



www.cpjournals.com

نشریه عمران و پروژه
Civil & Project Journal (CPJ)

Investigation of Seismic Performance of Beam Bending Joint to Steel Column with Tapered Beam Flange (TBF)

Seyed Hamid Reza Safaye Tolami^{۱*}, Mahmoud Herischian^۲, Farzin Moludi^۳

*^۱- M.Sc. in Civil Engineering, Structural Orientation, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Email: shr.s.tolami@gmail.com

^۲- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Email: heris@azad.ac.ir

^۳- M.Sc. in Civil Engineering, Structural Orientation, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
Email: farzin.moludi@semnan.ac.ir

ABSTRACT

One of the most common parts of steel bending frame structures, which is damaged by seismic load, is beam joints to the column, and joint failure can cause the structure to collapse. One way to improve the seismic performance of steel bending joints is to use bending joints with tapered beam flange (TBF). In this joint, with reducing part of the beam flange width along the seismic anchor slope, the bending joint ductile behavior is increased and the critical stress area is transferred from the beam-to-column joint to the beam flange width reduction location. In this article, the results of laboratory studies conducted by Chen et al.^۱ are the basis for the validation of the finite element model, and the most important parameters affecting the seismic performance of this type of joint, including the reinforcement ratio (β_j), the length of the beam flange width reduction area (L_{top}) and the cross section of the main beam have been investigated using the finite element method. The results of the analysis of nonlinear finite element models in ABAQUS software showed that the TBF joint caused the expansion of stress and strain equivalent to the maximum along the area of reduction of the beam flange width, and amount of stress in the area of joint of the beam to the column is reduced and the critical area of the joint is transferred from this place to the place of reduction of the width of the beam flange. Also, by increasing the reinforcement ratio (β_j) or by increasing the length of the beam flange width reduction area (L_{top}) in the TBF joint, the bearing capacity of the joint is increased, and is reduced the maximum amount of strain created at the beam joint to the column.

Keywords: TBF joint, bending joint with tapered beam flange, joining beam to steel column, seismic behavior, steel bending joints

All rights reserved to Civil & Project Journal.

^۱ Cheng-Chih Chen, Chun-Chou Lin, Chieh-Hsiang Lin



www.cpjournals.com

نشریه عمران و پروژه Civil & Project Journal (CPJ)

بررسی عملکرد لرزه‌ای اتصال خمشی تیر به ستون فولادی با بال‌های باریک شونده تیر (TBF)

سید حمیدرضا صفای تولمی^{۱*}، محمود هریسچیان^۲، فرزین مولودی^۳

۱- کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران
پست الکترونیکی: shr.s.tolami@gmail.com

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران
پست الکترونیکی: heris@azad.ac.ir

۳- کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
پست الکترونیکی: farzin.moludi@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۰۴

چکیده

یکی از رایج‌ترین قسمت‌های سازه‌های قاب خمشی فولادی که تحت بار لرزه‌ای دچار صدمه می‌گردد، اتصالات تیر به ستون است و شکست اتصال می‌تواند عامل فروپاشی سازه باشد. یکی از روش‌های بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصالات خمشی فولادی، استفاده از اتصال خمشی با بال‌های باریک شونده تیر^۲ (TBF) می‌باشد. در این اتصال، با کاهش بخشی از عرض بال تیر در طول شیب لنگر لرزه‌ای، رفتار شکل‌پذیر اتصال خمشی افزایش یافته و ناحیه بحرانی تنش از محل اتصال تیر به ستون، به محل کاهش عرض بال تیر منتقل شده است. در این مقاله، نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط چن و همکاران^۳، مبنای اعتبارسنجی مدل اجزای محدود قرار گرفته و مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد لرزه‌ای این نوع اتصال، شامل نسبت تقویت (β_f) ، طول ناحیه کاهش عرض بال تیر (L_{top}) و سطح مقطع تیر اصلی با استفاده از روش اجزای محدود، بررسی شده است. نتایج تحلیل مدل‌های اجزای محدود غیرخطی در نرم‌افزار آباکوس^۴ نشان داد که اتصال TBF موجب گسترش تنش و کرنش معادل حداکثر در طول ناحیه کاهش عرض بال تیر شده است و از مقدار تنش در ناحیه اتصال تیر به ستون کاسته شده و ناحیه بحرانی اتصال از این محل به محل کاهش عرض بال تیر انتقال یافته است. همچنین با افزایش نسبت تقویت (β_f) و یا با افزایش طول ناحیه کاهش عرض بال تیر (L_{top}) در اتصال TBF، ظرفیت باربری اتصال افزایش یافته و از مقدار حداکثر کرنش به وجود آمده در اتصال تیر به ستون کاسته شده است.

کلمات کلیدی: اتصال TBF، اتصال خمشی با بال‌های باریک شونده تیر، اتصال تیر به ستون فولادی، رفتار لرزه‌ای، اتصالات خمشی فولادی

^۲ Tapered Beam Flange

^۳ Cheng-Chih Chen, Chun-Chou Lin, Chieh-Hsiang Lin

^۴ ABAQUS

۱- مقدمه

در سازه‌های قاب خمشی فولادی، یکی از رایج‌ترین قسمت‌هایی که تحت بار لرزه‌ای دچار صدمه می‌گردد، اتصال تیر به ستون است. بدیهی است که به منظور مقاومت در برابر تخریب پیش‌رونده، لازم است سازه توانایی پُل زدن به آن طرف المان کلیدی که شکسته شده را داشته باشد و در این حالت، اتصال، مهم‌ترین نقش را ایفا می‌کند. (شاه‌حسینی و امامی‌کوردی، ۱۳۹۳) همچنین یکی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین بخش‌ها را نیز در رفتار خمشی سازه تشکیل می‌دهد و شکست اتصال که در حقیقت، دو قطعه اصلی سازه‌های فولادی یعنی تیر و ستون را به هم مرتبط می‌نماید، می‌تواند عامل فروپاشی سازه باشد؛ از این رو تلاش‌های زیادی در جهت شناخت و بررسی رفتاری اتصالات صورت پذیرفته است که دستاوردهای این تلاش‌ها، منجر به ارائه مدل‌ها و دسته‌بندی‌های مختلفی از چشمه اتصال شده است. در عمده این تحلیل‌ها، تقسیم‌بندی اتصال، به صورت زیر است: (افخمی، ۱۳۹۳)

۱- اتصال گیردار (صلب)

۲- اتصال نیمه گیردار (نیمه صلب)

۳- اتصال ساده (مفصلی)

وقوع زلزله نورتریج^۵ در ژانویه ۱۹۹۴ منجر به صدمات فراوانی در سازه‌های خمشی فولادی دارای اتصالات جوشی تیر به ستون گردید و ضمن اینکه گسیختگی‌های ترد و گوناگونی در این اتصالات مشاهده شد، موجب بروز رفتار غیر ارتجاعی اتصالات خمشی و تضعیف مقاومت اتصال در برابر بارگذاری زلزله شد. (Astaneh-Asl, ۱۹۹۷) رفتار غیر الاستیک اتصال، عمدتاً به تشکیل مفصل پلاستیک در تیر نسبت داده می‌شود. در سازه‌های آسیب‌دیده نورتریج، تنها شواهد اندکی دال بر اینکه نواحی پلاستیک واقعاً تشکیل شده باشند وجود دارد که شاید یکی از دلایل مهم آن‌ها، نحوه در نظر گرفتن محل تشکیل مفصل پلاستیک در طراحی اتصالات بوده است. طراحی اتصالات قبل از زلزله نورتریج، به نحوی انجام می‌شد که مفصل پلاستیک در بر ستون، یعنی جایی که بالاترین قیود و تنش‌های سه محوره وجود دارد، به وقوع بپیوندد. تنش‌های سه محوره، تأثیر شدیدی در کاهش شکل‌پذیری و بروز رفتار ترد دارند. (فرزانه، قاسمیه و بهاری، ۱۳۹۰) پس از این زلزله، مطالعات زیادی به منظور بهبود رفتار اتصال خمشی جوشی صورت پذیرفت و روش‌های مختلف ذیل به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصالات خمشی به کار گرفته شد (Astaneh-Asl, ۱۹۹۷):

الف) ورق پوششی^۶

ب) ماهیچه‌ای^۷

ج) ورق کناری^۸

د) مقطع کاهش یافته تیر^۹

برای اجرای قاب خمشی، دو نوع روند ساخت شامل اجرای کارگاهی یا ساخت در کارخانه که اصطلاحاً سیستم ستون-درختی^{۱۰} نامیده می‌شود را می‌توان نام برد (شکل ۱). در سیستم ستون-درختی، تکه‌های کوتاه تیر یا یک تیر کوتاه چندتکه (تیر کوتاه مرکب از

^۵ Northridge Earthquake

^۶ Cover Plate

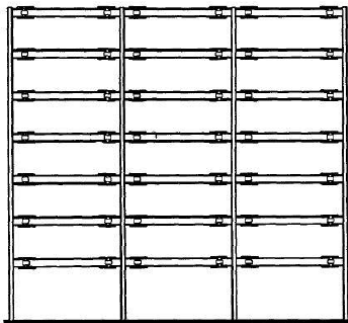
^۷ Launch

^۸ Side-Plate

^۹ RBS

^{۱۰} Column-Tree

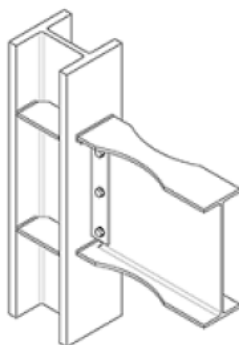
اتصال چند قطعه کوچک‌تر) که معمولاً ۶۰ الی ۱۲۰ سانتی‌متر طول دارند، در کارخانه به ستون‌ها جوش می‌شوند و پس از آنکه ستون‌های درختی در کارگاه نصب شدند، تیر اصلی به انتهای دوتکه تیر کوتاه جوش شده به ستون‌ها، پیچ می‌شود. (Astaneh-Asl, ۱۹۹۷) در ایران



شکل ۱- سیستم قاب خمشی ستون-درختی (Astaneh-Asl, ۱۹۹۷)

نیز چند سالی است که استفاده از این اتصال، در میان برخی از مهندسين سازه، متداول شده است. (فیوض و مصدق زاده، ۱۳۸۹) در این نوع اتصال، جوش در کارخانه و پیچ در محل، انجام می‌شود؛ لذا کیفیت اجرا مناسب‌تر از سایر انواع اتصالات خمشی است. مقاومت، سختی و شکل‌پذیری مناسب، به همراه امکان کنترل دقیق و سهولت اجرا، از جمله دلایل اقبال طراحان و مجریان، به چنین سیستم خمشی است. (Chen, Lin, Lin, ۲۰۰۶)

یکی از روش‌های بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصالات خمشی رایج، ایجاد مکانیسمی برای ایجاد مفصل پلاستیک در تیر و در فاصله مناسب از بر ستون می‌باشد که با کاهش و یا برداشتن بخشی از بال تیر در ناحیه‌ای به‌دوراز بر ستون انجام‌گرفته که به این اتصالات، اصطلاحاً اتصالات با سطح مقطع کاهش‌یافته تیر^{۱۱} (RBS) می‌گویند (شکل ۲) که گاهی نیز به‌عنوان اتصالات استخوان-سگی شناخته می‌شود. ایده کاهش مقطع تیر در فاصله از بر ستون، اولین بار توسط پلومیر^{۱۲} در سال ۱۹۹۰ م پیشنهاد و آزمایش شد. (Plumier, ۱۹۹۰)



شکل ۲- اتصال تیر به ستون از نوع تیر با مقطع کاهش‌یافته (RBS) (Sofias, Tzourmakliotou, ۲۰۱۸)

در سال ۲۰۱۴ تحقیقاتی توسط کولگرنی^{۱۳} و سماوالا^{۱۴} به روش آزمایشگاهی بر روی دو نوع اتصال خمشی با RBS و بدون RBS تحت بارگذاری چرخه‌ای انجام‌شده است. نتایج آزمایش مذکور نشان داد که نمونه بدون RBS به دلیل وقوع ترک‌ها در جوش بال پائینی،

^{۱۱} Reduced Beam Section

^{۱۲} Andre Plumier

^{۱۳} Swati Ajay Kulkarni

^{۱۴} Gaurang Vesmawala

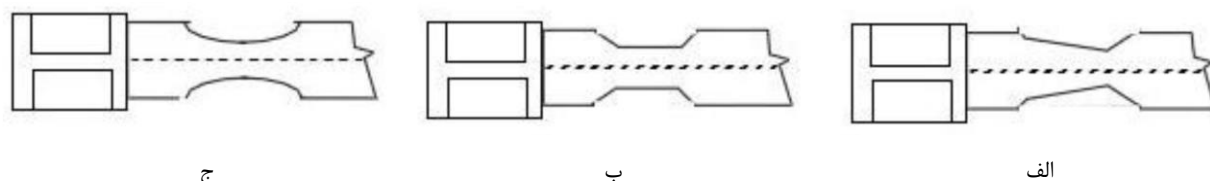
عملکرد ضعیفی داشته است؛ لیکن نمونه با RBS به ظرفیت چرخشی 0.2 رادیان بدون آسیب در جوشها دست یافته است. (Kulkarni, Vesmawala, ۲۰۱۴)

برحسب اینکه نحوه برداشتن و یا بریدن بال تیر به چه شکلی باشد، اتصال RBS انواع مختلفی می تواند داشته باشد که متداول ترین آنها عبارتند از: (شکل ۳)

الف) اتصال RBS با مقطع کاهش یافته یکنواخت

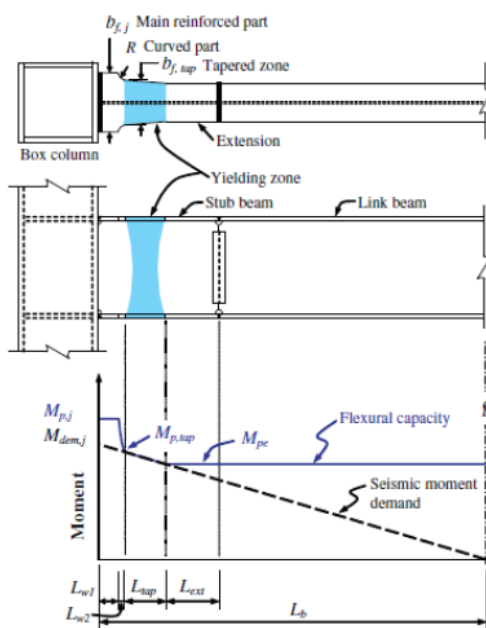
ب) اتصال RBS با مقطع کاهش یافته مستقیم

ج) اتصال RBS با مقطع کاهش یافته شعاعی



شکل ۳- انواع اتصال RBS (FEMA, ۱۹۹۹)

از دیگر اتصالات خمشی فولادی، اتصال خمشی با بالهای باریک شونده تیر (TBF) است که در شکل ۴ اتصال مذکور نشان داده شده است.



شکل ۴- هندسه و شیب لنگر اتصال TBF (Chen, Lin, ۲۰۱۳)

در شکل فوق، $M_{p,j}$ ، لنگر پلاستیک مقطع در ناحیه تقویت؛ $M_{dem,j}$ ، لنگر تقاضا در ناحیه تقویت؛ $M_{p,tap}$ ، لنگر پلاستیک مقطع در ناحیه انتهایی کاهش عرض بال تیر؛ M_{pe} ، لنگر پلاستیک مقطع تیر کاهش یافته؛ L_{w1} ، طول بخش اصلی تقویت شده؛ L_{w2} ، طول ناحیه منحنی؛ L_{tap} ، طول ناحیه کاهش عرض بال تیر؛ $b_{f,j}$ ، عرض بال تیر در ناحیه تقویت؛ $b_{f,tap}$ ، عرض بال در ناحیه انتهایی کاهش عرض بال تیر؛ b_f ، عرض بال تیر گسترش یافته می باشد.

در این اتصال، سعی شده با کاهش دادن بخشی از عرض بال تیر در طول شیب لنگر لرزه‌ای، رفتار شکل‌پذیر اتصال خمشی افزایش یابد و ناحیه بحرانی تنش از محل اتصال تیر به ستون، به محل کاهش عرض بال تیر انتقال پیدا کند. این اتصال شامل یک بخش اصلی تقویت‌شده، بخش منحنی، ناحیه کاهش عرض بال تیر و ناحیه گسترش تیر می‌باشد. بخش اصلی تقویت‌شده برای کاهش تقاضا بر روی جوش شیار تیر به ستون و تضمین نمودن ظرفیت کافی در اتصال تیر به ستون استفاده شده است. بخش منحنی نیز برای فراهم کردن یک ناحیه انتقال هموار طراحی شده است و گسترش تیر وصله را برای تیر پیوند، فراهم می‌کند.

رفتار لرزه‌ای اتصال TBF به‌طور اساسی، به ظرفیت خمشی تیر بستگی دارد. مطابق مفهوم طراحی اتصال TBF، دو متغیر اصلی حاکم بر عملکرد اتصال عبارت‌اند از: نسبت تقویت (β_j) (معادله ۱) و طول ناحیه کاهش عرض بال تیر (L_{tap}) (شکل ۴). β_j به‌صورت نسبت ظرفیت خمشی $M_{p,j}$ به تقاضای لرزه‌ای خمشی $M_{dem,j}$ در محل اتصال تیر به ستون تعریف شده است. پارامتر L_{tap} منعکس‌کننده وسعت ناحیه تسلیم‌شدگی در تیر می‌باشد. (Chen, Lin, ۲۰۱۳)

$$B_j = M_{p,j} / M_{dem,j} \quad (1)$$

پارامترهایی که مبنای مقایسه و تصمیم‌گیری در این نوع اتصال می‌باشند، شامل میزان موفقیت در دور نمودن تمرکز تنش از محل اتصال تیر به ستون و توانایی کنترل در اتلاف انرژی می‌شوند. همچنین این نوع اتصال، باعث کاهش تمرکز تنش در بال‌های تیر در منطقه حفره‌ای دسترسی جوش می‌شود. (Chen, Lin, ۲۰۱۳)

در این مقاله، مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار این نوع اتصال، شامل: نسبت تقویت (β_j) ، طول ناحیه کاهش سطح مقطع بال تیر (L_{tap}) و سطح مقطع تیر اصلی گسترش‌یافته (Chen, Lin, ۲۰۱۳) به‌عنوان متغیر تعیین‌شده و عملکرد لرزه‌ای اتصال خمشی تیر به ستون با بال‌های باریک شونده تیر (TBF) با نسبت‌ها و ابعاد مختلف این پارامترها، بررسی شده است.

۲- مشخصات مدل‌های تحلیلی

۲-۱- نرم‌افزار مورد استفاده

در این مقاله، از نرم‌افزار آباکوس^{۱۵} که یک نرم‌افزار المان محدود غیرخطی می‌باشد، استفاده شده است. در این نرم‌افزار، طیف وسیعی از المان‌ها قابل استفاده بوده و از این جهت، توانایی بسیار زیادی را به کاربر می‌دهد تا بتواند انواع مختلف مسائل را مدل‌سازی و تحلیل نماید.

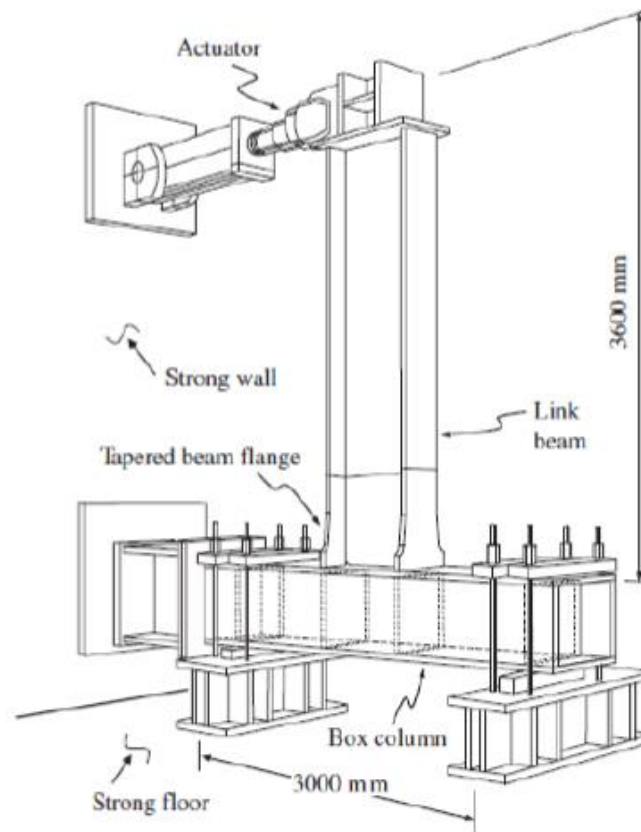
تمام قسمت‌های مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس، از المان صفحه‌ای سه‌بُعدی و چهار گرهی با انتگرال کاهش‌یافته استفاده شده که بانام S4R در نرم‌افزار مشخص شده است که در این نام‌گذاری، S به معنای المان Shell، 4 به معنای چهار گرهی بودن المان (مستطیلی) و R به معنی انتگرال کاهش‌یافته^{۱۶} می‌باشد. همچنین برای به دست آوردن سازه مش‌بندی مناسب، تحلیل‌های زیادی صورت گرفت تا اندازه مش‌بندی مناسب (۴۰×۴۰ میلی‌متر) برای هر المان، حاصل گردید.

^{۱۵} ABAQUS

^{۱۶} Reduced Integration

۲-۲- مدل‌های مورد بررسی و نحوه مدل‌سازی

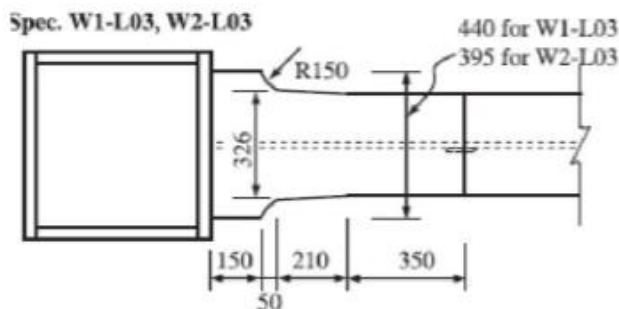
در این مقاله، نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده توسط چن و لین^{۱۷} (Chen, Lin, ۲۰۱۳) در خصوص مدل W۱-L۰۳، مبنای اعتبارسنجی مدل اجزای محدود قرار گرفته و در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. نحوه انجام آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- مدل ساخته‌شده توسط چن و لین در آزمایشگاه (Chen, Lin, ۲۰۱۳)

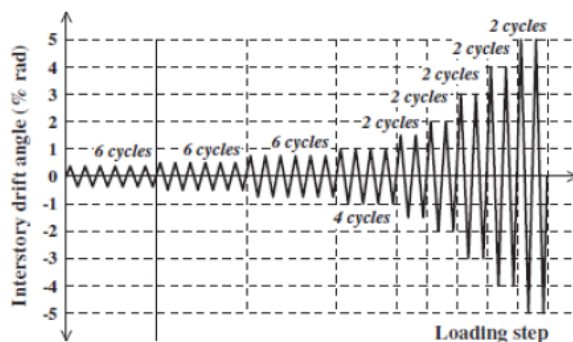
ابعاد هندسی و جزئیات اتصال نمونه آزمایشگاهی، در شکل ۶، ارائه شده است.

^{۱۷} Cheng-Chih Chen, Chun Chou Lin



شکل ۶- ابعاد هندسی و جزئیات اتصال نمونه آزمایشگاهی مدل W1-L03 ساخته شده توسط چن و لین (Chen, Lin, ۲۰۱۳)

شرایط مرزی به صورت اتصال بالای ستون، مفصلی و پایین ستون، غلتکی در نظر گرفته شده است. برای ساخت کلیه اجزاء اتصال، از آلمان پوسته Shell از نوع S4R استفاده شده است و مصالح به کاررفته، فولاد ST-۳۷ با تنش تسلیم مصالح 240 N/mm^2 و تنش نهایی 370 N/mm^2 می باشد و نمونه، تحت بارگذاری چرخه ای شکل ۷ آزمایش شده است.



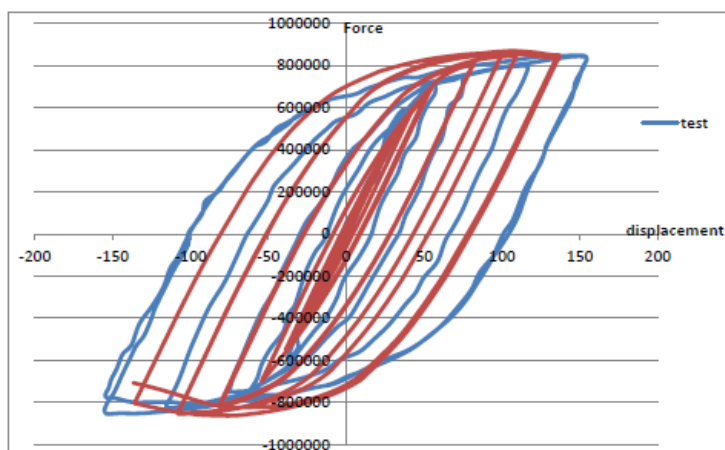
شکل ۷- بارگذاری مدل ساخته شده توسط چن و لین در آزمایشگاه (Chen, Lin, ۲۰۱۳)

مشخصات مکانیکی مصالح به کاررفته در نمونه مورد آزمایش، در جدول ۱ ارائه شده است.

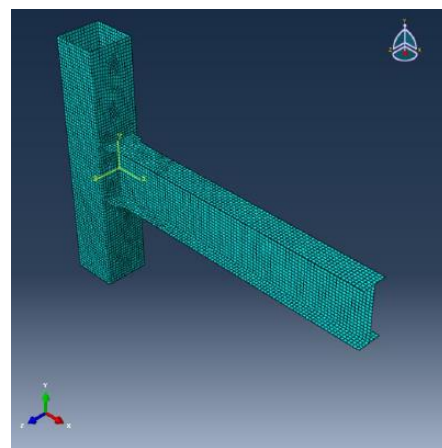
جدول ۱- مشخصات مکانیکی مصالح نمونه مورد آزمایش توسط چن و لین (Chen, Lin, ۲۰۱۳)

عضو	موقعیت	مقاومت تسلیم F_y (MPa)	مقاومت کششی F_u (MPa)
تیر رابط	بال تیر	۳۸۷	۵۰۷
	جان تیر	۴۲۹	۵۲۹
تیر انتهایی	بال تیر	۳۷۱	۵۱۱
	جان تیر	۳۷۳	۴۹۴
ستون	بال و جان ستون	۴۳۱	۵۷۸

با توجه به شکل‌های ۵، ۶ و ۷ و مشخصات ارائه شده در جدول ۱ و سایر داده‌های مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط چن و لین، مدل تحلیلی از اتصال آزمایشگاهی W1-L03 در نرم‌افزار آباکوس ساخته شد و برای کالیبره کردن نتایج اجزای محدود با نتایج اتصال آزمایشگاهی، تحلیل‌های حساسیت بر روی پارامترهای موجود در نرم‌افزار آباکوس انجام گرفت. همچنین برای بررسی تأثیر اندازه مش‌بندی المان‌ها بر روی نتایج مدل اجزای محدود، مدل‌های تحلیلی با مش‌بندی‌های مختلف از اتصال آزمایشگاهی به منظور کالیبره نمودن نتایج تحلیل به کار رفت و در نهایت، مدل با مش‌بندی 40x40 میلی‌متر که منجر به نتایج نزدیک‌تری با نتایج آزمایشگاهی شده بود، به عنوان مدل مورد بررسی انتخاب شد که در شکل ۸، نمونه ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس، نشان داده شده است. همچنین در شکل ۹، مقایسه بین منحنی هیستریزس مدل آزمایشگاهی و مدل المان محدود ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس، ارائه شده است.



شکل ۹- مقایسه منحنی هیستریزس مدل آزمایشگاهی و مدل المان محدود



شکل ۸- مش‌بندی مدل ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس

۳- نتایج و نمودارها

۳-۱- تأثیر نسبت تقویت (β_j) بر رفتار لرزه‌ای اتصال خمشی تیر به ستون TBF

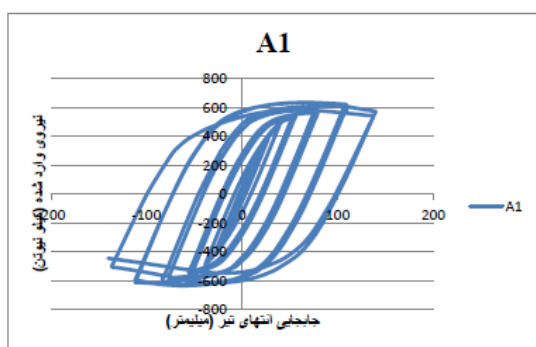
به منظور بررسی تأثیر پارامتر نسبت تقویت (β_j) بر رفتار اتصال خمشی TBF، از سه نسبت 1/1، 1/2 و 1/3 برای پارامتر مذکور استفاده شده است. در جدول ۲، مشخصات نمونه‌ها ارائه شده است.

جدول شماره ۲- نمونه‌های ساخته شده با نسبت تقویت‌های مختلف

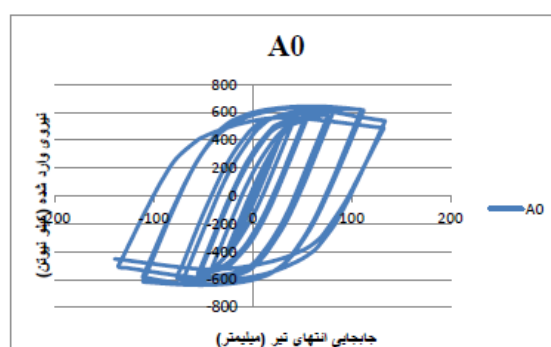
شماره مدل	نسبت تقویت (β_j)	طول ناحیه کاهش عرض بال تیر ضربدر ارتفاع تیر ($L_{tap} * h_p$)	ابعاد تیر (mm)	طول تیر (mm)	عرض بال تیر اصلی (mm)	عرض بال انتهایی ناحیه کاهش عرض بال ($b_{f,tap}$) (mm)	عرض بال تیر در ناحیه تقویت (b_f) (mm)	طول ناحیه کاهش عرض بال تیر (L_{tap}) (mm)
A0 (اتصال آزمایشگاهی مبنا)	1/2	0/5	H300x700	3500	300	345	465	350
A1	1/1	0/5	H300x700	3500	300	345	416	350

۳۵۰	۵۰۷	۳۴۵	۳۰۰	۳۵۰۰	H۳۰۰x۷۰۰	۰/۵	۱/۳	A۲
-----	-----	-----	-----	------	----------	-----	-----	----

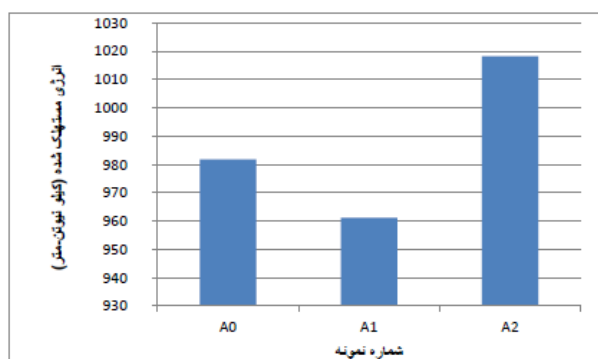
در اشکال ۱۰، ۱۱ و ۱۲، نتایج منحنی هیستریزیس مدل‌های A۰، A۱ و A۲ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۳، انرژی مستهلک شده توسط سه نمونه مذکور، نشان داده شده است.



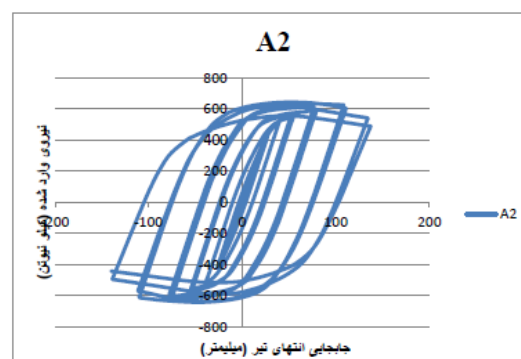
شکل ۱۱- منحنی هیستریزیس برای مدل A1



شکل ۱۰- منحنی هیستریزیس برای مدل A۰ (اتصال آزمایشگاهی مبنا)



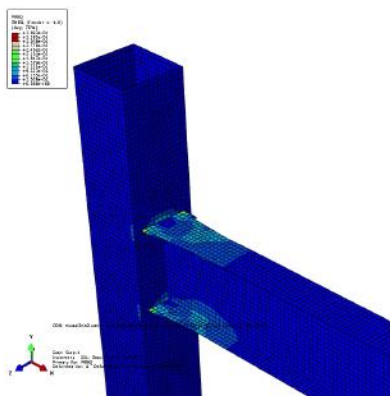
شکل ۱۳- مقایسه انرژی مستهلک شده بین سه نمونه A۰، A1 و A۲



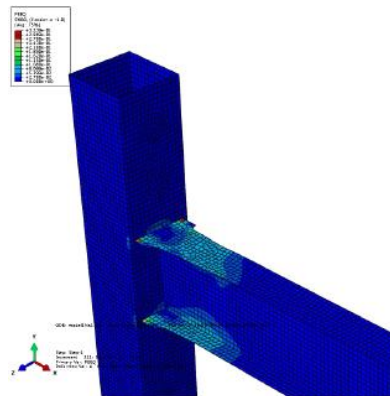
شکل ۱۲- منحنی هیستریزیس برای مدل A۲

همان‌طور که در اشکال ۱۰، ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود، هر سه مدل، جابجایی تا حدود ۱۰۰ میلی‌متر انتهای تیر را بدون کاهش مقاومت، تحمل کرده‌اند و پس از آن، با ایجاد مفصل پلاستیک در مدل‌ها، ظرفیت باربری اتصال، کاهش یافته است. همچنین مقایسه انرژی مستهلک شده بین سه نمونه A۰، A1 و A۲ در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که با افزایش عرض بال ناحیه تقویت، انرژی مستهلک شده در اتصال، افزایش یافته است.

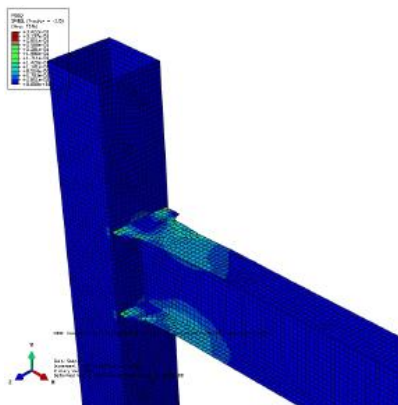
بررسی شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ که مربوط به نتایج کرنش‌های معادل به وجود آمده پس از تحلیل مدل‌های A۰، A1 و A۲ در جابجایی ۰/۴ رادیان زاویه تغییر مکان جانبی داخلی اتصال می‌باشد، نشان می‌دهد که بیشترین کرنش معادل، در طول ناحیه کاهش عرض بال تیر به وجود آمده است و در طول این ناحیه، گسترده شده است و ناحیه بحرانی، از محل اتصال تیر به ستون، فاصله گرفته است.



شکل ۱۵- کرنش معادل به وجود آمده در مدل A1

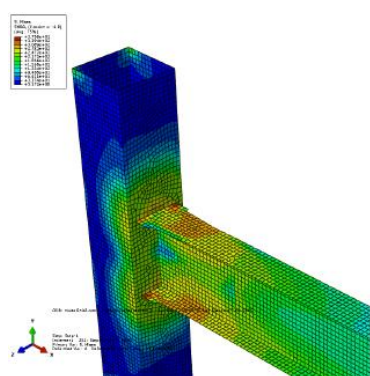


شکل ۱۴- کرنش معادل به وجود آمده در مدل A0

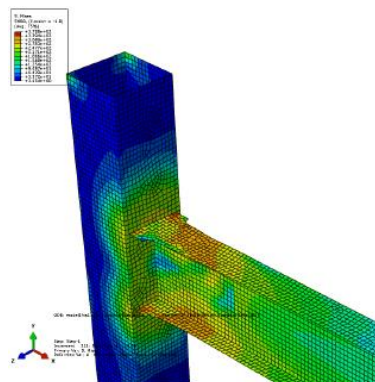


شکل ۱۶- کرنش معادل به وجود آمده در مدل A2

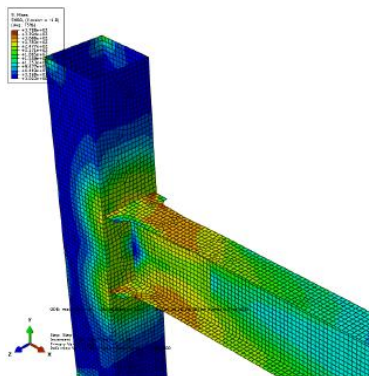
همچنین بررسی شکل‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ که مربوط به نتایج تنش فون میسز^{۱۸} به وجود آمده پس از تحلیل مدل‌های A0، A1، A2 و A3 در جابجایی ۰/۴ رادیان زاویه تغییر مکان جانبی داخلی اتصال می‌باشد، نشان می‌دهد که بیشترین تنش نیز در طول ناحیه کاهش عرض بال تیر به وجود آمده است. حداکثر کرنش معادل به دست آمده در ناحیه تسلیم‌شدگی در مدل A0، برابر ۰/۳۴۵؛ برای مدل A1، برابر ۰/۴۲۱ و برای مدل A2، برابر ۰/۲۹۲ می‌باشد که نشان می‌دهد با افزایش عرض بال ناحیه تقویت، مقدار کرنش معادل حداکثر در مدل‌ها کاهش می‌یابد.



شکل ۱۸- تنش فون میسز به وجود آمده در مدل A1

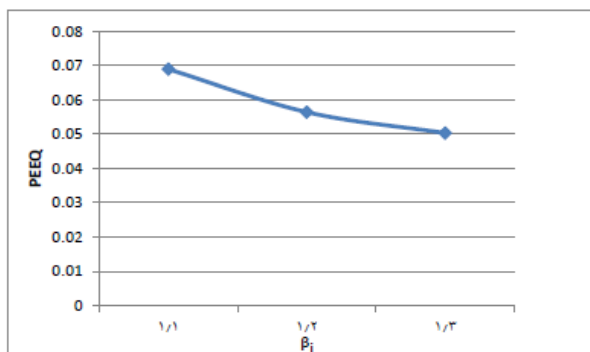


شکل ۱۷- تنش فون میسز به وجود آمده در مدل A0



شکل ۱۹- تنش فون میسز به وجود آمده در مدل A۲

در شکل ۲۰، مقایسه کرنش نرمال شده به دست آمده در محل اتصال بال تیر به ستون در جابجایی ۰/۴ رادیان زاویه تغییر مکان جانبی داخلی اتصال در مدل‌ها، با تغییر پارامتر β_j نشان داده شده است.



شکل ۲۰- تأثیر نسبت تقویت (β_j) بر کرنش معادل در محل اتصال بال تیر به ستون

همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت تقویت (β_j)، مقدار کرنش معادل به وجود آمده در بال تیر در محل اتصال تیر به ستون، کاهش می‌یابد.

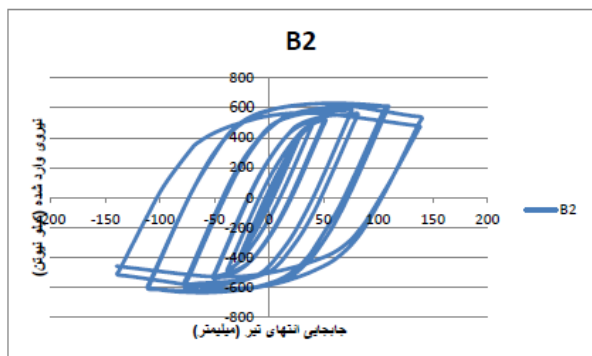
۳-۲- تأثیر طول ناحیه کاهش عرض بال تیر (L_{tap}) بر رفتار لرزه‌ای اتصال خمشی تیر به ستون TBF

به منظور بررسی تأثیر پارامتر طول ناحیه کاهش عرض بال تیر (L_{tap}) بر رفتار اتصال TBF، از سه نسبت ۰/۷، ۰/۵ و ۰/۳ برای پارامتر مذکور استفاده شده است. در جدول ۳، مشخصات نمونه‌ها، ارائه شده است.

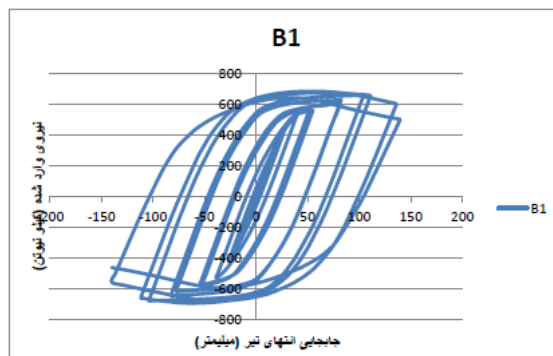
جدول شماره ۳- نمونه‌های ساخته شده با نسبت طول ناحیه کاهش عرض بال تیرهای مختلف

شماره مدل	نسبت تقویت (β_j)	طول ناحیه کاهش عرض بال تیر ضربدر ارتفاع تیر $(L_{tap} * h_p)$	ابعاد تیر (mm)	طول تیر (mm)	عرض بال تیر اصلی (mm)	عرض بال تیر در انتهای ناحیه کاهش عرض بال $(b_{f,tap})$ (mm)	عرض بال تیر در ناحیه تقویت (b_f) (mm)	طول ناحیه کاهش عرض بال تیر (L_{tap}) (mm)
A۰ (اتصال آزمایشگاهی)	۱/۲	۰/۵	H۳۰۰x۷۰۰	۳۵۰۰	۳۰۰	۳۴۵	۴۶۵	۳۵۰
B۱	۱/۲	۰/۷	H۳۰۰x۷۰۰	۳۵۰۰	۳۰۰	۳۶۷	۴۹۰	۴۹۰
B۲	۱/۲	۰/۳	H۳۰۰x۷۰۰	۳۵۰۰	۳۰۰	۳۲۶	۴۴۰	۲۱۰

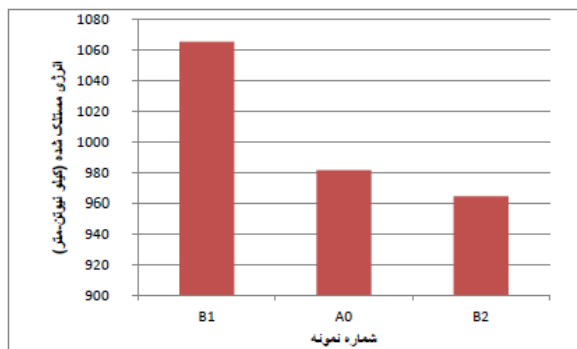
در اشکال ۱۰، ۲۱ و ۲۲، به ترتیب، نتایج منحنی هیستریزس مدل‌های A۰، B۱ و B۲ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۲۳، انرژی مستهلک شده توسط سه نمونه مذکور، نشان داده شده است.



شکل ۲۲- منحنی هیستریزس برای مدل B۲



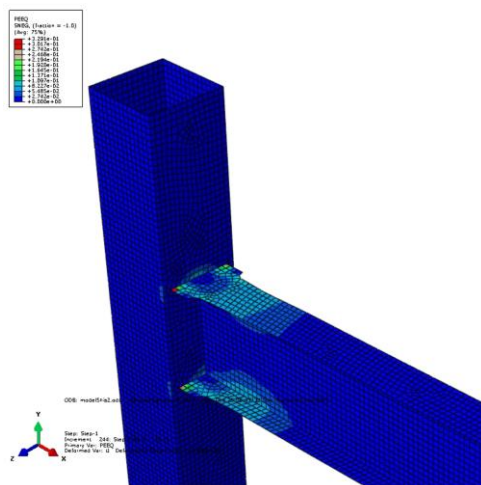
شکل ۲۱- منحنی هیستریزس برای مدل B۱



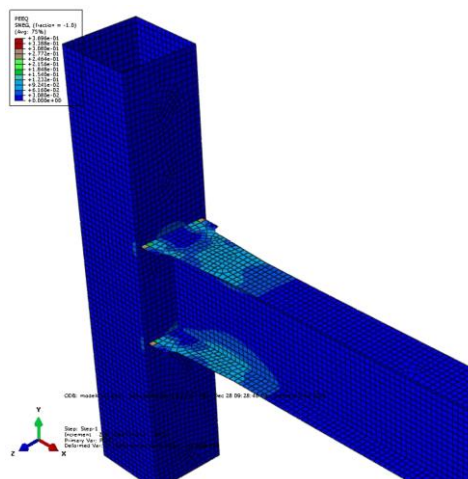
شکل ۲۳- مقایسه انرژی مستهلک شده بین سه نمونه A۰، B۱ و B۲

همان‌طور که در اشکال ۱۰، ۲۱ و ۲۲ مشاهده می‌شود، هر سه مدل، جابجایی تا حدود ۱۰۰ میلی‌متر را بدون افت مقاومت تحمل کرده‌اند؛ اما پس از آن، با ایجاد مفصل پلاستیک در مدل‌ها، با کاهش مقاومت روبرو می‌شوند. در مدل B۱ که طول ناحیه کاهش عرض بال تیر، بیشتر است، به دلیل آنکه ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک در طول بیشتری اتفاق افتاده است، این کاهش مقاومت، کمتر می‌باشد. همچنین مقایسه انرژی مستهلک‌شده بین سه نمونه A۰، B۱ و B۲ در شکل ۲۳ نشان می‌دهد که با افزایش طول ناحیه کاهش عرض بال تیر، مقدار انرژی مستهلک‌شده در سیستم نیز افزایش یافته است.

بررسی شکل‌های ۲۴ و ۲۵ که مربوط به نتایج کرنش‌های معادل به وجود آمده پس از تحلیل مدل‌های B۱ و B۲ در جابجایی ۰/۴ رادیان زاویه تغییر مکان جانبی داخلی اتصال می‌باشد، نشان می‌دهد که حداکثر کرنش در ناحیه کاهش عرض بال تیر به وجود آمده است و با افزایش طول ناحیه کاهش عرض بال تیر، محل بیشترین کرنش، از محل اتصال، فاصله گرفته است.

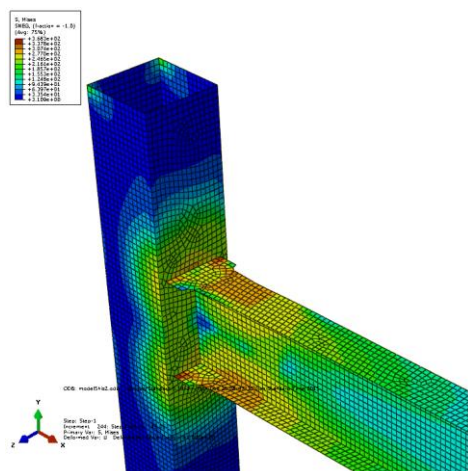


شکل ۲۵- کرنش معادل به وجود آمده در مدل B۲

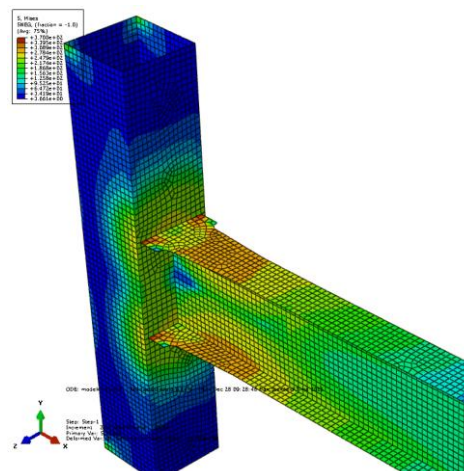


شکل ۲۴- کرنش معادل به وجود آمده در مدل B۱

همچنین بررسی شکل‌های ۲۶ و ۲۷ که مربوط به نتایج تنش فون میسز به وجود آمده پس از تحلیل مدل‌های B۱ و B۲ در جابجایی ۰/۴ رادیان زاویه تغییر مکان جانبی داخلی اتصال می‌باشد، نشان می‌دهد که بیشترین تنش نیز در ناحیه کاهش عرض بال تیر اتفاق افتاده است. حداکثر کرنش معادل به دست آمده در ناحیه تسلیم‌شدگی در مدل A۰، برابر ۰/۳۴۵؛ در مدل B۱، برابر ۰/۳۳۸ و در مدل B۲، برابر ۰/۳۷۲ به دست آمده است که نشان می‌دهد افزایش طول ناحیه کاهش عرض بال تیر، مقدار کرنش به وجود آمده در اتصال را کاهش می‌دهد؛ اما مقدار تأثیر آن از افزایش عرض بال ناحیه تقویت، کمتر است.

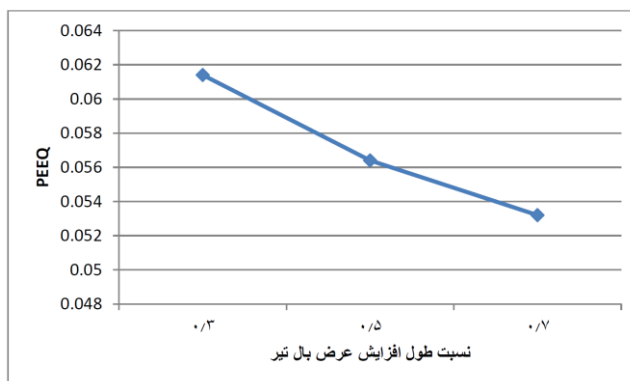


شکل ۲۷- تنش فون میسز به وجود آمده در مدل B ۲



شکل ۲۶- تنش فون میسز به وجود آمده در مدل B 1

شکل ۲۸ ، مقایسه کرنش نرمال شده به دست آمده در محل اتصال بال تیر به ستون در جابجایی ۰/۴ رادیان زاویه تغییر مکان جانبی داخلی اتصال در مدل‌ها با تغییر نسبت افزایش عرض بال تیر (L_{lap}) را نشان می‌دهد.



شکل ۲۸- تأثیر نسبت افزایش طول ناحیه کاهش عرض بال تیر (L_{lap}) بر کرنش معادل در محل اتصال بال تیر به ستون

همان‌طور که در شکل ۲۸ مشاهده می‌شود، افزایش طول ناحیه کاهش عرض بال تیر، باعث کاهش کرنش معادل به وجود آمده در محل اتصال بال تیر به ستون شده است.

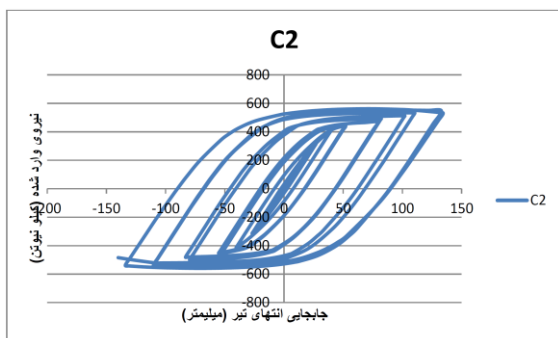
۳-۳- تأثیر تغییر سطح مقطع تیر اصلی بر رفتار لرزه‌ای اتصال خمشی تیر به ستون TBF

به منظور بررسی تأثیر سطح مقاطع مختلف برای تیر اصلی بر رفتار اتصال TBF ، از سه ارتفاع مختلف برای جان تیر به صورت $H300 \times 600$ ، $H300 \times 700$ و $H300 \times 800$ میلی‌متر استفاده شده است. (در جدول ۴ مشخصات نمونه‌ها ارائه شده است).

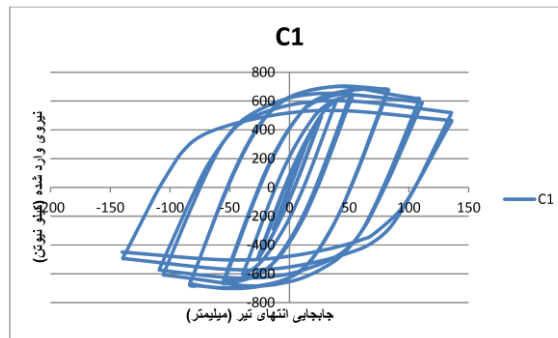
جدول شماره ۴- نمونه‌های ساخته شده با نسبت ارتفاع مختلف مقطع تیر

طول ناحیه کاهش عرض بال تیر (L_{tap}) (mm)	عرض بال تیر در ناحیه تقویت (b_f) (mm)	عرض بال تیر در انتهای ناحیه کاهش عرض بال $(b_{f,tap})$ (mm)	عرض بال تیر اصلی (mm)	طول تیر (mm)	ابعاد تیر (mm)	طول ناحیه کاهش عرض بال تیر ضریب ارتفاع تیر $(L_{tap} * h_p)$	نسبت تقویت (β_j)	شماره مدل
۳۵۰	۴۶۵	۳۴۵	۳۰۰	۳۵۰۰	H۳۰۰x۷۰۰	۰/۵	۱/۲	A۰ (اتصال آزمایشگاهی مبنا)
۳۵۰	۴۶۹	۳۴۷	۳۰۰	۳۵۰۰	H۳۰۰x۸۰۰	۰/۵	۱/۲	C۱
۳۵۰	۴۵۷	۳۴۴	۳۰۰	۳۵۰۰	H۳۰۰x۶۰۰	۰/۵	۱/۲	C۲

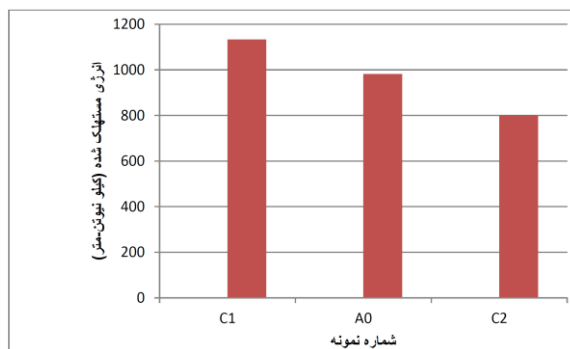
در اشکال ۱۰، ۲۹ و ۳۰، نتایج منحنی هیستریزیس مدل‌های A۰، C۱ و C۲ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۳۱، انرژی مستهلک شده توسط سه نمونه مذکور نشان داده شده است.



شکل ۳۰- منحنی هیستریزیس برای مدل C۲



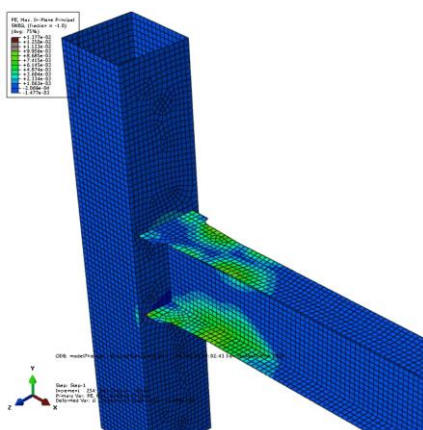
شکل ۲۹- منحنی هیستریزیس برای مدل C۱



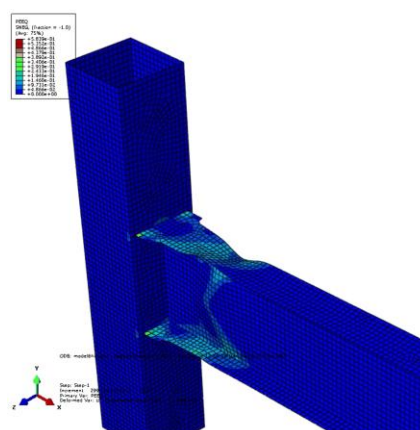
شکل ۳۱- مقایسه انرژی مستهلک شده بین سه نمونه A۰، C۱ و C۲

همان‌طور که در اشکال ۱۰، ۲۹ و ۳۰ مشاهده می‌شود، مدل C1 ظرفیت تحمل نیروی بیشتری را از خود نشان داده است؛ اما در جابجایی کمتری در انتهای تیر به ظرفیت نهایی خود رسیده است و پس‌از آن، افت تحمل نیرو در آن اتفاق افتاده است. مدل C2 نیز در مقایسه با مدل‌های A0 و C1، ظرفیت تحمل نیروی کمتری دارد؛ اما با افزایش جابجایی انتهای تیر، نسبت به دو مدل دیگر، همچنان ظرفیت تحمل نیروی خود را حفظ کرده است. همچنین مقایسه انرژی مستهلک‌شده بین سه نمونه A0، C1 و C2 در شکل ۳۱، نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع مقطع تیر، انرژی مستهلک‌شده توسط سیستم، افزایش پیدا کرده است.

شکل‌های ۳۲ و ۳۳ که مربوط به نتایج کرنش‌های معادل به وجود آمده پس از تحلیل مدل‌های C1 و C2 در جابجایی ۰/۴ رادیان زاویه تغییر مکان جانبی داخلی اتصال می‌باشد را نشان می‌دهد.

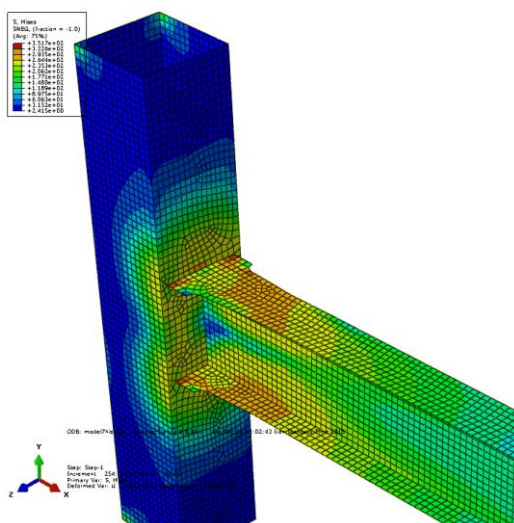


شکل ۳۳- کرنش معادل به وجود آمده در مدل C2

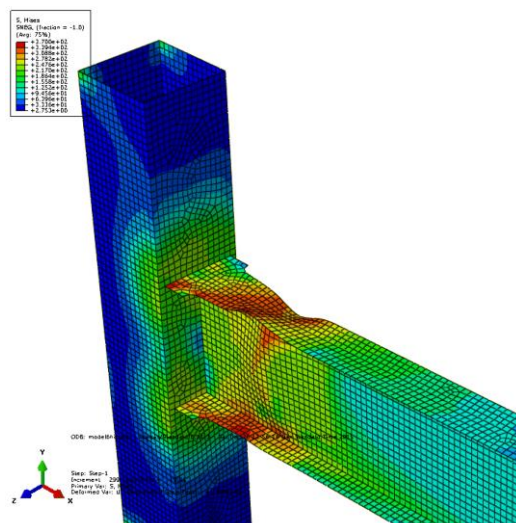


شکل ۳۲- کرنش معادل به وجود آمده در مدل C1

همچنین بررسی شکل‌های ۳۴ و ۳۵ که مربوط به نتایج تنش فون میسز به وجود آمده پس از تحلیل مدل‌های C1 و C2 در جابجایی ۰/۴ رادیان زاویه تغییر مکان جانبی داخلی اتصال می‌باشد، نشان می‌دهد در مدل C1 که ارتفاع تیر بیشتر است، اتصال به تنش نهایی خود رسیده است؛ اما در مدل C2، تنش تسلیم نهایی در اتصال به وجود نیامده است. حداکثر کرنش معادل به دست آمده در ناحیه تسلیم‌شدگی در مدل A0، برابر ۰/۳۴۵؛ در مدل C1، برابر ۰/۳۹۲ و در مدل C2، برابر ۰/۳۱۵ به دست آمده که نشان می‌دهد افزایش ارتفاع تیر، کرنش به وجود آمده در اتصال را افزایش داده است.

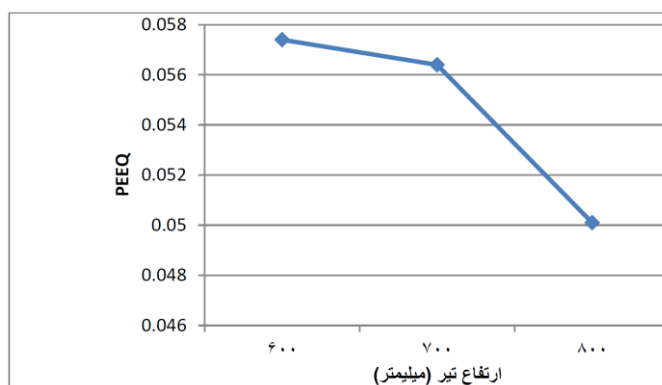


شکل ۳۵- تنش فون میسز به وجود آمده در مدل C2



شکل ۳۴- تنش فون میسز به وجود آمده در مدل C1

در شکل ۳۶، مقایسه کرنش نرمال شده به دست آمده در محل اتصال بال تیر به ستون، در جابجایی ۰/۴ رادیان زاویه تغییر مکان جانبی داخلی اتصال در مدل‌ها با تغییر نسبت ارتفاع تیر را نشان می‌دهد.



شکل ۳۶- تأثیر تغییر ارتفاع تیر بر کرنش معادل در محل اتصال تیر به ستون

همان‌طور که در شکل ۳۶ مشاهده می‌شود، افزایش ارتفاع تیر، باعث کاهش کرنش معادل به وجود آمده در محل اتصال بال تیر به ستون شده است.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به آنکه در اتصال TBF، عرض بال تیر با دور شدن از ستون، کاهش می‌یابد، در نتیجه شکل‌پذیری اتصال، افزایش یافته و محل ایجاد تمرکز تنش به جای محل اتصال تیر به ستون، به محل کاهش عرض بال تیر انتقال می‌یابد. مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار لرزه‌ای اتصال TBF، ظرفیت خمشی تیر، نسبت تقویت و طول ناحیه کاهش عرض بال تیر می‌باشند.

در مجموع، مهم‌ترین نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها در نرم‌افزار آباکوس را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

- اتصال گیردار تیر به ستون با مقطع تیر کاهش یافته، باعث گسترش تنش و کرنش معادل حداکثر در طول ناحیه کاهش عرض بال تیر می‌شود و از مقدار تنش در ناحیه اتصال تیر به ستون می‌کاهد. همچنین ناحیه بحرانی اتصال از این محل، به محل کاهش عرض بال تیر، انتقال می‌یابد.
- افزایش نسبت طول تقویت (β_j) در اتصال TBF باعث افزایش ظرفیت باربری اتصال شده و از مقدار حداکثر کرنش به وجود آمده در محل اتصال تیر به ستون می‌کاهد.
- افزایش طول ناحیه کاهش عرض بال تیر (L_{tap}) در اتصال TBF باعث افزایش ظرفیت باربری اتصال شده و از مقدار حداکثر کرنش به وجود آمده در محل اتصال تیر به ستون می‌کاهد.
- افزایش ارتفاع تیر در اتصال TBF باعث افزایش ظرفیت باربری اتصال می‌شود؛ اما در جابجایی کمتری این اتفاق می‌افتد و تیر، زودتر به تنش تسلیم‌شدگی خود رسیده و ظرفیت باربری خود را زودتر از دست می‌دهد. همچنین افزایش ارتفاع تیر، از مقدار کرنش حداکثر به وجود آمده در محل اتصال تیر به ستون می‌کاهد.

• از مقایسه نتایج می‌توان گفت با افزایش نسبت طول تقویت (β_j) و طول ناحیه کاهش عرض بال تیر (L_{tap})، شاهد نتیجه بهتری در اتصال TBF خواهیم بود.

شایان ذکر است مدل با نسبت تقویت ۱/۳ و با نسبت طول افزایش عرض بال تیر ۰/۷ و با ارتفاع تیر ۸۰۰ میلی‌متر را می‌توان به‌عنوان یکی از الگوهای قابل طرح با کمترین مقدار کرنش به وجود آمده در محل اتصال بال تیر به ستون نام برد.

مراجع

- [۱] FEMA (۱۹۹۹), "Interim Guidelines Advisory", Federal Emergency Management Agency, FEMA-۲۶۷, Sacramento, California.
- [۲] Afkhami, Hamid Reza (۲۰۱۴), Master Thesis, Hormozgan University.
- [۳] Shah Hosseini, Farnaz and Emami Korandi, Mohammad, ۲۰۱۴, "Evaluation of nonlinear dynamic behavior of special steel bending frame structures by considering reduced beam joints (۲۰ and ۴۰٪ RBS) in progressive failure", ۲nd international congress of structure, architecture and urban development, Tabriz (Persian).
- [۴] Astaneh-Asl, Abolhassan, ۱۹۹۷, "Seismic Design of Steel Column-Tree Moment-Resisting Frames", Structural Steel Educational Council, Technical Information & Product Service, University of California, Berkeley.
- [۵] Mahnaz, Farzaneh, Ghassemieh, Mehdi and Bahaari, Mohammad Reza, ۲۰۱۱, "Rib Reinforcing of Flange Plate Moment Resisting Connection", Structure and Steel, Tehran, No. ۱۰, pp. ۱۰۹-۱۲۰ (Persian).
- [۶] Fiouz, Alireza and Mosadegh Zaddeh, Afshin, ۲۰۱۰, "Cyclic behavior of column-tree bending joint with non-prismatic short beam and column with H-shaped cross section", ۵th National Congress on Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad (Persian).
- [۷] Chen, Cheng-Chih, Lin, Chun-Chou and Lin, Chieh-Hsiang (۲۰۰۶), "Ductile Moment Connections Used in Steel Column-Tree Moment-Resisting Frames", Journal of Constructional Steel Research, ۶۲(۸), pp. ۷۹۳-۸۰۱.
- [۸] Plumier, Andre (۱۹۹۰), "New Idea for Safe Structures in Seismic Zones", IABSE Symposium, Brussels, Vol. ۶۰, pp. ۴۳۱-۴۳۶.
- [۹] Sofias, Christos E., Tzourmakliotou, Dimitra C. (۲۰۱۸), "Reduced Beam Section (RBS) Moment Connections- Analytical Investigation Using Finite Element Method", Civil Engineering Journal, ۴(۶), pp. ۱۲۴۰-۱۲۵۳.
- [۱۰] Kulkarni, Swati Ajay and Vesmawala, Gaurang (۲۰۱۴), "Study of Steel Moment Connection with and without reduced Beam Section", Case Studies in Structural Engineering, Vol. ۱, pp. ۲۶-۳۱.
- [۱۱] Chen, Cheng-Chih and Lin, Chun Chou (۲۰۱۳), "Seismic Performance of Steel Beam-to-Column Moment Connections with Tapered Beam Flanges", Engineering Structures, Vol. ۴۸, pp. ۵۸۸-۶۰۱.