

نوع مقاله: علمی - پژوهشی

چکیده

استفاده از اتصالات تیر به ستون درختی در قاب‌های خمشی فولادی، به دلیل انجام جوشکاری قسمت‌های بحرانی در کارخانه و سهولت نصب در کارگاه، بیش از گذشته مورد توجه طراحان و مجریان قرار گرفته است. این در حالی است که تاکنون تأثیر نوع روش طراحی وصله پیچی در پیش‌پذیرفتگی این نوع اتصالات به‌منظور استفاده در سیستم‌های قاب خمشی ویژه بررسی نشده است. هدف اصلی تحقیق حاضر، بررسی تأثیر نوع روش طراحی وصله پیچی در عملکرد لرزه‌ای و پیش‌پذیرفتگی اتصالات تیر به ستون درختی است. بدین‌منظور در این مطالعه، سه روش طراحی وصله پیچی موجود در آیین‌نامه‌های طراحی که عبارتند از: طراحی بر اساس اتصال لغزش بحرانی، طراحی بر اساس اتصال پیش‌تنیده و طراحی بر اساس وصله ضعیف با استفاده از تحلیل المان محدود غیرخطی در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌های انجام‌شده نشان داد که نوع روش طراحی وصله تأثیر بسزایی در مقاومت خمشی اتصال ندارد. در حالی که نوع وصله در تعیین پیش‌پذیرفتگی اتصال، میزان انرژی مستهلک‌شده و مقدار شاخص‌های خسارت ناشی از زلزله در محل اتصال تیر ریشه به ستون نقش مهمی ایفا می‌کند. در این تحقیق، نمونه اتصال‌های تیر به ستون درختی طراحی شده بر اساس لغزش بحرانی و اتصال پیش‌تنیده جزو اتصالات پیش‌پذیرفته طبقه‌بندی شدند. در صورتی که اتصال تیر به ستون درختی طراحی شده بر اساس وصله ضعیف، به دلیل نیمه‌صلب بودن، نمی‌تواند به‌عنوان یک اتصال پیش‌پذیرفته در نظر گرفته شود. در نهایت، به‌منظور بهره‌مندی بیشتر از لغزش پیچ‌ها به‌عنوان یک مود شکل‌پذیر، جهت کاهش شاخص‌های خسارت ناشی از زلزله، پیشنهاد می‌شود که وصله تیر بر اساس اتصال پیش‌تنیده طراحی شود.

واژگان کلیدی: اتصال تیر به ستون درختی، وصله پیچی، عملکرد لرزه‌ای، پیش‌پذیرفتگی، آباکوس.

تأثیر نوع روش طراحی وصله پیچی در عملکرد لرزه‌ای و پیش‌پذیرفتگی اتصالات تیر به ستون درختی

بهنام کرمی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

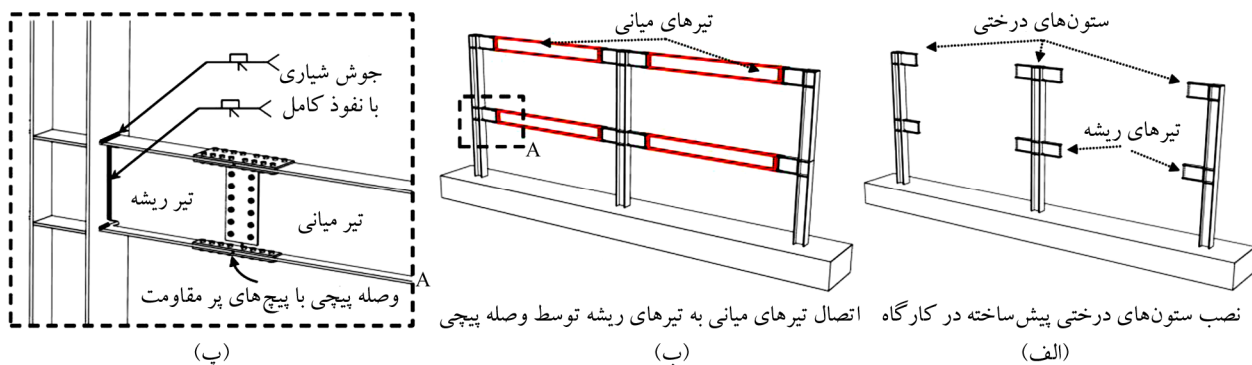
بهرخ حسینی هاشمی (نویسنده مسئول)

دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و رئیس انجمن مهندسی زلزله، تهران، ایران، Behrokh@iiees.ac.ir

۱- مقدمه و مطالعات گذشته

جوش در کارگاه، کیفیت پایین مصالح فولادی و فلز جوش در چند دهه گذشته و خصوصیات حرکت زمین اشاره کرد [۲]. بعد از زلزله نورتریج، محققین برای بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصالات قاب‌های خمشی ویژه مطالعات گسترده‌ای انجام دادند. بر اساس مطالعات صورت گرفته، پیشنهادهایی به‌منظور اصلاح عملکرد لرزه‌ای اتصالات خمشی مطرح شده است که یکی از این پیشنهادها، ایده استفاده از اتصالات تیر به ستون درختی^۱ به‌منظور

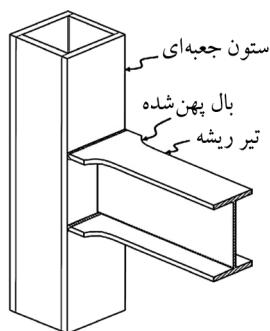
زلزله نورتریج در سال ۱۹۹۴، باعث خرابی گسترده‌ای در سیستم‌های قاب خمشی شد که نشان از وجود ضعف در عملکرد لرزه‌ای اتصالات بود [۱]. بررسی‌های انجام‌شده بعد از زلزله نورتریج نشان دادند، عوامل مختلفی در ایجاد شکست ترد اتصالات نقش داشتند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به تمرکز تنش در محل اتصال تیر به ستون (به دلیل وجود پشت‌بند و شکل هندسی سوراخ دسترسی جوش)، عدم کنترل و بازرسی دقیق



شکل (۱): مراحل ساخت سیستم قاب خمشی ستون درختی.

مطالعه کردند. در این مطالعه قبل از اینکه زاویه دریافت طبقه به $0.3/0.7$ رادیان برسد، نمونه‌های اتصالات تیر به ستون درختی دچار شکست شدند. مهم‌ترین ضعف این اتصالات، تقاضای کرنش پلاستیک زیاد در لبه جوش شده بال تیر به ستون بود که سبب می‌شد، طی تعداد اندکی چرخه بارگذاری، اتصال دچار گسیختگی ترد در محل مذکور شود.

برای جلوگیری از گسیختگی ترد جوش، چن و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۶، تیر با بال پهن شده و بدون سوراخ دسترسی جوش در محل اتصال تیر ریشه به ستون را معرفی کردند (شکل ۲). پهن‌شدگی و حذف سوراخ دسترسی جوش باعث کاهش تقاضای کرنش پلاستیک در ناحیه سوراخ دسترسی جوش و بال تیر شد.



شکل (۲): اتصال تیر ریشه به ستون جعبه‌ای پیشنهاد شده توسط چن و همکاران [۶].

چن و لین [۷] در سال ۲۰۱۳، برای افزایش شکل‌پذیری و بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون درختی هفت نمونه اتصال را (با هندسه‌های متفاوت در بال تیرهای ریشه) مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد، عریض‌شدگی و کاهش

جلوگیری از انجام جوشکاری در کارگاه است [۳]. در سیستم ستون درختی، تیرهای ریشه که معمولاً 10 الی $12/5$ درصد اندازه دهانه طول دارند، در کارخانه تحت شرایط کنترل شده و با بازرسی‌های کامل به ستون جوش داده می‌شوند و پس از آنکه ستون‌های درختی در کارگاه نصب شدند (شکل ۱-الف)، بخش میانی تیر را توسط پیچ‌های پر مقاومت به تیر ریشه^۲ وصله می‌کنند (شکل ۱-ب). جزئیات یک نمونه از اتصال تیر به ستون درختی در شکل (۱-پ) نشان داده شده است.

تاریخچه استفاده از اتصال تیر به ستون درختی به کشور ژاپن بازمی‌گردد. در ژاپن بسیاری از قاب‌های خمشی ویژه فولادی با استفاده از ستون‌های قوطی و تیرهای بال‌پهن ساخته می‌شدند. هرچند که اعتقاد بر آن بود که اتصال جوشی کارخانه‌ای کیفیت بهتری نسبت به اتصال جوشی کارگاهی دارد، با این وجود در زلزله کوبه سال ۱۹۹۵، بسیاری از اتصالات تیر به ستون درختی آسیب دیدند و در اتصالات جوشی کارخانه‌ای گسیختگی ترد مشاهده گردید [۴]. ناکاشیما و همکاران [۴] در سال ۱۹۹۸، علت اصلی این خسارت‌ها را شکست نابهنگام جوش شیاری در محل اتصال بال تیر به ستون و ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک محدود در محل اتصال بیان کردند. پس از زلزله کوبه، مطالعات گسترده‌ای بر روی اتصالات تیر به ستون درختی صورت پذیرفت. آستانه اصل [۲] در سال ۱۹۹۷، گزارشی درباره رفتار و طراحی لرزه‌ای قاب‌های خمشی ویژه با سیستم ستون درختی صلب ارائه نمود. لی و پارک [۵] در سال ۱۹۹۸، اثر مقاومت چشمه اتصال در عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون درختی را

به ستون درختی به صورت کامل مورد مطالعه قرار نگرفته است، لذا در این مطالعه به بررسی این موضوع پرداخته می‌شود.

۲- هدف و مراحل انجام تحقیق

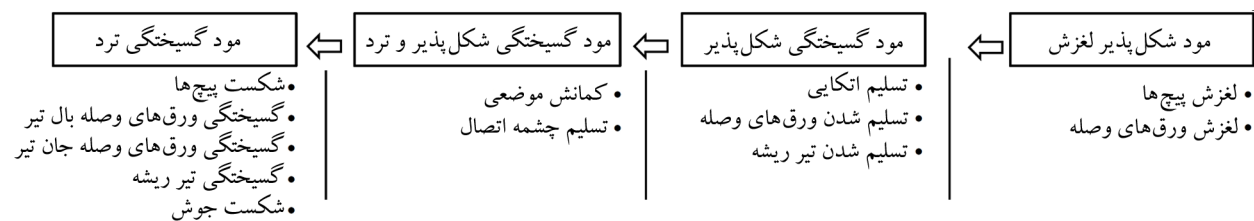
برای طراحی لرزه‌ای اتصالات در قاب‌های خمشی ویژه می‌توان از اتصالات از پیش پذیرفته شده در آیین‌نامه‌ها یا اتصالاتی که از طریق آزمایش‌های توصیه شده مورد تأیید قرار گرفته‌اند، استفاده کرد. با این وجود استفاده از اتصالات تیر به ستون درختی که متأسفانه هنوز ضوابط طراحی و آیین‌نامه خاصی برای آنها در نظر نگرفته شده است، به شکل‌های مختلف در کشور ایران به چشم می‌خورد. لذا بررسی رفتار لرزه‌ای این نوع اتصالات در هنگام زلزله حائز اهمیت است؛ زیرا عدم دقت در طراحی و اجرای نادرست اتصال، علاوه بر خرابی خود اتصال باعث آسیب رساندن به سایر اجزای سازه‌ای خواهد شد.

در این مقاله، ابتدا به نقد مطالعه آه و همکاران [۳] پرداخته شده است سپس با اصلاح آزمایش‌های آنها با استفاده از روش عددی اجزای محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس، تأثیر نوع وصله در عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون درختی بررسی می‌شود. بدین منظور پس از مقایسه نتایج عددی مدل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی متناظر یکی از اتصالات تیر به ستون درختی (نمونه CT-B) و تأیید صحت شیوه مدل‌سازی، تأثیر نوع روش طراحی وصله در میزان استهلاک انرژی، سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و شاخص‌های خسارت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۳- روش‌های طراحی وصله تیر

طراحی اتصالات تیر به ستون درختی باید به گونه‌ای باشد که مودهای گسیختگی شکل‌پذیر زودتر از مودهای گسیختگی ترد اتفاق بیافتند [۲] (شکل ۳). با انجام طراحی مناسب می‌توان مودهای گسیختگی شکل‌پذیر و مطلوب را حاکم کرد. بر این اساس، سه نوع روش طراحی برای وصله تیر در آیین‌نامه‌های طراحی پیشنهاد شده است که در قسمت بعد به روش طراحی هر یک از آنها پرداخته شده است.

تدریجی بال تیر ریشه نه تنها سبب افزایش شکل‌پذیری اتصال می‌شود بلکه باعث دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون خواهد شد. لی و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۶، لغزش پیچ‌های اتصالات تیر به ستون درختی را به ازای نسبت‌های مختلف طول تیر به عمق تیر ارزیابی کردند. هدف پژوهش آنها، ارزیابی تأثیر لغزش پیچ‌های وصله در عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون درختی بود. آه و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۴، اثر طراحی وصله ضعیف در عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون درختی را همراه با دو نمونه اتصال تیر به ستون درختی که اتصال پیچی وصله تیر آنها بر اساس لغزش بحرانی و پیش‌تینده طراحی شده بودند، مقایسه کردند. آزمایش‌های ایشان نشان داد که با به کارگیری رویکرد طراحی بر اساس وصله ضعیف، از مقاومت خمشی اتصال کاسته نخواهد شد و جذب انرژی بیشتری نسبت طراحی‌های سایر وصله حاصل می‌شود. ژانگ و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۷، عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون درختی با وصله Z شکل را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد، در صورت استفاده از اتصال مستقیم با مقطع کاهش یافته در تیر ریشه، میزان جذب انرژی، نسبت به حالتی که مقطع کاهش یافته در تیر میانی قرار دارد، بیشتر است. قره‌باغی و حسینی [۱۰] در سال ۲۰۱۷، اثر اندازه سوراخ پیچ‌ها و میزان پیش‌تیدگی پیچ‌ها را در عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون درختی بررسی کردند. نتایج مطالعه نیروی پیش‌تیدگی پیچ‌ها موجب کاهش ظرفیت خمشی و جذب انرژی اتصال می‌شود. وتنسور و کوتسال [۱۱] در سال ۲۰۱۸، تأثیر طول ریشه را در چگونگی تشکیل مفصل پلاستیک در اتصالات تیر به ستون درختی به صورت عددی بررسی کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که در صورت قرار گرفتن وصله پیچی در محل مفصل پلاستیک، شاخص‌های خسارت و احتمال ترک خوردگی سوراخ‌های پیچ نزدیک به وجه ستون، افزایش پیدا می‌کند. با توجه به تحقیقات انجام شده، تاکنون اثر روش طراحی وصله در عملکرد لرزه‌ای و پیش‌پذیرفتگی اتصالات تیر



شکل (۳): مودهای شکست در اتصالات تیر به ستون درختی.

اساس مقاومت نهایی، به دلیل اینکه میزان تقاضای لنگر خمشی در محل وصله تیر کمتر از محل اتصال تیر ریشه به ستون است، می‌توان وصله را برای تقاضای کمتری از لنگر خمشی طراحی کرد؛ به گونه‌ای که وصله به‌عنوان یک فیوز خمشی عمل کند. بر این اساس، میزان تقاضای لنگر خمشی طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود. از طرفی در این حالت، تعداد پیچ‌های وصله بر اساس اتصالات اتکایی با رعایت الزامات اتصالات اصطکاکی محاسبه می‌شوند [۲].

$$M_f = M_{ps} + V \times a \leq M_{pb} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، M_f لنگر منتقل شده به وجه ستون، M_{ps} لنگر پلاستیک وصله تیر، M_{pb} لنگر پلاستیک تیر ریشه، V نیروی برشی ناشی از مجموع برش لرزه‌ای حاصل از تشکیل مفصل پلاستیک در محل وصله و بارهای ثقلی و a فاصله مرکز وصله تیر تا بر ستون است.

۴- بررسی و نقد مطالعه اُه و همکاران

اُه و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۴، تأثیر وصله ضعیف در عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیرستون درختی را بررسی کردند. به این منظور، آنها سه نمونه اتصال تیر به ستون درختی که وصله‌هایشان بر اساس سه روش بیان شده در قسمت ۳ طراحی شده بودند را به‌صورت آزمایشگاهی ارزیابی کردند. نام‌گذاری اتصالات تیر به ستون درختی طراحی شده در مقاله ایشان با توجه به نوع وصله در نظر گرفته شده برای آنها عبارتند از: وصله طراحی شده بر اساس مقاومت نهایی (CT)، وصله طراحی شده بر اساس اتصال اتکایی (CT-B) و وصله طراحی شده بر اساس وصله ضعیف (CT-R). جزئیات نمونه اتصال‌های تیر به ستون درختی بررسی شده در مقاله اُه و همکاران [۳] در شکل (۴)

۳-۱- طراحی وصله بر اساس اتصال لغزش بحرانی

در طراحی وصله پیچی بر اساس مقاومت نهایی، مطابق با رابطه (۱)، فرض بر این است که ظرفیت خمشی وصله تیر باید بزرگ‌تر یا برابر ظرفیت پلاستیک تیر با مقطع کوچک‌تر باشد. این روش در آیین‌نامه مبحث دهم مقررات ملی ساختمان پیشنهاد شده است. بر این اساس، ظرفیت پلاستیک وصله از ظرفیت پلاستیک تیر ریشه بیشتر خواهد بود. تعداد پیچ‌های وصله در این حالت بر اساس طراحی اتصالات لغزش بحرانی محاسبه می‌شوند [۱۲].

$$M_{ps} \geq M_{pb} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، M_{ps} لنگر پلاستیک در محل وصله تیر و M_{pb} لنگر پلاستیک تیر ریشه است.

۳-۲- طراحی وصله بر اساس اتصال پیش‌تنیده

در طراحی وصله تیر بر اساس اتصال پیش‌تنیده برخلاف طراحی بر اساس مقاومت نهایی، تعداد پیچ‌ها برحسب اتصالات اتکایی محاسبه می‌شوند اما الزامات مربوط به اجرای اتصالات اصطکاکی باید برای آنها رعایت شود. آستانه اصل [۱۳] به‌منظور جلوگیری از لغزش پیچ‌های وصله تحت بارهای بهره‌برداری مطابق با رابطه (۲) پیشنهاد می‌کند که لنگری که سبب لغزش پیچ‌ها می‌شود، باید $1/25$ برابر لنگر موجود در محل وصله باشد.

$$M_{ps} \geq 1.25M_{(service,splice)} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، M_{ps} لنگر پلاستیک وصله تیر و $M_{(service,splice)}$ میزان لنگر خمشی موجود در وصله ناشی از ترکیب بارهای بهره‌برداری است.

۳-۳- طراحی بر اساس وصله ضعیف

در طراحی وصله بر اساس وصله ضعیف برخلاف طراحی بر

بال و جان تیر ریشه نمونه‌ها توسط جوش شیاری با نفوذ کامل به بال ستون جوش داده شدند. مکان وصله تیر در تمامی نمونه‌ها از بر ستون ۹۰۰ میلی‌متر فاصله دارد.

ابعاد اجزای وصله تیر نمونه‌ها در جدول (۱) و مشخصات مصالح استفاده شده در ساخت آنها در جدول (۲) آورده شده است. تمامی نمونه‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که الزامات مربوط به چشمه اتصال و اصل تیر ضعیف - ستون قوی موجود در آیین‌نامه AISC341-16 را برآورده می‌کنند [۱۵].

در طراحی تیرهای نمونه‌ها از فولاد نوع SHN400 با تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال و تنش گسیختگی ۴۰۰ مگاپاسکال استفاده شده است و همچنین نوع فولاد به کار رفته در ساخت ستون‌ها از نوع SHN490 با تنش تسلیم ۳۲۵ مگاپاسکال و تنش گسیختگی ۴۹۰ مگاپاسکال است [۳]. تمامی پیچ‌های استفاده شده در وصله بال و جان از نوع پر مقاومت M20 با تنش تسلیم ۹۰۰ مگاپاسکال و تنش نهایی ۱۰۰۰ مگاپاسکال است [۳]. قطر سوراخ‌ها از نوع استاندارد و متناسب با قطر اسمی پیچ، ۲۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

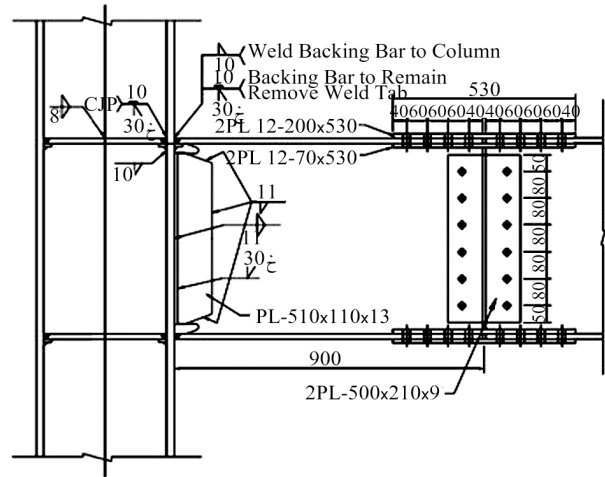
جدول (۱): مشخصات نمونه‌های اتصال تیر به ستون درختی (ابعاد بر حسب میلی‌متر) [۳].

نمونه	وصله بال		وصله جان	
	تعداد ورق‌های وصله بال	تعداد ورق‌های وصله جان	تعداد ورق‌های وصله جان	تعداد ورق‌های وصله جان
CT	بالا	۳۲	۲	۱۲
	پایین	۳۲	۲	۱۲
CT-B	بالا	۲۴	۲	۱۲
	پایین	۲۴	۲	۱۲
CT-R	بالا	۲۴	۲	۱۲

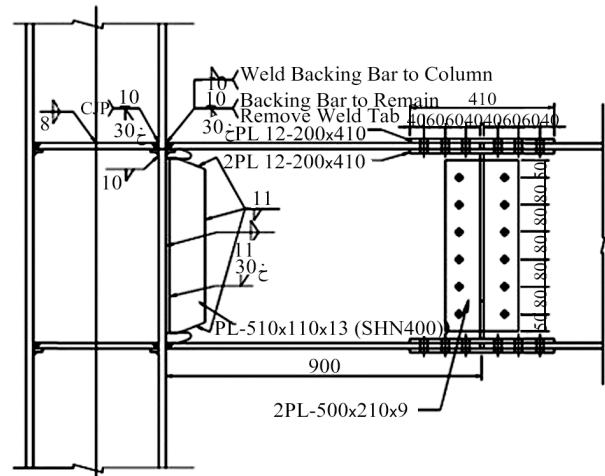
جدول (۲): نتایج آزمایش کششی مصالح [۳].

المان	موقعیت نمونه	F_{ue}	F_{ye}	ستون
		(مگاپاسکال)	(مگاپاسکال)	
ستون	جان	۵۵۹/۷	۳۹۸/۴	H-۴۰۰×۴۰۰×۱۳×۲۱
	بال	۵۷۱/۴	۴۰۷/۹	
تیر	جان	۴۷۰/۵	۳۳۶/۳	H-۶۰۰×۲۰۰×۱۱×۱۷
	بال	۴۵۵/۸	۲۹۲/۳	

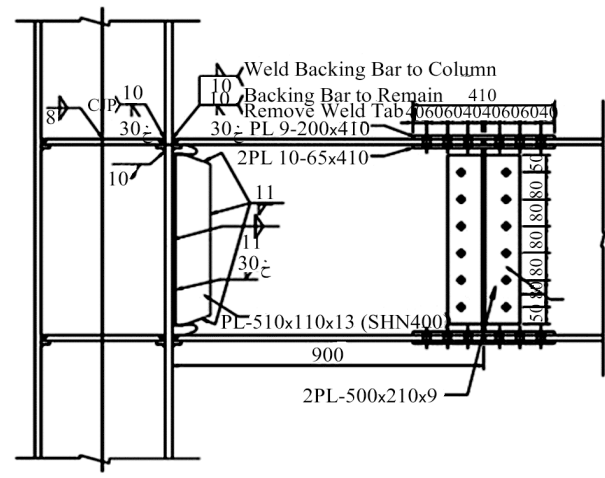
نشان داده شده است. در مطالعه ایشان برای اتصال تیر ریشه به ستون نمونه‌ها از اتصال پیش‌پذیرفته خمشی بال جوش شده‌ی تقویت نشده - جان جوش شده (WUF-W)^۳ استفاده شده است [۱۴].



(الف) نمونه اتصال تیر به ستون درختی CT



(ب) نمونه اتصال تیر به ستون درختی CT-B



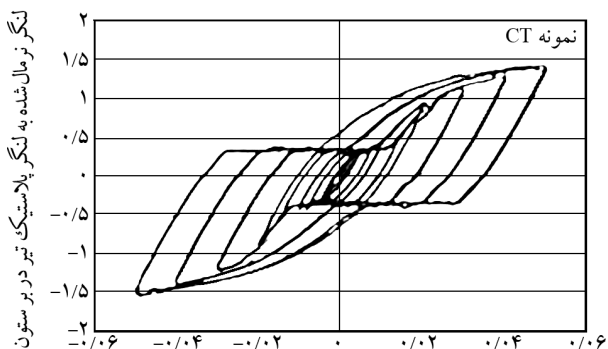
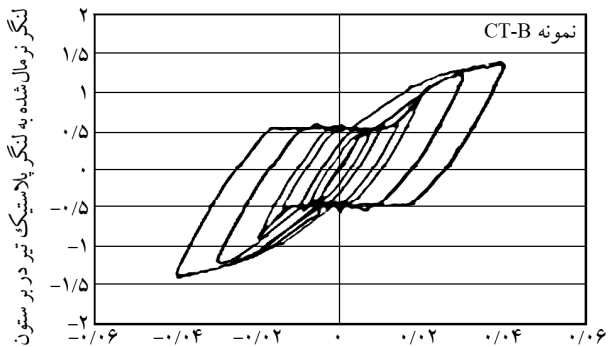
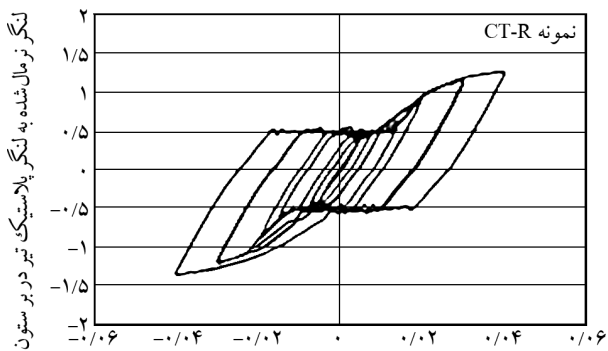
(پ) نمونه اتصال تیر به ستون درختی CT-R

شکل (۴): جزئیات نمونه اتصال‌های تیر به ستون درختی بررسی شده در مقاله او و همکاران [۳].

ثابت شده است. تکیه گاه‌های دو سر ستون به صورت مفصلی است و انتهای آزاد تیر جهت اعمال بارگذاری به جک هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰۰ کیلو نیوتن متصل شده است.

منحنی‌های هیستریزس اتصالات تیر به ستون درختی مطالعه آه و همکاران [۳] در شکل (۶) نشان داده شده است.

بررسی تحقیقات انجام شده توسط آه و همکاران [۳] نشان می‌دهد که نمونه‌های آزمایشگاهی آنها ایراد داشته و پیچ‌های وصله تیر به اندازه‌ای که از عملکرد وصله انتظار می‌رفت پیش تنیده نشدند و مطابقتی با طراحی‌های انجام شده ندارد. منحنی‌های هیستریزس به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی ایشان نیز بیان کننده



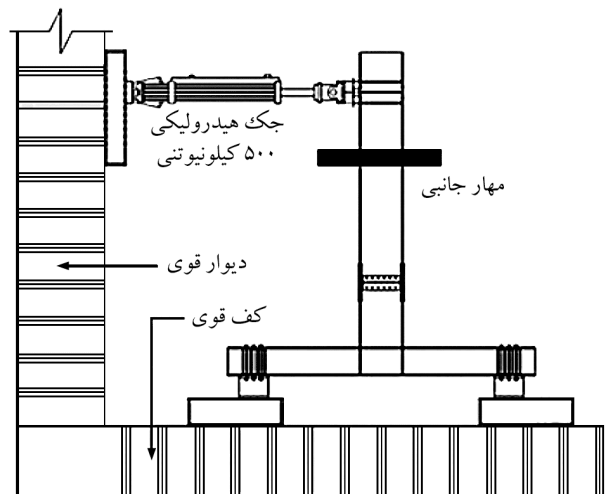
نسبت دررفت طبقه

شکل (۶): منحنی هیستریزس اتصالات تیر به ستون درختی مطالعه آه و همکاران [۳].

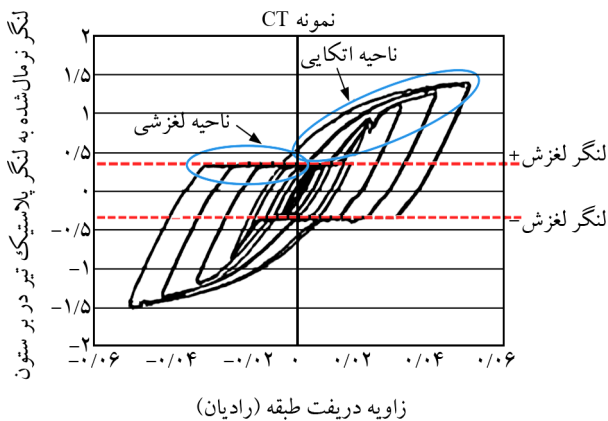
جدول (۳): پروتکل بارگذاری استفاده شده در مقاله آه و همکاران [۳].

شماره گام بارگذاری	زاویه دررفت	تعداد چرخه‌ها
۱	۰/۰۰۳۷۵	۶
۲	۰/۰۰۵	۶
۳	۰/۰۰۷۵	۶
۴	۰/۰۱	۴
۵	۰/۰۱۵	۲
۶	۰/۰۲	۲
۷	۰/۰۳	۲
۸	۰/۰۴	۲
۹	۰/۰۵	۲

پروتکل بارگذاری استفاده شده در مقاله آه و همکاران [۳] در جدول (۳) نشان داده شده است. بدین ترتیب که ابتدا دررفت‌های ۰/۰۰۳۷۵، ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۷۵ هر کدام شش چرخه به انتهای تیر اعمال شدند سپس چهار چرخه دررفت ۰/۰۱، دو چرخه دررفت ۰/۰۱۵ و دو چرخه دررفت ۰/۰۲ به تیر وارد شد. در ادامه، در هر گام بارگذاری که معادل دو چرخه بود، ۰/۰۱ رادیان به دررفت طبقه اضافه شد و بارگذاری آنقدر ادامه پیدا کرد تا در اتصال شکست مشاهده شود یا بارگذاری به دررفت ۰/۰۵ رادیان برسد. در شکل (۵)، شماتیکی از برپایش اتصال تیر به ستون درختی در آزمایش آه و همکاران [۳] نشان داده شده است. همان گونه که در شکل (۵) نشان داده شده است، جهت جلوگیری از حرکت ستون در هنگام بارگذاری، دو انتهای ستون به کف قوی آزمایشگاه



شکل (۵): شماتیک آزمایش آه و همکاران [۳].



شکل (۷): منحنی هیستریزس اتصال تیر به ستون درختی CT در آزمایش‌ها و همکاران [۳].

۵- مدل‌سازی عددی المان محدود

بررسی نتایج آزمایشگاهی‌ها و همکاران [۳] نشان داد که پیچ‌های وصله تیر به اندازه کافی پیش‌تینده نشدند؛ لذا به منظور اصلاح کردن مقدار پیش‌تیدگی پیچ‌ها می‌توان از تحلیل‌های عددی کمک گرفت. در این تحقیق از نرم‌افزار ABAQUS، به عنوان یکی از معتبرترین نرم‌افزارهای اجزای محدود غیرخطی که علاوه بر توانایی مدل‌سازی المان‌های پیوسته قابلیت مدل‌سازی اندرکنش‌های تماسی بین سطوح و ایجاد نیروی پیش‌تیدگی در پیچ را دارد، استفاده شده است. در این قسمت به نحوه مدل‌سازی اتصالات تیر به ستون درختی پرداخته شده است. به منظور مدل‌سازی عددی، مشخصات هندسی مدل‌ها مطابق با قسمت ۴ در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، نام‌گذاری اتصالات تیر به ستون درختی با توجه به نوع اتصال وصله پیچی در نظر گرفته شده برای آنها عبارتند از: وصله طراحی شده بر اساس اتصالات لغزش بحرانی CT-SC، وصله طراحی شده بر اساس اتصالات پیش‌تینده CT-PT و وصله طراحی شده بر اساس وصله ضعیف CT-W. نمونه‌های CT-PT، CT-SC و CT-W به ترتیب مشابه نمونه‌های CT-B، CT-R و CT-R است، با این تفاوت که نیروی پیش‌تیدگی پیچ‌های وصله در آنها اصلاح شده است.

۵-۱- مدل‌سازی فولاد

با توجه به اینکه اطلاعات مرتبط با منحنی تنش کرنش فولاد

این موضوع هستند که نمونه‌های آزمایشگاهی آنها مطابق شرایط طراحی در نظر گرفته شده برای آنها نیست و لغزش پیچ‌ها زودتر از زمانی که از طراحی انتظار می‌رفت، اتفاق افتاده است. برای اثبات این ادعا، نمونه اتصال CT که وصله تیر آن بر اساس اتصال لغزش بحرانی طراحی شده است، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به روش طراحی که برای وصله تیر نمونه CT در نظر گرفته شده، انتظار می‌رود که ابتدا تیر ریشه تسلیم شود و سپس لغزش رخ دهد. در این حالت از روش طراحی وصله، در صورتی که نسبت لنگر موجود ($M_{available}$) به لنگر پلاستیک اسمی تیر ریشه (M_{pb}) در بر ستون بزرگ‌تر یا مساوی یک ($\frac{M_{available}}{M_{pb}} \geq 1$) باشد، لغزش اتفاق می‌افتد (خطوط افقی در منحنی هیستریزس)؛ در حالی که منحنی‌های هیستریزس به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی‌ها و همکاران [۳] این امر را تأیید نمی‌کند و نسبت لنگر موجود به لنگر پلاستیک اسمی تیر ریشه در بر ستون در چرخه‌های اولیه هیستریزس کمتر از یک ($\frac{M_{available}}{M_{pb}} < 1$) است. این موضوع نشان‌دهنده این است که لغزش پیچ‌ها زودتر از تسلیم شدن تیر ریشه اتفاق افتاده است. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده، منحنی‌های هیستریزس اتصالات تیر به ستون درختی مورد ارزیابی در مطالعه‌ها و همکاران [۳] شامل ناحیه لغزشی و اتکایی تسلیم است. خطوط افقی مشاهده شده در منحنی هیستریزس نشان‌دهنده لغزش بین سطوح وصله و پیچ‌ها است و خطوط منحنی شکل بیانگر تماس پیچ با بدنه سوراخ‌های پیچ است که منجر به ناحیه اتکایی می‌شود. با توجه به اینکه لنگر لغزش مثبت و منفی در محدوده ۰/۵ تا -۰/۵ قرار دارد و بیشتر از یک نیست می‌توان نتیجه گرفت، پیچ‌ها به اندازه‌ای که از طراحی انتظار می‌رفت، پیش‌تینده نشدند. با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌شود که استدلال بیان شده برای نمونه اتصال‌های CT-B و CT-R نیز صادق است؛ لذا در این مقاله با اصلاح نیروی پیش‌تیدگی پیچ‌ها با استفاده از روش عددی المان محدود مطابق با آیین‌نامه‌های طراحی به بررسی تأثیر نوع روش طراحی اتصال وصله پیچی در عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون درختی پرداخته می‌شود.

که نمونه‌ها علاوه بر اینکه تحت بارگذاری رفت و برگشتی باشند، در چرخه‌های با جابه‌جایی‌های زیاد وارد ناحیه پلاستیک و سخت‌شوندگی کرنشی شوند؛ لذا در مدل‌سازی فولاد می‌بایستی تأثیر این دو مورد در رفتار مصالح فولادی دیده شود. چون در مدل‌سازی اتصالات با افزایش سطح تسلیم به دلیل وارد شدن فولاد به ناحیه سخت‌شوندگی کرنشی^۴ و انتقال سطح تسلیم به دلیل بارهای رفت و برگشتی مواجه هستیم از مدل سخت‌شوندگی ترکیبی^۵ چابوش (رفتار همسانگرد و پویا) استفاده شده است [۲۰-۲۱]. این مدل رفتاری، ترکیبی از سخت‌شوندگی همسان گرد چرخه‌ای و سخت‌شدگی پویا است. منظور از رفتار همسان گرد چرخه‌ای، افزایش سطح تسلیم به علت وارد شدن فولاد به ناحیه سخت‌شوندگی کرنشی تحت بارگذاری چرخه‌ای است. مدل رفتاری سخت‌شدگی همسان گرد در بارگذاری چرخه‌ای مطابق با رابطه (۸) [۲۰-۲۱] تعریف می‌شود.

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + Q[1 - \exp(-b\varepsilon_p)] \quad (8)$$

در رابطه (۸)، σ_0 تنش تسلیم، Q ماکزیمم اندازه سطح تسلیم، b نرخ تغییرات اندازه سطح تسلیم با افزایش کرنش پلاستیک، ε_p کرنش پلاستیک است. مقادیر سخت‌شدگی مطابق با جدول (۴) به نرم‌افزار آباکوس معرفی شده است.

۲-۵- مدل‌سازی اندرکنش‌های تماسی

یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌سازی اتصالات تیر به ستون درختی، مدل‌سازی سطوح در تماس با یکدیگر است. عدم مدل‌سازی صحیح سطوح تماسی منجر به نتایج نادرست و عدم همگرایی تحلیل خواهد شد. در نرم‌افزار آباکوس می‌توان با استفاده از دو روش جنرال و سطح به سطح^۶، جفت‌های تماسی^۷

و پیچ‌ها در مقاله آه و همکاران [۳] داده نشده است، منحنی تنش کرنش مصالح مصرفی طبق جدول (۲) با استفاده از مدل رفتاری رامبرگ اسگود اصلاح شده [۱۶-۱۸] به نرم‌افزار آباکوس معرفی شدند. فرم اصلی تابع رامبرگ اسگود در رابطه (۴) آورده شده است:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (4)$$

در رابطه (۴)، ε کرنش مهندسی، σ تنش مهندسی، E مدول الاستیسیته و n پارامتر توانی رامبرگ اسگود است. ضریب توانی رامبرگ اسگود (n) به مشخصات مکانیکی مصالح وابسته است. اگرچه برای محاسبه این پارامتر روش‌های مختلفی ارائه شده است، ولی از رابطه (۵) [۱۶] به منظور محاسبه این پارامتر بیشتر استفاده می‌شود.

$$n = \frac{\ln(\varepsilon_{us} / 0.2)}{\ln(F_{tu} / F_{ty})} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، F_{tu} مقاومت نهایی، F_{ty} مقاومت تسلیم و ε_{us} کرنش متناظر با تنش مقاومت نهایی است. به منظور محاسبه ε_{us} کرنش متناظر با تنش مقاومت نهایی رابطه (۶) [۱۸] با توجه به مقدار افزایش طول ε_r نمونه ارائه شده است.

$$\varepsilon_{us} = 100 \left(\varepsilon_r - \frac{F_{tu}}{E} \right) \quad (6)$$

درصد افزایش طول نمونه برای فولاد مصرفی مطابق با

رابطه (۷) [۱۹] به دست آمده است.

$$\varepsilon_r = 0.6 \left(1 - \frac{F_{ye}}{F_{ue}} \right) \quad (7)$$

در رابطه (۷)، ε_r کرنش نهایی و F_{ye} تنش تسلیم و F_{ue} تنش نهایی است.

مشخصات فولاد مورد استفاده در ورق‌های وصله متناظر با

فولاد SHN400 فرض شد. بارگذاری چرخه‌ای سبب می‌شود

جدول (۴): مشخصات پلاستیک فولاد SHN400 و SHN490.

توضیحات تکمیلی	متغیرهای سخت‌شدگی همسان گرد		کرنش پلاستیک گسیختگی	تنش گسیختگی اسمی (مگا پاسکال)	تنش تسلیم اسمی (مگا پاسکال)	نام فولاد
	Q	b				
سخت‌شدگی همسان گرد چرخه‌ای	۱۱۰	۲/۸	۰/۲۶	۵۰۰-۳۷۵	۲۳۵	SHN400
سخت‌شدگی همسان گرد چرخه‌ای	۱۵۰	۸	۰/۲۱	۶۳۰-۴۷۰	۳۴۵	SHN490

بین اجزا انتقال پیدا می‌کند. این انتقال تا زمانی که مقدار تنش‌های برشی موجود به تنش برشی بحرانی نرسیده است، ادامه پیدا می‌کند؛ هنگامی که تنش‌های برشی موجود به تنش برشی بحرانی رسید، رفتار دوم یعنی لغزش بین سطوح به وجود می‌آید. در این حالت انتقال تنش برشی با لغزش بین سطوح همراه است [۲۰].

تنش برشی بحرانی طبق رابطه (۱۰) [۲۰] محاسبه می‌شود:

$$\tau_{crit} = \mu P \quad (10)$$

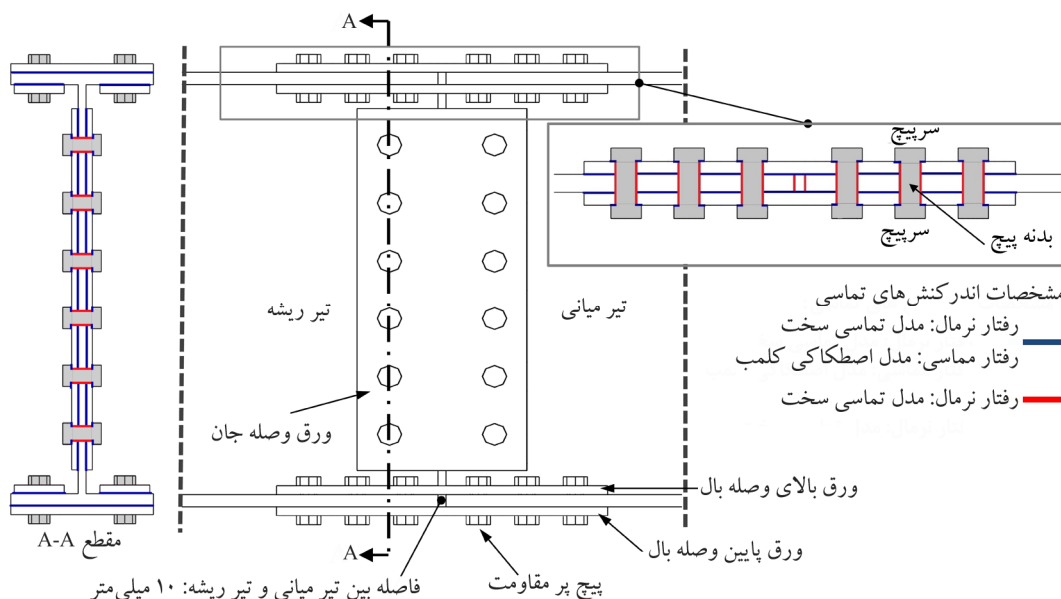
در رابطه (۱۰)، μ ضریب اصطکاک، P فشار تماسی عمود بر سطح و τ_{crit} تنش برشی بحرانی بین سطوح تماسی است. اندرکنش‌های تماسی در نظر گرفته شده در محل وصله تیر در شکل (۸) نشان داده شده است. خطوط آبی رنگ نشان‌دهنده رفتار نرمال و مماسی است و خطوط قرمز رنگ فقط رفتار نرمال را نشان می‌دهد. تعداد جفت‌های تماسی در نظر گرفته شده برای هر مدل در جدول (۵) آورده شده است.

با توجه به اینکه در نتایج آزمایشگاهی مطالعه‌أه و همکاران [۳] در نواحی جوشکاری شکست و گسیختگی گزارش نشده است و همچنین اطلاعاتی در مورد تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری در مقاله ایشان موجود نیست، از مدل‌سازی جوش صرف‌نظر شده و تیر ریشه توسط اندرکنش تماسی Tie به ستون متصل شده است.

را تعریف کرد [۲۰]. به سطوحی که در تماس با یکدیگر هستند و یا در میانه تحلیل در تماس باهم قرار می‌گیرند و یا امکان برقراری تماس بین آنها وجود دارد جفت‌های تماسی می‌گویند. در این مقاله از روش سطح به سطح به دلیل دقت بالایی که دارد به منظور معرفی جفت‌های تماسی استفاده شده است. رفتار فیزیکی جفت‌های تماسی تعریف شده، شامل لغزش مماسی (رفتار مماسی^۸) و جدا شدن از هم (رفتار نرمال^۹) است. به منظور اعمال جفت‌های تماسی از روش پنالتی^{۱۰} و مدل اصطکاکی کولمب استفاده شده است. همچنین برای در نظر گرفتن رفتار نرمال از مدل تماس سخت^{۱۱} بهره گرفته شده است. در روش پنالتی اجازه نفوذ گره‌های سطوح پایه^{۱۲} به سطوح پیرو^{۱۳} داده می‌شود. از این رو با مشخص شدن تابع نفوذ گره‌ها و سختی نرمال تماسی بین سطوح، تنش‌های فشاری قابل محاسبه خواهند بود. فشار تماسی مطابق رابطه (۹) [۲۰] تعریف می‌شود.

$$p = \begin{cases} 0 & \text{if } u_n \geq 0 \\ K_n \cdot u_n & \text{if } u_n < 0 \end{cases} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، u_n تابع نفوذ و K_n سختی تماسی در راستای نرمال است. در مدل اصطکاکی کولمب دو نوع رفتار اصطکاکی ایستایی و جنبشی بین سطوح در نظر گرفته شده است. در طول رفتار اصطکاکی ایستایی، تنش‌های برشی بدون هیچ گونه لغزشی



شکل (۸): اندرکنش‌های تماسی در نظر گرفته شده در محل وصله پیچی.

جدول (۵): جفت‌های تماسی وصله.

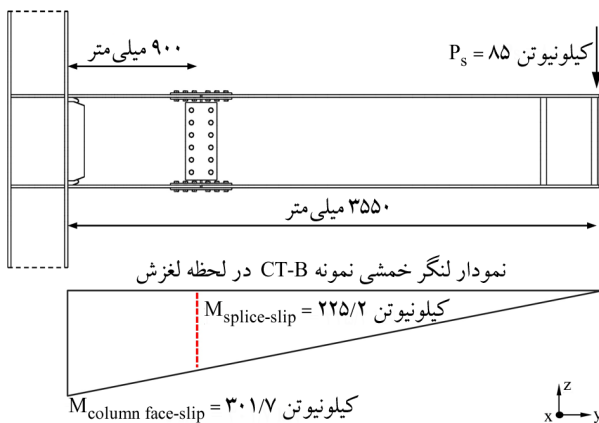
تعداد جفت‌های تماسی در نظر گرفته شده برای نمونه‌های مورد بررسی			سطح تماس پیرو	سطح تماس پایه
CT-W	CT-PT	CT-SC		
۴۸	۴۸	۶۴	ورق‌های وصله بال	سریچ دمبلی
۲۴	۲۴	۲۴	ورق وصله جان	سریچ دمبلی
۳۶	۳۶	۴۴	بدنه سوراخ پیچ	بدنه پیچ
۶	۶	۶	بال تیر ریشه و بال تیر میانی	ورق‌های وصله بال
۲	۲	۲	جان تیر ریشه و جان تیر میانی	ورق‌های وصله جان

به صورت معکوس محاسبه شدند. نحوه محاسبه متوسط مقدار نیروی پیش‌تیدگی پیچ‌ها و ضریب اصطکاک بین سطوح نمونه CT-B در ادامه توضیح داده شده است. با توجه به جدول (۶) که از نتایج آزمایشگاهی آه و همکاران [۳] مستخرج شده است، زمانی که مقدار نیروی جک هیدرولیکی به ۸۵ کیلو نیوتن می‌رسد، نمونه CT-B دچار لغزش می‌شود.

بر اساس مقدار نیروی جک هیدرولیکی به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی آه و همکاران [۳] در هنگام شروع لغزش، لنگر خمشی ($M_{splice-slip}$) که سبب لغزش پیچ‌های وصله می‌شود با توجه به شکل (۱۰) قابل محاسبه است. $M_{column face-slip}$ در شکل (۱۰) نشان‌دهنده میزان لنگر خمشی در بر ستون، در شروع لغزش است.

جدول (۶): نیروی اعمال شده به جک در هنگام لغزش پیچ‌ها.

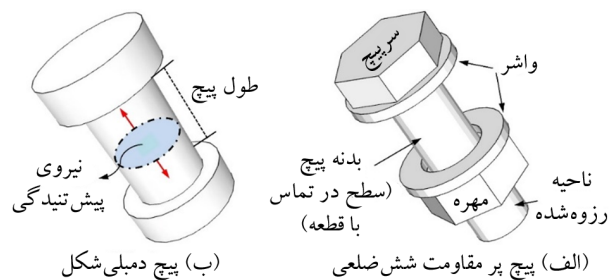
CT-B	نمونه
۸۵ کیلو نیوتن	مقاومت در برابر لغزش (نیروی اعمال شده توسط جک هیدرولیکی)



شکل (۱۰): نمودار لنگر خمشی اتصال تیر به ستون درختی نمونه CT-B در آستانه لغزش پیچ‌های وصله.

۳-۵- مدل‌سازی پیچ‌های پر مقاومت و اعمال نیروی پیش‌تیدگی

در این مطالعه به منظور کاهش زمان تحلیل و برطرف کردن مشکلات همگرایی که ممکن است در روند حل مسئله پیش‌آید، هندسه پیچ‌ها به صورت دمبلی شکل در نظر گرفته شدند و از مدل‌سازی واشرها صرف نظر گردید. بر این اساس مساحت سریچ‌های دمبلی شکل برابر با مساحت سطح تماس واشرها در نظر گرفته شد. نیروی پیش‌تیدگی ایجاد شده ناشی از بستن پیچ، با استفاده از روش پیش‌بار ۱۴ در نرم‌افزار آباکوس، به صورت یک نیروی کششی در وسط بدنه‌ای پیچ مدل‌سازی شد [۲۰] (شکل ۹). در اثر این نیرو، در پیچ تنش‌های کششی به وجود آمده و عکس‌العمل این نیرو از طریق سریچ‌ها در ورق‌های وصله ایجاد فشار می‌کند.



شکل (۹): مدل‌سازی پیچ.

۴-۵- تشخیص ضریب اصطکاک و نیروی پیش‌تیدگی نمونه CT-B

مقادیر ضریب اصطکاک بین سطوح و مقدار نیروی پیش‌تیدگی پیچ‌ها در مقاله آه و همکاران [۳] بیان نشده است. به همین منظور با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و روش طراحی، مقادیر آنها با توجه به لنگر خمشی که سبب لغزش پیچ‌ها می‌شود

ورق شماره ۱ به دلیل داشتن مساحت بیشتر نسب به ورق شماره ۲، نیروی محوری بیشتری در آن ایجاد می‌شود. لذا ابتدا لغزش در ورق شماره ۱ صورت می‌گیرد. در این صورت می‌توان نتیجه گرفت که در زمان لغزش، نیروی محوری به‌دست آمده در ورق شماره ۲ با نیروی اصطکاکی بین ورق شماره ۱ و بال تیر ریشه برابر است، لذا مطابق با رابطه (۱۴) [۱۲] خواهیم داشت:

$$n_{\text{bolt}}(\phi\mu D_u h_f T_b n_s) = T_{\text{splice-1}} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، n_{bolt} تعداد پیچ‌ها، ϕ ضریب تقلیل مقاومت و برابر ۱، μ ضریب اصطکاک، D_u نسبت پیش‌تندگی متوسط پیچ‌ها به پیش‌تندگی حداقل پیچ‌ها و برابر ۱/۱۳، h_f ضریب کاهش به خاطر وجود ورق‌های پرکننده در بین قطعات متصل به یکدیگر و برابر ۱، T_b حداقل نیروی پیش‌تندگی، n_s تعداد صفحات لغزش برابر ۱، $T_{\text{splice-1}}$ سهم نیروی محوری ورق شماره ۱ از لنگر $M_{\text{splice-slip}}$ است. با توجه به رابطه (۱۴)، مقادیر ضریب اصطکاک بین سطوح و حداقل مقدار نیروی پیش‌تندگی مشخص نیستند. لذا دو حالت می‌توان در نظر گرفت:

حالت اول: حداقل مقدار نیروی پیش‌تندگی، مطابق آیین‌نامه AISC [۱۲] برای پیچ M20، ۱۷۹ کیلو نیوتن در نظر گرفته شود و ضریب اصطکاک محاسبه شود. در این حالت مطابق با رابطه (۱۵) ضریب اصطکاک بین سطوح برابر با ۰/۱۸ است. از طرفی ضریب اصطکاک برای فولاد معمولی ناشی از نورد گرم بین ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ است و در صورتی که ماسه‌پاشی شود می‌توان ضریب اصطکاک فولاد را تا ۰/۵ افزایش داد [۲۲]. به همین علت، چون ضریب اصطکاک به‌دست آمده در بازه بیان شده نیست می‌توان نتیجه گرفت که نیروی پیش‌تندگی کمتر از حداقل در نظر گرفته شده در آیین‌نامه AISC است. لذا حالت دوم باید بررسی شود.

$$\mu = \left(\frac{T_{\text{splice-1}}}{\phi D_u h_f T_b n_s n_{\text{bolt}}} \right) \left(\frac{227.10}{1 \times 1.13 \times 1 \times 179 \times 1 \times 6} \right) = 0.18 \quad (15)$$

با توجه با لنگر خمشی ($M_{\text{splice-slip}}$) به‌دست آمده در محل وصله می‌توان کوپل نیروی ایجادشده در ورق‌های وصله را با توجه به رابطه (۱۱) محاسبه کرد.

$$T_{u\text{-slip}} = \left(\frac{M_{\text{splice-slip}}}{d} \right) = \frac{225.25}{0.612} = 368.05 \text{ kN} \quad (11)$$

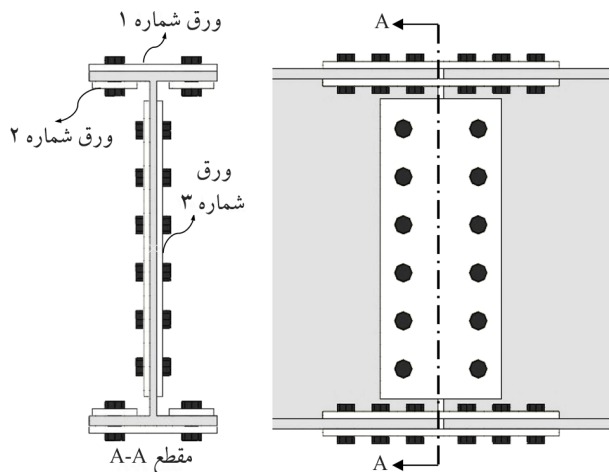
در رابطه (۱۱)، $T_{u\text{-slip}}$ کوپل نیروی ایجادشده در ورق‌های وصله بال، d فاصله مرکز به مرکز ورق‌های وصله بال و $M_{\text{splice-slip}}$ میزان لنگر خمشی در آستانه لغزش پیچ‌های وصله است.

توزیع کوپل نیروی حاصل از لنگر خمشی ($M_{\text{splice-slip}}$) در هر یک از قسمت‌های وصله بال تیر توسط رابطه $\frac{MQ}{I}$ (که در آن Q ممان استاتیکی مقطع موردنظر، M لنگر و I ممان اینرسی مقطع است) به دست می‌آید. از این رو سهم نیروی هر یک از ورق‌های اتصال وصله بال $T_{\text{splice-1}}$ و $T_{\text{splice-2}}$ به ترتیب از رابطه‌های (۱۲) و (۱۳) تعیین می‌شود.

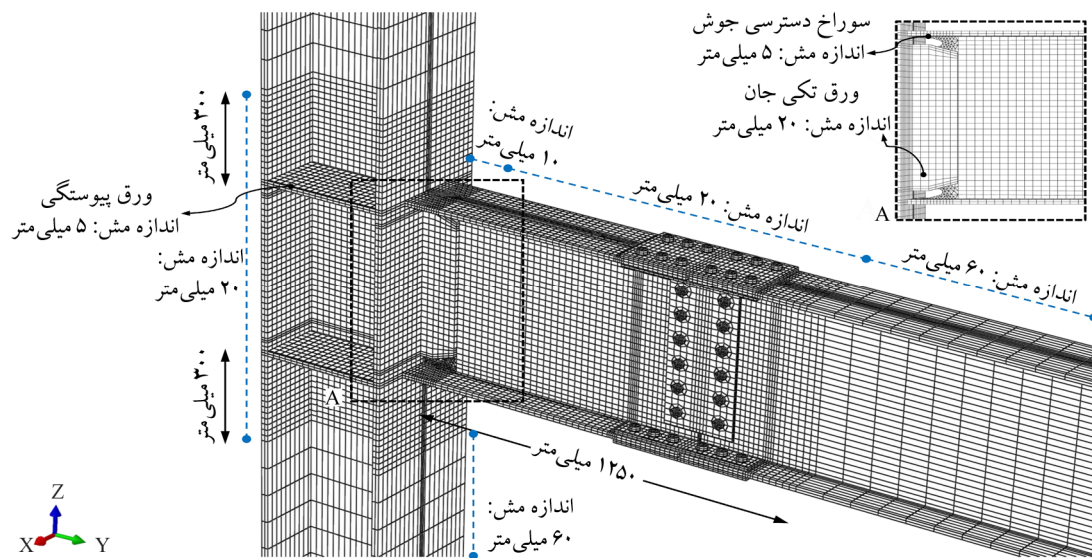
$$T_{\text{splice-1}} = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} \times T_{u\text{-slip}} = 0.62 \times 368.05 = 227.10 \text{ kN} \quad (12)$$

$$T_{\text{splice-2}} = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \times T_{u\text{-slip}} = 0.38 \times 368.05 = 139.86 \text{ kN} \quad (13)$$

در روابط فوق Q_1 و Q_2 به ترتیب ممان استاتیکی ورق‌های شماره ۱ و ۲ در شکل (۱۱) است.

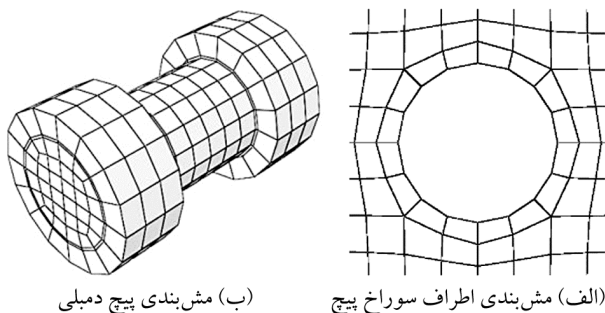


شکل (۱۱): مقطع عرضی نمونه اتصال CT-B در محل وصله تیر.



شکل (۱۲): شبکه‌بندی اجزای اتصال تیر به ستون درختی.

را نیز دارد [۲۰]. شبکه‌بندی اجزای اتصال و اندازه مش‌ها در شکل (۱۲) نشان داده شده است. شبکه‌بندی به گونه‌ای است که با نزدیک شدن به ناحیه وصله تیر و ناحیه اتصال تیر ریشه به ستون، به دلیل افزایش تنش و تغییر شکل‌های بیشتر، اندازه المان‌ها کوچک‌تر شده تا به جواب‌های صحیح‌تری منجر شود. اندازه المان‌ها با توجه به تعداد المان‌هایی که در محیط سوراخ‌ها قرار گرفته‌اند، تعیین شده‌اند (شکل ۱۳).



شکل (۱۳): شبکه‌بندی سوراخ پیچ و پیچ M20.

۵-۶- شرایط مرزی و بارگذاری

شرایط مرزی در نظر گرفته شده، مطابق با شرایط آزمایشگاهی که شامل دو تکیه‌گاه مفصلی در دو انتهای ستون و محل قرارگیری مهار جانبی تیر می‌شود، در شکل (۱۴-الف) نشان داده شده است. به منظور بررسی عملکرد لرزه‌ای اتصالات

حالت دوم: ضریب اصطکاک مطابق با ضرایب مشخص شده در آیین‌نامه در نظر گرفته شود و مقدار نیروی پیش‌تندگی محاسبه شود. با توجه ضریب اصطکاک مطرح شده در آیین‌نامه کره جنوبی [۲۳] که فقط به ضریب اصطکاک ۰/۵ اشاره شده است، می‌توان نیروی پیش‌تندگی موجود پیچ‌ها را مطابق با رابطه (۱۶) به دست آورد.

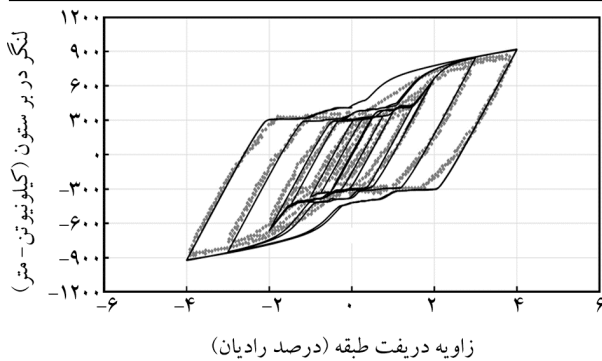
$$T_b = \left(\frac{T_{Splice-1}}{\phi \mu D_u h_f n_s n_{bolt}} \right) = \left(\frac{227.10}{1 \times 0.5 \times 1.13 \times 1 \times 0.5 \times 6} \right) = 67 \text{ kN} \quad (16)$$

بر این اساس در مدل‌سازی مدل CT-B ضریب اصطکاک بین سطوح ۰/۵ و مقدار نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها ۶۷ کیلونیوتن در نظر گرفته شد. برای سایر نمونه‌ها، ضریب اصطکاک بین سطوح برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

۵-۵- شبکه‌بندی مدل

شبکه‌بندی تمامی اجزای اتصال با المان C3D8R از سری المان‌های سه‌بعدی نرم‌افزار آباکوس صورت پذیرفت. این المان دارای هشت گره بوده و هر گره سه درجه آزادی انتقالی است که از روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته برای حل انتگرال‌ها استفاده می‌کند. المان C3D8R قابلیت کنترل پدیده ساعت شنی^{۱۵}

.....نمونه آزمایشگاهی آه و همکاران (نمونه) — مدل اجزای محدود



شکل (۱۵): مقایسه نمودار هیستریزس نتایج آزمایشگاهی آه و همکاران [۳] و عددی برای نمونه CT-B.

آزمایش نمونه CT-B برابر $876/8$ کیلونیوتن در متر بوده در حالی که میزان محاسبه شده از روش عددی معادل $918/4$ کیلونیوتن در متر ارزیابی شده است که نشانگر اختلاف $4/5$ درصدی در مقادیر حداکثر بوده و مؤید دقت مناسب در شیوه مدل‌سازی است. نیرویی که در اثر اعمال بارگذاری چرخه‌ای با دامنه زاویه دررفت $0/75$ درصد رادیان منجر به لغزش پیچ‌ها می‌شود، در نتایج آزمایشگاهی و عددی به ترتیب برابر 85 و 81 کیلونیوتن ($4/7$ درصد خطا) ارزیابی شد.

مشخصه دیگری که مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی آه و همکاران [۳] داشت، کرنش پلاستیک معادل PEEQ است. همان‌طور که در شکل (۱۶) نشان داده شده است، توزیع کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در مدل تحلیلی نمونه آزمایش CT-B، مطابقت خوبی با نواحی رنگ ریختگی مدل آزمایشگاهی آه و همکاران [۳] دارد.

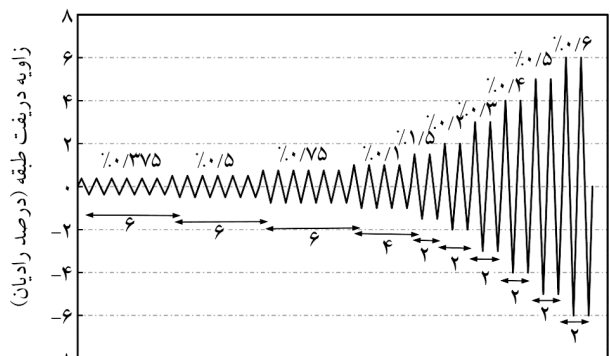
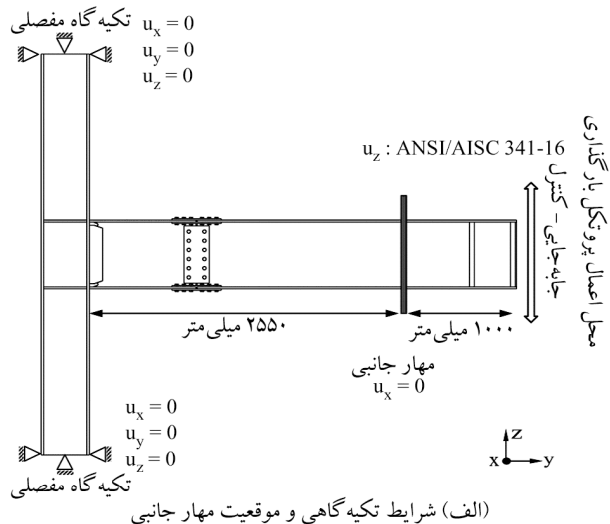
این پارامتر را می‌توان برای پیش‌بینی توزیع تغییر شکل‌های پلاستیک به کار برد. همچنین این پارامتر مؤثر که نشان‌دهنده رفتار ترد یا شکل‌پذیر اتصال است به وسیله رابطه (۱۷) [۲۱] تعریف می‌شود:

$$PEEQ = \frac{1}{\sqrt{2(1+\nu)}} \times \quad (17)$$

$$\left[(\varepsilon_x^{pl} - \varepsilon_y^{pl})^2 + (\varepsilon_y^{pl} - \varepsilon_z^{pl})^2 + (\varepsilon_x^{pl} - \varepsilon_z^{pl})^2 + \frac{2}{3}(\gamma_{xy}^{pl^2} + \gamma_{yz}^{pl^2} + \gamma_{xz}^{pl^2}) \right]^{1/2}$$

در رابطه (۱۷)، ε_i^{pl} و $i = x, y, z$ مؤلفه‌های کرنش نرمال

از بارگذاری استاندارد چرخه‌ای آیین‌نامه AISC 341-16 مطابق با (شکل ۱۴-ب) به انتهای آزاد تیر استفاده شده است. برای جلوگیری از لهیدگی انتهای آزاد تیر در اثر بارگذاری از دو جفت سخت‌کننده در دو طرف تیر استفاده شده است.



(ب) تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای AISC 341-16

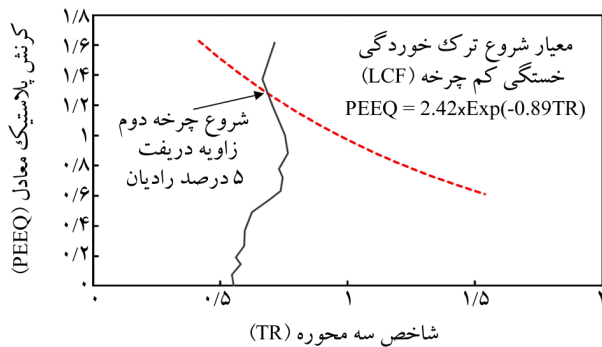
شکل (۱۴): شرایط مرزی و اعمال بارگذاری.

۶- صحت‌سنجی

به منظور ارزیابی دقت مدل‌سازی و صحت‌سنجی از مدل آزمایشگاهی CT-B آه و همکاران [۳] استفاده شده است. مدل CT-B از نظر هندسی مشابه مدل CT-PT است؛ با این تفاوت که در مدل CT-PT پیچ‌ها با توجه آیین‌نامه AISC به اندازه کافی پیش‌تیده شده‌اند. پس از انجام تحلیل، با مقایسه منحنی‌های لنگر-زاویه دررفت نمونه CT-B به دست آمده از نتایج عددی و آزمایشگاهی، انطباق قابل‌ملاحظه‌ای در رفتار آنها مشاهده می‌گردد (شکل ۱۵). حداکثر لنگر در بر ستون به دست آمده از

در رابطه (۱۹)، σ_m تنش هیدرو استاتیک و تنش فون میسر است. در صورتی که در محل انتهایی سوراخ دسترسی جوش اتصال، منحنی کرنش پلاستیک معادل - شاخص سه محوره به گونه‌ای باشد که از حد خستگی کم چرخه عبور کند، شکست رخ خواهد داد. با توجه به آیین نامه Fema-351 [۲۶] و بررسی میزان تقاضای کرنش پلاستیک در محل انتهایی سوراخ دسترسی جوش در تحلیل عددی نشان می‌دهد که پدیده خستگی با چرخه‌ای کم (LCF) می‌تواند موجب شکست بال پایینی تیر شده باشد (شکل ۱۷).

در تحلیل عددی در شروع چرخه‌ی دوم زاویه دریافت ۵ درصد رادیان، افت مقاومت شدیدی مشاهده شد و تحلیل از حالت همگرایی خارج شد. لذا به منظور مقایسه آن با نتیجه آزمایشگاهی، منحنی هیستریزس نمونه عددی تا زاویه دریافت ۴ درصد رادیان رسم شده است.



شکل (۱۷): بررسی معیار شروع ترک خوردگی خستگی کم چرخه (LCF) در محل انتهایی سوراخ دسترسی جوش نمونه CT-B.

۷- اصلاح آزمایش‌های انجام شده توسط آه و همکاران با استفاده از روش عددی المان محدود

همان‌طور که در بخش هدف و روند تحقیق بیان شد، مطالعات آزمایشگاهی آه و همکاران [۳] به دلیل رعایت نکردن مقدار پیش‌تندگی پیچ‌ها، مود لغزش زودتر از مود تسلیم رخ داده است و این موضوع باعث شده است که نمونه‌ها مطابق با روش طراحی در نظر گرفته شده برای آنها نباشند. لذا در این قسمت با استفاده از ضریب اصطکاک به دست آمده از صحت‌سنجی و رعایت حداقل نیروی پیش‌تندگی برای پیچ

پلاستیک، γ_{ij}^{pl} و مؤلفه‌های کرنش برشی $ij = xy, yz, xz$ پلاستیک و γ ضریب پواسون است.

همان‌طور که در مقاله آه و همکاران [۳] ذکر شده است، بال پایینی تیر نمونه آزمایشگاهی CT-B در محل انتهایی سوراخ دسترسی جوش، در شروع چرخه‌ی اول زاویه دریافت ۵ درصد رادیان، دچار شکست ناگهانی شد (شکل ۱۶- الف). علت این شکست توسط ایشان بیان نشده است؛ لذا در این مقاله، به منظور بررسی شکست، از مدل نمایی تعریف شده در رابطه (۱۸) [۲۴] برای توصیف معیار شروع ترک خوردگی خستگی کم چرخه^{۱۶} (LCF) استفاده شد.

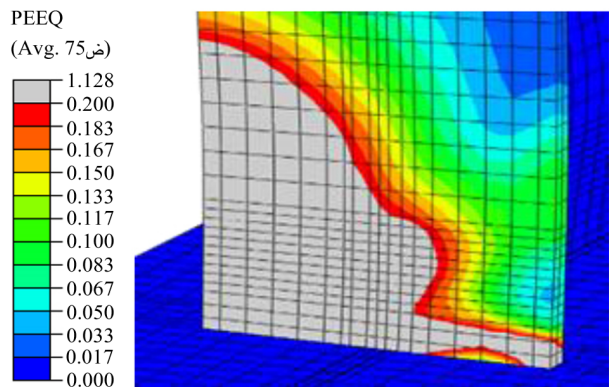
$$PEEQ = 2.42 \times \text{Exp}(-0.89TR) \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، TR شاخص سه محوره با توجه به رابطه (۱۹) [۲۵] محاسبه می‌شود.

$$TR = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad (19)$$



(الف) شکست بال پایینی تیر ریشه در شروع چرخه اول با زاویه دریافت ۵ درصد [۳]

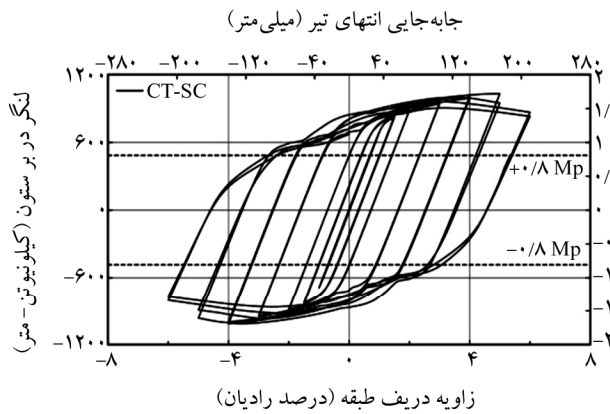


(ب) میزان کرنش پلاستیک در شروع چرخه اول با زاویه دریافت ۵ درصد

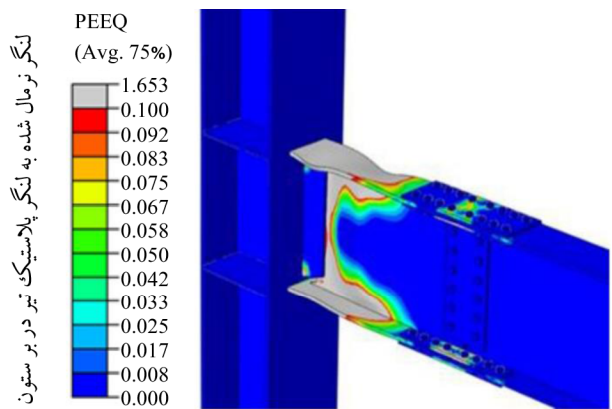
شکل (۱۶): مقایسه مود خرابی گزارش شده در مطالعه آه و همکاران [۳] با میزان کرنش پلاستیک معادل به دست آمده از نتایج عددی.

مطابق با ضوابط لرزه‌ای AISC 341-16 برای اتصالات تیر به ستون قاب خمشی ویژه انتظار می‌رود که کلیه اتصالات اجزای آنها توانایی تحمل حداقل زاویه دررفت ۴ درصد رادیان را داشته باشند و مقاومت خمشی اندازه‌گیری شده‌ی اتصال در وجه ستون در زاویه دررفت ۴ درصد رادیان باید حداقل برابر

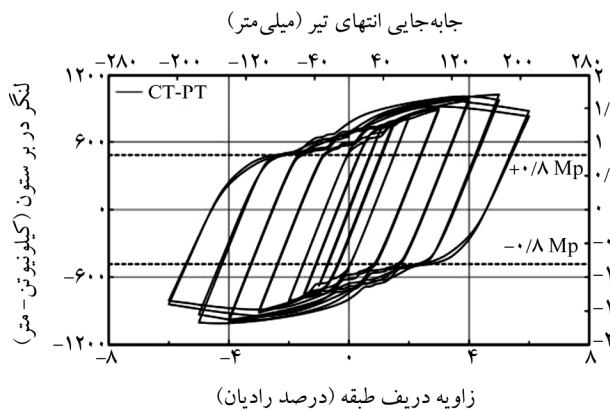
M20 (۱۷۹ کیلو نیوتن حداقل نیروی پیش‌تندگی لازم برای پیچ M20)، آزمایش‌های آه و همکاران [۳] با استفاده از تحلیل‌های المان محدود غیرخطی اصلاح شدند. تغییر شکل، توزیع کرنش پلاستیک و منحنی‌های هیستریزس نمونه اتصالات تیر به ستون درختی در شکل (۱۸) نشان داده شده است.



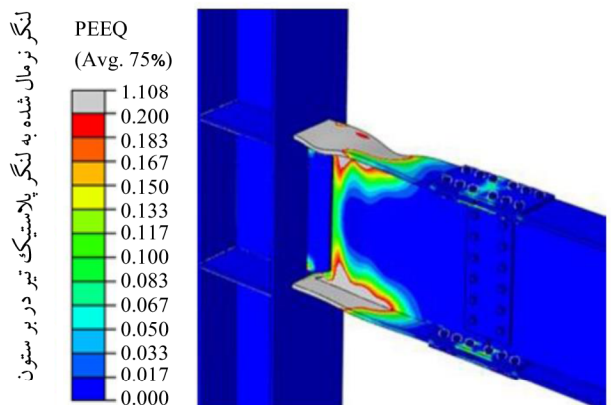
(ب) منحنی لنگر- زاویه دررفت مدل CT-SC



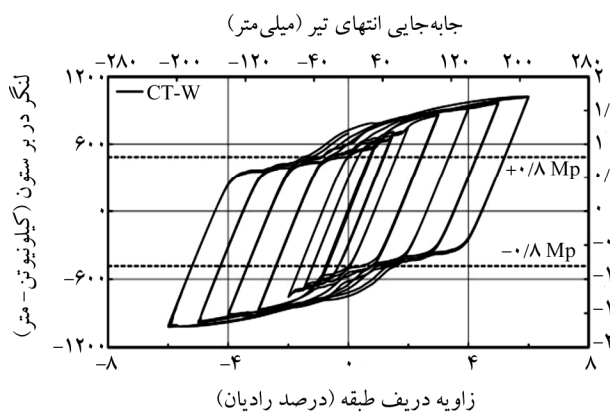
(الف) توزیع کرنش پلاستیک در زاویه دررفت ۶ درصد رادیان مدل CT-SC



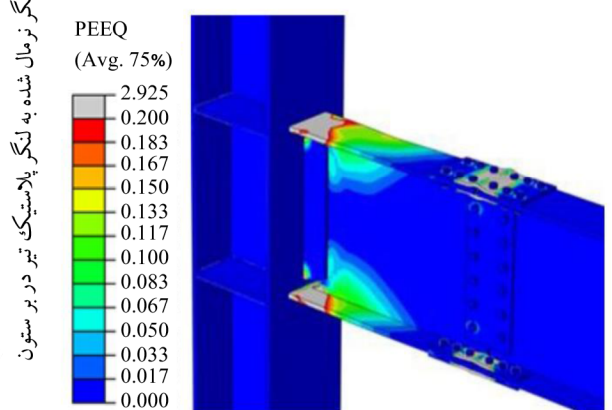
(ت) منحنی لنگر- زاویه دررفت مدل CT-PT



(پ) توزیع کرنش پلاستیک در زاویه دررفت ۶ درصد رادیان مدل CT-PT



(ج) منحنی لنگر- زاویه دررفت مدل CT-W



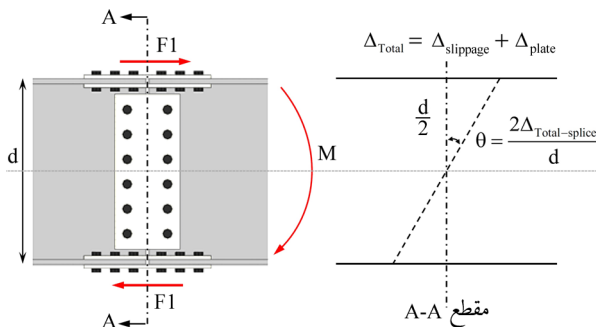
(ث) توزیع کرنش پلاستیک در زاویه دررفت ۶ درصد رادیان مدل CT-W

شکل (۱۸): نتایج المان محدود غیرخطی اتصالات تیر به ستون درختی.

پلاستیک تا فاصله ۴۰۰ میلی متر از بر ستون ادامه پیدا کرده است و مفصل پلاستیک عمدتاً در محل وصله پیچی رخ داده است.

۸- تأثیر نوع روش طراحی وصله تیر در میزان صلبیت

بر اساس مطالعات آستانه اصل در صورتی که اتصال تیر ریشه به ستون صلب باشد، در آن صورت سختی اتصالات تیر به ستون درختی بر اساس صلبیت وصله تعیین می شود [۲]. لذا به منظور تعیین سختی اتصالات تیر به ستون درختی، ابتدا میزان دوران نسبی وصله پیچی و میزان لنگر خمشی در محل وصله محاسبه و سپس با ضوابط آیین نامه AISC مربوط به تعیین صلبیت اتصالات مقایسه شدند. میزان دوران نسبی وصله پیچی مطابق شکل (۱۹) تعیین شد. جابه جایی وصله بال ناشی از لغزش و تغییر شکل الاستیک و پلاستیک در راستای افقی است. طبق آیین نامه AISC اگر $m = \frac{K_S L}{EI} \geq 20$ باشد می توان اتصال را به صورت صلب و اگر $m = \frac{K_S L}{EI} < 2$ باشد می توان اتصال را به صورت ساده در نظر گرفت و اتصالاتی با سختی های بین این دو مرز به صورت نیمه صلب در نظر گرفته می شوند.



شکل (۱۹): تعیین میزان دوران نسبی وصله پیچی.

سختی سکانتی وصله $K_{S-Bolted\ splice}$ به عنوان یک مشخصه از سختی اتصال به صورت رابطه (۲۰) در نظر گرفته می شود.

$$K_{S-Bolted\ splice} = \frac{M_s}{\theta_s} \quad (20)$$

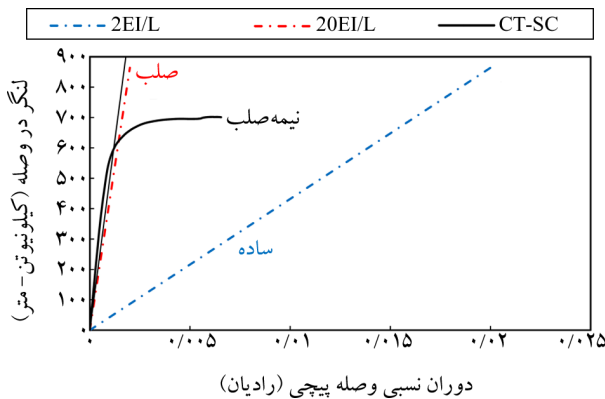
در رابطه (۲۰)، M_s و θ_s به ترتیب لنگر و دوران در بارهای سرویس هستند. میزان لنگر تحت بارهای سرویس M_s مطابق با رابطه (۲۱) محاسبه شده است.

$$M_s = S_x F_y \quad (21)$$

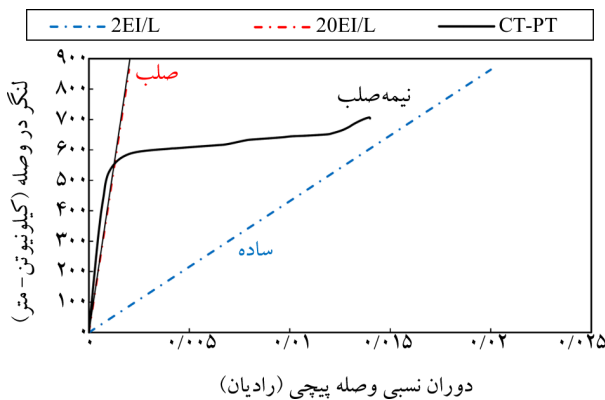
۰/۸ لنگر پلاستیک تیر متصل شده باشد. با توجه به منحنی های هیستریزس مشاهده می گردد که مقدار لنگر در وجه ستون در زاویه دریافت ۴ درصد رادیان از ۰/۸ لنگر پلاستیک تیر بیشتر است. همچنین در مدل های مورد مطالعه تا زاویه دریافت ۴ درصد رادیان کمانشی رخ نداده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که تمام اتصالات شکل پذیر بوده و مقاومت لازم را برای تحمل بارهای وارده دارند. در صورتی که نمونه های مورد بررسی، ضوابط مربوط به صلبیت را مطابق با الزامات آیین نامه ارضا کنند، قابلیت استفاده در قاب های خمشی ویژه را دارند و می توانند به عنوان یک اتصال از پیش پذیرفته معرفی شوند. این موضوع در قسمت های بعد مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به منحنی های هیستریزس به دست آمده، مشاهده می شود که نوع روش طراحی وصله تأثیر زیادی بر روی مقاومت خمشی نهایی اتصال تحت بار چرخه ای نمی گذارد اما می تواند بر روی مقاومت خمشی در هنگام لغزش، تسلیم و همچنین بر روی مدهای خرابی اتصالات تیر به ستون درختی تأثیر گذار باشد.

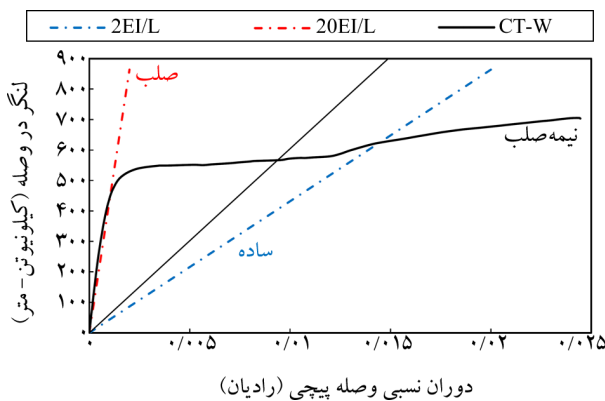
توزیع کرنش پلاستیک معادل نشان داده شده در شکل (۱۸-الف) بیانگر این است که پتانسیل پلاستیک شدن در انتهای تیر ریشه بیشتر سایر اجزای اتصال است. در این نوع از اتصال محل تشکیل مفصل پلاستیک از بر ستون تا ابتدای ورق وصله بال به اندازه ۶۲۰ میلی متر ادامه پیدا کرده است. همچنین وسط ورق های وصله بال هم با زاویه تقریباً ۴۵ درجه در اطراف پیچ های اولیه وصله وارد ناحیه پلاستیک شده است. توزیع کرنش پلاستیک معادل در شکل (۱۸-ب) نشان می دهد که پتانسیل پلاستیک شدن در ناحیه انتهای تیر ریشه و وصله تیر بیشتر سایر اجزای اتصال است. در این نوع از اتصال محل تشکیل مفصل پلاستیک تا فاصله ۶۰۰ میلی متر از بر ستون ادامه پیدا کرده است. در حالی که توزیع کرنش پلاستیک معادل نشان داده شده در شکل (۱۸-ث) بیانگر این است که پتانسیل پلاستیک شدن به ترتیب در ناحیه وصله بال و انتهای تیر بیشتر سایر اجزای اتصال است. در این نوع از اتصال، محل تشکیل مفصل پلاستیک در محل وصله و انتهای تیر ریشه است. محل تشکیل مفصل



شکل (۲۰): منحنی لنگر دوران نسبی در محل وصله پیچی نمونه اتصال تیر به ستون درختی CT-SC.



شکل (۲۱): منحنی لنگر دوران نسبی در محل وصله پیچی نمونه اتصال تیر به ستون درختی CT-PT.



شکل (۲۲): منحنی لنگر دوران نسبی در محل وصله پیچی نمونه اتصال تیر به ستون درختی CT-W.

در رابطه (۲۱)، F_y تنش تسلیم اسمی فولاد و S_x اساس مقطع الاستیک تیر حول محور قوی توسط است.

θ_s از محل تقاطع میزان لنگر تحت بارهای سرویس با منحنی لنگر دوران نسبی در محل وصله پیچی به دست می‌آید. منحنی لنگر دوران نسبی در محل وصله پیچی اتصالات مورد بررسی در شکل‌های (۲۰-۲۲) نشان داده شده است. برای تعیین سختی اتصالات تیر به ستون درختی، سختی وصله مهم است لذا با توجه به مطالعه آستانه اصل، در صورتی که طول تیر ریشه کمتر از ۱۵ درصد طول دهانه باشد، پارامتر سختی اتصالات تیر به ستون درختی بر اساس رابطه (۲۲) [۲] تعیین می‌شود.

$$m = \frac{K_{S-bolted\ splice}}{(EI/L)_{Beam}} \quad (22)$$

در رابطه (۲۲)، $K_{bolted\ splice}$ سختی اتصال وصله، L طول دهانه تیر و (EI) سختی خمشی تیر است. $K_{bolted\ splice}$ سختی اتصال تیر به ستون به روش سکانتی محاسبه می‌شود.

با توجه به مطالب بیان شده و شکل‌های (۲۰) تا (۲۲) میزان صلیبت و پارامتر سختی اتصالات تیر به ستون درختی در جدول (۷) محاسبه شده است. با توجه به این شکل‌ها نوع روش طراحی وصله در میزان صلیبت اتصالات تیر به ستون درختی تأثیر می‌گذارد. به گونه‌ای که اتصال CT-SC و اتصال CT-PT در دسته اتصالات صلب و CT-W در دسته اتصالات نیمه صلب قرار می‌گیرند. میزان صلیبت اتصالات تیر به ستون درختی بر اساس صلیبت وصله تعیین می‌شود. علت کاهش صلیبت اتصال تیر به ستون درختی به دلیل لغزش در بین سطوح وصله و تغییر طول ورق‌های وصله بال است. در صورتی که وصله اتصالات تیر به ستون درختی بر اساس اتصال لغزش بحرانی و پیش‌تیده طراحی شوند از نظر سختی جزو اتصالات صلب طبقه‌بندی می‌شوند.

جدول (۷): تعیین میزان صلیبت اتصالات تیر به ستون درختی.

اتصال	F_y (مگاپاسکال)	S_x (میلی متر مکعب)	M_s (کیلو نیوتن در متر)	θ_s (رادیان)	K_s (کیلو نیوتن در متر بر رادیان)	m	طبقه‌بندی اتصال
CT-SC	۲۳۵	۲۴۸۰۶۲۲	۵۸۲/۹	۰/۰۰۱۱	۵۲۹۹۰۹/۱	۲۳/۲	صلب
CT-PT	۲۳۵	۲۴۸۰۶۲۲	۵۸۲/۹	۰/۰۰۱۳	۴۴۸۳۸۴/۶	۲۰/۴	صلب
CT-W	۲۳۵	۲۴۸۰۶۲۲	۵۸۲/۹	۰/۰۰۹۶	۶۰۴۳۰/۱	۲/۸	نیمه صلب

پیش تنیده و وصله ضعیف طراحی شوند، مود خرابی تسلیم شدن تیر ریشه و وصله به تأخیر می‌افتد و ابتدا لغزش رخ می‌دهد.

۱۰- تأثیر نوع روش طراحی وصله تیر در میزان شکل پذیری

میزان شکل پذیری μ اتصالات تیر به ستون درختی، تحت بارگذاری چرخه‌ای، با توجه رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود [۹].

$$\mu = \frac{\theta_u}{\min(\theta_s, \theta_y)} \quad (23)$$

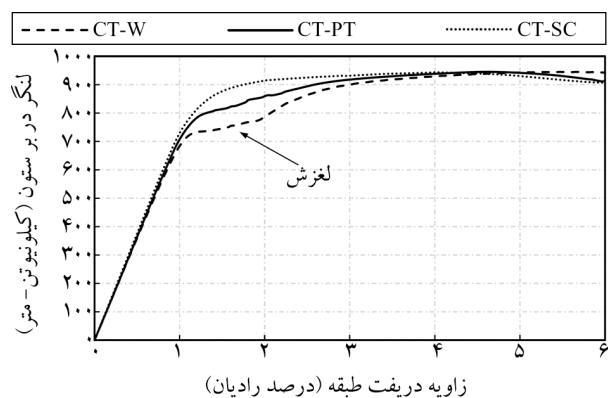
در رابطه (۲۳)، θ_u دوران نهایی اتصال در زمانی است که جابه‌جایی اتصال به حداکثر مقدار خود می‌رسد و افت مقاومت خمشی در آن زاویه بیشتر از ۲۰ درصد لنگر پلاستیک تیر نیست، θ_s دوران اتصال در زمانی است که اتصال شروع به لغزش می‌کند و θ_y دوران اتصال در زمانی است که شروع به تسلیم شدن می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۲۴) مشاهده می‌شود به‌منظور تعیین مقادیر دوران در هنگام لغزش و تسلیم شدن، از منحنی‌های انرژی مستهلک‌شده به دلیل اصطکاک بین سطوح و پلاستیک شدن فولاد در طول بارگذاری استفاده شده است. با استفاده از نمودارهای استهلاک انرژی جمع می‌توان تقدم و تأخیر مودهای خرابی تسلیم و لغزش پیچ‌ها بر اساس زاویه دریافت مشخص کرد. θ_s و θ_y گزارش شده در جدول (۵) با توجه به شکل (۲۴) به‌دست آمدند.

با توجه به شکل (۲۴-الف) مشاهده می‌شود که در نمونه اتصال تیر به ستون درختی CT، ابتدا تسلیم شدن تیر ریشه رخ می‌دهد و سپس لغزش پیچ‌ها اتفاق می‌افتد. به‌گونه‌ای که در زلزله‌های با شدت کم، حالت تسلیم شدن تیر ریشه به وجود می‌آید و در زلزله‌های قوی علاوه بر تسلیم شدن تیر ریشه، لغزش پیچ‌ها ایجاد می‌شود. با توجه به شکل (۲۴-ب) مشاهده می‌شود که در نمونه اتصال تیر به ستون درختی CT-B، ابتدا لغزش پیچ‌ها رخ می‌دهد و سپس تسلیم شدن شکل می‌گیرد. در این حالت مودهای خرابی لغزش پیچ‌ها و تسلیم شدن نزدیک به یکدیگر هستند.

۹- تأثیر نوع روش طراحی وصله تیر در مقاومت خمشی

مقاومت خمشی اتصالات یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که در بررسی عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون درختی می‌بایست به آن توجه شود لذا در این قسمت تأثیر وجود وصله در مقاومت خمشی اتصالات تیر به ستون درختی تحت اثر بارگذاری یکنواخت بررسی می‌شوند. منحنی لنگر-زاویه دریافت طبقه اتصالات CT-SC، CT-PT و CT-W تحت بارگذاری یکنواخت در شکل (۲۳) نشان می‌دهد که نوع روش طراحی وصله تأثیر زیادی در مقاومت نهایی اتصالات نمی‌گذارد اما می‌توان با استفاده از روش طراحی وصله مود خرابی لغزش و تسلیم شدن را کنترل کرد. مود خرابی لغزشی در وصله به علت لغزش پیچ‌ها و مود خرابی تسلیم شدن به علت وارد شدن فولاد به ناحیه پلاستیک رخ می‌دهد. خطوط افقی به وجود آمده در منحنی لنگر-زاویه دریافت طبقه اتصالات تیر به ستون درختی نشان‌دهنده مود خرابی لغزش است. لغزش ایجادشده در پیچ‌ها می‌تواند به‌عنوان یک ابزار اصطکاکی و جداساز سبب کاهش نیروهای لرزه‌ای ایجاد شده در اتصال شود و عملکرد لرزه‌ای اتصال را بهبود بخشد. از طرفی نتایج آزمایشگاهی و مطالعات تحلیلی نشان می‌دهند که این لغزش‌ها تأثیر قابل توجهی بر دریافت سازه در طول زلزله ندارد [۲]. با توجه به شکل (۲۳)، در صورتی که وصله اتصالات تیر به ستون درختی بر اساس اتصال لغزش بحرانی طراحی شوند، مود لغزش به تأخیر می‌افتد و در صورتی که وصله اتصالات تیر به ستون درختی بر اساس اتصال



شکل (۲۳): منحنی لنگر-زاویه دریافت طبقه اتصالات CT-PT، CT-SC و CT-W تحت بارگذاری یکنواخت.

اصطکاک نسبت به اتصال CT-PT پررنگ‌تر است.

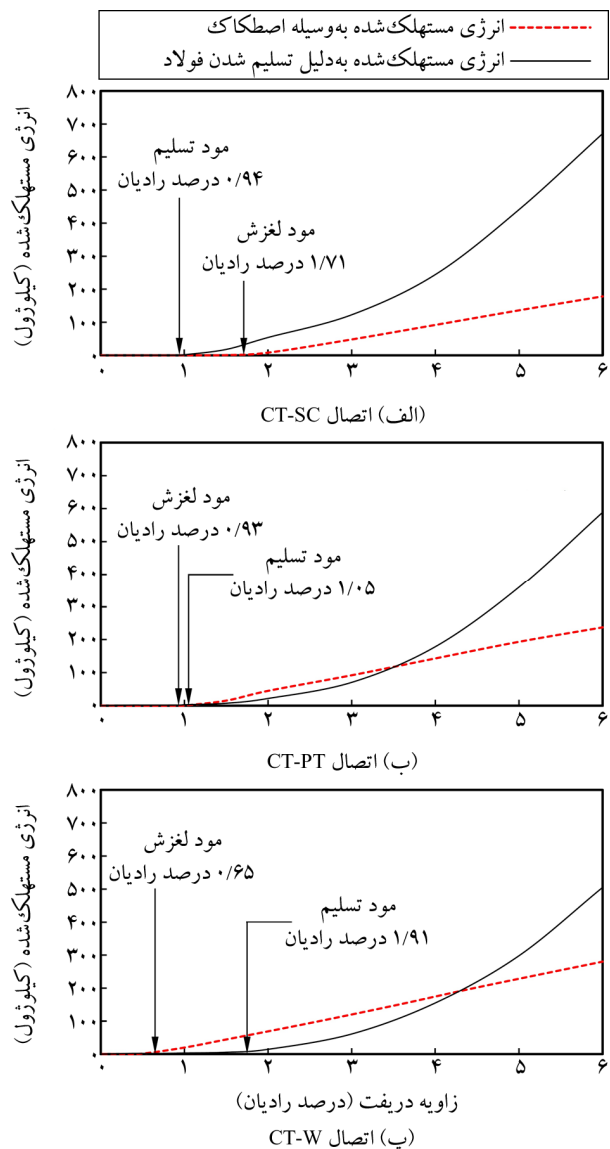
به دلیل این که تمام نمونه‌ها تا زاویه ۶ درصد رادیان بارگذاری شدند، دوران نهایی θ_{ii} اتصال‌ها برابر ۶ درصد رادیان است. با توجه به جدول (۸) مشاهده می‌شود که در صورتی که وصله بر اساس وصله ضعیف طراحی شده باشد اتصال شکل‌پذیری بیشتری از خود نشان می‌دهد. بیشتر بودن شکل‌پذیری اتصال تیر به ستون درختی CT-PT نسبت به اتصال CT-SC به دلیل اصطکاک و لغزش بین سطوح در وصله است. علت زیاد بودن شکل‌پذیری اتصال CT-W نسبت به دو اتصال CT-SC و CT-PT استفاده حداکثری از لغزش بین سطوح و پلاستیک شدن وصله است.

جدول (۸): تأثیر نوع روش طراحی وصله بر روی شکل‌پذیری اتصالات تیر به ستون درختی.

اتصال	θ_s (درصد رادیان)	θ_y (درصد رادیان)	θ_{ii} (درصد رادیان)	μ
CT-SC	۱/۷۱	۰/۹۴	۶/۰۰	۶/۳۸
CT-PT	۰/۹۳	۱/۰۵	۶/۰۰	۶/۴۵
CT-W	۰/۶۵	۱/۹۱	۶/۰۰	۹/۲۳

۱۱- تأثیر نوع روش طراحی وصله تیر در شاخص‌های خسارت

در تحلیل مدل‌های عددی انجام شده، با توجه به هدف و حیطه پژوهش، تأثیر شروع و گسترش ترک به تنهایی در مدل‌ها دیده نشدند و بر اساس شاخص‌های خسارت که از نتایج تحلیل به دست می‌آیند، به پیش‌بینی و نحوه شروع شکل‌گیری ترک با توجه به جزئیات اتصالات پرداخته شده است. در این قسمت، مقادیر شاخص‌های خسارت کرنش پلاستیک معادل و شاخص سه‌محوری نمونه‌ها در زاویه دررفت ۴ درصد رادیان استخراج و با یکدیگر مقایسه می‌شوند. با توجه به ضوابط آیین‌نامه AISC و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، هنگامی یک اتصال خمشی در رده اتصالات پیش‌پذیرفته قرار می‌گیرد که آن اتصال حداقل توانایی تحمل دررفت ۴ درصد رادیان را داشته باشد؛ به همین علت شاخص‌های خسارت در دررفت ۴ رادیان با یکدیگر

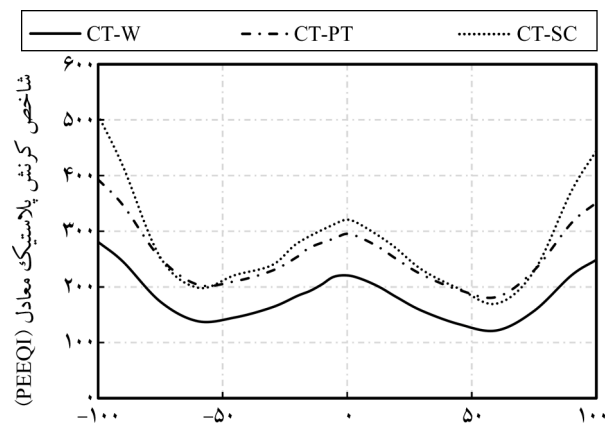


شکل (۲۴): میزان انرژی مستهلک‌شده تجمعی در برابر زاویه دررفت.

به گونه‌ای که در زلزله‌های با شدت کم حالت لغزش پیچ‌ها به وجود می‌آید و تأثیر بیشتری در استهلاک انرژی دارد و در زلزله‌های قوی علاوه بر لغزش پیچ‌ها، حالت تسلیم شدن تیر ریشه ایجاد می‌شود. با توجه به شکل (۲۴-پ) مشاهده می‌شود که در اتصال تیر به ستون درختی نمونه CT-W، ابتدا و لغزش رخ می‌دهد و سپس تسلیم شدن شکل می‌گیرد. در این حالت لغزش و پلاستیک شدن نزدیک به یکدیگر نیستند. به گونه‌ای که در زلزله‌های با شدت کم حالت لغزش به وجود می‌آید و در زلزله‌های قوی علاوه بر لغزش حالت تسلیم شدن تیر ریشه ایجاد می‌شود. در این حالت، نقش استهلاک انرژی از طریق

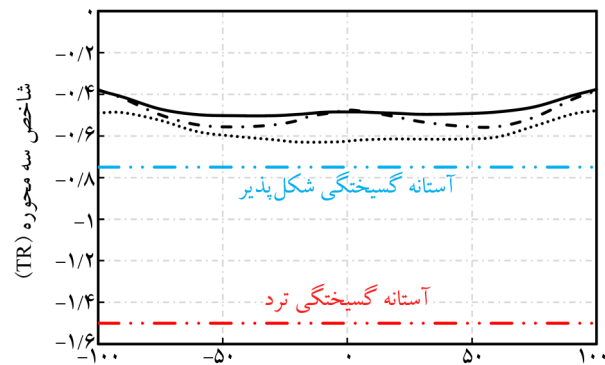
همان‌طور که مشاهده می‌شود، شاخص کرنش پلاستیک معادل در اتصال CT-SC دارای مقادیر بزرگ‌تری بوده و بزرگ‌ترین مقدار آن برابر ۵۰۰ در گوشه‌های مقطع تیر است که می‌تواند باعث گسیختگی جوش و در نتیجه خرابی اتصال شود. شاخص کرنش پلاستیک معادل در اتصال CT-W دارای مقادیر کمتری از اتصال CT-SC است و این موضوع مؤید کاهش کرنش‌ها و در نتیجه کاهش پتانسیل شکست اعم از ترد و شکل‌پذیر در محل بررسی شده است. شاخص کرنش پلاستیک در گوشه بال تیر اتصال CT-PT برابر ۳۹۰ است.

مقایسه شاخص سه‌محوره اتصالات در زاویه دریافت ۴ درصد رادیان نشان می‌دهند که سه اتصال در طول تحلیل دچار گسیختگی نشدند و با توجه به نزدیک بودن شاخص سه‌محوره به عدد ۰/۷۵ در صورتی که ناحیه بحرانی تعیین شده بخواد گسیخته شود،



فاصله از محور جان تیر (میلی متر)

الف) شاخص کرنش پلاستیک معادل در زاویه دریافت ۴ درصد رادیان



فاصله از محور جان تیر (میلی متر)

ب) شاخص سه‌محوره در زاویه دریافت ۴ درصد رادیان

شکل (۲۵): شاخص‌های مورد مطالعه در بال بالایی تیر ریشه به ستون.

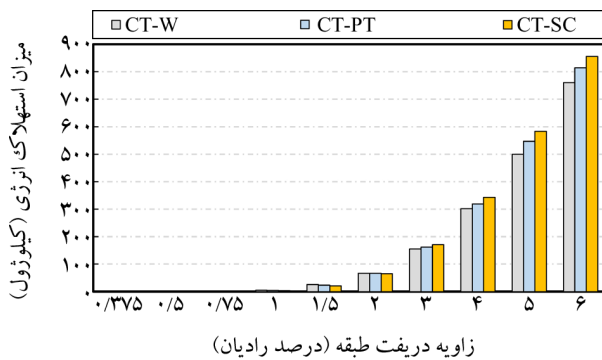
مقایسه شدند [۶، ۲۷]. به این منظور برای تمامی نمونه‌ها، اتصال بال بالایی تیر ریشه به ستون به‌عنوان ناحیه بحرانی انتخاب شد و شاخص‌های خسارت در این نواحی بررسی شدند. علت انتخاب این نواحی به این دلیل است که طبق تجربیات زلزله‌های گذشته در این نواحی خسارات سازه‌ای بیشتر متمرکز شده‌اند و بررسی شاخص‌های خسارت در این نواحی به شناخت بیشتر رفتار آنها کمک می‌کند.

شاخص کرنش پلاستیک معادل PEEQI، شاخص متداولی است که محققین برای تشخیص پتانسیل خسارت مصالح فولادی در اتصالات استفاده می‌کنند [۲۷-۲۹]. شاخص کرنش پلاستیک معادل PEEQI مطابق با رابطه (۲۴) به‌صورت نسبت کرنش پلاستیک به‌دست‌آمده از تحلیل به کرنش تسلیم فولاد بیان می‌شود. این شاخص برای قضاوت در مورد مقایسه رفتار مدل‌هایی با هندسه و پیکربندی مختلف و همچنین تعیین میزان کرنش پلاستیک موضعی مناسب است.

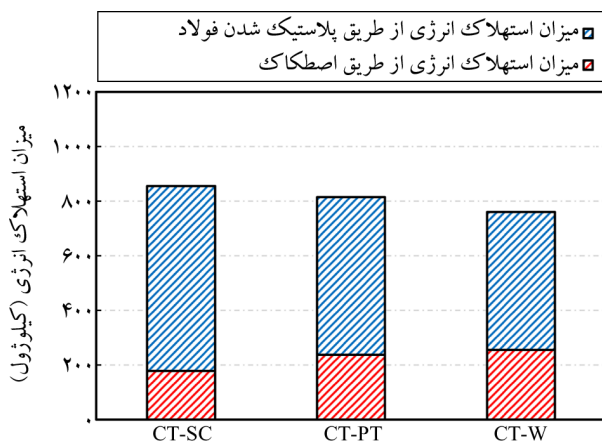
$$PEEQI = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \cdot \varepsilon_{ij}^p}}{\varepsilon_y} \quad (24)$$

در رابطه (۲۴)، ε_{ij}^p مؤلفه‌های کرنش پلاستیک و ε_y کرنش تسلیم است.

وجود تنش‌های هیدرو استاتیک کششی (σ_m) زیاد بیانگر پتانسیل بیشتر شکست است. تنش هیدرو استاتیک کششی زیاد می‌تواند منجر به فاکتورهای شدت تنش بالا در نوک ترک‌ها و نقص‌ها و در نتیجه افزایش پتانسیل شکست ترد در صورت وجود ترک و نقص گردد. همچنین مقادیر بالای تنش هیدرو استاتیک کششی می‌تواند منجر به کاهش شکل‌پذیری گردد. تحت چنین شرایطی مقادیر بالای شاخص سه‌محوره (TR) موجب شیوع شکست شکل‌پذیر خواهد شد. مقادیر بالای شاخص سه‌محوری ($0.75 < |TR| < 1.5$) می‌تواند منجر به کاهش کرنش گسیختگی فولاد و مقادیر خیلی زیاد شاخص سه‌محوره ($|TR| > 1.5$) می‌تواند آغازگر شکست ترد گردد [۱۷]. نتایج حاصل از به دست آوردن شاخص کرنش پلاستیک معادل و شاخص سه‌محوره در شکل (۲۵) نشان داده شدند.



شکل (۲۶): ظرفیت استهلاک انرژی هر سه نمونه اتصال تیر به ستون درختی به ازای درصد زاویه دررفت طبقه.



شکل (۲۷): بررسی تأثیر نوع روش طراحی وصله تیر در میزان استهلاک انرژی اتصالات تیر به ستون درختی.

استهلاک انرژی عمدتاً از طریق پلاستیک شدن تیر ریشه انجام می‌شود و در این حالت از حداکثر ظرفیت تیر ریشه در استهلاک انرژی استفاده می‌شود. در صورتی که وصله ضعیف طراحی شده باشد، عمدتاً استهلاک انرژی از طریق پلاستیک شدن وصله بال و اصطکاک بین سطوح انجام می‌شود و از حداکثر ظرفیت تیر ریشه در استهلاک انرژی استفاده نمی‌شود. در صورتی که وصله بر اساس اتصال پیش‌تینده طراحی شود، حالتی بین وصله اتصال CT-W و CT-SC به وجود می‌آید و استهلاک انرژی از طریق اصطکاک بین سطوح، پلاستیک شدن وصله بال و تیر ریشه انجام می‌شود.

۱۳- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر روش طراحی وصله پیچی در عملکرد

گسیختگی از نوع شکل‌پذیر خواهد بود. میزان شاخص سه‌محوری اتصال CT-W در زاویه دررفت ۴ درصد نسبت به دو اتصال دیگر مقدار کمتری دارد که نشانگر شکل‌پذیری زیاد این اتصال نسبت به اتصال CT-PT و CT-SC است.

۱۲- تأثیر نوع روش طراحی وصله تیر در میزان استهلاک انرژی

مقایسه استهلاک انرژی سبب می‌شود که درک درستی از رفتار اتصال در میزان جذب انرژی و پلاستیک شدن مصالح پیدا کنیم. در اتصالات تیر به ستون درختی میزان استهلاک انرژی برابر است با مجموع انرژی درونی ناشی از پلاستیک شدن فولاد و انرژی ناشی از اصطکاک بین سطوح. مساحت زیر منحنی هیستریزس اتصالات تیر به ستون درختی نشان‌دهنده کل انرژی مستهلک شده است.

مقدار انرژی مستهلک شده توسط سه اتصال تا زاویه دررفت ۶ درصد رادیان در شکل (۲۶) نشان داده شده است. مقایسه مقدار انرژی مستهلک شده سه اتصال نشان می‌دهد که اتصال CT-SC بیشترین و اتصال CT-W کمترین میزان استهلاک انرژی را در زاویه دررفت ۴، ۵ و ۶ درصد رادیان داشته‌اند. در زاویه دررفت‌های ۰.۳۷۵ تا ۳ درصد رادیان میزان استهلاک انرژی توسط سه اتصال تقریباً با هم برابر است. انرژی مستهلک شده کل اتصال برابر است با مجموع انرژی که به دلیل تشکیل شدن مفصل پلاستیک در تیر ریشه، اصطکاک بین سطوح و لغزش پیچ‌ها مستهلک می‌شود.

بررسی تأثیر نوع روش طراحی وصله تیر در میزان استهلاک انرژی اتصالات تیر به ستون درختی در شکل (۲۷) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۲۷) بیشترین استهلاک انرژی به دلیل پلاستیک شدن فولاد به ترتیب در اتصال CT-SC، اتصال CT-PT و اتصال CT-W شکل گرفته است. در صورتی که بیشترین انرژی ناشی از اصطکاک بین ورق‌های وصله به ترتیب در اتصال CT-W، اتصال CT-PT و CT-SC انجام شده است. هنگامی که وصله بر اساس اتصال لغزش بحرانی طراحی شود،

- استفاده از وصله ضعیف باعث می‌شود، مفصل پلاستیک در وصله تشکیل شود که خود به نوعی باعث دور شدن محل مفصل پلاستیک از بر ستون می‌شود و کاهش میزان شاخص‌های خسارت را در بر خواهد داشت.
- در صورتی که وصله اتصالات ستون درختی بر اساس اتصال لغزش بحرانی طراحی شوند، در زلزله‌های متوسط و شدید لغزش پیچ‌ها اتفاق خواهد افتاد. لذا به منظور بهره بردن بیشتر از لغزش به عنوان یک مود شکل پذیر، جهت کاهش شاخص‌های خسارت ناشی از زلزله، پیشنهاد می‌شود که وصله بر اساس اتصال پیش‌تینده طراحی شود.
- وصله اتصالات تیر به ستون درختی در صورتی که بر اساس لغزش بحرانی و اتصال پیش‌تینده طراحی شوند، جزو اتصالات پیش‌پذیرفته طبقه‌بندی می‌شود و در صورتی که بر اساس وصله ضعیف طراحی شود، جزو اتصالات پیش‌پذیرفته طبقه‌بندی نمی‌شود.

مراجع

1. Hamburger, R.O. and Malley, J.O. (2009) *Seismic Design of Steel Special Moment Frames*. NIST GCR, 09-917.
2. Astaneh-Asl, A. (1997) Seismic design of steel column-tree moment-resisting frames. *Structural Steel Educational Council*.
3. Oh, K., Li, R., Chen, L., Hong, S.B., and Lee, K. (2014) Cyclic testing of steel column-tree moment connections with weakened beam splices. *International Journal of Steel Structures*, **14**(3), 471-478.
4. Nakashima, M., Inoue, K., and Tada, M. (1998) Classification of damage to steel buildings observed in the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake. *Engineering Structures*, **20**(4-6), 271-281.
5. Lee, C.H. and Park, J.W. (1998) Cyclic seismic testing of full-scale column-tree type steel moment connections. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, **10**(4), 629-639.
6. Chen, C.C., Lin, C.C., and Lin, C.H. (2006) Ductile

- لرزه‌ای و پیش‌پذیرفتگی اتصالات تیر به ستون درختی با استفاده از تحلیل المان محدود غیرخطی در نرم‌افزار آباکوس مورد مطالعه قرار گرفت. مطابق با حیطه این پژوهش، بررسی نتایج حاصل از منحنی‌های هیستریزیس، پوش، میزان صلیبیت، شاخص‌های خسارت و نمودارهای استهلاک انرژی نشان می‌دهند که:
- وجود وصله تیر بر روی میزان استهلاک انرژی، سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و شاخص‌های خسارت PEEQI و TR تأثیرگذار است و پیش‌پذیرفته بودن اتصالات تیر به ستون درختی وابسته به رفتار وصله تیر است.
- نمونه اتصال CT-SC و CT-PT در دسته اتصالات صلب و نمونه اتصال CT-W در دسته اتصالات نیمه‌صلب قرار می‌گیرد.
- بیشترین میزان استهلاک انرژی به دلیل پلاستیک شدن فولاد به ترتیب در اتصال‌های CT-SC، CT-PT و CT-W شکل گرفته است؛ در صورتی که بیشترین استهلاک انرژی ناشی از اصطکاک بین ورق‌های وصله به ترتیب در اتصال‌های CT-W، CT-PT و CT-SC رخ داده است.
- بیشترین میزان شاخص‌های خسارت PEEQI و TR در محل اتصال تیر ریشه به ستون به ترتیب در اتصال‌های CT-SC، اتصال CT-PT و اتصال CT-W رخ داده است.
- بیشترین میزان شکل‌پذیری به ترتیب در اتصال‌های CT-W، CT-PT و CT-SC رخ داده است.
- اتصالات خمشی تیر به ستون درختی در صورتی که اتصال تیر ریشه به ستون از نوع پیش‌پذیرفته باشد و وصله پیچی صلیب کافی را داشته باشد، می‌تواند الزامات آیین‌نامه AISC 341-16 مربوط قاب‌های خمشی ویژه را برآورد کنند.
- نوع روش طراحی وصله با توجه به اینکه در ظرفیت خمشی اتصال تأثیر قابل توجهی ندارد، اما می‌تواند در میزان صلیبیت اتصال و کاهش میزان شاخص‌های خسارت در محل جوش اتصال تیر به ستون و محل تشکیل مفصل پلاستیک نقش مهمی ایفا کند.

18. Rice, R.C. (2003) *Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS): Chapters 1-4 (Vol. 1)*. National Technical Information Service.
19. Yun, X. and Gardner, L. (2017) Stress-strain curves for hot-rolled steels. *Journal of Constructional Steel Research*, **133**, 36-46.
20. Simulia, D.S. (2013) *ABAQUS 6.13 User's manual*. Dassault Systems, Providence, RI.
21. Dunne, F. and Petrinic, N. (2005) *Introduction to Computational Plasticity*. Oxford University Press on Demand.
22. Azhari, M. and Mirghaderi, R. (2011) *Design of Steel Structures*. Volume 4, Seismic Design Issues (in Persian).
23. AIK (2009) *Korean Building Code*. Architectural Institute of Korea Seoul.
24. Liao, F., Wang, M., Tu, L., Wang, J., and Lu, L. (2019) Micromechanical fracture model parameter influencing factor study of structural steels and welding materials. *Construction and Building Materials*, **215**, 898-917.
25. El-Tawil, S., Mikesell, T., Vidarsson, E., and Kunnath, S. (1998) *Strength and Ductility of FR Welded-Bolted Connections*. SAC Report, 98-01.
26. Federal Emergency Management Agency (2000) *Recommended Seismic Evaluation and Upgrade Criteria for Existing Welded Steel Moment-Frame Buildings*. FEMA.
27. Chen, C.C., Lin, C.C., and Tsai, C.L. (2004) Evaluation of reinforced connections between steel beams and box columns. *Engineering Structures*, **26**(13), 1889-1904.
28. Erfani, S., Asnafi, A.A., and Goudarzi, A. (2016) Connection of I-beam to box-column by a short stub beam. *Journal of Constructional Steel Research*, **127**, 136-150.
29. Wang, M., Shi, Y., Wang, Y., and Shi, G. (2013) Numerical study on seismic behaviors of steel frame end-plate connections. *Journal of Constructional Steel Research*, **90**, 140-152.
- moment connections used in steel column-tree moment-resisting frames. *Journal of Constructional Steel Research*, **62**(8), 793-801.
7. Chen, C.C. and Lin, C.C. (2013) Seismic performance of steel beam-to-column moment connections with tapered beam flanges. *Engineering Structures*, **48**, 588-601.
8. Lee, K., Oh, K., and So, J. (2016) Bolt slippage evaluation in column-tree steel moment connection on L/d. In *Proceedings of the World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'16)*, Paper No. ICSENM (Vol. 114).
9. Zhang, A.L., Guo, Z.P., and Liu, X.C. (2017) Seismic performance of Z-type cantilever beam splices of column-tree connection. *Journal of Constructional Steel Research*, **133**, 97-111.
10. Gharebaghi, R. and Hosseini, A. (2017) Local behavior of column-tree connections with considering bolt-hole clearance and bolt pretension effects. *International Journal of Steel Structures*, **17**(2), 379-388.
11. Vatansever, C. and Kutsal, K. (2018) Effect of bolted splice within the plastic hinge zone on beam-to-column connection behavior. *Steel and Composite Structures*, **28**(6), 767-778.
12. ANSI, A. 360-16 (2016) *Specification for Structural Steel Buildings*.
13. Astaneh-Asl, A. (1999) Seismic performance and design of bolted steel moment-resisting frames. *Engineering Journal*, **36**(3), 105-120.
14. AISC, A. (2016) *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*.
15. AISC, A. (2016) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*.
16. Deolia, P. and Shaikh, F.A. (2016) Finite element analysis to estimate burst pressure of mild steel pressure vessel using Ramberg-Osgood model. *Perspectives in Science*, **8**, 733-735.
17. Bruneau, M., Uang, C.M., and Whittaker, A. (1998) *Ductile Design of Steel Structures* (Vol. 389). New York: McGraw-Hill.

واژه‌نامه

Column-Tree Connection	۱- اتصالات تیر به ستون درختی
Stub Beam	۲- تیر ریشه
Welded Unreinforced Flange-Welded Web (Wuf-W)	۳- اتصال پیش‌پذیرفته خمشی بال جوش شده‌ی تقویت نشده - جان جوش شده
Strain Hardening	۴- سخت‌شوندگی کرنشی
Combined Hardening Models	۵- مدل سخت‌شوندگی ترکیبی
Surface-to-Surface	۶- سطح به سطح
Contact Pairs	۷- جفت‌های تماسی
Tangential Behavior	۸- رفتار مماسی
Behavior Normal	۹- رفتار نرمال
Penalty Behavior	۱۰- روش پنالتی
Hard Contact	۱۱- تماس سخت
Master Surfaces	۱۲- سطوح پایه
Slave Surfaces	۱۳- سطوح پیرو
Method Preload	۱۴- روش پیش‌بار
Effect Hourglass	۱۵- پدیده ساعت شنی
Low-Cycle Fatigue (LCF)	۱۶- خستگی کم چرخه

Effect of Bolted Splice Design Method on Seismic Performance and Prequalification of Column-Tree Connections

Behnam Karami¹ and Behrokh Hosseini Hashemi^{2*}

1. M.Sc. Graduate, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran
2. Associate Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: behrokh@iiees.ac.ir

Moment resisting steel frames (MRSFs) are widely used as a lateral load resisting system in steel structures in very high seismic regions. The seismic performance of this system depends mainly on the behavior of beam-to-column moment connections such that trivial damages in the connections may lead to the collapse of the whole structure or at least post-earthquake demolition of the structure. In the 1994 Northridge earthquake, beam-to-column connections in the MRSFs damaged noticeably and unexpectedly. Several researchers then proposed various suggestions to improve the seismic performance of beam to column connections. One of these suggestions was using a column-tree system to avoid the low-quality field-welded moment connections. These days, column-tree connections are widely used in the special moment resisting frames (SMRFs) buildings due to their well-known ease of installation and inspection of welding zone, especially in the high seismic areas. However, the prequalification and seismic behavior of these connections had not been evaluated well prior to this research; hence the structural designers usually consider these connections as the prequalified connection for using in the SMRFs without following a robust and validated approach. Therefore, in this study, the effect bolted splice design method on the prequalification and cyclic response of the column-tree connections were investigated using experimentally validated finite element analysis in ABAQUS FEA software. The column-tree connection must be designed such that the ductile failure modes occur prior to the brittle failure modes. This may be achieved through an appropriate design approach. Based on the bolted joint type in the AISC specification (i.e., pre-tensioned joint and slip-critical joint) and removing plastic hinge from the column edge (weakened bolted splice), there are three bolted splice design methods available. These are bolted splice design methods based on the slip critical joint, pre-tensioned joint, and weak splice plates. This research studied three samples to evaluate the effects of the bolted splice design methods on the prequalification and seismic behavior of the connection. The results show that the column-tree connection prequalification depends on the bolted splice design methods; moreover, the bolted splice design method influences the monotonic and cyclic behavior, strength, stiffness, fracture tendency, ductility, and energy dissipation characteristics of the connection. Also, it is observed that based on the moment strength and rotational stiffness of the bolted splice, the column-tree connection is classified as a rigid or semi-rigid moment connection. This is a significant point that needs to be taken into account in the column-tree moment frame design. The structural designers should consider these effects in their design approach for the column-tree connections. The column-tree connection with its bolted splice designed based on the pre-tensioned joint exhibits a reduction in the fracture tendency and increase in the ductility of the connection and also a smaller number of required bolts. For these reasons, it is recommended that the pre-tensioned joint method be implemented in designing a bolted splice instead of the slip-critical joint method.

Keywords: Column-Tree Connection, Bolted Splice, Seismic Performance, Prequalification, Finite Element Modeling.