

بررسی اجزای محدود اتصال جدید نیمه گیردار با موقعیت آسیب کنترل شده در قاب‌های فولادی سردنورد شده (CFS)

محمدرضا فرج پور^۱، جمشید صبوری^{۲*}، یوسف حسین زاده^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۲- استادیار، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۳- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- stu.farajpour@iaut.ac.ir

۲- j-sabouri@iaut.ac.ir

۳- hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir

چکیده:

در این پژوهش نوع جدیدی از اتصال نیمه‌گیردار با موقعیت آسیب کنترل شده برای قاب‌های فولادی سردنورد شده (CFS) معرفی و رفتار آن به کمک مدل سازی اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی بررسی شد. این اتصال به گونه‌ای طراحی شده است که با ایجاد یک فیوز خمشی در محل اتصال تیر به ستون، تمرکز آسیب از ستون دور شده و به ناحیه‌ای از پیش تعیین شده برای تسلیم موضعی منتقل شود. پارامترهای هندسی مختلف شامل ضخامت ورق، زاویه شیب قطعات اتصال، طول قطعه کنترلی و اندازه لبه سخت‌کننده بال بررسی شد. نتایج بیانگر آن است که افزایش ضخامت ورق موجب رشد قابل‌ملاحظه مقاومت خمشی و افزایش سختی اولیه می‌شود. تحلیل پارامتریک نشان داد افزایش طول قطعه کنترلی منجر به افزایش مقاومت خمشی تا ۱۸٪ و سختی اولیه تا ۱۲٪ می‌گردد، در حالی که حذف این قطعه مانع از هدایت مفصل پلاستیک به محل از پیش تعیین شده می‌شود. تغییر زاویه بخش شیب‌دار اتصال مقاومت خمشی را حدود ۱۳٪ افزایش داد و افزایش اندازه لبه سخت‌کننده بال باعث رشد مقاومت خمشی تا ۳۵٪ گردید، هرچند سختی بیش‌ازحد می‌تواند احتمال کمانش موضعی در تیر را افزایش دهد. بررسی منحنی‌های لنگر-دوران حاکی از آن است که اتصال جدید رفتار نیمه‌گیردار مناسبی داشته و به طور مؤثر کمانش اعضای تیر و اتصال را در ناحیه فیوز کنترل می‌کند؛ به گونه‌ای که در اکثر نمونه‌ها تا دوران ۰.۰۷ رادیان هیچ‌گونه کمانش موضعی در تیر یا ستون مشاهده نشد.

واژگان کلیدی:

قاب فولادی سبک سردنورد شده (CFS)، اتصالات نیمه‌گیردار، مدلسازی اجزای محدود، منحنی لنگر-دوران، موقعیت آسیب کنترل شده و رفتار مونوتونیک.

* جمشید صبوری، استادیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز.

ایمیل: j-sabouri@iaut.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Finite element investigation of novel semi-rigid Connection with Controlled Damage Position in CFS frames

M.R. Farajpour ^١, J. Saburi ^٢, Y. Hosseinzadeh ^٣

^١– Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Ta. C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran

^٢– Associate Prof., Department of Civil Engineering, Ta. C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran

^٣– Prof., The Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract:

In this study, a novel semi-rigid connection with a Controlled Damage Position (CCDP) is introduced for cold-formed steel (CFS) frames, and its structural performance is thoroughly evaluated through both finite element (FE) modeling and experimental tests. The connection is specifically designed to incorporate a flexural fuse at the beam-to-column joint, thereby effectively relocating damage concentration away from the column and directing it toward a predefined region intended for controlled localized yielding. The proposed connection was fabricated using galvanized steel plates, which were carefully cut and bent to thicknesses of ١-, ٢-, and ٣-mm. Comparative results between FE simulations and experimental tests demonstrated excellent agreement, with the maximum deviation being less than ٩%, confirming the reliability of the FE modeling approach. A detailed parametric investigation was conducted to assess the influence of key geometric parameters, including plate thickness, inclination angle of the connecting components, length of the control segment, and the size of flange stiffeners. The results indicated that increasing plate thickness significantly enhanced both the flexural strength and the initial stiffness of the connection. Furthermore, the parametric analysis revealed that extending the control segment length increased the flexural capacity by up to ١٨% and the initial stiffness by up to ١٢%, whereas removal of this segment prevented the proper localization of the plastic hinge. Increasing the inclination angle of the sloped component improved flexural capacity by approximately ١٣%, while enlarging the flange stiffener length enhanced the flexural resistance by up to ٣٥%, although excessive stiffening could potentially increase the likelihood of local buckling in the beam. Among all the studied configurations, the specimen with ٢-mm plates and a ٢٠-mm control segment exhibited the highest moment capacity and initial stiffness. Moreover, the obtained moment–rotation curves confirmed that the CCDP connection provided reliable semi-rigid behavior and effectively controlled buckling within the designated fuse region; in most specimens, no local buckling was observed in either the beam or the column up to a rotation of ٠,٠٧ radians.

Keywords: cold formed steel frames (CFS), semi-rigid connections, finite element modeling, moment rotation curve, controlled damage position and monotonic behavior.

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

سازه های سردنورد فولادی، نسبت سختی به وزن مصالح بیشتری نسبت به سازه های گرم نورد داشته و سازه هایی اقتصادی به حساب می آیند. این سازه ها به دلیل نسبت بالای عرض به ضخامت اعضا، بیشتر از مقاطع گرم نورد شده مستعد کمانش و خرابی موضعی هستند. به همین دلیل اکثراً از مقاطع سردنورد شده به عنوان اعضای غیر سازه ای استفاده می شود [۱]. با روشن شدن مزایای اقتصادی این نوع از سازه ها، استفاده از این مقاطع به عنوان اعضای سازه ای رو به گسترش می باشد. از مقاطع جدار نازک به صورت قاب های خمشی با اتصالات پیچی می توان در سازه های با ارتفاع کم تا متوسط به عنوان اعضای سازه ای استفاده نمود. در سازه های فولادی سردنورد شده سیستم های مقاوم در برابر بارهای جانبی به طور کلی به سه گروه اصلی تقسیم می شوند: سیستم دیوار برشی با قاب های سبک پانلی، سیستم دیوار برشی با مهاربند تسمه ای و سیستم قاب خمشی با اتصالات گیردار. اتصالات خوب طراحی شده می توانند با مشارکت در رفتار غیر خطی سازه، رفتار لرزه ای آن را بهبود بخشند. تیر در قاب های فولادی سبک مستعدترین نقطه برای تشکیل مفصل پلاستیک می باشد. ظرفیت دورانی مناسب اتصالات این امکان را به سازه می دهد که به جای ایجاد خرابی، با تغییر شکل غیرالاستیک و جذب انرژی، از تغییر مکان جانبی بیشتر قاب جلوگیری نموده و شکل پذیری سازه را بهبود بخشد. رفتار کلی اتصالات فولادی را چیدمان، نیروی سفت شدگی پیچ و رفتار خمشی اعضای اتصال تعیین می کند. نتایج بررسی های آزمایشگاهی و عددی اخیر روی اتصالات خمشی متعارف استفاده شده در قاب های فولادی سبک نشان دهنده مقاومت خمشی مناسب این نوع از اتصالات است. توجه به این نکته ضروری است که اتصالات متعارف در قاب هایی که نسبت عرض به ضخامت مقاطع جدار نازک استفاده شده در آنها بسیار بالا باشد شکل پذیری و جذب انرژی ضعیفی دارند [۲]. این موضوع ضرورت اصلاح و بهبود رفتار اتصالات در سازه های فولادی سبک در مناطق لرزه خیز را نشان می دهد.

مقاومت خمشی اتصالات سازه های سبک فولادی تحت بارگذاری های رفت و برگشتی به صورت عددی و آزمایشگاهی توسط عماد حسن و همکاران [۳] مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که این اتصالات به صورت نیمه گیردار عمل کرده و تنها مقاومت لازم برای قاب فولادی با مقاومت خمشی کم و متوسط را تامین می نمایند.

مطالعات عددی انجام یافته توسط لیم و همکاران [۴] نشان داده است که مشخصات پیچ مورد استفاده در قاب های فولادی سبک تاثیر زیادی در ظرفیت خمشی قاب دارد. بر اساس این تحقیقات، مقاومت خمشی و شکل پذیری در قاب های فولادی سبک بر اساس چهار فاکتور اصلی تامین می شود. اول مشخصات مصالح و تنش تسلیم آن، دوم نحوه کمانش اعضای قاب در محل اتصال، سوم شکل توزیع پیچ ها و در نهایت شکل مقطع تیر و ستون. با این حال مطالعات نشان داده است که با یک طراحی مناسب می توان شکل پذیری و مقاومت خمشی مناسبی از مقاطع جدار نازک بدست آورد.

مطالعات آزمایشگاهی انجام یافته توسط مجتبیایی و همکاران [۵] نشان داده است که استفاده از اشکال خاص و افزایش بعد و مقاومت خمشی بال های مقاطع تیر و ستون می تواند تاثیر زیادی در مقاومت کمانشی اعضای قاب داشته باشد. برای رسیدن به این هدف استفاده از مقاطع تیر با شکل بال گوناگون از جمله چند وجهی و گرد پیشنهاد شده است. با توجه به این که مقاطع مورد استفاده در قاب های فولادی سبک از ورق های نازک با قابلیت برشکاری و خمکاری ساخته می شود به راحتی می توان مقاطع جدید با هندسه مختلف ساخت. ولی نحوه اتصال پیچی تیر با هندسه پیچیده به اعضای اتصال و ستون یکی از مشکلات مقاطع با شکل هندسی پیچیده می باشد.

مجتبیایی و همکاران [۶]، مدلهای آزمایشگاهی و اجزای محدود از قاب های فولادی با ستونهای ساخته شده از پروفیل مربعی شکل با اتصالات صلب را ارائه نموده اند. آنها جهت ایجاد یک اتصال گیردار بین تیر و ستون از ورقهای فولادی مثلی شکل استفاده کردند. در مدل قاب خمشی ارائه شده، افزایش مقاومت جانبی قاب نسبت به قاب های سبک فولادی متعارف محسوس است. در مدل ارائه شده، کمانش بال ستون در نزدیکی محل اتصال ستون به پی رخ می دهد. سپس دومین نقطه ستون در نزدیکی ورق اتصال دچار کمانش موضعی می شود. در این مدلها، جذب انرژی و شکل پذیری قاب افزایش قابل توجهی داشته و تاثیر اندازه پروفیل ستون در افزایش مقاومت خمشی قاب از تاثیر نسبت عرض به ضخامت ستون بیشتر است. ضریب کاهش مقاومت برخی از مدلهای ارائه شده بر اساس آیین نامه های طراحی کافی به نظر می رسد. قابل توجه است که کمانش ستون در نزدیکی پی و در محل اتصال تیر به ستون عمده مشکل مدل پیشنهادی مجتبیایی و همکاران است.

یک نوع قاب با اتصال گیردار نوین توسط مکرون و همکاران [۷] ارائه شده است. در این مطالعه، جهت ایجاد گیرداری در اتصال، از ورقهای مثلی و سخت کننده های مختلف استفاده شد. در این مدلها، جذب انرژی بالاتر، شکل پذیری بهتر و شکل هیستریزیس پایدارتری نسبت قابهای فولادی سبک متعارف مشاهده شد. در مدلهای ارائه شده، کمانش جانبی جان ستون در محل اتصال ستون به ورق سخت کننده اتصال رخ داد. به نظر می رسد کمانش جانبی ستون عمده ایراد مدل قاب خمشی ارائه شده توسط مکرون و همکاران است.

نوع جدیدی از اتصالات گیردار تیر به ستون توسط عماد حسن و همکاران [۸] ارائه شده است. در این نوع اتصال از سخت کننده های قائم و افقی متعدد در محل اتصال استفاده شد. از معایب اتصال معرفی شده توسط عماد حسن و همکاران استفاده زیاد از مصالح و دشواری اتصال جوشی سخت کننده ها است. با توجه به ضخامت کم ورق تیر، استفاده از جوش جهت اتصال سخت کننده ها مناسب به نظر نمی رسد.

عامل کلیدی محدودکننده شکل پذیری قابهای فولادی سردنورد، عدم توانایی در کنترل محل ایجاد کمانش است. صباغ و همکاران [۹] اقدام به توسعه نوع جدیدی از اتصالات گیردار با استفاده از ورقهای میان گذر نمودند. آنها توانستند ظرفیت خمشی اتصال را ۳۵ درصد افزایش داده و شکل پذیری قابهای سردنورد شده را تا ۷۵ درصد بهبود بخشند. یکی از ایرادات مهم اتصالات معرفی شده توسط صباغ، استفاده از ورقهای میانگذر با عرض زیاد است که مانع از اجرای صحیح عرشه در سازه های فولادی سبک می شود.

ستوک و همکاران [۱۰] در یک مطالعه عددی، اقدام به بهبود جزئیات اتصالات خمشی ارائه شده توسط صباغ و همکاران [۹] نمودند. او با تغییر شکل و ضخامت ورقهای میانگذر، با حفظ گیرداری اتصالات، ایرادات مدل صباغ و همکاران را رفع نمود.

پاپاگریوس و همکاران [۱۱] مطالعات عددی گسترده ای روی سه نوع اتصال نوآورانه با استفاده از صفحات انتهایی و سخت کننده های لچکی انجام دادند. آنها اتصالات گیردار را در سه حالت مختلف، اتصال بال تیر به بال ستون با استفاده از لچکی، اتصال جان تیر به جان ستون با ورق میانگذر و ترکیبی از این دو روش را مطالعه نموده و با ترکیب سخت کننده ها و لچکی های اتصال دهنده بال، تعادلی بین ظرفیت باربری و عملکرد لرزه ای ایجاد کردند.

سناپاتی و همکاران [۱۲] با ادغام قابهای خمشی متوسط که در جهت نیروی جانبی تراز شده اند، ظرفیت باربری جانبی کلی سازه را افزایش دادند. در تحقیقات آنها راهکاری عملی برای ایجاد اتصالات گیردار ارائه نشده است و تنها از ظرفیت باربری قابها در راستای نیروی جانبی جهت انتقال نیروهای افقی استفاده شده است.

شاهینی و همکاران [۱۳] با تمرکز بر ساز و کار لغزش اصطکاکی اتصالات پیچی و بررسی اتصالات با آرایشهای مختلف پیچ توانستند اتلاف انرژی قابهای خمشی سردنورد شده را تا ۷۵ درصد افزایش دهند. بر اساس این مطالعات، آرایش پیچی دایره ای با سوراخهای شکاف دار می تواند به طور موثری خرابی کمانشی تیرها در سازه های فولادی سبک را به تاخیر بیندازد.

تحقیقات قابل توجهی بر بهبود عملکرد لرزه ای سازه های فولادی از طریق به کارگیری اجزای مستهلک کننده انرژی متمرکز شده است. یکی از رویکردهای نوین، استفاده از فیوز خمشی است که با افزایش شکل پذیری، آسیب را در یک بخش متمرکز کرده و از خرابی اعضای اصلی سازه جلوگیری می کند. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده اند که به کارگیری چنین فیوزهایی موجب افزایش جذب انرژی، کنترل مکانیزم های خرابی پس از زلزله می شود. کافی و همکاران [۱۴] یک سیستم تسلیم شونده را به صورت آزمایشگاهی و عددی ارزیابی کردند. نتایج این تحقیق بیانگر شکل پذیری بالا و ظرفیت مطلوب در جذب انرژی بوده است؛ به طوری که مفصل پلاستیک صرفاً در یک نقطه مشخص تشکیل شده و سایر اعضا در محدوده الاستیک باقی مانده اند. این یافته ها اهمیت استفاده از مکانیزم های تسلیم کنترل شده در سازه های فولادی را نشان می دهد؛ رویکردی که همسو با توسعه ای اتصالات خمشی با ناحیه آسیب از پیش تعیین شده در قابهای فولادی سردنورد شده است [۱۵].

محمد محمود و همکاران [۱۵] اثر پیکربندی اتصال انتهایی تیر به بستر خرپا های ساخته شده از فولاد سردنورد شده را به صورت آزمایشی بررسی کردند. نتایج نشان داد که نوع اتصال انتهایی نقش مؤثری در انتقال بار، شکل پذیری اعضا و توزیع تنش دارد؛ تغییر در جزئیات اتصال می تواند موجب کاهش تمرکز تنش در نقاط بحرانی یا افزایش ظرفیت باربری شود. این یافته ها اهمیت طراحی اتصالات خمشی با کنترل دقیق مکانیزم های تسلیم و تمرکز بر رفتار غیرالاستیک در مناطق از پیش تعیین شده را تأیید می کند.

محققین همواره به اهمیت ایجاد کمانش های موضعی در اجزای قاب های فولادی سبک واقف بوده و با ارائه راهکارهای مختلف سعی در کنترل و دور نمودن آن از نقاط حساس قاب کرده اند. با توجه به اهمیت کنترل محل کمانش موضعی در اجزای قاب های فولادی سبک، در این مقاله نوع جدیدی از اتصالات نیمه گیردار با موقعیت آسیب کنترل شده پیشنهاد شده است. این اتصال به عنوان یک فیوز خمشی عمل کرده و آسیب و کمانش را از ستون و تیر دور می کند. اتصالات نیمه گیردار نوین از خم و برش ورقهای گالوانیزه ایجاد و توسط پیچ مابین تیر و ستون متصل می شوند. جهت بررسی عددی رفتار این اتصالات، مدل های اجزای محدود در نرم افزار ABAQUS ایجاد و دقت مدل های اجزای محدود با استفاده از نتایج آزمایشگاهی سنجیده شد. رفتار اتصالات جدید تحت بارگذاری مونوتونیک بررسی و کمانش موضعی اجزای اتصال، مقاومت خمشی و دوران اتصال بررسی شد. در ادامه تحقیق، تاثیر پارامترهای هندسی دخیل در رفتار اتصالات نوین بررسی شد. نتایج نشان می دهند اتصالات پیشنهادی دارای درجه گیرداری مناسب جهت استفاده در قاب های فولادی سردنورد بوده و در کنترل محل ایجاد کمانش و ممانعت از انتقال تغییر شکل های بزرگ به ستون و تیر مناسب عمل کرده اند.

۲ - نحوه ساخت اتصال گیردار جدید با موقعیت آسیب کنترل شده (CCDP)

در ساخت اتصال نیمه گیردار تیر به ستون جدید با موقعیت آسیب کنترل شده (CCDP)، یک قطعه با استفاده از یک ورق به صورت شکل (۱- a) بریده و خم می شود. سپس یک قطعه دیگر به روش مشابه ساخته شده که دقیقاً هم اندازه با قطعه قبلی بوده و با اتصال این دو قطعه توسط پیچ، قطعه اتصال دهنده واسط بین تیر و ستون مطابق شکل (۱- b) ایجاد می شود. انتقال نیروهای داخلی از تیر به ستون، توسط این دو قطعه انجام می شود. این قطعات پیش ساخته از خم و برش ورق گالوانیزه با ضخامت یک، دو و سه میلی متر، بر اساس آیین نامه طراحی سازه های سردنورد شده ۲۴-۱۰۰۰ AISI-S [۱۷] ساخته شده اند. شعاع خمکاری در ساخت این قطعات دو میلی متر است. هر قطعه اتصال بعد از خمکاری و مونتاژ، از دو باکس یا بخش R و P تشکیل یافته و به صورت یک سیستم یکپارچه، نیروی برشی و لنگر خمشی تیر را به ستون منتقل می کند. مجموعه اتصال مطابق

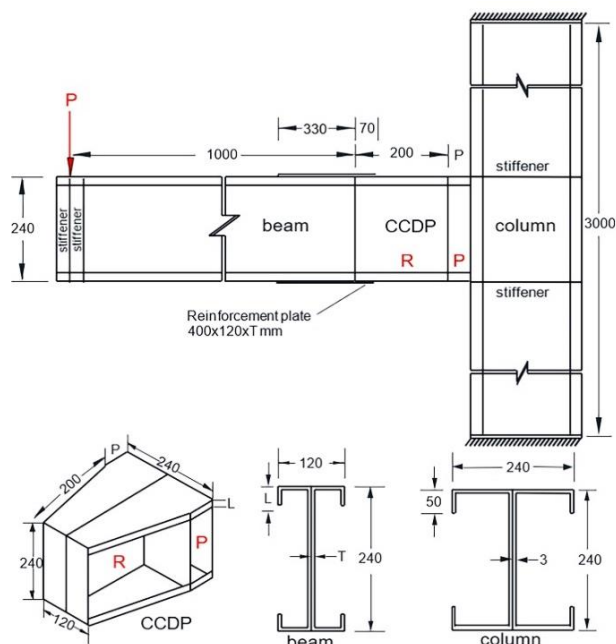
شکل (۱) از ۶ جزء تشکیل شده است که بعد از خمکاری و اتصال به یکدیگر، به صورت یک سیستم واحد عمل می کند. ورق های ۱، ۳ و ۶ علاوه بر اتصال قسمتهای R و P، نقش سخت کننده را نیز دارند. جهت اتصال دو قطعه پیش ساخته به هم، از ۱۵ عدد پیچ شماره ۸ استفاده شده است. جهت متصل نمودن تیر به اتصال CCDP، از ۱۲ عدد پیچ و جهت متصل نمودن اتصال CCDP به ستون از شش عدد پیچ شماره ۸ استفاده شده است. پیچهای بکار رفته از نوع CL۸/۸ می باشند. هدف از طراحی بخشهای مختلف اتصال CCDP، ایجاد گیرداری در محل اتصال تیر به ستون و کنترل کمانش اعضای اتصال و تیر است. بخش P اتصال، وظیفه دور کردن تغییر شکلهای پلاستیک و کمانش از بر ستون را بر عهده دارد و این قطعه از آسیب به اتصال در بر ستون جلوگیری می کند؛ استهلاک انرژی و کمانش بال فشاری در یک نقطه از پیش تعیین شده در وسط قطعه R رخ می دهد. در طراحی تیر و اتصال، محدودیت عرض بال به ضخامت ورق جهت کنترل تسلیم موضعی و مقاومت پیچ و جوش بر اساس آیین نامه Eurocode ۳ [۱۸] رعایت شده است. مجموعه تیر و قطعه CCDP با استفاده از شش پیچ M۱۰ به یک ستون بطول ۳۰۰ سانتیمتر متصل شده است. ضخامت ورق و سخت کننده های ستون در همه مدلها ۳ میلی متر است. دو انتهای ستون دارای تکیه گاه گیردار است. از ورق تقویت کننده بال در محل اتصال تیر به قطعه اتصال CCDP استفاده شده است. ورق تقویت کننده بال، الگوی کمانش تیر و اتصال را تغییر می دهد و استفاده از آن در محل اتصال تیر به قطعه CCDP از جدا شدگی ورق انتهایی تیر و قطعه CCDP ممانعت کرده و رفتار اتصال را بهبود می دهد. ورق تقویتی بطول ۴۰۰ میلی متر است و به وسیله ۱۲ پیچ شماره ۶ به بال های تیر و قطعه اتصال متصل شده است. در این مدلها، ضخامت ورق تقویتی با ضخامت اجزای تیر و اتصال یکسان بوده و در موقعیت ۷۰ میلی متری ابتدای قطعه CCDP و ۳۳۰ میلی متری انتهای تیر نصب شده است. تعداد پیچهای اتصال ورق تقویتی به نحوی طراحی شده است که مقاومت کافی جهت تحمل نیروهای کششی حاصل از خمش را دارا باشد. شکل (۲) یکی از نمونه های آزمایشگاهی اتصال CCDP با ورق تقویتی بال را نشان می دهد. جهت بررسی رفتار اتصال پیشنهادی بیست و یک مدل اجزای محدود در سه ضخامت مختلف ایجاد شده است. میزان گیرداری اتصالات با

^۱ Connection with controlled damage position (CCDP)

قطعه R را نشان می دهد. در تمامی نمونه های اجزای محدود مشخصات هندسی ستون یکسان است.



شکل ۲: نمونه آزمایشگاهی تیر و اتصال CCDP



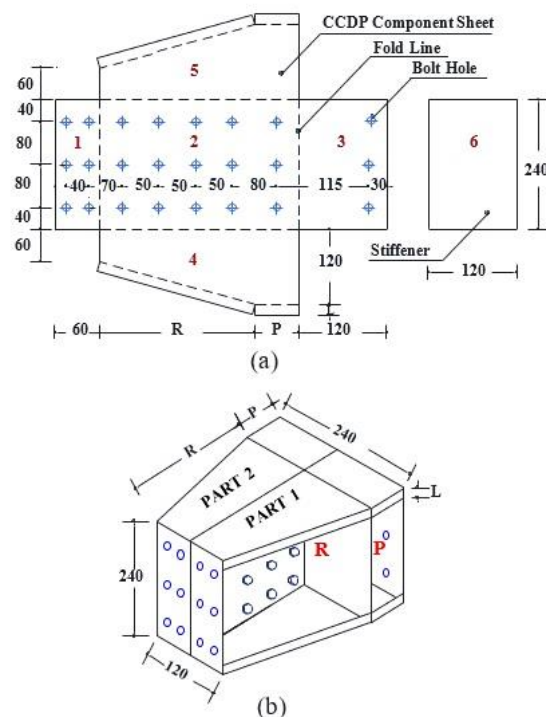
شکل ۳: اندازه مدل های اجزای محدود (ابعاد به میلی متر)

۳ - مدل سازی اجزای محدود نمونه ها

جهت مدل سازی اجزای محدود اتصالات از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. در مدل های اجزای محدود، رفتار غیر خطی هندسی، غیر خطی مصالح و تغییر شکلهای بزرگ مورد توجه قرار گرفته است. می باشد. این حالت کماتش موضعی اعضا را به خوبی نشان می دهد [۲].

خواص مکانیکی مصالح فولاد تیر، ستون و ورق اتصال بر اساس نتایج کوپن تست نمونه های آزمایشگاهی در دو حالت مسطح و خم بدست آمده است. شکل (۴) نمونه های کوپن تیر و اتصال و شکل (۵) منحنی تنش و کرنش مصالح را نشان می دهد. جدول (۲) مشخصات مصالح مصرفی را ارائه کرده است. در این جدول، E مدول الاستیسیته مصالح، $\sigma_{0.2\%}$ تنش تسلیم مصالح، F_u مقاومت کششی نهایی و ϵ_f کرنش نهایی

استفاده از روابط آیین نامه ۳ Eurocode [۱۸] تعیین شده است. بر اساس این آیین نامه، نمونه های مورد مطالعه در محدوده اتصالات نیمه گیردار قرار دارند. شکل (۳) اندازه قطعات اتصال را نشان میدهد.



شکل ۱: نحوه ایجاد اتصال CCDP (ابعاد به میلی متر)

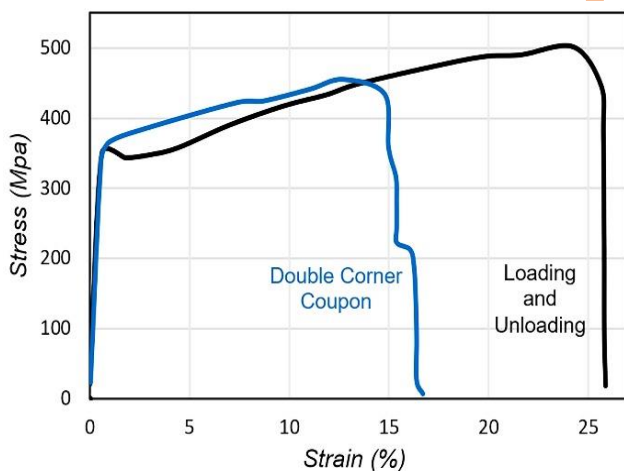
(a) نحوه برش و خمکاری ورق هر پارت، (b) شکل اتمام یافته اتصال

جهت بررسی پارامترهای هندسی دخیل در رفتار اتصال، اندازه لبه سخت کننده (L) در سه اندازه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی متر تحلیل و نتایج مقایسه شده اند. پارامتر موثر دیگر در رفتار اتصال، زاویه افزایش عرض قطعه R اتصال است. در حالت اول، قطعه R اتصال با زاویه افزایش عرض ۱۷ درجه، کل عرض بال ستون را پوشش می دهد و در حالت دوم، قطعه R با زاویه افزایش عرض ۹ درجه، ۷۵ درصد عرض بال ستون را پوشش داده است. در هر دو حالت طول قطعه R برابر ۲۰۰ میلی متر است. پارامتر هندسی سوم طول بخش کنترلی ثابت P است که در چهار اندازه مختلف صفر، ۲۰، ۵۰ و ۷۰ میلی متر بررسی شده است. جدول (۱) مشخصات مدل های اجزای محدود ایجاد شده را نشان میدهد. در نامگذاری مدل ها، T ضخامت ورق مورد استفاده در ساخت تیر و اتصال، L اندازه لبه سخت کننده بال، P طول قسمت ثابت کنترلی اتصال و R در دو حالت R^1 و R^2 ، شیب افزایش عرض

همگرایی مش تیر در جدول (۳) ارائه شده است. بیشینه خطای حاصل از اندازه مش بندی ۲.۹ درصد است. جهت افزایش دقت مدلسازی، نسبت ابعاد مش بندی (aspect-ratio)، در محل اتصال قطعات کوچکتر در نظر گرفته شده است. مطابق نمونه های آزمایشگاهی، بارگذاری مونوتونیک اتصالات تا دوران ۰.۰۷ رادیان در محل اتصال اعمال شده است. شکل (۶) یک نمونه مدل اجزای محدود تیر و اتصال را نشان می دهد.



شکل ۴: نمونه های کوپن تیر و اتصال



شکل ۵: منحنی تنش و کرنش مصالح مصرفی
جدول ۲: مشخصات مصالح مصرفی

مصلح است. جهت مدلسازی پیچ در مدل های المان از اتصال دهنده (connector-beam) استفاده شده است. این نوع اتصال دهنده، دوران و تغییر شکل پیچ را در نظر نگرفته و یک اتصال کامل ما بین صفحات در محل پیچ ایجاد میکند.

جدول ۱: مشخصات هندسی نمونه ها (ابعاد به میلی متر)

specimen	Plate thickness (T)	wing stiffener edge (L)	Length of (R)	Width of (P)	Length of (P)
T1L2R1P0	۱	۲۰	۲۰۰	۲۴۰	۰
T1L2R1P2	۱	۲۰	۲۰۰	۲۴۰	۲۰
T1L2R1P5	۱	۲۰	۲۰۰	۲۴۰	۵۰
T1L2R1P7	۱	۲۰	۲۰۰	۲۴۰	۷۰
T1L1R1P5	۱	۱۰	۲۰۰	۲۴۰	۵۰
T1L2R1P5	۱	۲۰	۲۰۰	۱۸۰	۵۰
T1L3R1P5	۱	۳۰	۲۰۰	۲۴۰	۵۰
T1L2R1P0	۲	۲۰	۲۰۰	۲۴۰	۰
T1L2R1P2	۲	۲۰	۲۰۰	۲۴۰	۲۰
T1L2R1P5	۲	۲۰	۲۰۰	۲۴۰	۵۰
T1L2R1P7	۲	۲۰	۲۰۰	۲۴۰	۷۰
T1L1R1P5	۲	۱۰	۲۰۰	۲۴۰	۵۰
T1L2R1P5	۲	۲۰	۲۰۰	۱۸۰	۵۰
T1L3R1P5	۲	۳۰	۲۰۰	۲۴۰	۵۰
T1L2R1P0	۳	۲۰	۲۰۰	۲۴۰	۰
T1L2R1P2	۳	۲۰	۲۰۰	۲۴۰	۲۰
T1L2R1P5	۳	۲۰	۲۰۰	۲۴۰	۵۰
T1L2R1P7	۳	۲۰	۲۰۰	۲۴۰	۷۰
T1L1R1P5	۳	۱۰	۲۰۰	۲۴۰	۵۰
T1L2R1P5	۳	۲۰	۲۰۰	۱۸۰	۵۰
T1L3R1P5	۳	۳۰	۲۰۰	۲۴۰	۵۰

در مدلسازی اجزای محدود، برای مش بندی اجزا از مش های چهار ضلعی با ۴ گره پوسته ای با انتگرال گیری کاهش یافته S4R در حالت تنش سه بعدی استفاده شده است. برای تعیین اندازه مناسب مش بندی، از تحلیل همگرایی مش استفاده شده است. یک نمونه اجزای محدود تیر تحت بارگذاری خمشی ثابت ۱۵ کیلونیوتن متر، با اندازه مش های مختلف تحلیل شده و با مقایسه تفاوت تغییر مکان و ماکزیمم تنش فون میزس حاصل از بارگذاری در یک المان مشخص در انتهای تیر، اندازه مش مناسب تعیین شده است. نتایج تحلیل

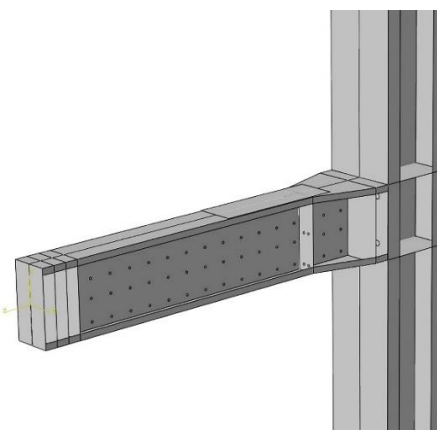
specimen	type	thickness (mm)	E (GPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	F_u (MPa)	ϵ_f (%)
۱، ۲	flat	۱۰	۲۱۴	۳۷۹	۴۲۴	۲۵.۹
۴، ۵	flat	۲۰	۲۲۰	۳۲۹	۳۸۷	۲۰.۱
۱، ۳	corner	۱۰	-	۳۵۴	۳۹۳	۱۶.۳
۳، ۴	corner	۲۰	-	۳۶۳	۴۰۰	۱۳.۳
average	-	-	۲۱۷	۳۵۶	۴۰۱	۱۸.۹

قطعه CCDP روی لبه بیرونی بال کششی مطابق شکل (۷) نصب شده است. جدول (۴) مقایسه نتایج تحلیل آزمایشگاهی و اجزای محدود را ارائه کرده است. در نمونه با ضخامت یک میلی متر، سختی اولیه نمونه آزمایشگاهی و اجزای محدود به ترتیب ۳۹۴۵ و ۴۰۵۸ کیلو نیوتن متر بر رادیان است. همچنین لنگر ماکزیمم تحمل شده توسط مجموعه تیر و اتصال در دوران ۰.۰۷ رادیان در نمونه های آزمایشگاهی و اجزای محدود به ترتیب ۲۴.۳۱ و ۲۴.۸۱ کیلو نیوتن متر است. در نمونه با ضخامت ۲ میلی متر نیز مشابه نمونه با ضخامت ورق ۱ میلی متر، سختی اولیه و لنگر ماکزیمم تیر و اتصال در مدل های اجزای محدود بیشتر از نمونه های آزمایشگاهی است. کرنش محاسبه شده توسط کانال ۱۲ روی بال کششی اتصال و کانال ۱۳ روی بال کششی تیر هم تطابق خوبی با نتایج مدلسازی اجزای محدود نشان می دهند. خطای مدلسازی اجزای محدود این نمونه ها با روش RMSE^۱ محاسبه شده است. خطای مدلسازی برای نمونه با ضخامت یک میلی متر، ۸.۸۲ درصد و برای نمونه با ضخامت دو میلی متر در حدود ۹.۱۷ درصد است.

منحنی لنگر-دوران نمونه های آزمایشگاهی و اجزای محدود در شکل (۹) و شکل (۱۰) و نوع آسیب و کماتش اجزای اتصال T۱L۲R۱P۵ در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در نمونه آزمایشگاهی با ضخامت ورق یک میلی متر، با لغزش در پیچهای ورق تقویتی بال کششی تیر در دوران ۰.۰۰۵ رادیان، سختی خمشی اتصال کاهش می یابد و در اجزای اتصال کماتش و تغییر شکلی تا دوران ۰.۰۲ رادیان ایجاد نمی شود. با ادامه بارگذاری، کماتش محدود لبه سخت کننده بال فشاری قطعه CCDP در نقطه B آغاز و در بال فشاری قطعه R گسترش می یابد. با تمرکز تغییر شکل و کماتش در وسط قطعه R اتصال، از ایجاد تغییر شکل در بر ستون و کماتش موضعی در تیر جلوگیری می شود. در دوران ۰.۰۷ رادیان، ۶ درصد دوران اتصال به

جدول ۳: نتایج تحلیل همگرایی مش بندی تیر تحت بارگذاری خمشی

Mesh size	Displacement at beam end (mm)	Max von mises stress (Mpa)	Displacement deviation (%)	Von-mises stress deviation (%)
۵mm	۳.۵۷۸۲۰	۱۷۲.۱	-	-
۴mm	۳.۴۴۱۱۹	۱۵۹.۳	۷٪	۷.۹٪
۳mm*	۶.۳۱۴۹	۱۵۴.۷	۳٪	۲.۹٪



شکل ۶: مدل اجزای محدود اتصال CCDP

۴ - صحت سنجی مدل های اجزای محدود با استفاده از نتایج آزمایشگاهی

جهت صحت سنجی مدلسازی اجزای محدود از نتایج آزمایشگاهی نمونه های T۱L۲R۱P۵ و T۲L۲R۱P۵ استفاده شده است [۱۹]. شکل (۷) نحوه نصب و تست نمونه آزمایشگاهی T۱L۲R۱P۵ را نشان می دهد. در این نمونه، ضخامت ورق تیر و اتصال یک میلی متر و اندازه لبه سخت کننده بال ۲۰ میلی متر است. همچنین طول قطعه P برابر ۵۰ میلی متر و زاویه قطعه R اتصال از راستای تیر ۱۷ درجه است. در نمونه های آزمایشگاهی، مجموعه تیر و قطعه اتصال توسط ۱۲ عدد پیچ با شماره ۱۰ به ستون صلب آزمایشگاه متصل شده است. بارگذاری توسط جک ۵۰۰ تن در انتهای تیر اعمال شده است. جهت ممانعت از کماتش جانبی تیر، تکیه گاه جانبی در فاصله ۴۰ سانتیمتری انتهای تیر قرار داده شده است. جهت ممانعت از کماتش موضعی محل اعمال نیرو، سه عدد سخت کننده در انتهای تیر در محل اتکای جک تعبیه شده است. محل اعمال نیرو در انتهای تیر بصورت مفصلی است. شکل (۸) جزئیات اتکای مفصلی جک به تیر را نشان می دهد. جهت مقایسه کرنش ایجاد شده در اجزای اتصال و تیر، دو عدد کرنش سنج در فاصله ۵ سانتیمتری محل اتصال تیر به

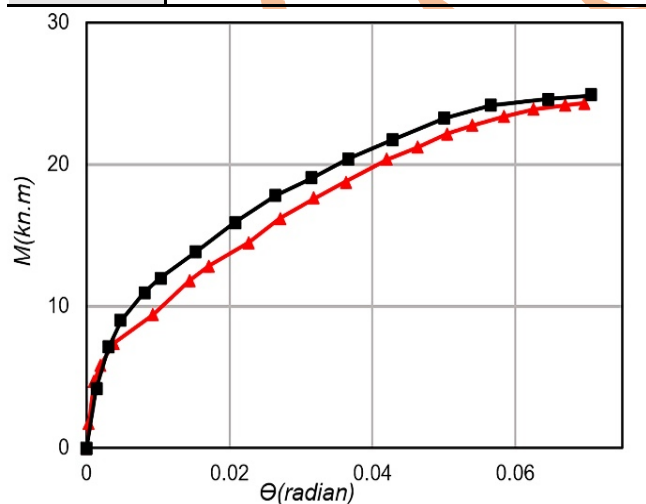
^۱ Root-Mean-Square Error (RMSE)



شکل ۸: اتصال مفصلی محل اعمال نیروی جک

جدول ۴: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود اتصال T₁L₂R₁P₅ و T₁L₂R₁P₅

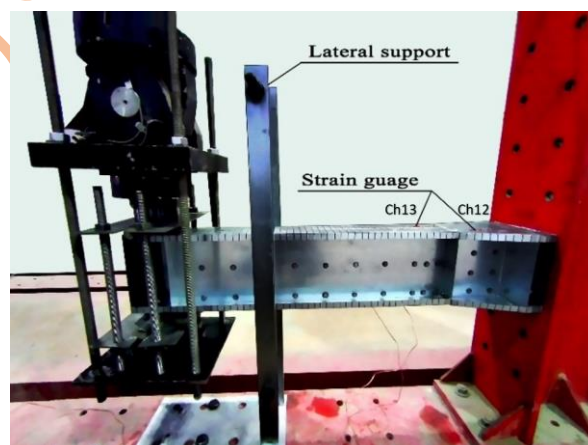
Specimen	Initial stiffness (kN.m/rad)	M _{max} (kN.m)	Strain (ch. ۱۳) (%)	Strain (ch. ۱۲) (%)
Experimental T ₁ L ₂ R ₁ P ₅	۳۹۴۵	۲۴.۳۱	۲.۹۳	۳.۸۵
Finite element T ₁ L ₂ R ₁ P ₅	۴۰۵۸	۲۴.۸۱	۲.۸۰	۳.۵۵
Experimental T ₁ L ₂ R ₁ P ₅	۸۹۳۳	۵۶.۵۹	۲.۶۵	۴.۰۴
Finite element T ₁ L ₂ R ₁ P ₅	۹۲۶۵	۵۸.۲۸	۲.۴۹	۳.۸۲



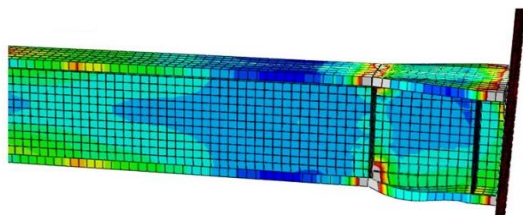
— T₁L₂R₁P₅(EXPERIMENTAL) — T₁L₂R₁P₅(FINITE ELEMENT)

شکل ۹: مقایسه منحنی لنگر-دوران نمونه آزمایشگاهی و اجزای محدود اتصال T₁L₂R₁P₅

دلیل لهیدگی ورق تقویتی و ۹۴ درصد دوران، به دلیل کمانش لبه سخت کننده بال فشاری قطعه R اتصال رخ داده است. مدل آسیب اجزای اتصال T₁L₂R₁P₅ در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در این نمونه لغزش پیچ و لهیدگی ورق تقویتی مشاهده نشد. در این اتصال، تغییر شکل در وسط بخش R قطعه CCDP بصورت کمانش موضعی لبه سخت کننده و بال فشاری اتصال رخ می دهد. در این نمونه همانند اتصال با ضخامت ورق یک میلی متر، قطعه CCDP علاوه بر افزایش مقاومت خمشی و سختی اولیه اتصال، از ایجاد تغییر شکل در بر ستون جلوگیری می کند. در هر دو نمونه اتصال بررسی شده، کمانش و تغییر شکل ماندگار در تیر ایجاد نمی شود و قطعه اتصال به خوبی توانسته است از ایجاد کمانش و تسلیم شدگی در تیر و ستون جلوگیری کرده و کمانش را در وسط قطعه R اتصال متمرکز کند. شکل توزیع تنش و آسیب اتصالات در مدلسازی اجزای محدود تطابق خوبی با مدل های آزمایشگاهی نشان می دهند. در نمونه های آزمایشگاهی و اجزای محدود، اتصال CCDP بصورت یک فیوز خمشی کارآمد عمل کرده است.



شکل ۷: نحوه نصب و چیدمان نمونه آزمایشگاهی اتصال T₁L₂R₁P₅



(b)

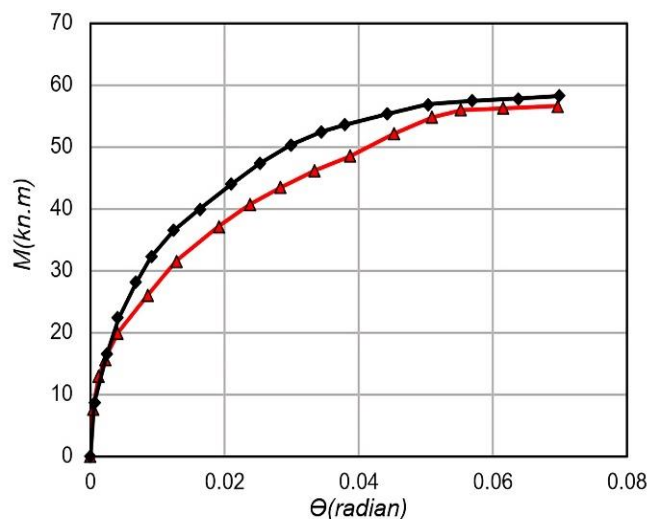
شکل ۱۲: مدل آسیب و کمانش نمونه T²L²R¹P⁵ تحت بارگذاری مونوتونیک
(a) نمونه آزمایشگاهی؛ (b) نمونه اجزای محدود

۵- تحلیل پارامتریک اتصال گیردار CCDP

برای بررسی رفتار اتصالات نیمه گیردار پیشنهادی و تاثیر پارامترهای هندسی دخیل در آن، ۲۱ مدل اجزای محدود اتصالات، مطابق جدول (۱) ایجاد و تحت بارگذاری مونوتونیک قرار گرفت. پارامترهای هندسی دخیل در رفتار اتصال شامل ضخامت ورق تیر و اتصال، اندازه لبه سخت کننده تیر، اندازه قطعه ثابت کنترلی P و شیب قطعه R است. بر اساس آیین نامه طراحی ۲۴-۱۰۰-AISI-S [۱۷]، ضخامت مجاز برای ساخت قطعات سردنورد شده ۰.۵ میلی‌متر تا ۳ میلی‌متر است. جهت بررسی تاثیر ضخامت ورق در رفتار اتصال، تیر و اجزای اتصال با ضخامت یک، دو و سه میلی‌متر ایجاد شد. قطعه ثابت P اتصال، وظیفه کنترل و دور نمودن محل ایجاد کمانش اجزای اتصال از بر ستون را بر عهده دارد. طول قطعه P در چهار حالت مختلف صفر، ۲۰، ۵۰ و ۷۰ میلی‌متر بررسی شد. قطعه R اتصال محل ایجاد مفصل پلاستیک از پیش تعیین شده است. همچنین استهلاک انرژی در این قطعه رخ می دهد. برای بررسی تاثیر شیب قطعه R در رفتار اتصال، نمونه های اجزای محدود با شیب ۹ و ۱۷ درجه برای قطعه R ایجاد شد. اندازه لبه سخت کننده بال تیر و اتصال تاثیر زیادی در سختی اتصال و نحوه آسیب و کمانش آن دارد. بدین جهت، نمونه هایی با اندازه لبه سخت کننده ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر ایجاد و نتایج تحلیل مونوتونیک نمونه ها مقایسه شد.

۵-۱- بررسی تاثیر ضخامت و اندازه قطعه ثابت P در رفتار اتصال

تاثیر قطعه P در رفتار اتصال CCDP وابستگی مستقیم به ضخامت ورق مورد استفاده در ساخت اجزای اتصال دارد. برای بررسی تاثیر قطعه P در رفتار اتصال، ۳ گروه مختلف مدل اجزای محدود با ضخامت یک، دو و سه میلی‌متر تحلیل و مقایسه شده اند. در تمام این مدلها اندازه لبه سخت کننده بال، طول و شیب قطعه R به ترتیب ۲۰ میلی‌متر، ۲۰۰ میلی‌متر و ۱۷ درجه است. مدل T²L²R¹P^۰، مدل

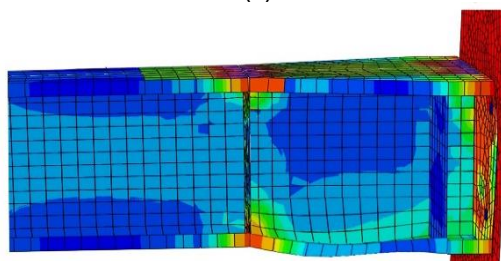


—▲ T2L2R1P5(EXPERIMENTAL) —◆ T2L2R1P5(FINITE ELEMENT)

شکل ۱۰: مقایسه منحنی لنگر-دوران نمونه آزمایشگاهی و اجزای محدود اتصال T²L²R¹P⁵

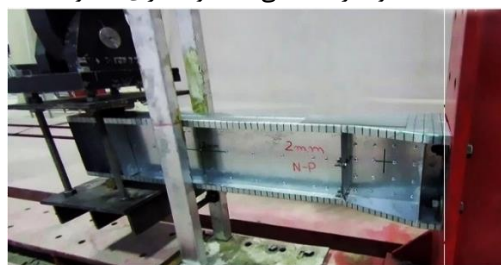


(a)



(b)

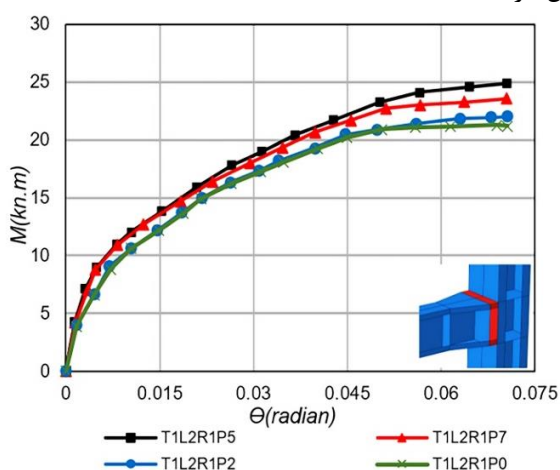
شکل ۱۱: مدل آسیب و کمانش نمونه T²L²R¹P⁵ تحت بارگذاری مونوتونیک
(a) نمونه آزمایشگاهی؛ (b) نمونه اجزای محدود



(a)

شکل (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) منحنی لنگر دوران اتصالات و شکل (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) توزیع تنش و نحوه کمانش نمونه ها را نشان می دهد. اتصالات با ضخامت ورق یک و دو میلی متر رفتار تقریباً یکسانی از خود نشان داده اند. در این اتصالات، کمانش موضعی سخت کننده بال در دوران ۰.۰۳ رادیان آغاز و با افزایش بارگذاری، تغییر شکل در بال فشاری قطعه R گسترش یافته و در دوران ۰.۰۵ رادیان بال فشاری اتصال کمانش میکند. در این اتصالات هیچ کمانش یا تغییر شکلی در تیر مشاهده نشده و اتصال از انتقال تغییر شکلهای بزرگ و کمانش به جان ستون ممانعت می کند.

در اتصالات با ضخامت بالای ورق استفاده از قطعه P تاثیر زیادی در دور نمودن تنش از بر ستون و ممانعت از انتقال تغییر شکلهای بزرگ به ستون دارد. در اتصالات با ضخامت ورق سه میلی متر، در صورت عدم استفاده از قطعه P، جان ستون کمانش می کند. استفاده از قطعه P در اتصالات CCDP ضروری بنظر می رسد. در صورت عدم استفاده از این قطعه در اتصال، نمی توان از کنترل محل کمانش اطمینان حاصل کرد.



شکل ۱۳: نمودار لنگر دوران اتصالات CCDP با ضخامت ورق یک میلی متر و اندازه قطعه P متغیر

اتصال بدون قطعه P است. مدل های دیگر اتصال CCDP با اضافه شدن قطعه P بطول ۲۰، ۵۰ و ۷۰ میلی متر ما بین ستون و قطعه R ایجاد شده اند.

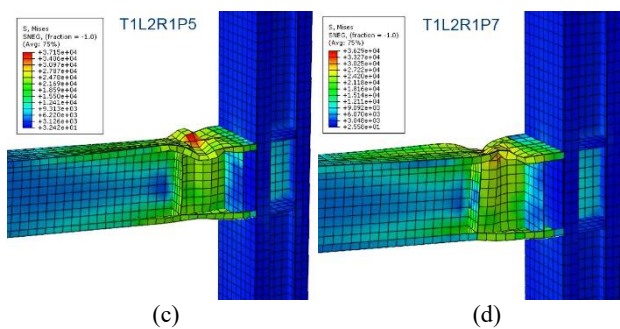
جدول (۵) نتایج تحلیل نمونه ها را نشان می دهد. در ضخامت یک میلی متر، اتصال با قطعه P با اندازه ۵۰ میلی متر مقاومت خمشی بیشتری نسبت به سایر مدل ها نشان داده است. در صورت استفاده از قطعه P با اندازه ۷۰ میلی متر، مقاومت در حدود ۳ درصد نسبت به اتصال با اندازه P برابر ۵۰ میلی متر کاهش می یابد. در اتصال با قطعه P با اندازه ۲۰ میلی متر کاهش مقاومت نسبت به اتصال با اندازه P برابر ۵۰ میلی متر، در حدود ۹ درصد است. در صورت عدم استفاده از قطعه P در اتصال مقاومت خمشی اتصال در حدود ۱۶ درصد کاهش می یابد.

رفتار اتصالات با ضخامت دو میلی متر مشابه اتصالات با ضخامت یک میلی متر است. در این اتصال هم بیشترین مقاومت خمشی در اتصال با اندازه قطعه P برابر ۵۰ میلی متر رخ داده است. با افزایش اندازه قطعه P، کاهش مقاومت اتصال محسوس نمی باشد. در صورت حذف قطعه P، مقاومت اتصال در حدود ۱۶ درصد کاهش می یابد.

جدول ۵: نتایج تحلیل مونوتونیک نمونه های اجزای محدود با طول P مختلف

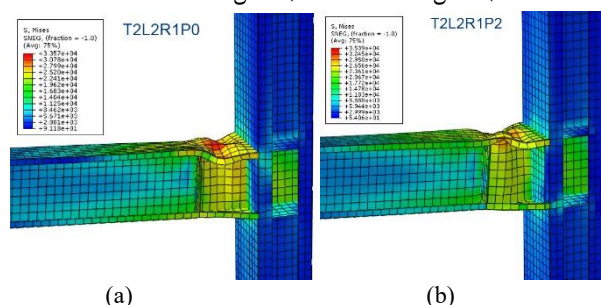
Specimen	Initial stiffness (kN.m/rad)	Moment at ۰.۰۷ rad (kN.m)
T ^۱ L ^۲ R ^۱ P ^۰	۳۹۶۵	۲۱.۲
T ^۱ L ^۲ R ^۱ P ^۲	۳۹۹۸	۲۲.۰۳
T ^۱ L ^۲ R ^۱ P ^۵	۴۰۵۸	۲۴.۸۵
T ^۱ L ^۲ R ^۱ P ^۷	۴۰۰۱	۲۳.۵۵
T ^۲ L ^۲ R ^۱ P ^۰	۸۸۲۵	۵۰.۰۴
T ^۲ L ^۲ R ^۱ P ^۲	۸۸۹۶	۵۳.۳۶
T ^۲ L ^۲ R ^۱ P ^۵	۹۰۶۵	۵۸.۲۶
T ^۲ L ^۲ R ^۱ P ^۷	۸۹۲۰	۵۶.۹۳
T ^۳ L ^۲ R ^۱ P ^۰	۲۲۵۶۰	۷۳.۲۹
T ^۳ L ^۲ R ^۱ P ^۲	۲۲۶۳۰	۸۲.۲۰
T ^۳ L ^۲ R ^۱ P ^۵	۲۳۸۸۰	۸۷.۲۴
T ^۳ L ^۲ R ^۱ P ^۷	۲۳۴۰۰	۸۷.۳۶

در اتصالات با ضخامت ورق سه میلی متر، مقاومت خمشی اتصال با قطعه P به طول ۵۰ و ۷۰ میلی متر، یکسان است. با کاهش طول این قطعه، مقاومت خمشی کاهش می یابد. در صورت حذف قطعه P، مقاومت خمشی اتصال کاهش شدیدی نسبت به اتصالات با ضخامت ورق کمتر داشته و در بارگذاری نهایی در حدود ۱۹ درصد کاهش یافته است.

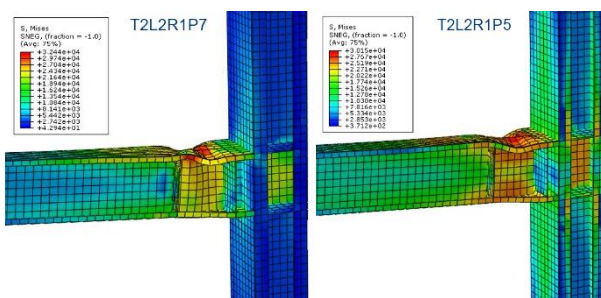


شکل ۱۶: توزیع تنش در اتصالات CCDP با ضخامت ورق یک میلی‌متر و اندازه
قطعه P متغیر (N/cm^۲)

(a) اتصال T^۱L^۱R^۱P^۰؛ (b) اتصال T^۱L^۱R^۱P^۲،
(c) اتصال T^۱L^۱R^۱P^۵؛ (d) اتصال T^۱L^۱R^۱P^۷



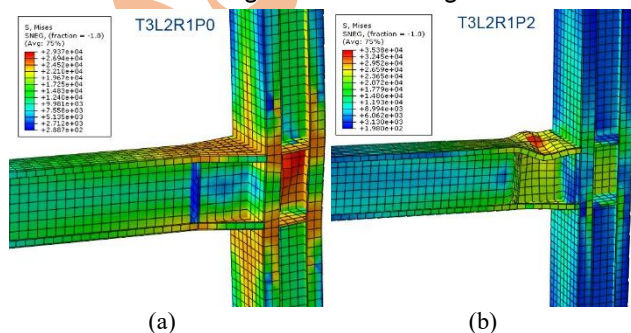
(a) (b)



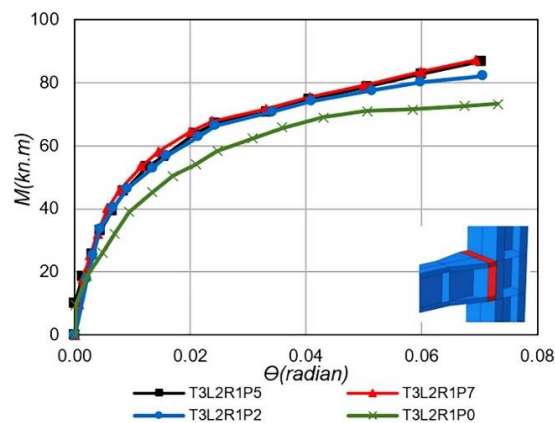
(c) (d)

شکل ۱۷: توزیع تنش در اتصالات CCDP با ضخامت ورق دو میلی‌متر و اندازه
قطعه P متغیر (N/cm^۲)

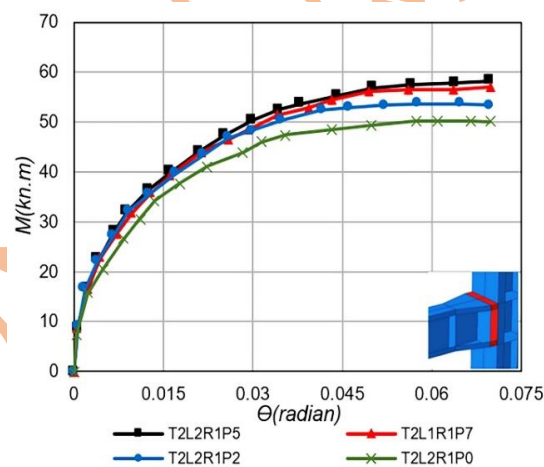
(a) اتصال T^۲L^۲R^۲P^۰؛ (b) اتصال T^۲L^۲R^۲P^۲،
(c) اتصال T^۲L^۲R^۲P^۵؛ (d) اتصال T^۲L^۲R^۲P^۷



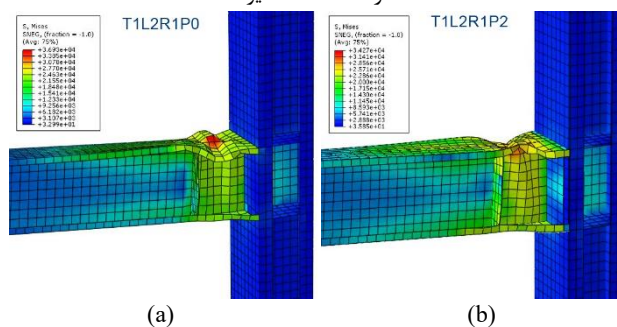
(a) (b)



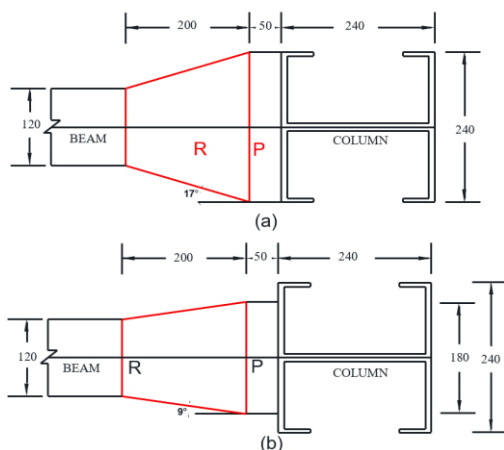
شکل ۱۴: نمودار لنگر دوران اتصالات CCDP با ضخامت ورق دو میلی‌متر و
اندازه قطعه P متغیر



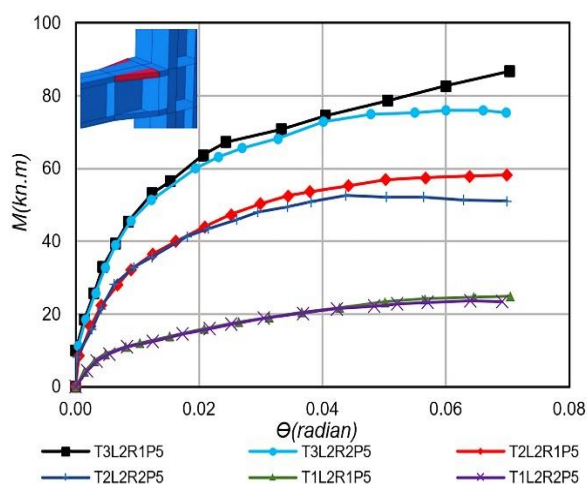
شکل ۱۵: نمودار لنگر دوران اتصالات CCDP با ضخامت ورق سه میلی‌متر و
اندازه قطعه P متغیر



(a) (b)



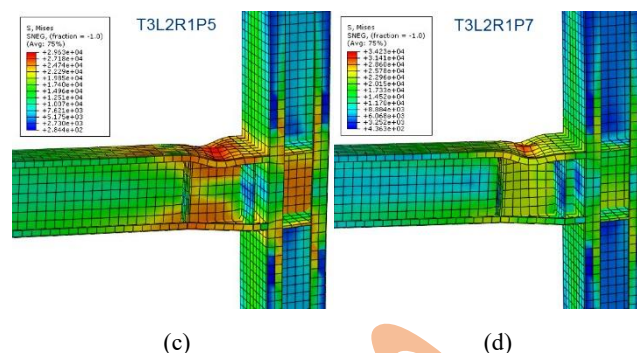
شکل ۱۹: اتصالات CCDP با شیب قطعه R مختلف (ابعاد به میلی‌متر)
(a) اتصالات با قطعه R_۱؛ (b) اتصالات با قطعه R_۲



شکل ۲۰: منحنی لنگر دوران اتصالات CCDP با شیب قطعه R مختلف

در اتصالات با ضخامت سه میلی‌متر سختی اولیه دو اتصال یکسان است. در دوران ۰.۰۴ رادیان، اتصال با قطعه R_۲ دچار کاهش مقاومت خمشی شده و این روند تا بارگذاری نهایی و دوران ۰.۰۷ رادیان ادامه دارد. در بارگذاری نهایی، مقاومت نهایی اتصال R_۲ در حدود ۱۴ درصد نسبت به اتصال R_۱ کاهش یافته است. همچنین تنش منتقل شده به جان ستون در این اتصال در حدود ۱۵ درصد کاهش نشان می‌دهد.

شکل (۲۱)، (۲۲) و (۲۳) توزیع تنش و کمناش بال فشاری مدلها را نشان می‌دهد. در تمامی مدلها، کمناش بال فشاری اتصال در محل پیش بینی شده و در وسط قطعه R رخ داده است و تغییر در عرض قطعه R تاثیری در رفتار فیوز خمشی آن ندارد ولی کاهش عرض قطعه R باعث کاهش مقاومت خمشی اتصال علی‌الخصوص در



شکل ۱۸: توزیع تنش در اتصالات CCDP با ضخامت ورق دو میلی‌متر و اندازه قطعه P متغیر (N/cm^۲)

(a) اتصال T_۳L_۲R_۱P_۵؛ (b) اتصال T_۳L_۲R_۱P_۷؛
(c) اتصال T_۲L_۲R_۱P_۵؛ (d) اتصال T_۲L_۲R_۱P_۷

۲-۵- تاثیر شیب قطعه R در رفتار اتصال گیردار CCDP

قطعه R وظیفه کنترل محل ایجاد مفصل پلاستیک را در اتصال دارد و کمناش اتصال در بال فشاری آن رخ می‌دهد. با توجه به تاثیر هندسه قطعه R در توزیع تنش، کنترل کمناش و محل آسیب، اتصال در دو هندسه مختلف مدلسازی و نتایج مقایسه شد. در مدل‌های R_۱، عرض بال تیر توسط قطعه R با شیب ۱۷ درجه به بال ستون که ۲۴۰ میلی‌متر است متصل شده است. در مدل R_۲ قطعه R عرض بال تیر را با شیب ۹ درجه به ۳/۴ عرض بال ستون متصل می‌کند. شکل (۱۹) جزئیات دو مدل اتصال را نشان می‌دهد. شکل (۲۰) منحنی لنگر-دوران اتصالات و جدول (۶) نتایج حاصل از تحلیل را ارائه داده است.

در اتصالات با ورق یک میلی‌متری رفتار دو اتصال یکسان است. هر دو اتصال دارای مقاومت خمشی و سختی اولیه یکسانی هستند. در مدل با ضخامت دو میلی‌متر مقاومت خمشی اتصال تا دوران ۰.۰۲ رادیان در هر دو مدل یکسان است ولی در اتصال با قطعه R_۲، مقاومت خمشی نهایی در حدود ۱۳ درصد نسبت به اتصال R_۱ کاهش یافته است.

ورق تقویتی و اندازه لبه سخت کننده بال دو پارامتر هندسی کنترل کننده محل ایجاد مفصل پلاستیک در اتصال CCDP هستند. استفاده

Specimen	Initial stiffness (kN.m/rad)	Moment at ۰.۰۷ rad (kN.m)
T ^۱ L ^۲ R ^۱ P ^۵	۴۰.۵۸	۲۴.۸۵
T ^۱ L ^۲ R ^۲ P ^۵	۴۰.۶۲	۲۳.۴۴
T ^۲ L ^۲ R ^۱ P ^۵	۹۰.۶۵	۵۸.۲۶
T ^۲ L ^۲ R ^۲ P ^۵	۸۸.۹۸	۵۱.۰۱
T ^۳ L ^۲ R ^۱ P ^۵	۲۳۸۸۰	۸۷.۲۴
T ^۳ L ^۲ R ^۲ P ^۵	۲۳۰۱۵	۷۵.۳۸

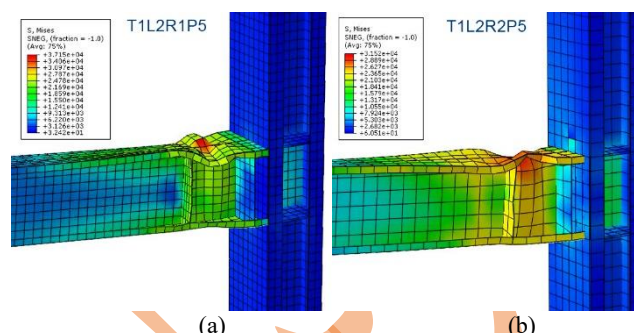
از ورق تقویتی بال باعث افزایش مقاومت خمشی انتهای تیر و تقویت اتصال پیچی آن شده و مانع ایجاد کمناش در تیر و جداسازی ورق اتصال انتهایی می شود. همچنین، خروج از محوریت لبه سخت کننده بال اتصال از راستای اعمال لنگر، باعث کاهش تاثیر سخت کنندگی و ایجاد کمناش موضعی در اتصال می شود. جهت بررسی تاثیر پارامتر اندازه لبه سخت کننده در رفتار اتصال، مدل های اجزای محدود با اندازه لبه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی متر ایجاد شده اند. در تمامی مدل ها اندازه قطعه P و شیب قطعه R اتصال ثابت و به ترتیب ۵۰ میلی متر و ۱۷ درجه است. شکل (۲۴) منحنی لنگر دوران اتصالات با اندازه لبه مختلف و جدول (۷) خلاصه نتایج را ارائه داده است. شکل (۲۵)، (۲۶) و (۲۷)

توزیع تنش و کمناش موضعی بال فشاری اتصالات را نشان می دهد. در مدل ها با ضخامت ورق یک میلی متر، کمناش از محل لبه سخت کننده در وسط قطعه R آغاز و به بال فشاری اتصال گسترش یافته است. در این مدل ها، تغییر شکل در ستون ایجاد نمی گردد ولی در مدل با اندازه لبه سخت کننده ۳۰ میلی متر، به دلیل سختی بالای لبه بال، کمناش به تیر منتقل شده است. تغییر در اندازه لبه سخت کننده بال باعث تغییر شدید در مقاومت خمشی اتصالات می شود. مقاومت خمشی نمونه با لبه سخت کننده ۱۰ میلی متری نسبت به مدل با اندازه لبه سخت کننده ۲۰ و ۳۰ میلی متر به ترتیب ۴۰ و ۹۰ درصد و سختی اولیه در حدود ۵ درصد کاهش یافته است.

در اتصالات با ضخامت دو میلی متر، با افزایش اندازه لبه L رفتار اتصال بهبود یافته و کاهش مقاومت خمشی بعد از لحظه کمناش لبه سخت کننده بال کمتر است. اتصال با اندازه لبه ۳۰ میلی متر مقاومت خمشی بالاتر و کاهش مقاومت خمشی بعد از کمناش بال فشاری کمتری دارد. اتصال با اندازه لبه ۲۰ میلی متر توزیع تنش بهتری داشته و کمترین تنش و تغییر شکل به ستون منتقل شده است. با تغییر در

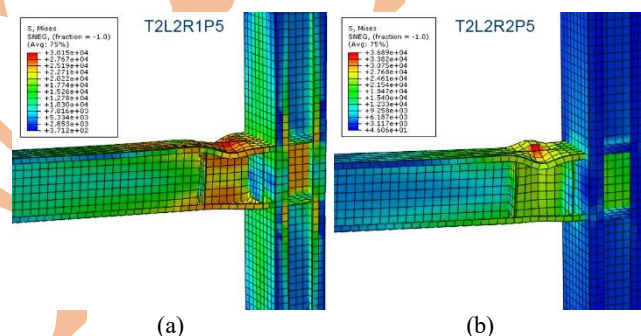
مدلهای با ضخامت ورق بالاتر شده و تنش انتقال یافته به جان ستون را کاهش داده است.

جدول ۶: نتایج تحلیل نمونه های اجزای محدود با شیب قطعه R متغیر



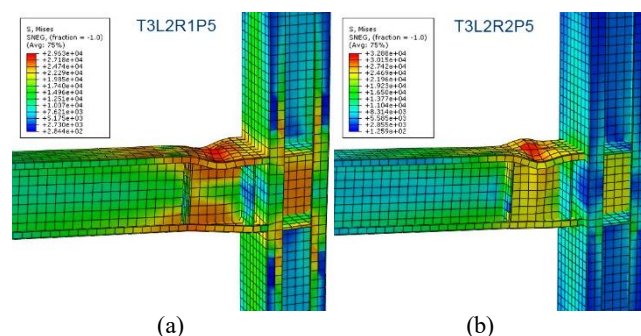
شکل ۲۱. تاثیر تغییر شیب قطعه R در توزیع تنش در اتصال CCDP با ضخامت یک میلی متر (N/cm^۲).

(a) اتصال T^۱L^۲R^۱P^۵؛ (b) اتصال T^۱L^۲R^۲P^۵



شکل ۲۲. تاثیر تغییر شیب قطعه R در توزیع تنش در اتصال CCDP با ضخامت دو میلی متر (N/cm^۲).

(a) اتصال T^۲L^۲R^۱P^۵؛ (b) اتصال T^۲L^۲R^۲P^۵

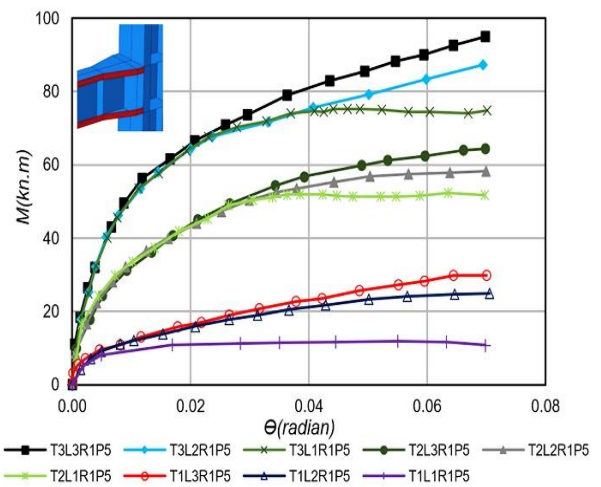
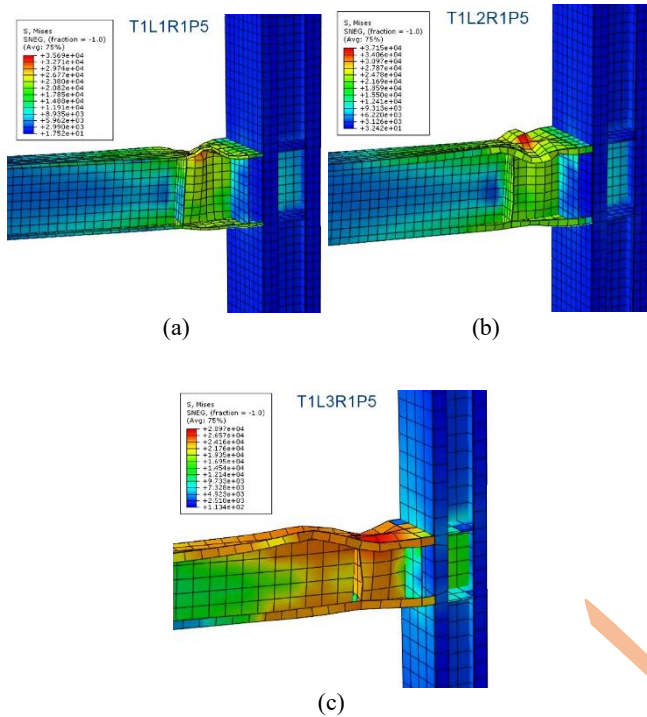


شکل ۲۳. تاثیر تغییر شیب قطعه R در توزیع تنش در اتصال CCDP با ضخامت سه میلی متر (N/cm^۲).

(a) اتصال T^۳L^۲R^۱P^۵؛ (b) اتصال T^۳L^۲R^۲P^۵

۳-۵- تاثیر اندازه لبه سخت کننده بال (L) در رفتار اتصالات CCDP

اندازه لبه L، تغییری در محل ایجاد کمانش در بال فشاری اتصال رخ نداده و اتصال همچنان به عنوان فیوز خمشی عمل کرده و محل کمانش را کنترل می کند.

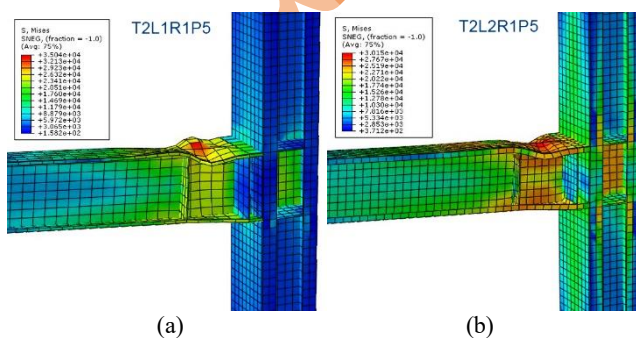


شکل ۲۴: تاثیر اندازه لبه L در مقاومت خمشی اتصال CCDP
جدول ۷: تاثیر اندازه لبه L در مقاومت خمشی و سختی اولیه اتصال CCDP

Specimen	Initial stiffness (kN.m/rad)	Moment at ۰.۰۷ rad (kN.m)
T ^۱ L ^۱ R ^۱ P ^۵	۳۸۵۶	۱۰.۷۶
T ^۱ L ^۲ R ^۱ P ^۵	۴۰۵۸	۲۴.۸۵
T ^۱ L ^۳ R ^۱ P ^۵	۴۵۰۳	۲۹.۸۴
T ^۲ L ^۱ R ^۱ P ^۵	۸۸۵۴	۵۱.۶۹
T ^۲ L ^۲ R ^۱ P ^۵	۹۰۶۵	۵۸.۲۶
T ^۲ L ^۳ R ^۱ P ^۵	۹۱۵۴	۶۴.۰۳
T ^۳ L ^۱ R ^۱ P ^۵	۲۱۶۵۰	۷۴.۰۲
T ^۳ L ^۲ R ^۱ P ^۵	۲۳۸۸۰	۷۸.۲۳
T ^۳ L ^۳ R ^۱ P ^۵	۲۵۶۱۰	۹۵.۱۲

شکل ۲۵: توزیع تنش و کمانش موضعی در مدل‌های اتصال با ضخامت ورق یک میلی‌متر و اندازه لبه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر (N/cm^۲)

(a) اتصال T^۱L^۱R^۱P^۵؛ (b) اتصال T^۱L^۲R^۱P^۵؛ (c) اتصال T^۱L^۳R^۱P^۵



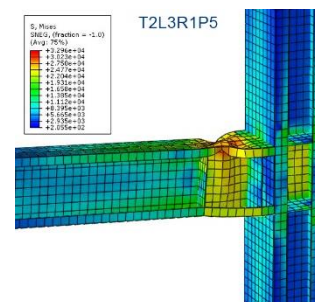
در اتصالات با ضخامت سه میلی‌متر، مقاومت خمشی تا دوران ۰.۰۲ رادیان و قبل از ایجاد کمانش در لبه سخت کننده بال فشاری یکسان است. با افزایش بارگذاری در مدل با اندازه لبه سخت کننده ۱۰ میلی‌متر، افت شدید مقاومت خمشی دیده می‌شود. در مدل با اندازه لبه ۳۰ میلی‌متر، کمانش در قطعه اتصال رخ نداده و تغییر شکل و تنش به جان ستون هدایت شده‌است. در اتصالات با ضخامت ورق سه میلی‌متر، استفاده از اندازه لبه سخت کننده ۳۰ میلی‌متری باعث افزایش ۸ درصدی سختی اتصال شده و کنترل محل ایجاد خرابی در قطعه CCDP را غیر ممکن می‌کند. تعیین هندسه مناسب برای کارکرد بهینه اتصال CCDP مستلزم کنترل همزمان تاثیر ضخامت ورق و اندازه لبه سخت کننده اتصال است. در صورت استفاده از ورق با ضخامت بالاتر و لبه سخت کننده بزرگتر، به دلیل سختی بالای اتصال نسبت به سختی تیر و ستون، تغییر شکلهای بزرگ و کمانش موضعی به تیر و ستون هدایت می‌شود.

دستیابی به این هدف، ۲۱ مدل اجزای محدود با پارامترهای هندسی مختلف در نرم‌افزار ABAQUS ایجاد و با داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد. مدل‌سازی اجزای محدود اتصالات دقت بالایی در پیش‌بینی رفتار نمونه‌ها داشت و در اکثر موارد، خطای مدل‌های اجزای محدود کمتر از ۱۰ درصد بود.

اتصال جدید CCDP از دو بخش R و P تشکیل شده‌است. قطعه P جهت دور کردن کمانش و محل آسیب از بر ستون به اتصال اضافه شده‌است. قطعه R وظیفه کنترل محل آسیب را بر عهده دارد. رفتار اتصال جدید وابسته به پارامترهای ضخامت ورق، شیب و یا عرض قطعه R، طول قسمت کنترلی P و اندازه لبه سخت‌کننده بال اتصال است. تحلیل پارامتریک اتصال پیشنهادی نشان داد افزایش ضخامت ورق از ۱ به ۳ میلی‌متر موجب رشد چشمگیر ظرفیت خمشی و افزایش سختی اولیه می‌شود. این موضوع بیانگر وابستگی مستقیم عملکرد اتصال به ضخامت ورق است.

افزایش طول قطعه P از ۲۰ به ۷۰ میلی‌متر می‌تواند مقاومت خمشی را تا ۱۹ درصد و سختی اولیه اتصال را تا ۱۲ درصد افزایش دهد. در حالی که حذف این قطعه مانع از هدایت مفصل پلاستیک به محل از پیش تعیین‌شده می‌شود و احتمال ایجاد مفصل پلاستیک در بر ستون را افزایش می‌دهد. افزایش زاویه شیب قطعه R از ۹ به ۱۷ درجه مقاومت خمشی اتصال را در حدود ۱۳ درصد افزایش داد و توزیع تنش مناسب‌تری را در مقطع اتصال ایجاد کرد. در بررسی اثر اندازه لبه سخت‌کننده بال (L)، مشخص شد که افزایش اندازه از ۱۰ به ۳۰ میلی‌متر، باعث افزایش مقاومت خمشی اتصال تا ۹۰ درصد می‌شود. افزایش اندازه لبه سخت‌کننده بال در اتصالات با ضخامت ورق بالا، باعث افزایش شدید سختی اتصال شده و رفتار فیوز خمشی اتصال را مختل کرده و مفصل پلاستیک را به انتهای تیر هدایت می‌کند. با طراحی مناسب پارامترهای هندسی اتصال و کنترل سختی آن در مقایسه با سختی خمشی تیر و ستون، می‌توان رفتار پایدار و مقاومت خمشی مناسب اتصال را تامین نمود. بطوری که در اکثر نمونه‌های اتصال پیشنهادی، در دوران حداکثری ۰.۰۷ رادیان، هیچ نوع کمانش و تغییر شکل ماندگار در ستون یا تیر ثبت نشد.

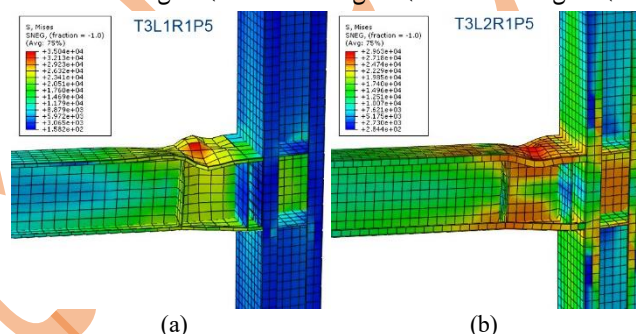
اتصال نیمه‌گیردار CCDP با کنترل محل آسیب، بهبود مقاومت خمشی و سهولت ساخت، راهکاری کارآمد برای استفاده در قاب‌های فولادی سردنورد شده به ویژه در نواحی لرزه‌خیز که تمرکز آسیب اهمیت ویژه‌ای دارد، فراهم می‌سازد. این اتصال نه تنها موجب افزایش



(c)

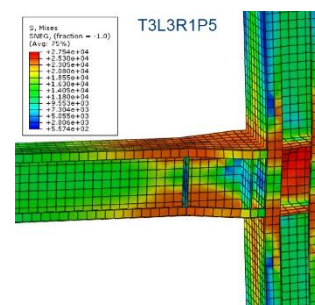
شکل ۲۶: توزیع تنش و کمانش موضعی در مدل‌های اتصال با ضخامت ورق دو میلی‌متر و اندازه لبه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر (N/cm^2)؛

(a) اتصال $T^2L^1R^1P^5$ ؛ (b) اتصال $T^2L^2R^1P^5$ ؛ (c) اتصال $T^2L^3R^1P^5$



(a)

(b)



(c)

شکل ۲۷: توزیع تنش و کمانش موضعی در مدل‌های اتصال با ضخامت ورق سه میلی‌متر و اندازه لبه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر (N/cm^2)؛

(a) اتصال $T^3L^1R^1P^5$ ؛ (b) اتصال $T^3L^2R^1P^5$ ؛ (c) اتصال $T^3L^3R^1P^5$

۶- نتیجه‌گیری:

در این تحقیق، یک نوع اتصال نیمه‌گیردار نوین با موقعیت آسیب کنترل‌شده (CCDP) برای قاب‌های فولادی سبک سردنورد شده (CFS) معرفی شد. این اتصال بر اساس آیین‌نامه Eurocode ۳ [۱۸] در دسته اتصالات نیمه‌گیردار طبقه‌بندی می‌شود. هدف اصلی از توسعه این اتصال، ایجاد گیرداری نسبی در اتصال و تمرکز خرابی و تسلیم در ناحیه‌ای از پیش تعیین‌شده‌است تا از تشکیل مفصل پلاستیک در ستون و بروز کمانش موضعی در تیر ممانعت شود. برای

۶. Ye, J., Mojtabaei, S. M., Hajirasouliha, I. ۲۰۱۹. Seismic performance of cold-formed steel bolted moment connections with bolting friction-slip mechanism. *Journal of Constructional Steel Research*, 156, pp. 122-136. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.01.013>.
۷. McCrum, D. P., Simon, J., Grimes, M., Broderick, B. M., Lim, J. B. P. and Wrzesien, A. M. ۲۰۱۹. Experimental cyclic performance of cold-formed steel bolted moment resisting frames. *Engineering Structures*, ۱۸۱, pp. ۱-۱۴. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.063>.
۸. Hassan, E. M., Serror, M. H. and Mourad, S. A. ۲۰۱۷. Numerical prediction of available rotation capacity of cold-formed steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 128, pp. ۸۴-۹۸. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.08.010>.
۹. Bagheri Sabbagh, A., Petkovski, M., Pilakoutas, K. and Mirghaderi, R. ۲۰۱۲. Cyclic behaviour of bolted cold-formed steel moment connections, FE modelling frame buildings. *Journal of constructional steel research*, 80, pp. ۱۰۰-۱۰۸. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.09.010>.
۱۰. Seok, S., Lee, J., Sik Choi, C. and Hwang, H. S., ۲۰۲۲. A practical design of cold-formed steel bolted moment connection: numerical investigation with an improved bolt slip bearing model. *J. Build Engineering*, 62, pp. ۱-۲۰. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105345>.
۱۱. Papargyriou, I., Mojtabaei, S. M., Hajirasouliha, I., Becque, J. and Pilakoutas, K. ۲۰۲۲. Cold-formed steel beam-to-column bolted connections for seismic applications. *Thin-Walled Structures*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108876>.
۱۲. Senapati, S. and Sangle, K. K. ۲۰۲۲. Nonlinear static analysis of cold-formed steel frame with rigid connections. *Results in Engineering*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100503>.
۱۳. Shahini, M., Sabbagh, A. B., Davidson, P. and Mirghaderi. ۲۰۱۹. Development of cold-formed steel moment-resisting connections with bolting friction-slip mechanism for

ایمنی سازه در برابر بارهای جانبی می‌شود، بلکه با توجه به کاهش مصرف مصالح، راه‌حلی اقتصادی نیز محسوب می‌گردد. طرح پیشنهادی یک رویکرد عملی و مقاوم برای ارتقای عملکرد سازه‌ای و ایمنی سیستم‌های فولادی سبک تحت تقاضاهای تغییر شکل غیرالاستیک ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است که استفاده از اتصال پیشنهادی در کارهای اجرایی نیازمند بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی بیشتر و همچنین ارائه روشهای دقیق طراحی است.

منابع

۱. YE, J., Becque, J., Hajirasouliha, I., Mojtabaei, S. M. and LIM, J. B. P. ۲۰۱۸. Development of optimum cold-formed steel sections for maximum energy dissipation in uniaxial bending. *Engineering Structures*, ۱۶۱, pp. ۵۵-۶۷. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.070>.
۲. Mojtabaei, S. M. Kabir, M. Z. Hajirasouliha, I. M. Kargar. ۲۰۱۸. Analytical and experimental study on the seismic performance of cold-formed steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 143, pp. ۱۸-۳۱. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.12.013>.
۳. Serror, M.H., E.M. Hassan, and S.A. Mourad. ۲۰۱۶. Experimental study on the rotation capacity of cold-formed steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 121, pp. ۲۱۶-۲۲۸. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.02.005>.
۴. James B.P Lim, Gregory J. Hancock, G. Charles Clifton, Cao Hung Pham, ۲۰۱۶. DSM for ultimate strength of bolted moment-connections between cold-formed steel channel members. *Journal of Constructional Steel Research*, 117, pp. ۱۹۶-۲۰۳. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.10.005>.
۵. Ye, J., Mojtabaei, S. M., Hajirasouliha, I. and Pilakoutas, K. ۲۰۲۰. Efficient design of cold-formed steel bolted-moment connections for earthquake resistant frames. *Thin-Walled Structures*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.12.015>.

۱۶. Mohamed E. M., Alao E. S., Ahmed E., Ahmed E. and Hani S., Effect of end-bearing connection configuration on static response of full-scale CFS trusses. ۲۰۲۶. *Journal of Constructional Steel Research*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109988>.
۱۷. AISI-S100-۲۴. ۲۰۲۴. North American specification for the design of cold-formed steel structural members. USA, Chicago. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.08.010>.
۱۸. Eurocode ۳. ۲۰۲۳. Design of Steel Structures, Part ۱-۱: General Rules and Rules for Buildings.
۱۹. M.R. Farajpour, J. Saburi., Y. Hosseinzadeh. ۲۰۲۵. Ductility Assessment of a Novel Semi-Rigid CFS Connection via monotonic and cyclic tests. *Journal of Structural Engineering*, submitted.
- seismic applications. *Thin-walled structures*, ۱۴۱, pp. ۲۱۷-۲۳۱. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.04.011>.
۱۴. Ghasem Pachideh, Mohammadali Kafi, Majid Gholhaki. ۲۰۲۰. Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater. *Structures*, 28, pp. ۴۶۷-۴۸۱. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.007>.
۱۵. Ghasem Pachideh, Majid Gholhaki and Mohammadali Kafi. ۲۰۲۰. Experimental and Numerical Evaluation of an Innovative Diamond-Scheme Bracing System Equipped with a Yielding Damper, *Steel and Composite Structures*, 36(2), pp. ۱۹۷-۲۱۱. <https://doi.org/10.12989/scs.2020.36.2.197>.