی و جانبی پیچشی بال تیر از نمای فوقانی در دوران ۶٪ نشان داده شده است.

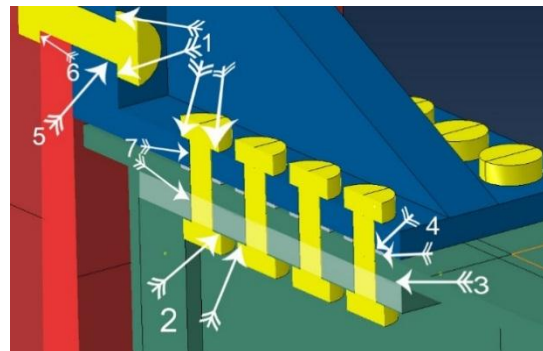


شکل ۱۱- توزیع تنش فون میسز نمونه PRCOL4 و نمای تغییرشکل یافته آن



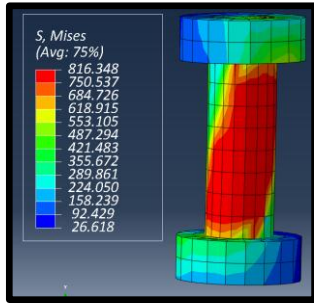
شکل ۱۲- نمای کماتش موضعی بال تیر و کماتش جانبی پیچشی تیر در دوران بیشینه ۶٪ و توزیع تنش‌های فون میسز متناظر

۳. بین ورق کلمپ^۱ و بال داخلی تیر
۴. بین دو سطح فوقانی و تحتانی و اشرف با سطح فوقانی بال تیر و سطح تحتانی براکت
۵. بین پیچ ستون و سطح کناری براکت
۶. بین سطح داخلی بال ستون و پیچ ستون
۷. این سطح بیرونی بال ستون و قسمت بیرونی کناری براکت
۸. بین قسمت تحتانی براکت و قسمت فوقانی بال تیر
۹. بین سطح بیرونی بدنه پیچ‌ها و سطح داخلی سوراخ‌ها

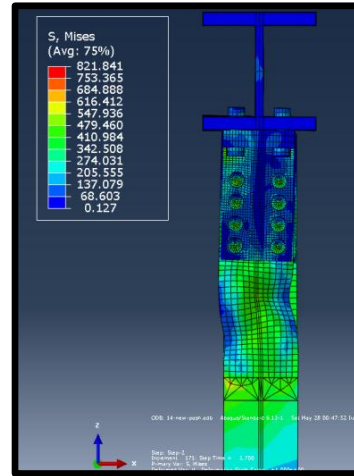


شکل ۱۰- سطوح تماس‌های در نظر گرفته شده در نرم‌افزار

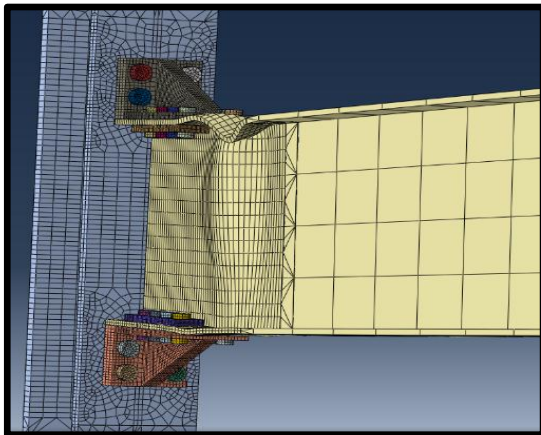
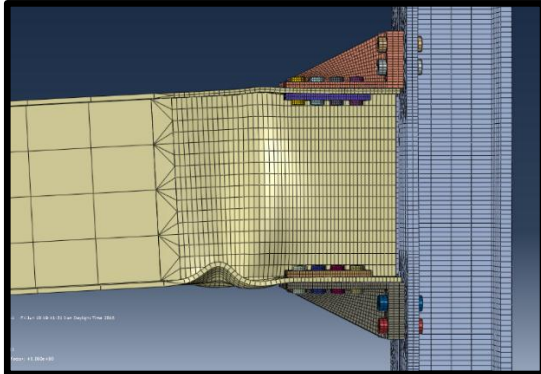
این تماس‌ها جهت حصول نتایج دقیق از نوع صفحه به صفحه انتخاب شده است و همین امر باعث بالا رفتن زمان محاسبات گردید. شرایط اتصال تماس اجازه‌ی نفوذ بین سطوح *master* و *slave* را نمی‌دهد ولیکن بین این سطوح لغزش وجود دارد. ضریب اصطکاکی ۰/۳ بین تمامی سطوح مفروض است [۹]. برای اعمال تماس بایستی از منوی *Interaction* گزینه *Create Interaction* و سپس *Surface-to-surface* انتخاب شود. ابتدا سطح *master* و سپس سطح *slave* انتخاب می‌شود. معمولاً قسمت سخت‌تر به عنوان سطح *master* انتخاب می‌شود. به عنوان مثال در تماس بین پیچ و بال، سطح پیچ قسمت *master* و سطح بال به عنوان سطح *slave* انتخاب می‌شود. در قسمت *Edit* بایستی نوع لغزش *Finite* انتخاب شود زیرا مقدار لغزش بین سطوح کم است. در قسمت *Contact interaction property* بایستی ویژگی تماس که در ادامه توضیح داده خواهد شد انتخاب شود. در قسمت *create interaction property* زیرشاخه *contact* می‌توان ویژگی‌های تماس را معرفی کرد. در این تحقیق به دلیل تماس تحت فشار بالا بایستی ابتدا *contact tangential behavior* گزینه *friction* و سپس ضریب اصطکاک ۰/۳ تعیین شود. سپس از قسمت *Mechanical* گزینه *Normal Behavior* انتخاب شود، سپس قسمت *Pressure over closure* بایستی *hard contact*



شکل ۱۵- تنش فون میسز در پیچ



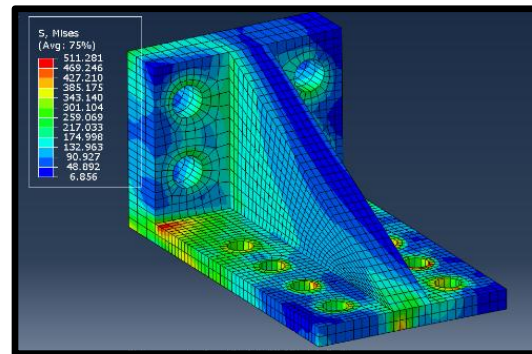
شکل ۱۳- نمای فوقانی کمانش موضعی و پیش‌جسی جانبی تیر



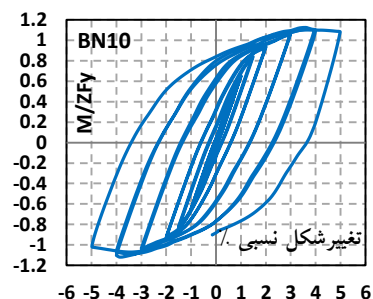
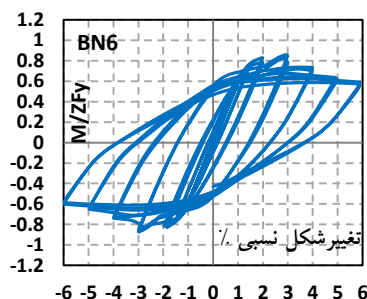
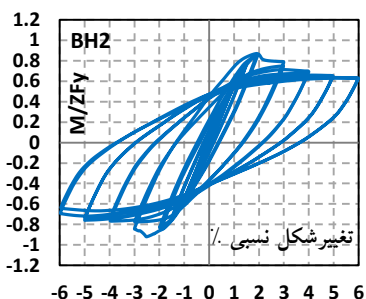
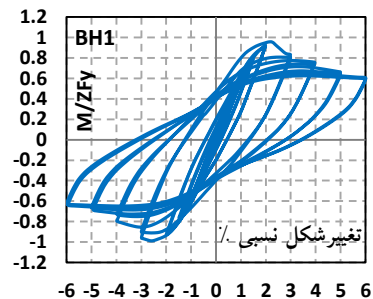
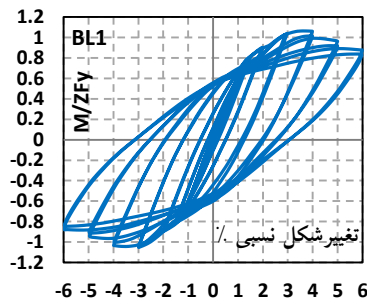
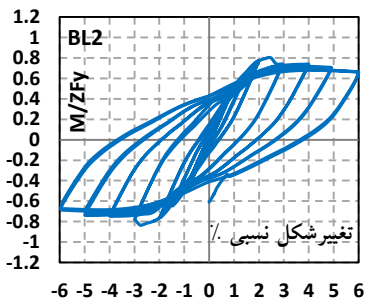
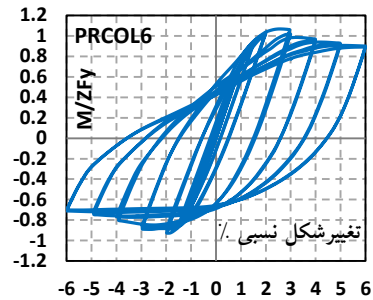
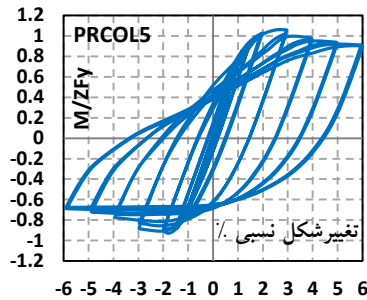
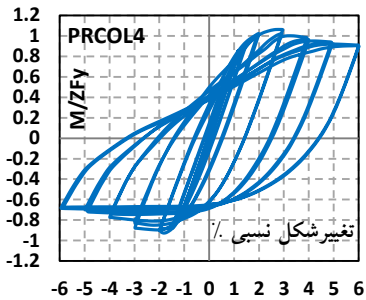
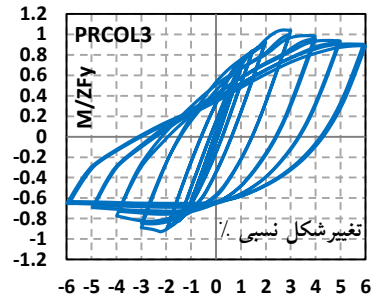
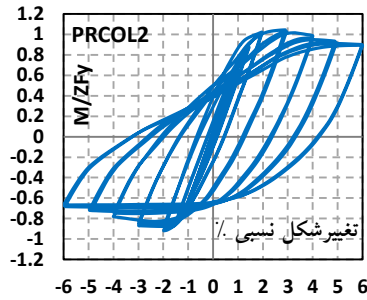
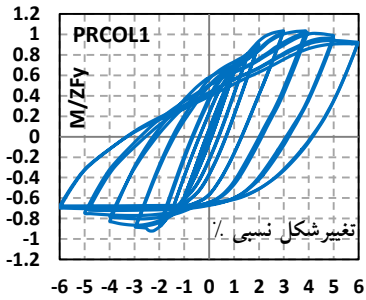
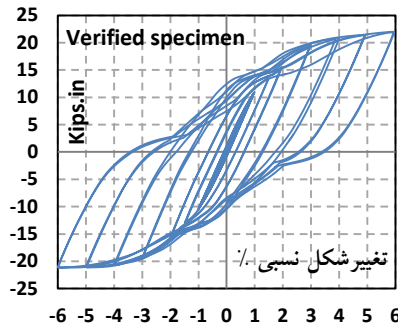
شکل ۱۶- شکل‌گیری مفصل پلاستیک در دوران ۰.۶٪

رفتار هیستریزس نمونه‌ها در شکل (۱۷) ملاحظه می‌گردد. لنگر نمونه اعتبارسنج بر اساس kips.in بیان شده است، زیرا نتایج نمونه آزمایشگاهی مرجع با واحد انگلیسی بیان شده است، محور عمود سایر نمونه‌ها بی بعد می‌باشد و بر اساس تقسیم مقدار لنگر مقطع بر لنگر پلاستیک آن محاسبه شده است.

در شکل (۱۴) به صورت مجزا تغییرات تنش فون میسز در قطعه براکت آورده شده است، نقاط داخل سوراخ‌های براکت بدلیل لغزش براکت و تماس بین جداره سوراخ و سطح پیچ دارای تنش‌های بیشتری هستند. در شکل (۱۵) تغییرات تنش فون میسز بر جداره بیرونی پیچ ستون نشان داده شده است؛ مقدار حداکثر تنش ایجاد شده از مقدار حداکثر تنش پلاستیک پیچ کمتر است. مقدار تنش حد نهایی آلیاژ پیچ در حدود ۱۰۴۰ مگاپاسکال مفروض است. در اشکال (۱۶) نحوه‌ی کمانش جان تیر در دوران پیشینه نمایش داده شده است. محل تشکیل مفصل پلاستیک در نمونه‌ها قابل قبول و مناسب است؛ چرا که تطابق مناسبی با فرضیه‌ی نظریه کایزر دارد که بایستی مفصل پلاستیک بعد از براکت (نه در فاصله دور) تشکیل شود.



شکل ۱۴- تنش فون میسز در قطعه براکت



شکل ۱۷- نمودار هیستریزس نمونه‌ها



جهت به دست آوردن شاخص شکست بایستی مقدار $PEEQ$ بر کرنش تسلیم تقسیم شود و داریم [۱۴]:

$$PRI = \frac{\frac{PEEQ}{\varepsilon_y}}{\exp(-1.5 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eff}})} \quad (1)$$

طبق رابطه (۲) و شکل (۲۱) هرچه میزان RI بیشتر باشد پتانسیل شکست ترد آن نقطه بیشتر خواهد شد. در این رابطه ε_y ، σ_m و σ_{eff} کرنش تسلیم، تنش هیدرواستاتیکی و تنش فون میسر می‌باشد.

در رابطه‌ی RI بحرانی‌ترین نقطه در تمام ۱۲ آزمایش صورت گرفته در محل $PEEQ$ حداکثر رخ می‌دهد. در شکل (۲۲) مشاهده می‌شود که نقطه بیشینه با رنگ قرمز متمایز شده است. پتانسیل شکست ترد برای تمامی آزمایشات در نزدیکی نقطه نشان داده شده در شکل (۲۲) رخ می‌دهد.

در جدول (۴) مقدار انرژی مستهلک‌شده در هر نمونه و مقدار درصد سهم تیر از کل انرژی آزادشده و همچنین مقدار درصد ستون از کل انرژی آزادشده آورده شده است. واحد انرژی آزاد شده برحسب ژول می‌باشد.

در شکل (۱۸) تغییرات نیروی پیش‌تنیده پیچ شماره ۱ (شکل (۱۹)) ستون در طول آزمایش نشان داده شده است.

در شکل‌های (۲۰) منحنی پوش نمودارهای هیستریزس برحسب لنگر نرمال شده براساس لنگر پلاستیک ZF_y نشان داده شده است. برای پذیرش اتصال طبق آیین نامه های اتصالات نسبت نرمال شده مقاومت پس‌ماند اتصال در چرخش نسبی طبقه‌ای ۰.۴٪ باید ۰.۸٪ باشد.

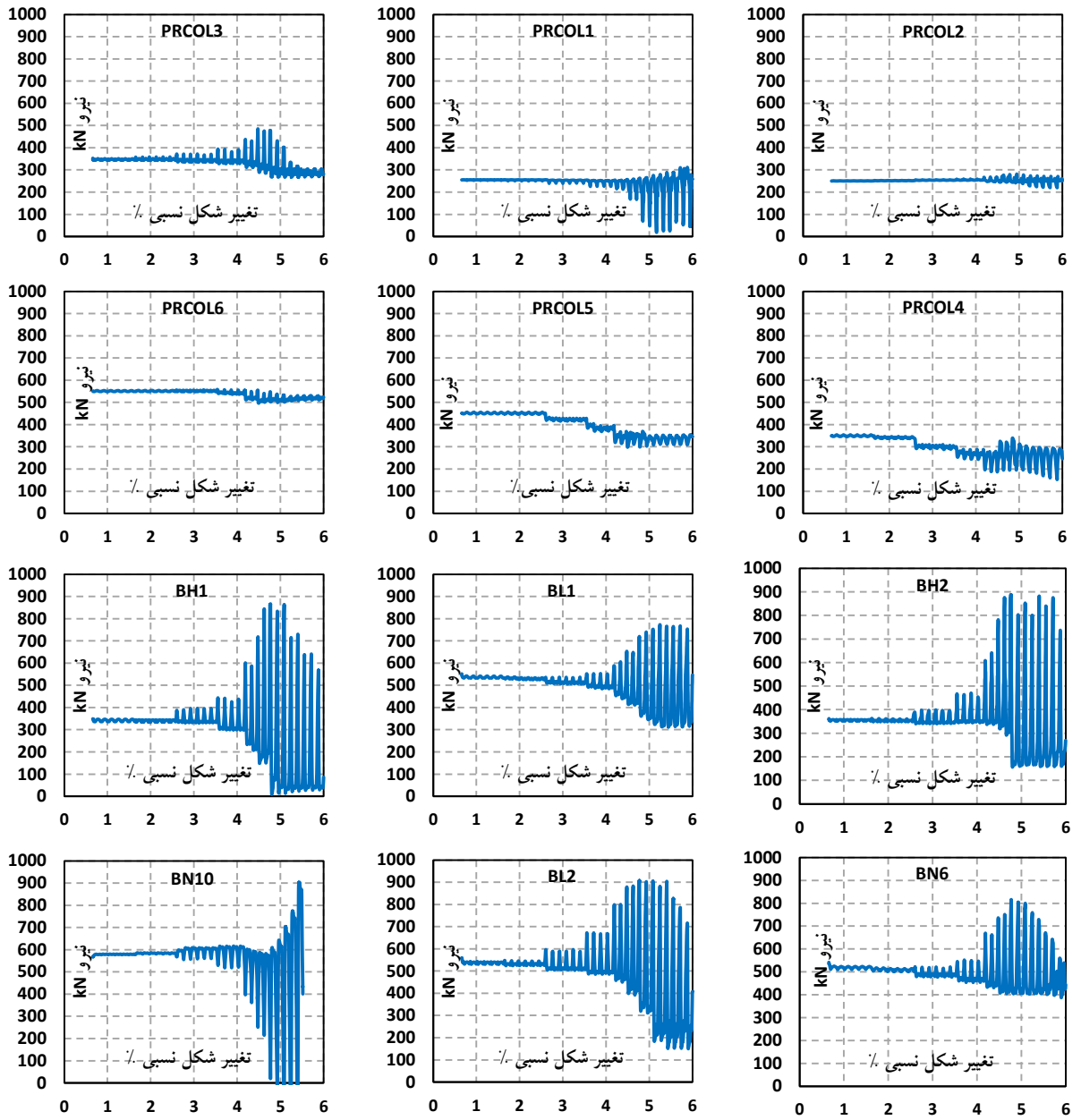
در نرم‌افزار آباکوس [۱۲] خروجی $PEEQ$ برابر است با:

$$PEEQ = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p} \quad (1)$$

جدول ۴- مقدار عددی انرژی مستهلک‌شده بر حسب ژول

مدل	انرژی کل مستهلک‌شده	درصد سهم تیر	درصد سهم ستون	درصد سهم اجزای اتصال
PRCOL1	۲۱۷۰۰۰	۹۷	≈۱	۲
PRCOL2	۲۳۳۰۰۰	۹۷	≈۱	۲
PRCOL3	۲۴۷۰۰۰	۹۶	≈۱	۳
PRCOL4	۲۴۹۰۰۰	۹۵	≈۱	۴
PRCOL5	۲۵۰۰۰۰	۹۳	≈۱	۶
PRCOL6	۲۵۷۰۰۰	۸۲	۹	۹
BH1	۲۶۷۰۰۰	۸۶	۴	۱۰
BH2	۲۳۳۰۰۰	۸۹	۳	۸
BL1	۱۶۰۰۰۰	۹۲	≈۲	۶
BL2	۱۵۲۰۰۰	۹۱	≈۱	۸
BN6	۲۱۰۰۰۰	۸۱	۵	۱۴
BN10	۹۶۰۰۰۰	۱۹	≈۱	۸۰

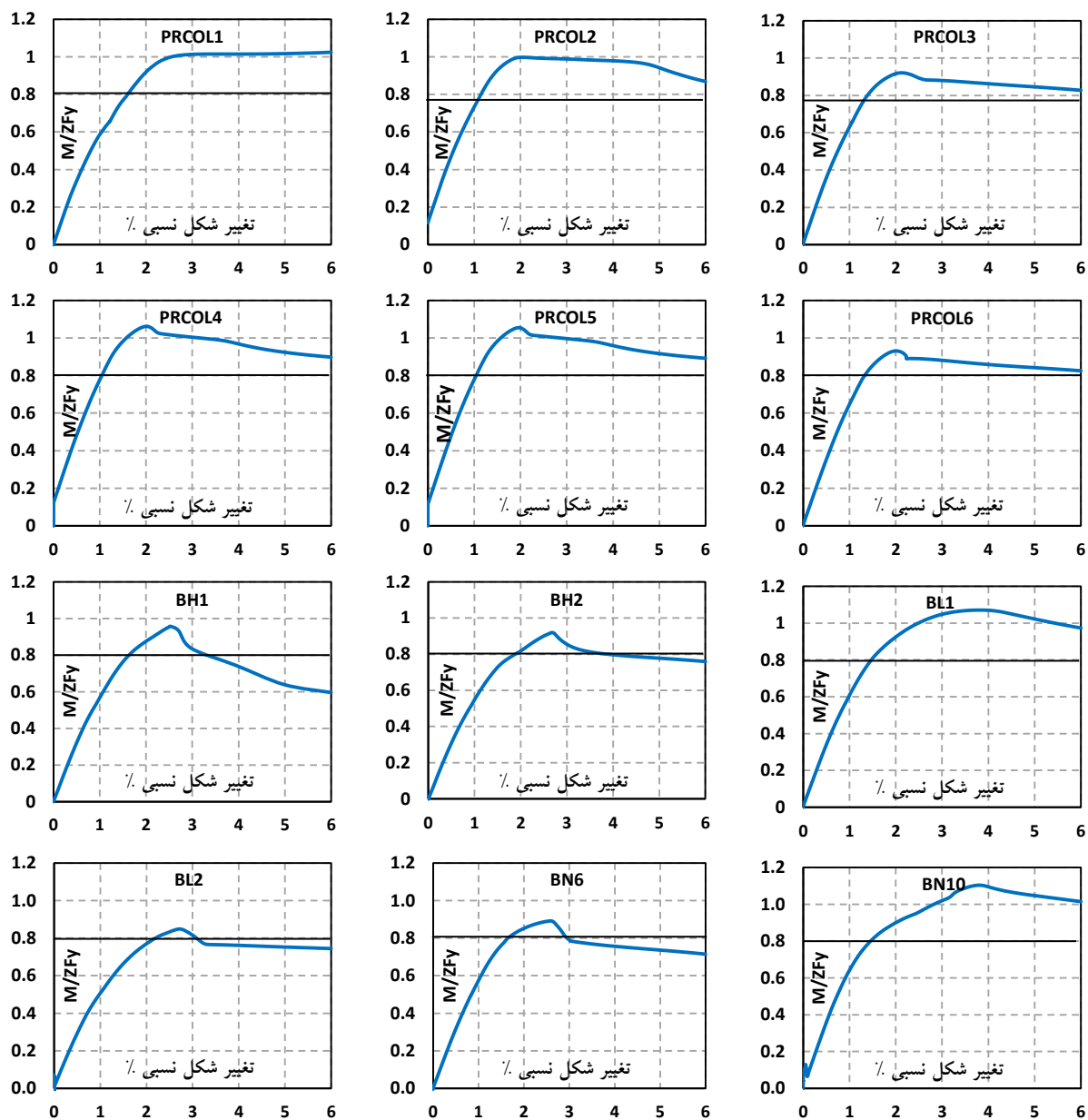




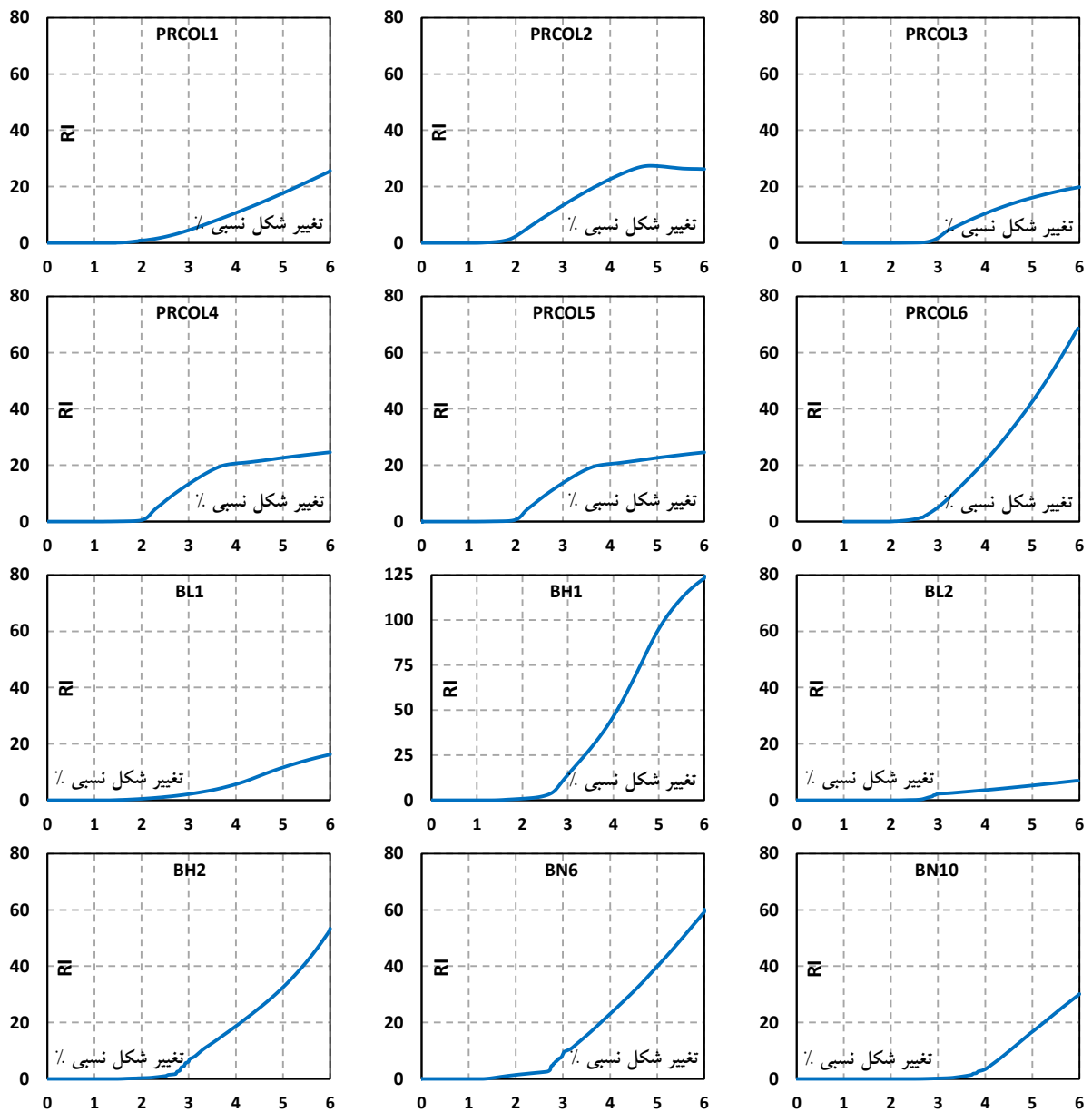
شکل ۱۸- تغییر نیروی محوری در پیچ مشخص شده در شکل (۱۵) در نمونه‌ها



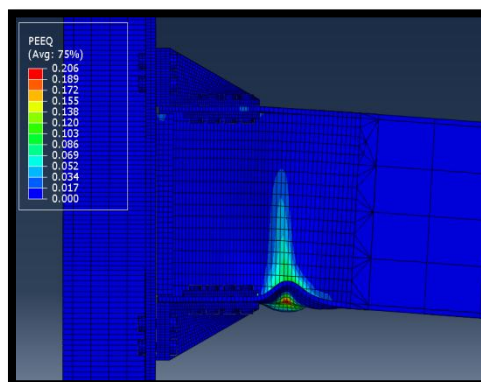
شکل ۱۹- پیچ مورد مطالعه



شکل ۲۰- نمودارهای پوش هیستریزیس برحسب لنگر پلاستیک تیر



شکل ۲۱- شاخص شکست RI نقاط بحرانی در نمونه‌ها



شکل ۲۲- نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک و میدان کششی قطری در یک پانل برشی با ستون‌های غیر یکسان

۴-۱- اثر نیروهای پیش‌تندگی پیچ‌های تیر و ستون

میزان نیروی پیش‌تندگی طبق آیین‌نامه طراحی سازه‌های فولادی $F_u \times A \times 0/55$ است، که در آن A سطح مقطع پیچ می‌باشد. مقدار نیروی پیش‌تندگی پیچ‌های ستون در حدود 600 kN و مقدار نیروی پیش‌تندگی پیچ‌های تیر در حدود 350 kN در نمونه مرجع طراحی می‌باشد. پیچ‌های ستون تحت کشش هستند و بنابراین پیش‌تندگی تأثیری در مقاومت طراحی آنها ندارد، ولی پیچ‌های تیر تحت برش هستند و عملکرد اصطکاکی آنها جلوی لغزش را می‌گیرد و رفتار اتصال را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نمونه‌ها مقدار $250-550 \text{ kN}$ برای پیش‌تندگی پیچ‌های ستون و مقدار $150-350 \text{ kN}$ برای پیچ‌های تیر در نظر گرفته شد. با توجه به نمودارهای هیستریزس در شش نمونه PRCOL1 الی PRCOL6 تغییر نیروی پیش‌تندگی پیچ‌های ستون تأثیر کمی بر رفتار هیستریزس و تغییر نیروی پیش‌تندگی تیر تأثیر بسزایی بر رفتار هیستریزس و شکل‌گیری به موقع مفصل پلاستیک دارد. دلیل تأثیر پیش‌تندگی پیچ‌های تیر، افزایش گیرداری اتصال و پیرو آن، تشکیل سریع‌تر مفصل پلاستیک است. در اینصورت کمناش‌های موضعی در تیر، کاهش مقاومت در سه دوران انتهایی بارگذاری در مقایسه با نمونه مرجع بیشتر احساس می‌گردد. از طرفی، با افزایش مقدار نیروهای پیش‌تندگی پیچ‌های ستون، از نوسانات نیروهای محوری آنها، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای در حدود 66% کاسته می‌شود؛ بنابراین این پدیده مقداری در گیرداری اتصال مشارکت می‌کند و سبب افزایش کوچک استهلاک انرژی اتصال می‌گردد. در مدل PRCOL2 نسبت به مدل PRCOL1 میزان انرژی مستهلاک شده 7% بیشتر شده است. همچنین در مدل PRCOL5 نسبت به مدل PRCOL2، 7% و در مدل PRCOL6 نسبت به مدل PRCOL5 تنها 3% انرژی مستهلاک‌شده بیشتر می‌شود. با توجه به نمودارهای هیستریزس و جدول (۴) می‌توان به این نکته پی برد که افزایش نیروی پیش‌تندگی پیچ‌های بال تیر سبب افزایش چشمگیر استهلاک انرژی در تیر و عملکرد بهتر اتصال می‌گردد. همچنین افزایش پیش‌تندگی پیچ‌های ستون سبب افزایش انرژی مستهلاک‌شده در تیر در نمونه PRCOL4-5 می‌گردد ولی در نمونه PRCOL6 استهلاک انرژی در برکت را به همراه دارد. بدین معنا که پیچ‌ها و برکت نیز تغییر شکل‌های فرا ارتجاعی را تجربه خواهند کرد ولی این مقادیر کوچک

می‌باشد. البته هر شش نمونه شرایط آیین‌نامه‌ای را جهت استفاده در قاب‌های خمشی ویژه، عبور از دوران 4% و همچنین مقاومت حداقل 80 درصد لنگر پلاستیک مقطع را در 4% چرخش دارا می‌باشند. با توجه به تمام جهات نمونه PRCOL5 که نزدیکترین شرایط را به نمونه طراحی شده مرجع دارد، بهترین عملکرد را داشته است.

۴-۲- اثر ارتفاع برکت

در زمان تغییر ارتفاع برکت نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها برای شرایط اصطکاکی (با پیش‌تندگی کامل) ثابت در نظر گرفته شد و سعی گردید اثر تغییر ارتفاع برکت نسبت به عدد طراحی مطالعه گردد. افزایش 30% ارتفاع برکت در BH1 سبب افزایش لغزش بین برکت و تیر شده و سبب جمع‌شدگی نمودار هیستریزس و افزایش استهلاک انرژی در برکت به جای تیر شده است. اگرچه در این نمونه کل انرژی مستهلاک شده تجمعی عدد بالایی است ولی 10% آن در برکت رخ داده و از درصد مشارکت تیر کاسته شده است. در این نمونه نوسانات نیروهای محوری در پیچ‌های ستون در حدود $2/5$ برابر مقدار نوسانات نمونه PRCOL1 و در حدود 16 برابر تغییرات نیروی پیش‌تندگی نمونه PRCOL6 است. بررسی نمودارهای پوش‌گویای آن است که میزان گیرداری اتصال تا حد قابل‌توجهی کم شده به‌طوری‌که در دوران 4% نسبت لنگر به ظرفیت لنگر پلاستیک تیر کمتر از 80% شده که از مقدار تعیین‌شده آیین‌نامه کمتر است، لذا این اتصال مردود است. از طرفی، طبق نمودار ۸، شاخص شکست نقطه بحرانی در حال افزایش است که در نتیجه‌ی آن پتانسیل شکست ترد اتصال نیز افزایش می‌یابد. مقایسه BH1 و PRCOL4 ضعف اتصال BH1 را به خوبی نشان می‌دهد.

با کاهش ارتفاع برکت در BH2 عملاً اتصال از نظر مقاومت و سختی و استهلاک انرژی افت می‌کند. در این نمونه نیز استهلاک انرژی، در مقدار کل و در تیر کاهش پیدا کرده و مقدار مشارکت برکت بالا رفته است، که نشان‌دهنده عملکرد نامناسب اتصال خواهد بود. افت استهلاک انرژی با مقایسه نمونه BH2 و PRCOL6 مشخص می‌گردد. میزان کاهش مقاومت در حدی است که در تغییر مکان متناظر با دوران 4 درصد، مقدار آن به 80% لنگر تیر می‌رسد که رفتار بحرانی را بیان می‌کند. درنهایت، کاهش ارتفاع برکت نشان‌دهنده عملکرد لرزه‌ای نامناسب و مردود شدن نمونه BH2 می‌باشد.

۴-۳- اثر طول براکت

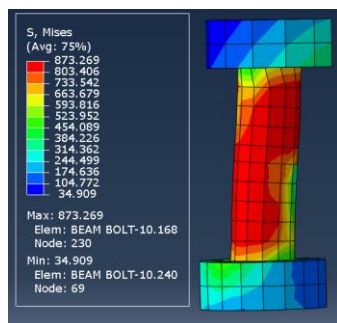
در این قسمت از پژوهش با ثابت نگاه داشتن شرایط پیش‌تیدگی پیچ‌ها در حالت اصطکاک، طول براکت را نسبت به نمونه طراحی مرجع کم و زیاد میکنیم تا تاثیر آن مشاهده شود. با افزایش طول براکت در نمونه BL1 کاهش مقاومت در چرخه‌های پایانی بارگذاری قابل مشاهده است. به دلیل افزایش طول براکت لنگر پلاستیک در فاصله‌ای دورتر از بر ستون تشکیل می‌شود زیرا محل در نظر گرفته شده برای تشکیل مفصل پلاستیک بلافاصله بعد از براکت لزوماً دارای لنگر موردنیاز جهت تشکیل مفصل پلاستیک نیست. بنابراین، در این مدل میزان انرژی مستهلک شده نسبت به مدل‌های پیشین کمتر است، میزان کاهش مقاومت در دوران ۴٪ کمتر از ۲۰٪ و مورد تأیید آیین‌نامه می‌باشد، و از طرفی میزان کم RI در این مدل در نقطه‌ی حساس شکل (۱۵)، حاکی از آن است که این نمونه گسیختگی دیرنگامی دارد. ولی استهلاک انرژی این نمونه سبب مردود شدن آن می‌گردد و در مقایسه با نمونه‌های PRCOL5 و PRCOL6 ضعف عملکرد آن مشخص می‌گردد.

در مقابل، با کاهش طول براکت در نمونه BL2 از چرخه‌های ابتدایی بارگذاری، اتصال با کاهش مقاومت شدیدی همراه است و با ایجاد منحنی هیستریزس لاغرتر میزان استهلاک انرژی آن نیز کمتر از BL1 شده است. به علاوه، میزان مقاومت اتصال در دوران ۴٪ کمتر از ۸۰٪ لنگر پلاستیک مقطع تیر است که نشان‌دهنده عملکرد لرزه‌ای نامناسب در آن می‌باشد. بنابراین BL2 اتصال مردودی است.

۴-۴- اثر تعداد پیچ بال تیر

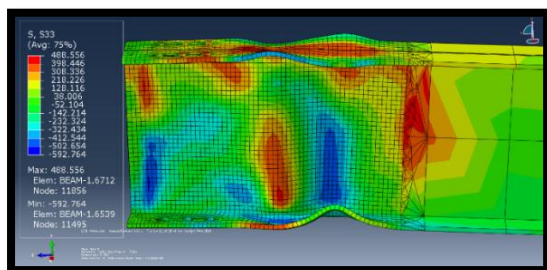
از آنجا که پیچ‌های بال تیر نقش اساسی در رفتار این اتصال بازی می‌کنند، اثر افزایش و کاهش آنها در این بخش از مطالعه بررسی می‌گردد. کاهش تعداد پیچ‌های بال تیر در نمونه BN6، با بالا رفتن قطر آن و بالا رفتن نیروی پیش‌تیدگی آن همراه است؛ و در مقابل، افزایش تعداد پیچ‌ها در بال تیر نمونه BN10، با کاهش قطر پیچ‌ها و کاهش نیروی پیش‌تیدگی آن همراه است. مقدار نیروی پیش‌تیدگی پیچ‌های بال بر اساس ضابطه آیین‌نامه طراحی سازه‌های فولادی محاسبه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که کاهش تعداد پیچ‌ها در BN6 سبب کاهش لغزش بین براکت و بال تیر شده و استهلاک انرژی بیشتر در مفصل پلاستیک تیر رخ می‌دهد. ولیکن افزایش تعداد پیچ‌ها در BN10 با افزایش لغزش بین براکت و بال تیر همراه است. این لغزش سبب تغییر شکل‌های گسترده در پیچ‌های بال تیر شده و استهلاک انرژی

شدید در پیچ‌ها به وجود می‌آورد که غیر منطقی و نامطلوب است زیرا منشاء استهلاک انرژی باید مفصل پلاستیک در تیر باشد. شکل (۲۳) تنش موجود بر روی بدنه پیچ را نشان می‌دهد. همچنین تقاضای نیرو در پیچ‌های ستون افزایش می‌یابد و کشش در پیچ‌های ستون نیز به مرحله پلاستیک می‌رسد. تغییرات نیروی محوری در پیچ مورد مطالعه قرارگرفته با توجه به شکل (۱۹) در نمونه BN10 بسیار زیاد است و به گونه‌ای است که پیچ را به گسیختگی می‌رساند و نیروی پیش‌تیدگی آن را به صفر می‌رساند. در واقع عملکرد نامطلوب اتصال سبب افزایش تقاضای نیرو در پیچ‌های ستون و انتقال مفصل به ستون می‌گردد.



شکل ۲۳- توزیع تنش فون میسس در پیچ تیر مدل BN6 و تغییر شکل آن در دوران ۶٪

در دوران ۴٪ نسبت لنگر اتصال به لنگر پلاستیک مقطع در نمونه BN6، ۰/۷۵ و در نمونه BN10، ۱/۸ می‌باشد که نشان‌دهنده مردود شدن نمونه BN6 می‌باشد. نتایج شاخص شکست نشانگر آن است که نمونه BN6 دارای بیشترین پتانسیل شکست می‌باشد، شکل (۲۴)؛ بنابراین استفاده از تعداد پیچ‌های اولیه‌ی ۸ عدد در روش طراحی کایزر مناسب‌ترین طرح است.



شکل ۲۴- توزیع تنش فون میسس و تشکیل مفصل پلاستیک مدل BN6 در دوران ۶٪

با توجه به نتایج نمودارهای انرژی مستهلک شده، نمودار تغییرات نیروی محوری پیچ‌ها، نمودارهای هیستریزس و

شاخص شکست، می‌توان نمونه‌های PRCOL5 و PRCOL6 را به‌عنوان نقطه بهینه برگزید. هدف کلی گزینش نمونه‌ای است که بیشترین انرژی آزادشده، کمترین شاخص شکست را دارا باشد همچنین به حد پلاستیسیته رسیده باشد و دچار افت محسوس مقاومت نشود و نوسان نیروی محوری پیچ‌ها در آن پایین باشد. اتصال‌های PRCOL5 و PRCOL6 دارای شاخص شکست نسبتاً پایین می‌باشند، همچنین ضوابط آیین‌نامه‌ای پذیرش اتصالات را ارضا می‌کنند.

۵- نتیجه گیری

از آنجایی که اتصالات پیش پذیرفته شده کایزر دارای ثبت اختراع بین‌المللی و منع استفاده عمومی است، در این تحقیق، اتصال جدید ارائه‌شده‌ی مشابه با اتصال کایزر تحت بارگذاری چرخه‌ای غیر خطی مطالعه شده است. الزامات لرزه‌ای آیین‌نامه اتصالات، مکانیزم گسیختگی، میزان استهلاک انرژی، پتانسیل شکست در نمونه‌ها، رفتار هیستریزس، و نوسان نیروی محوری پیچ‌ها مواردی است که در طراحی این اتصالات مورد مطالعه قرار گرفته است. در این بررسی اثر تغییر تعداد پیچ‌های اتصال، تغییر طول براکت و تغییر ارتفاع براکت بررسی دقیق شد و در مطالعه اثر لغزش و اصطکاک نیز در پیچ‌های پیش‌تینده مطالعه گردید. نتایج موردی زیر در تحقیق بدست آمد:

۱- در حالت کلی با افزایش مقدار نیروی پیش‌تندگی پیچ‌های تیر، میزان پینچینگ نمودار افزایش می‌یابد ولیکن بر مقدار انرژی تجمعی آزادشده افزوده می‌گردد. بیش از ۹۰ درصد انرژی از طریق تیر آزاد خواهد شد و در این نمونه‌ها مقاومت باقی‌مانده پس از چرخش طبقه ۴٪ از ۸۰٪ لنگر پلاستیک مقطع بیشتر است و از این جهت الزامات لرزه‌ای آیین‌نامه را برآورده می‌سازد. در واقع توصیه می‌شود علاوه بر اصطکاک شدن پیچ‌های تیر، پیچ‌های ستون نیز اصطکاک شود تا بهترین عملکرد اتصال معرفی شده رخ دهد.

۲- افزایش ارتفاع براکت بر مقدار انرژی آزادشده اثر دارد ولیکن باعث بالا رفتن احتمال شکست در نقاط حساس نمونه می‌شود. با کاهش ارتفاع براکت علاوه بر افت مقاومت و کاهش سختی، میزان انرژی مستهلک شده نیز کاهش می‌یابد. از طرفی، مقادیر شاخص شکست در نقطه بحرانی افزایش می‌یابد. بنابراین ارتفاع ارائه شده در ضوابط طراحی اتصال کایزر برای اتصال معرفی شده مناسب‌تر است.

۳- افزایش و کاهش طول براکت مقدار انرژی آزادشده را کاهش می‌دهد و در زمان شکل‌گیری مفصل پلاستیک تأثیر می‌گذارد. در مدل BL1 مقاومت باقی‌مانده در چرخش طبقه ۴٪ بیش از ۸۰٪ ظرفیت لنگر پلاستیک مقطع بوده ولی این میزان مقاومت برای مدل BL2 بسیار پایین‌تر بوده و از ۸۰٪ کمتر است. بنابراین طول ارائه شده در ضوابط طراحی اتصال کایزر برای این اتصال معرفی شده مناسب‌تر است.

۴- افزایش دو پیچ در اتصال تیر و براکت همراه با کاهش ۵ میلی متری قطر آن، سبب افزایش مقدار انرژی آزادشده در حدود ۴ برابر نسبت به PRCOL1 می‌شود. طبق جدول (۴)، درصد سهم اجزای اتصال (به جز تیر و ستون) در حدود ۸۰٪ کل می‌باشد که علتش کوچکتر بودن قطر سوراخ پیچ بوده و در اثر لغزش، بیشترین انرژی در اثر لهیدگی بین جداره داخلی سوراخ و پیچ‌ها می‌شود، که سبب تغییر فرم پیچ‌ها شده و نامطلوب است. کاهش پیچ‌های تیر سبب تشکیل مفصل پلاستیک با ناحیه‌ی بزرگ در تیر شده و همچنین کماتش جان تیر نیز افزایش خواهد یافت ولیکن با افزایش شاخص شکست احتمال گسیختگی بیشتر می‌شود. مقاومت اتصال در دوران ۴٪ کمتر از ۸۰٪ ظرفیت مفصل پلاستیک خواهد بود. بنابراین تعداد پیچ‌های طراحی نیز براساس ضوابط طراحی اتصال کایزر مناسب‌ترین شرایط را پیش می‌آورد.

۵- نمونه‌های PRCOL5 و PRCOL6 بهترین رفتار را ارائه نمودند و الزامات آیین‌نامه ای را دارا بودند. این نمونه‌ها بر اساس ضوابط کایزر طرح شده بودند و نشان دهنده بهترین عملکرد براساس آیین‌نامه بودند.

در مجموع دو اتصال پیشنهادی PRCOL5 و PRCOL6 ارائه شده می‌توانند با ضوابط اتصال کایزر طرح گردند و عملکرد لرزه ای قابل قبولی در مناطق لرزه خیز داشته باشند. در این تحقیق چندین اتصال براکت پیچی از جنبه‌های مختلف لرزه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت و دو مورد پذیرفته شد.

۶- مراجع

- [1] Adey, B.T., Grondin, G.Y. and Cheng, J.J. (2000), "Cyclic Loading of End Plate Moment Connections", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 27, No. 4, pp. 683-701.
- [2] Gerami, M., Saberi, H., Saberi, V. and Daryan, A.S. (2011), "Cyclic Behavior of Bolted Connections with Different Arrangement of Bolts", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 67, No. 4, pp. 690-697.
- [3] Shi, G., Shi, Y., Wang, Y. and Bradford, M.A. (2008), "Numerical Simulation of Steel Pretensioned Bolted End-



- [9] Popov, E.P. and Takhirov, S.M. (2002), "Bolted Large Seismic Steel Beam-to-Column Connections Part 1: Experimental Study", Engineering Structures, Vol. 24, No. 12, pp. 1523-1534.
- [10] ANSI/AISC 358s2-14 (2014), Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, AISC.
- [11] ANSI/AISC 341-10 (2010), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, AISC.
- [12] Abaqus, Version, A. 6.13. (2013), Documentation, Abaqus User's Guide.
- [13] Yang, J.G., Murray, T.M. and Plaut, R.H. (2000), "Three-dimensional Finite Element Analysis of Double Angle Connections under Tension and Shear", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 54, No. 2, pp. 227-244.
- [14] Ghobadi, M.S., Ghassemieh, M., Mazroi, A. and Abolmaali, A. (2009), "Seismic Performance of Ductile Welded Connections Using T-stiffener", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, No. 4, pp. 766-775.
- plate Connections of Different Types and Details", Engineering Structures, Vol. 30, No. 10, pp. 2677-2686.
- [4] Seradj, H. (1997), "Ductile End-plate Connections Utilizing Plate Yielding", MSc Thesis, School of Civil Engineering and Environmental Science, University of Oklahoma.
- [5] Gross, J.L., Engelhardt, M.D., Uang, C.M., Kasai, K. and Iwankiw, N.R. (1999), "Steel Design Guide 12: Modification of Existing welded Steel Moment Frame Connections for Seismic Resistance", AISC.
- [6] Adan, S.M. and Gibb, W. (2009), "Experimental Evaluation of Kaiser Bolted Bracket Steel Moment-Resisting Connections", Engineering Journal, Vol. 46, No. 3, pp. 181-196.
- [7] Miller, D.K. (1998), "Lessons Learned from the Northridge Earthquake", Engineering Structures, Vol. 20, No. 4, pp. 249-260.
- [8] Tremblay, R., Filiatrault, A., Timler, P. and Bruneau, M. (1995), "Performance of Steel Structures during the 1994 Northridge Earthquake", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 22, No. 2, pp. 338-360.

پی نوشت

^۱ ورق کلمپ، دارای مشخصات الاستیک و پلاستیک مشابه تیر است و مانع از تماس مستقیم بین پیچ و بال تیر شده و دارای سوراخ های استاندارد است، فاصله ابتدا و انتهای ورق کلمپ از محور پیچ اول و آخر برکت ۵۱ میلی متر از هر دو سمت است.