



Research Article

Finite Element Investigation of Novel Semi-Rigid Connection with Controlled Damage Position in CFS Frames

Mohammad Reza Farajpour¹, Jamshid Sabouri^{1*} and Yousef Hosseinzadeh²

¹Department of Civil Engineering, Ta. C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

²Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* corresponding author: (j-sabouri@iaut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 13 July 2025

Revised: 7 October 2025

Accepted: 22 October 2025

Keywords:

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

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 1-, 2-, and 3-mm. Comparative results between FE simulations and experimental tests demonstrated excellent agreement, with the maximum deviation being less than 9%, 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 18% and the initial stiffness by up to 12%, 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 13%, while enlarging the flange stiffener length enhanced the flexural resistance by up to 35%, although excessive stiffening could potentially increase the likelihood of local buckling in the beam. Among all the studied configurations, the specimen with 2-mm plates and a 70-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 0.07 radians.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:

Farajpour, M.R., Saburi, J. and Hosseinzadeh, Y. 2026. Finite element investigation of novel semi-rigid connection with controlled damage position in CFS frames, Sharif Civil Engineering Journal, 42(1), 59-74.
<https://doi.org/10.24200/sjce.2025.67113.3437>



بررسی اجزاء محدود اتصال جدید نیمه‌گیردار با موقعیت آسیب کنترل‌شده در قاب‌های فولادی سرد نوردشده (CFS)

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

^۱ گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز، ایران.

^۲ گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

* نویسنده مسئول (j-sabouri@iaut.ac.ir)

چکیده

در پژوهش حاضر، نوع جدیدی از اتصال نیمه‌گیردار با موقعیت آسیب کنترل‌شده برای قاب‌های فولادی سرد نوردشده (CFS) معرفی و رفتار آن به کمک مدل‌سازی اجزاء محدود و آزمایش‌های تجربی بررسی شده است. اتصال مذکور به گونه‌ای طراحی شده است که با ایجاد یک فیوز خمشی در محل اتصال تیر به ستون، تمرکز آسیب از ستون دور شود و به ناحیه‌ای از پیش تعیین‌شده برای تسلیم موضعی انتقال یابد. پارامترهای هندسی مختلف، شامل: ضخامت ورق، زاویه‌ی شیب قطعات اتصال، طول قطعه‌ی کنترلی، و اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال بررسی شده‌اند. نتایج نشان داده‌اند که افزایش ضخامت ورق موجب رشد قابل‌ملاحظه‌ی مقاومت خمشی و افزایش سختی اولیه شده است. در تحلیل پارامتریک نیز افزایش طول قطعه‌ی کنترلی منجر به افزایش مقاومت خمشی تا ۱۸٪ و سختی اولیه تا ۱۲٪ شده است؛ در حالی که حذف قطعه‌ی اخیر مانع از هدایت مفصل پلاستیک به محل از پیش تعیین‌شده می‌شود. تغییر زاویه‌ی بخش شیب‌دار، اتصال مقاومت خمشی را حدود ۱۳٪ افزایش داده و افزایش اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال باعث رشد مقاومت خمشی تا ۳۵٪ شده است، هر چند سختی بیش از حد می‌تواند احتمال کماتش موضعی در تیر را افزایش دهد. بررسی منحنی‌های لنگر- دوران حاکی از آن است که اتصال جدید، رفتار نیمه‌گیردار مناسبی داشته و به‌طور مؤثر کماتش اعضاء تیر و اتصال را در ناحیه‌ی فیوز کنترل کرده است؛ به گونه‌ای که در بیشتر نمونه‌ها تا دوران ۰/۰۷ رادیان، هیچ‌گونه کماتش موضعی در تیر یا ستون مشاهده نشده است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰

واژگان کلیدی:

قاب فولادی سبک سرد

نوردشده (CFS)،

اتصال‌های نیمه‌گیردار،

مدل‌سازی اجزاء محدود،

منحنی لنگر- دوران،

موقعیت آسیب کنترل‌شده،

رفتار مونوتونیک.

۱. مقدمه

سازه‌های سردنورد فولادی، نسبت سختی به وزن مصالح بیشتری نسبت به سازه‌های گرم‌نورد دارند و سازه‌هایی اقتصادی به حساب می‌آیند. سازه‌های سردنورد فولادی، به دلیل نسبت بالای عرض به ضخامت اعضاء، بیشتر از مقاطع گرم‌نوردشده، مستعد کماتش و خرابی موضعی هستند. به همین دلیل، بیشتر مواقع، از مقاطع سردنوردشده به عنوان اعضاء غیرسازه‌ای استفاده می‌شود.^[۱] با روشن شدن مزایای اقتصادی سازه‌های سردنورد فولادی، استفاده از آن‌ها به عنوان اعضاء سازه‌ای رو به گسترش است. از مقاطع جدار نازک به صورت قاب‌های خمشی با اتصال‌های پیچی می‌توان در سازه‌های با ارتفاع کم تا متوسط به عنوان اعضاء سازه‌ای استفاده کرد. در سازه‌های فولادی سردنوردشده، سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی به طور کلی به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند: (۱) سیستم دیوار برشی با قاب‌های سبک پانلی، (۲) سیستم دیوار برشی با مهاربند تسمه‌ای، و (۳) سیستم قاب خمشی با اتصال‌های گیردار. اتصال‌های خوب طراحی‌شده می‌توانند با مشارکت در رفتار غیرخطی

سازه، رفتار لرزه‌ای آن را بهبود بخشند. تیر در قاب‌های فولادی سبک، مستعدترین نقطه برای تشکیل مفصل پلاستیک است. ظرفیت دورانی مناسب اتصال‌ها، این امکان را به سازه می‌دهد که به جای ایجاد خرابی، با تغییر شکل غیرالاستیک و جذب انرژی، از تغییر مکان جانبی بیشتر قاب جلوگیری کند و شکل‌پذیری سازه را بهبود بخشد. رفتار کلی اتصال‌های فولادی را چیدمان، نیروی سفت‌شدگی پیچ، و رفتار خمشی اعضاء اتصال تعیین می‌کند. نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی اخیر روی اتصال‌های خمشی متعارف استفاده‌شده در قاب‌های فولادی سبک، نشان‌دهنده‌ی مقاومت خمشی مناسب اتصال‌های مذکور است. توجه به این نکته ضروری است که اتصال‌های متعارف در قاب‌هایی که نسبت عرض به ضخامت مقاطع جدارنازک استفاده‌شده در آن‌ها بسیار بالا باشد، شکل‌پذیری و جذب انرژی ضعیفی دارند.^[۲] این موضوع ضرورت اصلاح و بهبود رفتار اتصال‌ها در سازه‌های فولادی سبک در مناطق لرزه‌خیز را نشان می‌دهد.

استناد به این مقاله:

فرج پور، محمدرضا، صبوری، جمشید و حسین زاده، یوسف، ۱۴۰۵. بررسی اجزاء محدود اتصال جدید نیمه‌گیردار با موقعیت آسیب کنترل‌شده در قاب‌های فولادی سرد نوردشده (CFS). مهندسی عمران شریف، ۴۲(۱)، صص ۷۴-۵۹. <https://doi.org/10.24200/j30.2025.67113.3437>



سخت‌کننده‌ی اتصال رخ داده است. به نظر می‌رسد کمناش جانبی ستون، عمده‌ی ایراد مدل قاب خمشی ارائه‌شده‌ی مکروم و همکاران بوده است.

نوع جدیدی از اتصال‌های گیردار تیر به ستون نیز توسط عماد حسن و همکاران (۲۰۱۷)^[۸] ارائه شده است؛ که در آن، از سخت‌کننده‌های قائم و افقی متعدد در محل اتصال استفاده شده است. از معایب اتصال مذکور، استفاده‌ی زیاد از مصالح و دشواری اتصال جوشی سخت‌کننده‌ها بوده است. با توجه به ضخامت کم ورق تیر، استفاده از جوش جهت اتصال سخت‌کننده‌ها مناسب به نظر نمی‌رسد.

عامل کلیدی محدودکننده‌ی شکل‌پذیری قاب‌های فولادی سردنورد، عدم توانایی در کنترل محل ایجاد کمناش است. باقری صباغ و همکاران (۲۰۱۲)^[۹] اقدام به توسعه‌ی نوع جدیدی از اتصال‌های گیردار با استفاده از ورق‌های میان‌گذر کرده و توانسته‌اند ظرفیت خمشی اتصال را ۳۵٪ افزایش دهند و شکل‌پذیری قاب‌های سردنوردشده را تا ۷۵٪ بهبود بخشند. یکی از ایرادهای مهم اتصال‌های اخیر، استفاده از ورق‌های میان‌گذر با عرض زیاد است، که مانع از اجرای صحیح عرشه در سازه‌های فولادی سبک می‌شود.

سنوک^۲ و همکاران (۲۰۲۲)^[۱۰] در یک مطالعه‌ی عددی، اقدام به بهبود جزئیات اتصال‌های خمشی ارائه‌شده توسط باقری صباغ و همکاران،^[۹] کرده و با تغییر شکل و ضخامت ورق‌های میان‌گذر، با حفظ گیرداری اتصال‌ها، ایرادهای مدل ایشان را رفع کرده‌اند.

پاپاگریوس^۳ و همکاران (۲۰۲۲)^[۱۱] مطالعات عددی گسترده‌ای روی سه نوع اتصال نوآورانه با استفاده از صفحات انتهایی و سخت‌کننده‌های لچکی انجام داده‌اند. ایشان اتصال‌های 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 دو روش مذکور مطالعه کرده و با ترکیب سخت‌کننده‌ها و لچکی‌های اتصال‌دهنده‌ی بال، تعادلی بین ظرفیت باربری و عملکرد لرزه‌ای ایجاد کرده‌اند.

سناپاتی^۴ و همکاران (۲۰۲۲)^[۱۲] با ادغام قاب‌های خمشی متوسط که در جهت نیروی جانبی تراز شده‌اند، ظرفیت باربری جانبی کلی سازه را افزایش داده‌اند. در مطالعات ایشان، راهکاری عملی برای ایجاد اتصال‌های گیردار ارائه نشده و فقط از ظرفیت باربری قاب‌ها در راستای نیروی جانبی جهت انتقال نیروهای افقی استفاده شده است.

شاهینی و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۳] با تمرکز بر ساز و کار لغزش اصطکاکی اتصال‌های پیچی و بررسی اتصال‌ها با آرایش‌های مختلف پیچ توانسته‌اند اتلاف انرژی قاب‌های خمشی سردنوردشده را تا ۷۵٪ افزایش دهند. براساس مطالعات ایشان، آرایش پیچی دایره‌ای با سوراخ‌های شکاف‌دار توانسته است به‌طور مؤثری خرابی کمناشی تیرها در سازه‌های فولادی سبک را به تأخیر بیندازد.

مطالعات قابل‌توجهی در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی از طریق به‌کارگیری اجزاء مستهلک‌کننده‌ی انرژی متمرکز انجام شده است؛ که یکی از رویکردهای نوین مذکور، استفاده از فیوز خمشی است، که با افزایش شکل‌پذیری، آسیب را در یک بخش متمرکز می‌سازد و از خرابی اعضای اصلی سازه جلوگیری می‌کند. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که به‌کارگیری

مقاومت خمشی اتصال‌های سازه‌های سبک فولادی تحت بارگذاری‌های رفت و برگشتی به‌صورت عددی و آزمایشگاهی توسط عماد حسن و همکاران (۲۰۱۶)^[۳] بررسی شده و نتایج نشان داده است که اتصال‌های مذکور به‌صورت نیمه‌گیردار عمل کرده و فقط مقاومت لازم برای قاب فولادی با مقاومت خمشی کم و متوسط را فراهم ساخته است.

نتایج مطالعات عددی لیم و همکاران (۲۰۱۶)^[۴] نیز نشان داده است که مشخصات پیچ استفاده‌شده در قاب‌های فولادی سبک، تأثیر زیادی در ظرفیت خمشی قاب دارد و مقاومت خمشی و شکل‌پذیری در قاب‌های فولادی سبک براساس ۴ عامل اصلی تأمین می‌شود: (۱) مشخصات مصالح و تنش تسلیم آن؛ (۲) نحوه‌ی کمناش اعضاء قاب در محل اتصال؛ (۳) شکل توزیع پیچ‌ها؛ و درنهایت، (۴) شکل مقطع تیر و ستون. با این حال مطالعات اخیر نشان داده است که با یک طراحی مناسب می‌توان شکل‌پذیری و مقاومت خمشی مناسبی از مقاطع جدار نازک به‌دست آورد.

مجتبایی و حاجی‌رسولی‌ها (۲۰۱۹)^[۵] در ارائه‌ی مدل‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود از قاب‌های فولادی با ستون‌های ساخته‌شده از پروفیل مربعی شکل با اتصال‌های صلب، جهت ایجاد یک اتصال گیردار بین تیر و ستون از ورق‌های فولادی مثلی‌شکل استفاده کرده‌اند. در مدل قاب خمشی ارائه‌شده، افزایش مقاومت جانبی قاب نسبت به قاب‌های سبک فولادی متعارف محسوس بوده است. در مدل ارائه‌شده، کمناش بال ستون در نزدیکی محل اتصال ستون به پی رخ داده است. سپس دومین نقطه‌ی ستون در نزدیکی ورق اتصال دچار کمناش موضعی شده است. در مدل‌های مذکور، جذب انرژی و شکل‌پذیری قاب، افزایش قابل‌توجهی داشته و تأثیر اندازه‌ی پروفیل ستون در افزایش مقاومت خمشی قاب از تأثیر نسبت عرض به ضخامت ستون بیشتر بوده است. ضریب کاهش مقاومت برخی از مدل‌های ارائه‌شده براساس آیین‌نامه‌های طراحی کافی به نظر رسیده است. قابل توجه است که کمناش ستون در نزدیکی پی و در محل اتصال تیر به ستون، عمده‌ی مشکل مدل پیشنهادی مجتبایی و حاجی‌رسولی‌ها بوده است.

همچنین ایشان در مطالعات آزمایشگاهی دیگری (۲۰۲۰)^[۶] نشان داده‌اند که استفاده از شکل‌های خاص و افزایش بُعد و مقاومت خمشی بال‌های مقاطع تیر و ستون می‌تواند تأثیر زیادی در مقاومت کمناشی اعضاء قاب داشته باشد. لذا برای رسیدن به هدف اخیر، استفاده از مقاطع تیر با شکل بال‌های گوناگون، از جمله چندوجهی و گرا د پیشنهاد کرده‌اند. با توجه به اینکه مقاطع استفاده‌شده در قاب‌های فولادی سبک از ورق‌های نازک با قابلیت برشکاری و خمکاری ساخته می‌شوند، به‌راحتی می‌توان مقاطع جدید با هندسه‌ی مختلف ساخت. ولی نحوه‌ی اتصال پیچی تیر با هندسه‌ی پیچیده به اعضاء اتصال و ستون، یکی از مشکلات مقاطع با شکل‌های هندسی پیچیده است.

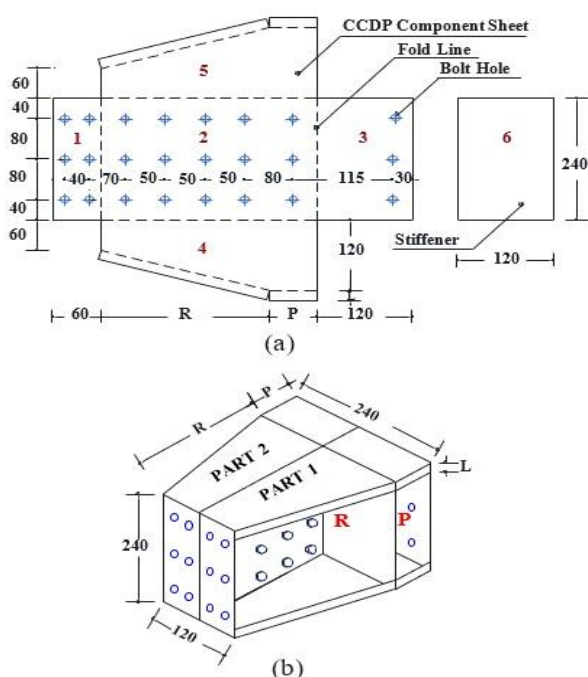
مکروم^۱ و همکاران (۲۰۱۹)^[۷] یک نوع قاب با اتصال گیردار نوین جهت ایجاد گیرداری در اتصال با استفاده از ورق‌های مثلی و سخت‌کننده‌های مختلف ارائه کرده‌اند؛ که در آن‌ها، جذب انرژی بالاتر، شکل‌پذیری بهتر، و شکل هیستریزس پایدارتری نسبت قاب‌های فولادی سبک متعارف مشاهده شده است. همچنین در مدل‌های ارائه‌شده، کمناش جانبی جان ستون در محل اتصال ستون به ورق

³ Papargyriou

⁴ Senapati

¹ McCrum

² Seok



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

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

بوده است. هر قطعه ی اتصال بعد از خم کاری و مونتاژ، از دو باکس یا بخش R و P تشکیل شده و به صورت یک سیستم یکپارچه، نیروی برشی و لنگر خمشی تیر را به ستون منتقل کرده است. مجموعه ی اتصال مطابق شکل ۱، از ۶ جزء تشکیل شده است، که بعد از خم کاری و اتصال به یکدیگر، به صورت یک سیستم واحد عمل می کنند. ورق های ۱، ۳، و ۶ علاوه بر اتصال قسمت های R و P، نقش سخت کننده را نیز داشته اند. جهت اتصال دو قطعه ی پیش ساخته به هم، از ۱۵ عدد پیچ شماره ۸ استفاده شده است. جهت متصل ساختن تیر به اتصال CCDP نیز از ۱۲ عدد پیچ و جهت متصل کردن اتصال CCDP به ستون، از ۶ عدد پیچ شماره ۸ استفاده شده است. پیچ های به کار رفته از نوع CL۸.۸ بوده اند. هدف از طراحی بخش های مختلف اتصال CCDP، ایجاد گیرداری در محل اتصال تیر به ستون و کنترل کمانش اعضا اتصال و تیر بوده است. بخش P اتصال، وظیفه ی دور کردن تغییر شکل های پلاستیک و کمانش از بر ستون را بر عهده داشته است، تا از آسیب به اتصال در بر ستون جلوگیری کند. استهلاک انرژی و کمانش بال فشاری در یک نقطه ی از پیش تعیین شده در وسط قطعه ی R رخ می دهد. در طراحی تیر و اتصال، محدودیت عرض بال به ضخامت ورق جهت کنترل تسلیم موضعی و مقاومت پیچ و جوش براساس آیین نامه ی Eurocode ۳^[۱۸] رعایت شده است. مجموعه ی تیر و قطعه ی CCDP با استفاده از ۶ پیچ M۱۰ به یک ستون به طول ۳۰۰ سانتی متر متصل شده است. ضخامت ورق و سخت کننده های ستون در همه ی مدل ها ۳ میلی متر و دو انتهای ستون دارای تکیه گاه گیردار بوده است. از ورق تقویت کننده ی بال در محل اتصال تیر به قطعه ی اتصال CCDP استفاده شده است. ورق تقویت کننده ی بال، الگوی کمانش تیر و اتصال را تغییر می دهد و استفاده از آن در محل اتصال تیر به قطعه ی CCDP از جداسازی ورق انتهایی تیر و قطعه ی CCDP ممانعت می کند و رفتار اتصال را بهبود می بخشد. ورق تقویتی به طول ۴۰۰ میلی متر و به وسیله ی ۱۲ پیچ شماره ۱۲ به بال های تیر و قطعه ی

چنین فیوزهایی موجب افزایش جذب انرژی و کنترل مکانیزم های خرابی پس از زلزله می شود. کافی و همکاران (۲۰۲۰)^[۱۴] با ارزیابی یک سیستم تسلیم شونده به صورت آزمایشگاهی و عددی به شکل پذیری بالا و ظرفیت مطلوب در جذب انرژی دست یافته اند؛ به طوری که مفصل پلاستیک فقط در یک نقطه ی مشخص تشکیل شده و سایر اعضا در محدوده ی الاستیک باقی مانده اند. یافته های اخیر، اهمیت استفاده از مکانیزم های تسلیم کنترل شده در سازه های فولادی را نشان می دهند؛ رویکردی که همسو با توسعه ی اتصال های خمشی با ناحیه ی آسیب از پیش تعیین شده در قاب های فولادی سردنورد شده است.^[۱۵]

محمد محمود و همکاران (۲۰۲۶)^[۱۶] اثر پیکربندی اتصال انتهای تیر به بستر خرپاهای ساخته شده از فولاد سردنورد شده را به صورت آزمایشی بررسی کرده و دریافته اند که نوع اتصال انتهایی، نقش مؤثری در انتقال بار، شکل پذیری اعضا، و توزیع تنش دارد؛ و تغییر در جزئیات اتصال می تواند موجب کاهش تمرکز تنش در نقاط بحرانی یا افزایش ظرفیت باربری شود. یافته های اخیر، اهمیت طراحی اتصال های خمشی با کنترل دقیق مکانیزم های تسلیم و تمرکز بر رفتار غیرالاستیک در مناطق از پیش تعیین شده را تأیید می کند.

پژوهشگران همواره به اهمیت ایجاد کمانش های موضعی در اجزاء قاب های فولادی سبک واقف بوده و با ارائه ی راهکارهای مختلف سعی در کنترل و دور کردن آن از نقاط حساس قاب کرده اند. با توجه به اهمیت کنترل محل کمانش موضعی در اجزاء قاب های فولادی سبک، در نوشتار حاضر نوع جدیدی از اتصال های نیمه گیردار با موقعیت آسیب کنترل شده پیشنهاد شده است؛ که به عنوان یک فیوز خمشی، آسیب و کمانش را از ستون و تیر دور می کند. اتصال های نیمه گیردار نوین از خم و برش ورق های گالوانیزه ایجاد و توسط پیچ مابین تیر و ستون متصل می شوند. جهت بررسی عددی رفتار اتصال های مذکور، مدل های اجزاء محدود در نرم افزار آباکوس^۵ ایجاد و دقت مدل های اجزاء محدود با استفاده از نتایج آزمایشگاهی سنجیده شده است. رفتار اتصال های جدید تحت بارگذاری مونوتونیک و نیز کمانش موضعی اجزاء اتصال، مقاومت خمشی، و دوران اتصال بررسی شده اند. همچنین در ادامه ی پژوهش، تأثیر پارامترهای هندسی دخیل در رفتار اتصال های نوین ملاحظه شده و نتایج نشان داده اند که اتصال های پیشنهادی با درجه ی گیرداری مناسب جهت استفاده در قاب های فولادی سردنورد ب و در کنترل محل ایجاد کمانش و ممانعت از انتقال تغییر شکل های بزرگ به ستون و تیر، مناسب عمل کرده اند.

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

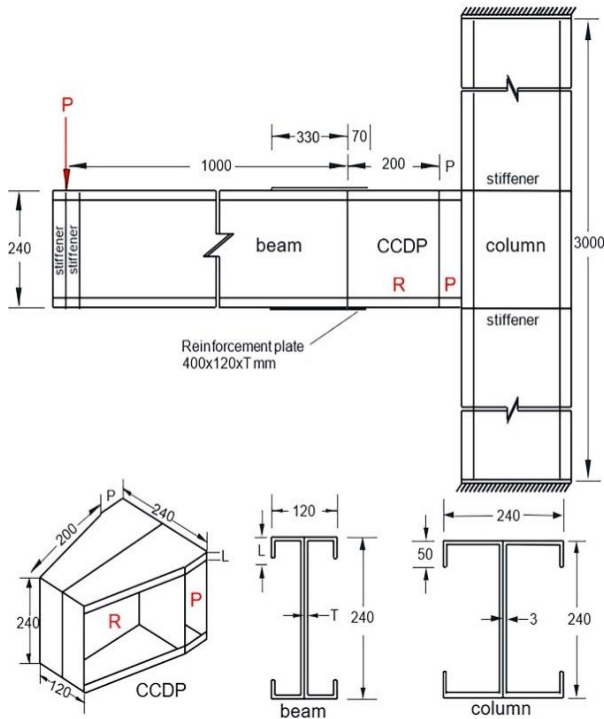
در ساخت اتصال نیمه گیردار تیر به ستون جدید با موقعیت آسیب کنترل شده (CCDP)^۶، یک قطعه با استفاده از یک ورق به صورت شکل (۱-۱) بریده و خم شده است. سپس یک قطعه ی دیگر به روش مشابه ساخته شده است، که دقیقاً هم اندازه با قطعه ی قبلی بوده و با اتصال دو قطعه ی مذکور توسط پیچ، قطعه ی اتصال دهنده ی واسط بین تیر و ستون مطابق شکل (۱-۲) ایجاد شده است. انتقال نیروهای داخلی از تیر به ستون، توسط دو قطعه ی اخیر انجام شده است. قطعات پیش ساخته ی مذکور از خم و برش ورق گالوانیزه با ضخامت های ۱، ۲، و ۳ میلی متر، براساس آیین نامه ی طراحی سازه های سردنورده ی ۲۴-۱۰۰ AISI-S^[۱۷] ساخته شده اند. شعاع خم کاری در ساخت آن ها، ۲ میلی متر

⁶ Connection with Controlled Damage Position

⁵ ABAQUS



شکل ۲. نمونه‌ی آزمایشگاهی تیر و اتصال CCDP.



شکل ۳. اندازه‌ی مدل‌های اجزاء محدود (ابعاد به میلی‌متر).

اتصال متصل شده است. در مدل‌های مذکور، ضخامت ورق تقویتی با ضخامت اجزاء تیر و اتصال یکسان بوده و در موقعیت ۷۰ میلی‌متری ابتدای قطعه‌ی CCDP و ۳۳۰ میلی‌متری انتهای تیر نصب شده است. تعداد پیچ‌های اتصال ورق تقویتی به نحوی طراحی شده‌اند که مقاومت کافی جهت تحمل نیروهای کششی حاصل از خمش را داشته باشند. در شکل ۲، یکی از نمونه‌های آزمایشگاهی اتصال CCDP با ورق تقویتی بال مشاهده می‌شود.

جهت بررسی رفتار اتصال پیشنهادی، ۲۱ مدل اجزاء محدود در سه ضخامت مختلف ایجاد شده است. میزان گیرداری اتصال‌ها با استفاده از روابط آیین‌نامه‌ی Eurocode ۳^[۱۸] تعیین شده است؛ که براساس آن، نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده‌ی اتصال‌های نیمه‌گیردار قرار داشته‌اند. در شکل ۳، اندازه‌ی قطعات اتصال مشاهده می‌شود.

جهت بررسی پارامترهای هندسی دخیل در رفتار اتصال، اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده (L) در سه اندازه‌ی ۱۰، ۲۰، و ۳۰ میلی‌متر تحلیل و نتایج به‌دست‌آمده مقایسه شده‌اند. پارامتر مؤثر دیگر در رفتار اتصال، زاویه‌ی افزایش عرض قطعه‌ی R اتصال است. در حالت اول، قطعه‌ی R اتصال با زاویه‌ی افزایش عرض ۱۷ درجه، کل عرض بال ستون و در حالت دوم، با زاویه‌ی افزایش عرض ۹ درجه، ۷۵٪ عرض بال ستون را پوشش داده است. در هر دو حالت، طول قطعه‌ی R برابر ۲۰۰ میلی‌متر بوده است. پارامتر هندسی سوم، طول بخش کنترلی ثابت P است، که در ۴ اندازه‌ی مختلف: صفر، ۲۰، ۵۰، و ۷۰ میلی‌متر بررسی شده است. در جدول ۱، مشخصات مدل‌های اجزاء محدود ایجادشده ارائه شده است. در نام‌گذاری مدل‌ها، T ضخامت ورق استفاده‌شده در ساخت تیر و اتصال، L اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال، P طول قسمت ثابت کنترلی اتصال، و R در دو حالت R_۱ و R_۲، شیب افزایش عرض قطعه‌ی R را نشان

جدول ۱. مشخصات هندسی نمونه‌ها (ابعاد به میلی‌متر).

specimen	Plate thickness (T)	wing stiffener edge (L)	Length of (R)	Width of (P)	Length of (P)
T1L2R1P0	1	20	200	240	0
T1L2R1P2	1	20	200	240	20
T1L2R1P5	1	20	200	240	50
T1L2R1P7	1	20	200	240	70
T1L1R1P5	1	10	200	240	50
T1L2R2P5	1	20	200	180	50
T1L3R1P5	1	30	200	240	50
T2L2R1P0	2	20	200	240	0
T2L2R1P2	2	20	200	240	20
T2L2R1P5	2	20	200	240	50
T2L2R1P7	2	20	200	240	70
T2L1R1P5	2	10	200	240	50
T2L2R2P5	2	20	200	180	50
T2L3R1P5	2	30	200	240	50
T3L2R1P0	3	20	200	240	0
T3L2R1P2	3	20	200	240	20
T3L2R1P5	3	20	200	240	50
T3L2R1P7	3	20	200	240	70
T3L1R1P5	3	10	200	240	50
T3L2R2P5	3	20	200	180	50
T3L3R1P5	3	30	200	240	50

جدول ۲. مشخصات مصالح مصرفی.

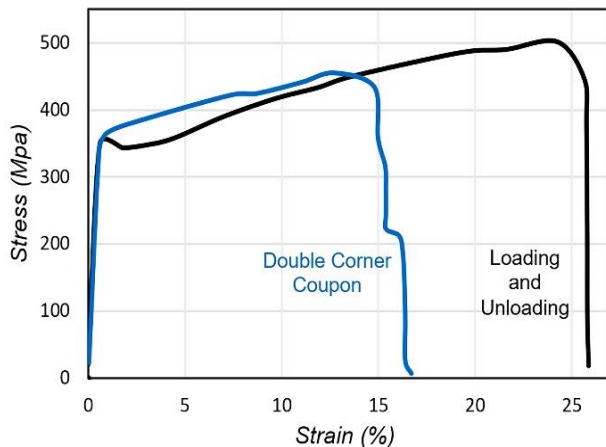
specimen	type	thickness (mm)	E (GPa)	$\sigma_{0.2\%}$ (MPa)	F_u (MPa)	ϵ_f (%)
1, 2	flat	1.0	214	379	424	25.9
4, 5	flat	2.0	220	329	387	20.1
1, 3	corner	1.0	-	354	393	16.3
3, 4	corner	2.0	-	363	400	13.2
average	-	-	217	356	401	18.9

جدول ۳. نتایج تحلیل همگرایی مش‌بندی تیر تحت بارگذاری خمشی.

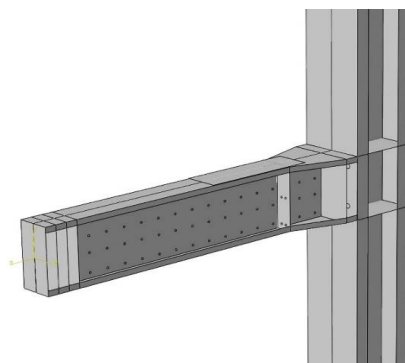
Mesh size (mm)	at beam end Displacement (mm)	Max von mises stress (Mpa)	Displacement deviation (%)	Von-mises stress deviation (%)
5	3.57820	172.1	-	-
4	3.44119	159.3	7%	7.9%
3*	6.3149	154.7	2%	2.9%



شکل ۴: نمونه‌های کوپن تیر و اتصال.



شکل ۵. منحنی تنش و کرنش مصالح مصرفی.



شکل ۶. مدل اجزاء محدود اتصال CCDP.

می‌دهد. در تمامی نمونه‌ها، اجزاء محدود مشخصات هندسی ستون یکسان بوده‌اند.

۳. مدل‌سازی اجزاء محدود نمونه‌ها

جهت مدل‌سازی اجزاء محدود اتصال‌ها از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. در مدل‌های اجزاء محدود، رفتار غیرخطی هندسی، غیرخطی مصالح، و تغییرشکل‌های بزرگ مورد توجه قرار گرفته است. ساختار استفاده‌شده برای مدل‌سازی اجزاء اتصال، حالت SHELL است، که کماتش موضعی اعضا را به‌خوبی نشان می‌دهد.^[۲]

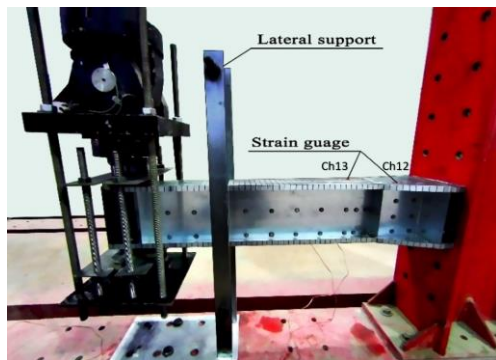
خواص مکانیکی مصالح فولاد تیر، ستون، و ورق اتصال براساس نتایج کوپن آزمون نمونه‌های آزمایشگاهی در دو حالت مسطح و خم به‌دست آمده است. در شکل ۴، نمونه‌های کوپن تیر و اتصال و در شکل ۵، منحنی تنش و کرنش مصالح مشاهده می‌شوند. همچنین در جدول ۲، مشخصات مصالح مصرفی ارائه شده است؛ که در آن، E مدول الاستیسیته‌ی مصالح، $\sigma_{0.2\%}$ تنش تسلیم مصالح، F_u مقاومت کششی نهایی، و ϵ_f کرنش نهایی مصالح هستند. جهت مدل‌سازی پیچ در مدل‌های المان از اتصال‌دهنده‌ی (connector-beam) استفاده شده است، که دوران و تغییرشکل پیچ را در نظر نمی‌گیرد و یک اتصال کامل مابین صفحات در محل پیچ ایجاد می‌کند.

در مدل‌سازی اجزاء محدود، برای مش‌بندی اجزا از مش‌های چهارضلعی با ۴ گره‌ی پوسته‌ای با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته‌ی S4R در حالت تنش سه‌بعدی استفاده شده است. برای تعیین اندازه‌ی مناسب مش‌بندی، از تحلیل همگرایی مش استفاده شده است. یک نمونه‌ی اجزاء محدود تیر تحت بارگذاری خمشی ثابت ۱۵ کیلونیوتن متر، با اندازه‌ی مش‌های مختلف تحلیل شده و با مقایسه‌ی تفاوت تغییرمکان و بیشینه‌ی تنش فون میزس حاصل از بارگذاری در یک المان مشخص در انتهای تیر، اندازه‌ی مش مناسب به‌دست آمده است. نتایج تحلیل همگرایی مش تیر در جدول ۳ ارائه شده است. بیشینه‌ی خطای حاصل از اندازه‌ی مش‌بندی، ۲/۹٪ بوده است. جهت افزایش دقت مدل‌سازی، نسبت ابعاد مش‌بندی (aspect-ratio)، در محل اتصال قطعات، کوچک‌تر در نظر گرفته شده است. مطابق نمونه‌های آزمایشگاهی، بارگذاری مونوتونیک اتصال‌ها تا دوران ۰/۰۷ رادیان در محل اتصال اعمال شده است. در شکل ۶، یک نمونه مدل اجزاء محدود تیر و اتصال مشاهده می‌شود.

۴. راستی‌آزمایی مدل‌های اجزاء محدود با استفاده از نتایج آزمایشگاهی

برای راستی‌آزمایی مدل‌سازی اجزاء محدود از نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های $T1L2R1P5$ و $T2L2R1P5$ استفاده شده است.^{۱۹} در شکل ۷، نحوه‌ی نصب و آزمون نمونه‌ی آزمایشگاهی $T1L2R1P5$ مشاهده می‌شود؛ که در آن، ضخامت ورق تیر و اتصال، ۱ میلی‌متر و اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال ۲۰ میلی‌متر؛ و همچنین طول قطعه‌ی P برابر ۵۰ میلی‌متر و زاویه‌ی قطعه‌ی R اتصال از راستای تیر، ۱۷ درجه است. در نمونه‌های آزمایشگاهی، مجموعه‌ی تیر و قطعه‌ی اتصال توسط ۱۲ عدد پیچ شماره‌ی ۱۰ به ستون صلب آزمایشگاه متصل شده‌اند. بارگذاری توسط جک ۵۰۰ تنی در انتهای تیر اعمال شده است. جهت ممانعت از کمانش جانبی تیر، تکیه‌گاه جانبی در فاصله‌ی ۴۰ سانتی‌متری انتهای تیر قرار داده شده است. جهت ممانعت از کمانش موضعی محل اعمال نیرو، سه عدد سخت‌کننده در انتهای تیر در محل اتکای جک تعبیه شده است. محل اعمال نیرو در انتهای تیر به صورت مفصلی است. در شکل ۸، جزئیات اتکای مفصلی جک به تیر مشاهده می‌شود. جهت مقایسه‌ی کرنش ایجادشده در اجزاء اتصال و تیر، دو عدد کرنش‌سنج در فاصله‌ی ۵ سانتی‌متری محل اتصال تیر به قطعه‌ی CCDP روی لبه‌ی بیرونی بال کششی مطابق شکل ۷ نصب شده است. در جدول ۴، نیز مقایسه‌ی نتایج تحلیل آزمایشگاهی و اجزاء محدود ارائه شده است. در نمونه با ضخامت ۱ میلی‌متر، سختی اولیه‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی و اجزاء محدود به ترتیب ۳۹۴۵ و ۴۰۵۸ کیلونیوتن بر متر رادیان بوده است. همچنین لنگر بیشینه‌ی تحمل‌شده توسط مجموعه‌ی تیر و اتصال در دوران ۰/۰۷ رادیان در نمونه‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود به ترتیب ۲۴/۳۱ و ۲۴/۸۱ کیلونیوتن متر بوده است. در نمونه با ضخامت ۲ میلی‌متر نیز مشابه نمونه با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر، سختی اولیه و لنگر بیشینه‌ی تیر و اتصال در مدل‌های اجزاء محدود بیشتر از نمونه‌های آزمایشگاهی بوده است. کرنش محاسبه‌شده توسط کانال ۱۲ روی بال کششی اتصال و کانال ۱۳ روی بال کششی تیر هم تطابق خوبی با نتایج مدل‌سازی اجزاء محدود نشان داده‌اند. خطای مدل‌سازی اجزاء محدود نمونه‌های مذکور با روش $RMSE^7$ محاسبه شده است. خطای مدل‌سازی برای نمونه با ضخامت ۱ میلی‌متر، ۸/۸۲٪ و برای نمونه با ضخامت ۲ میلی‌متر در حدود ۹/۱۷٪ بوده است.

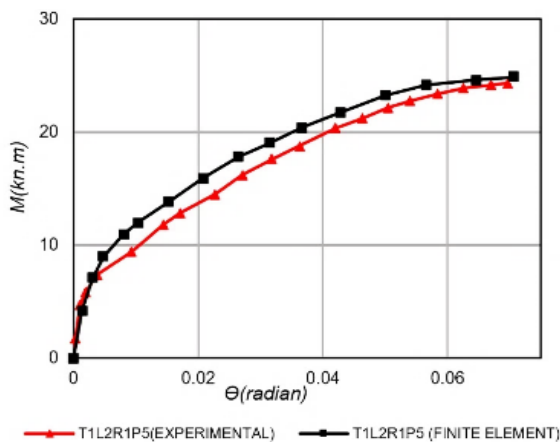
منحنی لنگر- دوران نمونه‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود در شکل‌های ۹ و ۱۰ و نوع آسیب و کمانش اجزاء اتصال $T1L2R1P5$ در شکل ۱۱ مشاهده می‌شوند. در نمونه‌ی آزمایشگاهی با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر، با لغزش در پیچ‌های ورق تقویتی بال کششی تیر در دوران ۰/۰۵ رادیان، سختی خمشی



شکل ۷. نحوه‌ی نصب و چیدمان نمونه‌ی آزمایشگاهی اتصال $T1L2R1P5$.



شکل ۸. اتصال مفصلی محل اعمال نیروی جک.

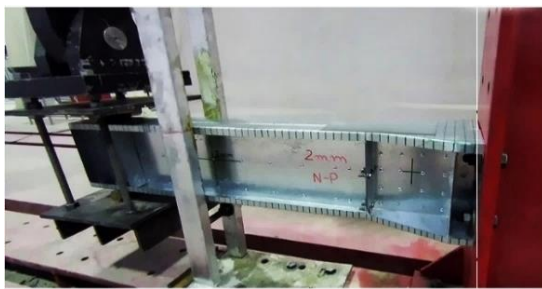


شکل ۹. مقایسه‌ی منحنی لنگر- دوران نمونه‌ی آزمایشگاهی و اجزاء محدود اتصال $T1L2R1P5$.

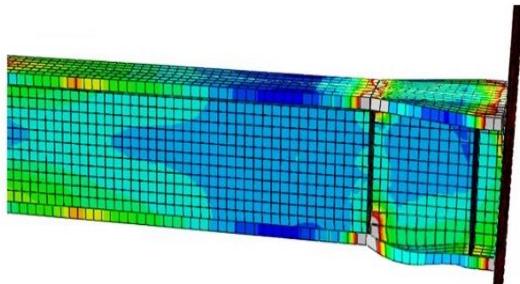
جدول ۴. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و اجزاء محدود اتصال‌های $T1L2R1P5$ و $T2L2R1P5$.

Specimen	Initial stiffness (kN.m/rad)	M_{max} (0.07 rad) (kN.m)	Strain 0.07rad (ch.13) %	Strain 0.07rad (ch.12) %
Experimental $T1L2R1P5$	3945	24.31	2.93	3.85
Finite element $T1L2R1P5$	4058	24.81	2.80	3.55
Experimental $T2L2R1P5$	8933	56.59	2.65	4.04
Finite element $T2L2R1P5$	9265	58.28	2.49	3.82

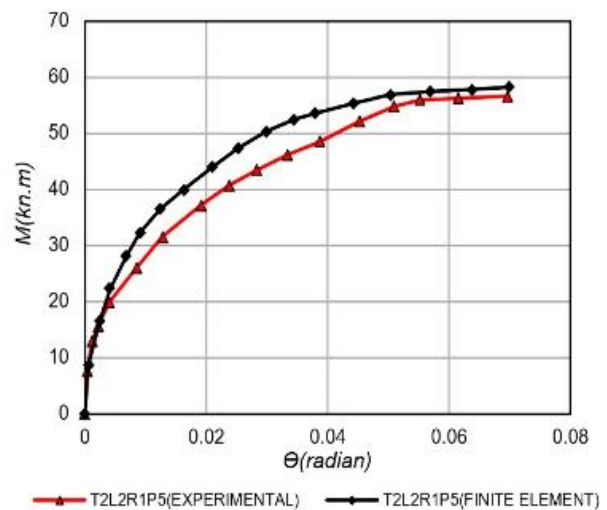
⁷ Root-Mean-Square Error



نمونه‌ی آزمایشگاهی (a)



نمونه‌ی اجزاء محدود. (b)



شکل ۱۰. مقایسه‌ی منحنی لنگر - دوران نمونه‌ی آزمایشگاهی و اجزاء محدود اتصال $T\bar{2}L\bar{2}R\bar{1}P\bar{5}$.

شکل ۱۲. مدل آسیب و کمانش نمونه‌ی $T\bar{2}L\bar{2}R\bar{1}P\bar{5}$ تحت بارگذاری مونوتونیک.

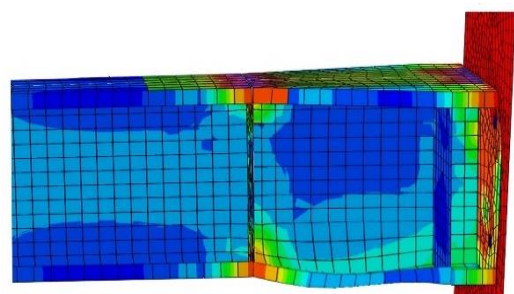
۱ میلی‌متر، قطعه‌ی CCDP علاوه بر افزایش مقاومت خمشی و سختی اولیه‌ی اتصال، از ایجاد تغییرشکل در بر ستون جلوگیری کرده است. در هر دو نمونه‌ی اتصال بررسی شده، کمانش و تغییرشکل ماندگار در تیر ایجاد نشده و قطعه‌ی اتصال به خوبی توانسته است از ایجاد کمانش و تسلیم‌شدگی در تیر و ستون جلوگیری و کمانش را در وسط قطعه‌ی R اتصال متمرکز کند. شکل توزیع تنش و آسیب اتصال‌ها در مدل‌سازی اجزاء محدود تطابق خوبی با مدل‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند. در نمونه‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود، اتصال CCDP به صورت یک فیوز خمشی کارآمد عمل کرده است.

۵. تحلیل پارامتریک اتصال گیردار CCDP

برای بررسی رفتار اتصال‌های نیمه‌گیردار پیشنهادی و تأثیر پارامترهای هندسی دخیل در آن، ۲۱ مدل اجزاء محدود اتصال‌ها، مطابق جدول ۱ ایجاد و تحت بارگذاری مونوتونیک قرار گرفته‌اند. پارامترهای هندسی دخیل در رفتار اتصال، شامل: ضخامت ورق تیر و اتصال، اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی تیر، اندازه‌ی قطعه‌ی ثابت کنترلی P و شیب قطعه‌ی R هستند. براساس آیین‌نامه‌ی طراحی ۱۰۰-S۲۴-AISI^[۱۷]، ضخامت مجاز برای ساخت قطعات سردنورده، ۵/۰ تا ۳ میلی‌متر است. جهت بررسی تأثیر ضخامت ورق در رفتار اتصال، تیر و اجزاء اتصال با ضخامت‌های ۱، ۲، و ۳ میلی‌متر ایجاد شده است. قطعه‌ی ثابت P اتصال، وظیفه‌ی کنترل و دورکردن محل ایجاد کمانش اجزاء اتصال از بر ستون را بر عهده دارد. طول قطعه‌ی P در چهار حالت مختلف: صفر، ۲۰، ۵۰، و ۷۰ میلی‌متر بررسی شده است. قطعه‌ی R اتصال، محل ایجاد مفصل پلاستیک از پیش تعیین شده است. همچنین استهلاک انرژی در قطعه‌ی R رخ می‌دهد. برای بررسی تأثیر شیب قطعه‌ی R در رفتار اتصال، نمونه‌های اجزاء محدود با شیب ۹ و ۱۷ درجه برای قطعه‌ی R ایجاد شده‌اند. اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال تیر و اتصال، تأثیر زیادی در سختی اتصال و نحوه‌ی آسیب و کمانش آن دارد. بدین جهت، نمونه‌هایی با اندازه‌ی لبه‌های سخت‌کننده‌ی ۱۰، ۲۰، و ۳۰ میلی‌متر ایجاد و نتایج تحلیل مونوتونیک نمونه‌ها مقایسه شده‌اند.



نمونه‌ی آزمایشگاهی (a)



نمونه‌ی اجزاء محدود. (b)

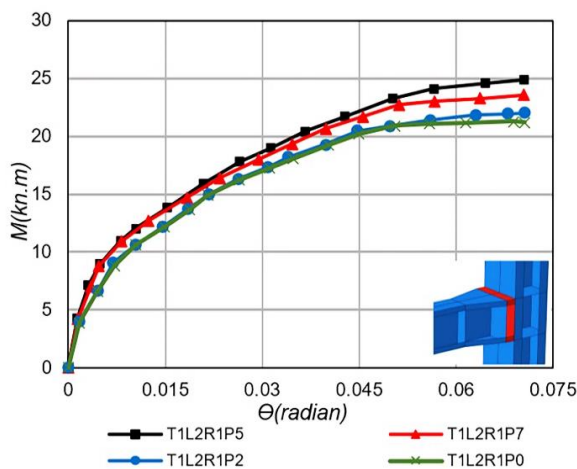
شکل ۱۱. مدل آسیب و کمانش نمونه‌ی $T\bar{2}L\bar{2}R\bar{1}P\bar{5}$ تحت بارگذاری مونوتونیک.

اتصال کاهش می‌یابد و در اجزاء اتصال، کمانش و تغییرشکلی تا دوران ۰/۰۲ رادیان ایجاد نمی‌شود. با ادامه‌ی بارگذاری، کمانش محدود لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال فشاری قطعه‌ی CCDP در نقطه‌ی B آغاز و در بال فشاری قطعه‌ی R گسترش می‌یابد. با تمرکز تغییرشکل و کمانش در وسط قطعه‌ی R اتصال، از ایجاد تغییرشکل در بر ستون و کمانش موضعی در تیر جلوگیری می‌شود. در دوران ۰/۰۷ رادیان، ۶٪ دوران اتصال به دلیل لهیدگی ورق تقویتی و ۹۴٪ دوران، به دلیل کمانش لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال فشاری قطعه‌ی R اتصال رخ داده است.

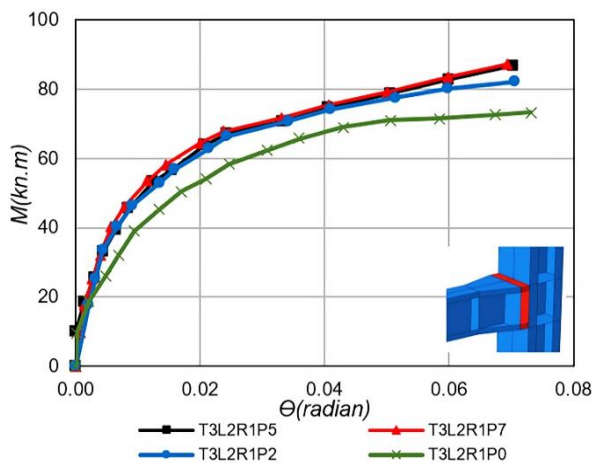
مدل آسیب اجزاء اتصال $T\bar{2}L\bar{2}R\bar{1}P\bar{5}$ در شکل ۱۲ نشان داده شده است؛ که در آن، لغزش پیچ و لهیدگی ورق تقویتی مشاهده نشده است. در اتصال اخیر، تغییرشکل در وسط بخش R قطعه‌ی CCDP به صورت کمانش موضعی لبه‌ی سخت‌کننده و بال فشاری اتصال رخ داده و همانند اتصال با ضخامت ورق

اتصال کاهش شدیدتری نسبت به اتصال‌های با ضخامت ورق کمتر داشته و در بارگذاری نهایی در حدود ۱۹٪ کاهش یافته است.

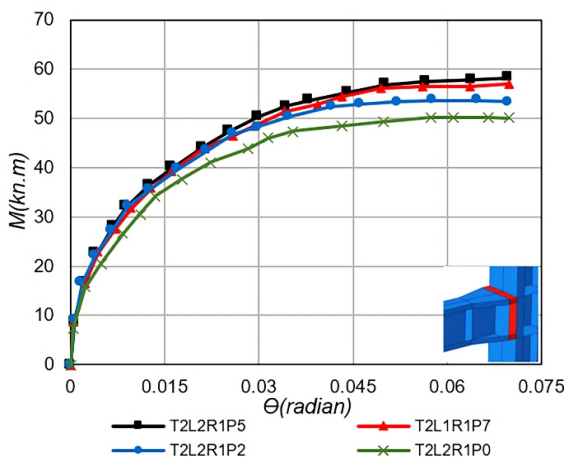
در شکل‌های ۱۳ الی ۱۵، منحنی‌های لنگر دوران اتصال‌ها و در شکل‌های ۱۶ الی ۱۸، توزیع تنش و نحوه‌ی کماتش نمونه‌ها مشاهده می‌شود. اتصال‌ها با



شکل ۱۳. نمودار لنگر دوران اتصال‌های CCDP با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر و اندازه‌ی قطعه‌ی P متغیر.



شکل ۱۴. نمودار لنگر دوران اتصال‌های CCDP با ضخامت ورق ۲ میلی‌متر و اندازه‌ی قطعه‌ی P متغیر.



شکل ۱۵. نمودار لنگر دوران اتصال‌های CCDP با ضخامت ورق ۳ میلی‌متر و اندازه‌ی قطعه‌ی P متغیر.

۱.۵. بررسی تأثیر ضخامت و اندازه‌ی قطعه‌ی ثابت P در رفتار اتصال

تأثیر قطعه‌ی P در رفتار اتصال CCDP وابستگی مستقیم به ضخامت ورق استفاده‌شده در ساخت اجزاء اتصال دارد. برای بررسی تأثیر قطعه‌ی P در رفتار اتصال، ۳ گروه مختلف مدل اجزاء محدود با ضخامت ۱، ۲، و ۳ میلی‌متر تحلیل و مقایسه شده‌اند. در تمام مدل‌های مذکور، اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال، طول و شیب قطعه‌ی R به ترتیب: ۲۰ میلی‌متر، ۲۰۰ میلی‌متر، و ۱۷ درجه است. مدل T1L2R1P0، مدل اتصال بدون قطعه‌ی P است. مدل‌های دیگر اتصال CCDP با اضافه‌شدن قطعه‌ی P به طول ۲۰، ۵۰، و ۷۰ میلی‌متر ما بین ستون و قطعه‌ی R ایجاد شده‌اند. در جدول ۵، نتایج تحلیل نمونه‌ها ارائه شده است.

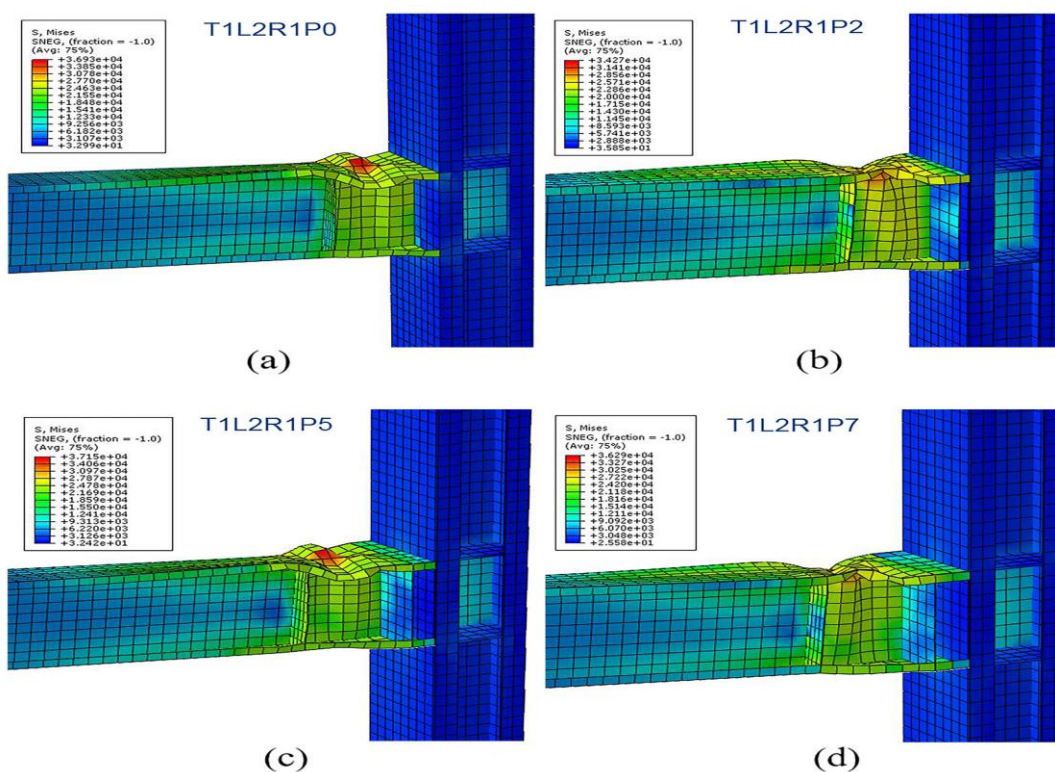
در ضخامت ۱ میلی‌متر، اتصال با قطعه‌ی P با اندازه‌ی ۵۰ میلی‌متر، مقاومت خمشی بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها نشان داده است. در صورت استفاده از قطعه‌ی P با اندازه‌ی ۷۰ میلی‌متر، مقاومت در حدود ۳٪ نسبت به اتصال با اندازه‌ی P برابر ۵۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد. در اتصال با قطعه‌ی P با اندازه‌ی ۲۰ میلی‌متر کاهش مقاومت نسبت به اتصال با اندازه‌ی P برابر ۵۰ میلی‌متر، در حدود ۹٪ بوده است. در صورت عدم استفاده از قطعه‌ی P در اتصال مقاومت خمشی اتصال در حدود ۱۶٪ کاهش می‌یابد.

رفتار اتصال‌ها با ضخامت ۲ میلی‌متر مشابه اتصال‌ها با ضخامت ۱ میلی‌متر است. در اتصال اخیر هم بیشترین مقاومت خمشی در اتصال با اندازه‌ی قطعه‌ی P برابر ۵۰ میلی‌متر رخ داده است. با افزایش اندازه‌ی قطعه‌ی P، کاهش مقاومت اتصال محسوس نیست. در صورت حذف قطعه‌ی P، مقاومت اتصال در حدود ۱۶٪ کاهش می‌یابد.

در اتصال‌های با ضخامت ورق ۳ میلی‌متر، مقاومت خمشی اتصال با قطعه‌ی P به طول ۵۰ و ۷۰ میلی‌متر، یکسان بوده است. با کاهش طول قطعه‌ی اخیر، مقاومت خمشی کاهش یافته است. در صورت حذف قطعه‌ی P، مقاومت خمشی

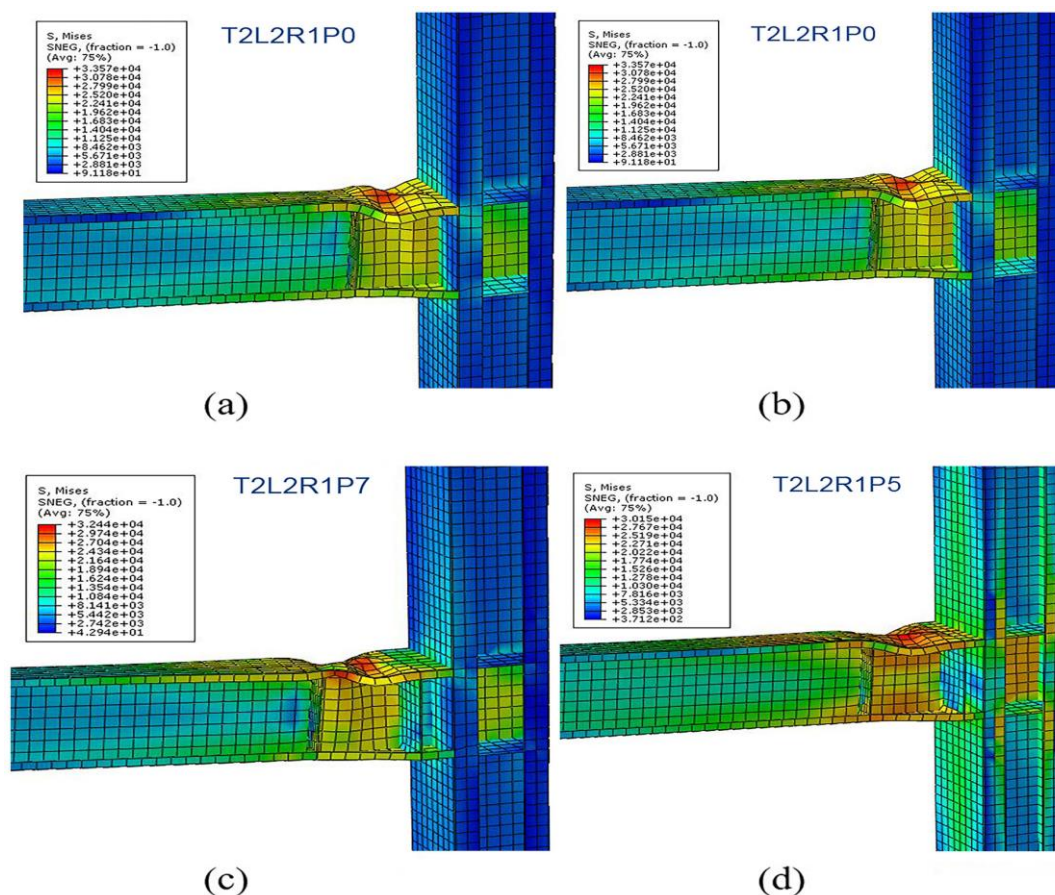
جدول ۵. نتایج تحلیل مونوتونیک نمونه‌های اجزاء محدود با طول p مختلف.

Specimen	Initial stiffness (kN.m/rad)	Moment at 0.07 rad (kN.m)
T1L2R1P0	3965	21.2
T1L2R1P2	3998	22.03
T1L2R1P5	4058	24.85
T1L2R1P7	4001	23.55
T2L2R1P0	8825	50.04
T2L2R1P2	8896	53.36
T2L2R1P5	9065	58.26
T2L2R1P7	8920	56.93
T3L2R1P0	22560	73.29
T3L2R1P2	22630	82.20
T3L2R1P5	23880	87.24
T3L2R1P7	23400	87.36



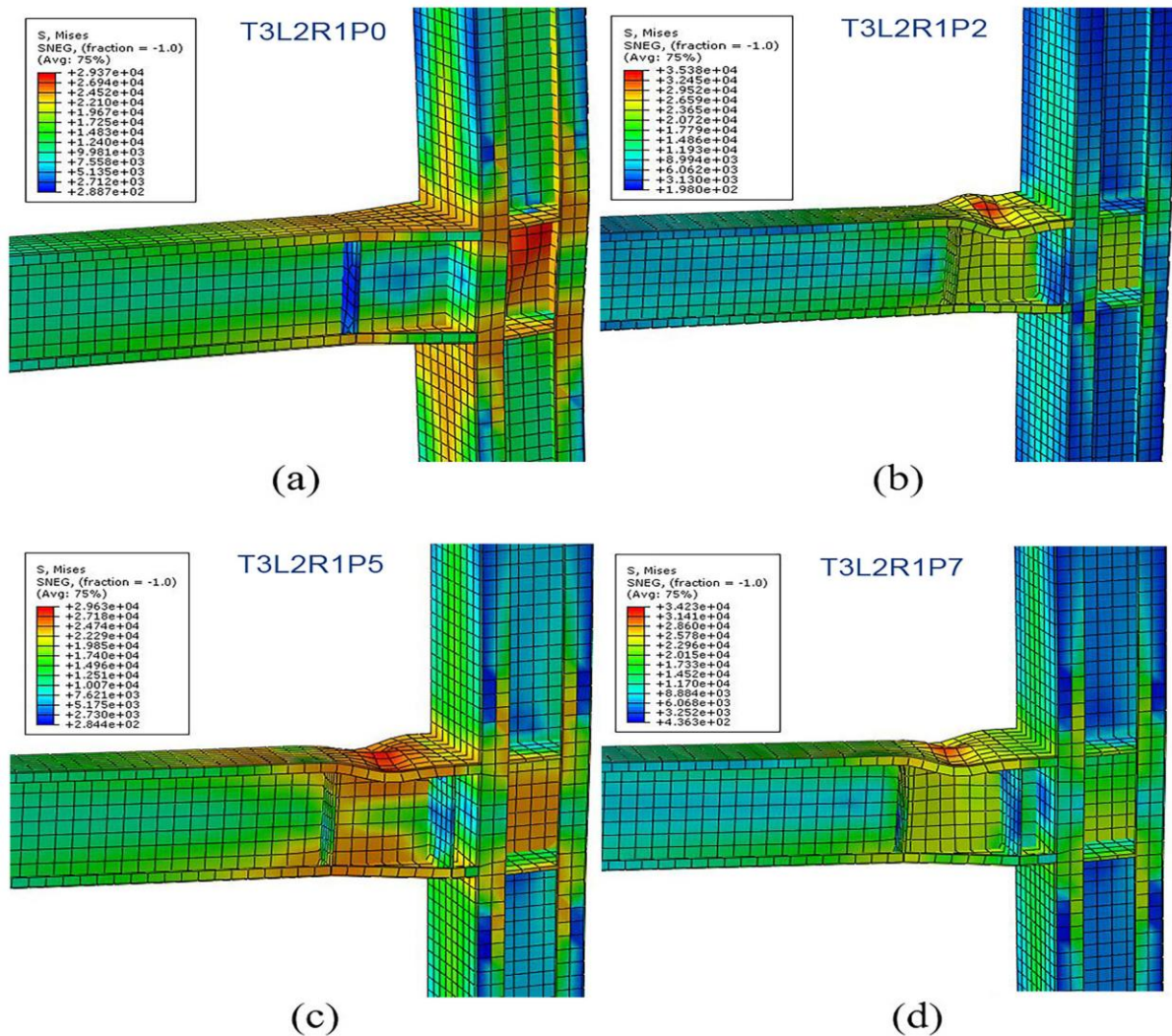
(a) اتصال T1L2R1P0؛ (b) اتصال T1L2R1P2؛ (c) اتصال T1L2R1P5؛ (d) اتصال T1L2R1P7.

شکل ۱۶. توزیع تنش در اتصال‌های CCDP با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر و اندازه‌ی قطعه‌ی P متغیر (N/cm^2).



(a) اتصال T2L2R1P0؛ (b) اتصال T2L2R1P2؛ (c) اتصال T2L2R1P5؛ (d) اتصال T2L2R1P7.

شکل ۱۷. توزیع تنش در اتصال‌های CCDP با ضخامت ورق ۲ میلی‌متر و اندازه‌ی قطعه‌ی P متغیر (N/cm^2).



شکل ۱۸. توزیع تنش در اتصال‌های CCDP با ضخامت ورق ۲ میلی‌متر و اندازه‌ی قطعه‌ی P متغیر (N/cm²): (a) اتصال T3L2R1P0؛ (b) اتصال T3L2R1P2؛ (c) اتصال T3L2R1P5؛ (d) اتصال T3L2R1P7.

شکل ۱۸. توزیع تنش در اتصال‌های CCDP با ضخامت ورق ۲ میلی‌متر و اندازه‌ی قطعه‌ی P متغیر (N/cm²):

مدل‌سازی و نتایج مقایسه شده‌اند. در مدل‌های R₁ عرض بال تیر توسط قطعه‌ی R با شیب ۱۷ درجه به بال ستون که ۲۴۰ میلی‌متر است، متصل شده است. در مدل R₂ قطعه‌ی R عرض بال تیر را با شیب ۹ درجه به ۳/۴ عرض بال ستون متصل می‌کند. در شکل ۱۹، جزئیات دو مدل اتصال و در شکل ۲۰، منحنی لنگر- دوران اتصال‌ها مشاهده می‌شود. همچنین در جدول ۶، نتایج حاصل از تحلیل ارائه شده است.

در اتصال‌های با ورق ۱ میلی‌متر، رفتار دو اتصال یکسان بوده و هر دو اتصال، مقاومت خمشی و سختی اولیه‌ی یکسانی داشته‌اند. در مدل با ضخامت ۲ میلی‌متر، مقاومت خمشی اتصال تا دوران ۰/۰۲ رادیان در هر دو مدل یکسان بوده است؛ ولی در اتصال با قطعه‌ی R₂، مقاومت خمشی نهایی در حدود ۱۳٪ نسبت به اتصال R₁ کاهش یافته است. در اتصال‌های با ضخامت ۳ میلی‌متر، سختی اولیه‌ی دو اتصال یکسان بوده است. در دوران ۰/۰۴ رادیان، اتصال با قطعه‌ی R₂ دچار کاهش مقاومت خمشی شده و این روند تا بارگذاری نهایی و دوران ۰/۰۷ رادیان ادامه داشته است. در بارگذاری نهایی، مقاومت نهایی اتصال R₂ در حدود ۱۴٪ نسبت به اتصال R₁ کاهش یافته است. همچنین تنش منتقل‌شده به جان ستون در اتصال اخیر، در حدود ۱۵٪ کاهش نشان داده است.

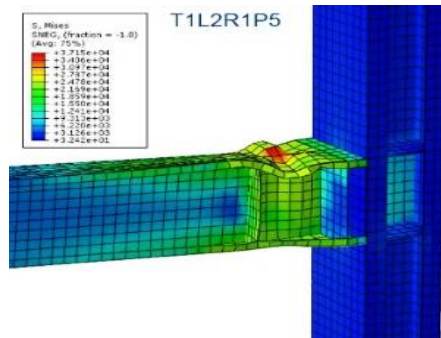
ضخامت ورق‌های ۱ و ۲ میلی‌متر، رفتار تقریباً یکسانی از خود نشان داده‌اند. در اتصال‌های اخیر، کمانش موضعی سخت‌کننده‌ی بال در دوران ۰/۰۳ رادیان آغاز و با افزایش بارگذاری، تغییرشکل در بال فشاری قطعه‌ی R گسترش یافته و در دوران ۰/۰۵ رادیان، بال فشاری اتصال کمانش کرده است. همچنین، در اتصال‌های مذکور هیچ کمانش یا تغییرشکلی در تیر مشاهده نشده و اتصال ذکرشده از انتقال تغییرشکل‌های بزرگ و کمانش به جان ستون ممانعت کرده است.

در اتصال‌های با ضخامت بالای ورق، استفاده از قطعه‌ی P، تأثیر زیادی در دور کردن تنش از بر ستون و ممانعت از انتقال تغییرشکل‌های بزرگ به ستون دارد. در اتصال‌ها با ضخامت ورق ۳ میلی‌متر، در صورت عدم استفاده از قطعه‌ی P، جان ستون کمانش می‌کند. استفاده از قطعه‌ی P در اتصال‌های CCDP ضروری به نظر می‌رسد. در صورت عدم استفاده از قطعه‌ی P در اتصال، نمی‌توان از کنترل محل کمانش اطمینان حاصل کرد.

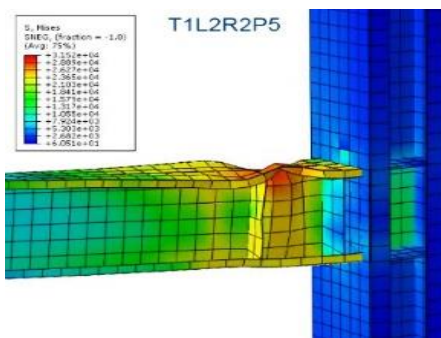
۲.۵. تأثیر شیب قطعه‌ی R در رفتار اتصال گیردار CCDP

قطعه‌ی R، وظیفه‌ی کنترل محل ایجاد مفصل پلاستیک در اتصال را دارد و کمانش اتصال در بال فشاری آن رخ می‌دهد. با توجه به تأثیر هندسه‌ی قطعه‌ی R در توزیع تنش، کنترل کمانش و محل آسیب، اتصال در دو هندسه‌ی مختلف

در شکل‌های ۲۱ الی ۲۳، توزیع تنش و کماتش بال فشاری مدل‌ها مشاهده می‌شود. در تمامی مدل‌ها، کماتش بال فشاری اتصال در محل پیش‌بینی شده و در وسط قطعه‌ی R رخ داده و تغییر در عرض قطعه‌ی R، تأثیری در رفتار فیز

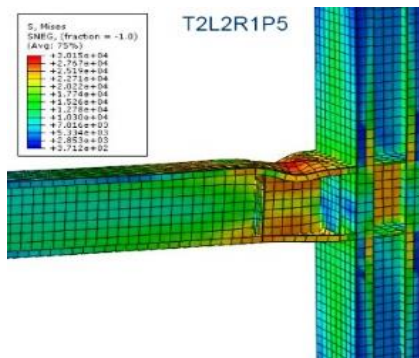


(a) اتصال T1L2R1P5

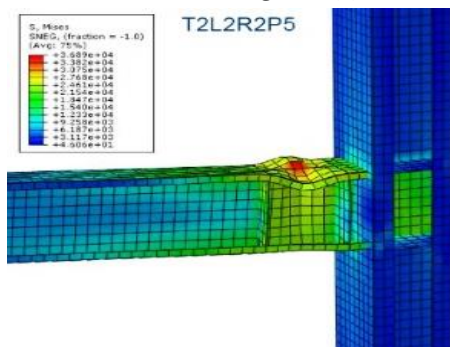


(b) T1L2R2P5

شکل ۲۱. تأثیر تغییر شیب قطعه‌ی R در توزیع تنش در اتصال CCDP با ضخامت ۱ میلی‌متر (N/cm^2)

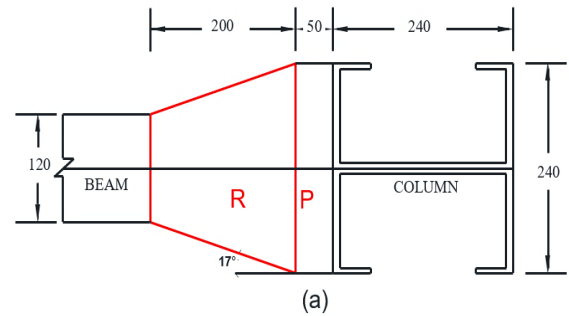


(a) اتصال T2L2R1P5

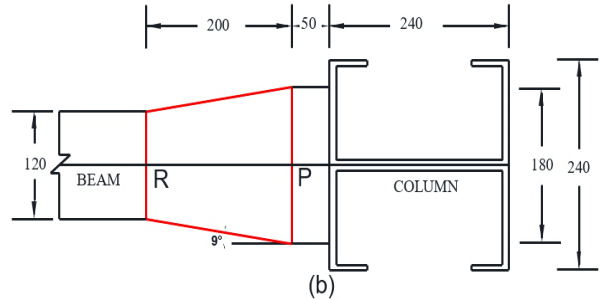


(b) T2L2R2P5

شکل ۲۲. تأثیر تغییر شیب قطعه‌ی R در توزیع تنش در اتصال CCDP با ضخامت ۲ میلی‌متر (N/cm^2)



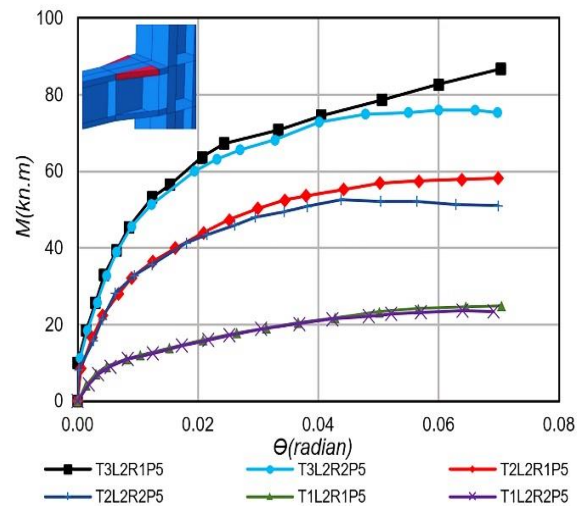
(a)



(b)

(a) اتصال‌ها با قطعه‌ی R۱؛ (b) اتصال‌ها با قطعه‌ی R۲

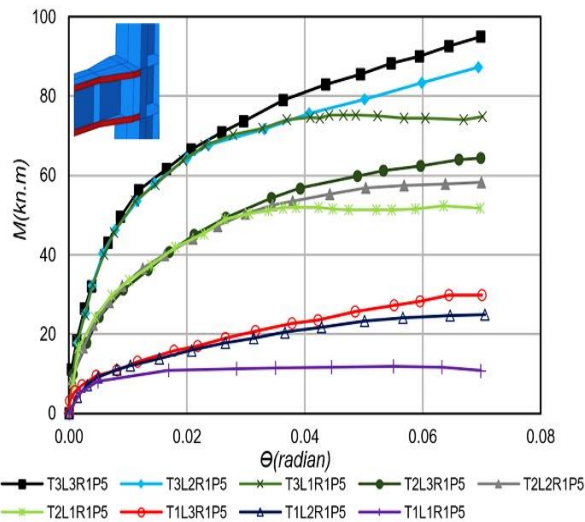
شکل ۱۹. اتصال‌های CCDP با شیب قطعه‌ی R مختلف (ابعاد به میلی‌متر):



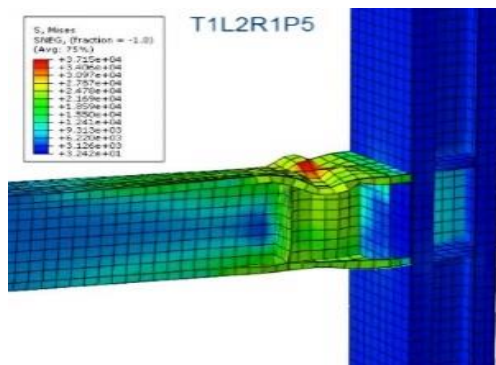
شکل ۲۰. منحنی لنگر دوران اتصال‌های CCDP با شیب قطعه‌ی R مختلف.

جدول ۶. نتایج تحلیل نمونه‌های اجزاء محدود با شیب قطعه‌ی R متغیر.

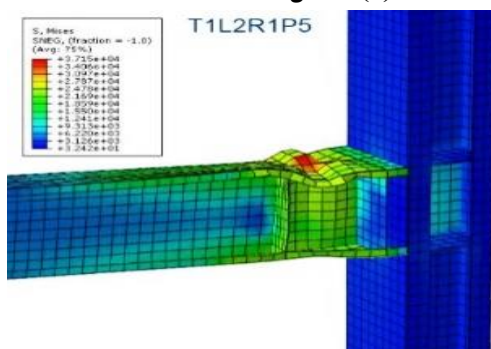
Specimen	Initial stiffness (kN.m/rad)	Moment at 0.07 rad (kN.m)
T1L2R1P5	4058	24.85
T1L2R2P5	4062	23.44
T2L2R1P5	9065	58.26
T2L2R2P5	8898	51.01
T3L2R1P5	23880	87.24
T3L2R2P5	23015	75.38



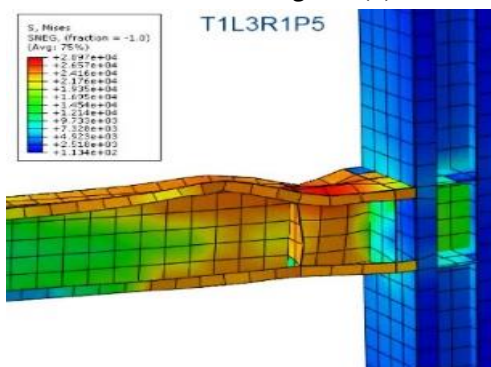
شکل ۲۴. تأثیر اندازه‌ی لبه‌ی L در مقاومت خمشی اتصال CCDP.



(a) اتصال T₁L₂R₁P₅



(b) اتصال T₁L₂R₁P₅



(c) اتصال T₁L₃R₁P₅

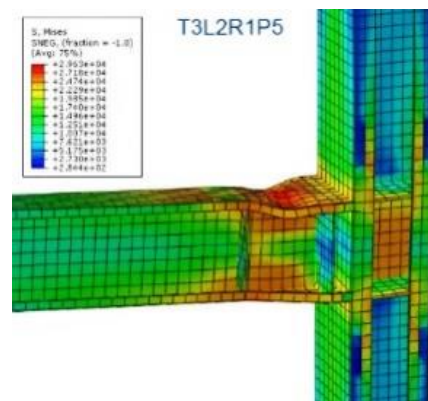
شکل ۲۵. توزیع تنش و کمانش موضعی در مدل‌های اتصال با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر و اندازه‌ی لبه‌های ۱۰، ۲۰، و ۳۰ میلی‌متر (N/cm^2).

خمشی آن نداشته است؛ ولی کاهش عرض قطعه‌ی R باعث کاهش مقاومت خمشی اتصال، علی‌الخصوص در مدل‌های با ضخامت ورق بالاتر شده و تنش انتقال‌یافته به جان ستون را کاهش داده است.

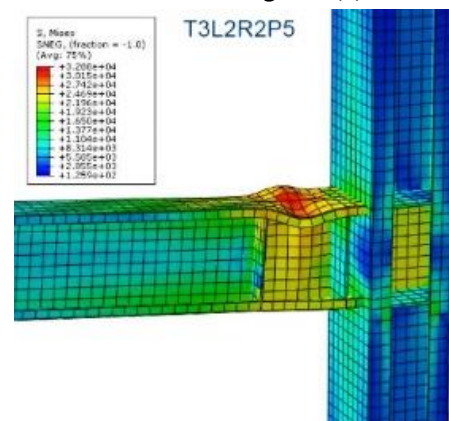
۳.۵. تأثیر اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال (L) در رفتار اتصال‌های CCDP

ورق تقویتی و اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال، دو پارامتر هندسی کنترل‌کننده‌ی محل ایجاد مفصل پلاستیک در اتصال CCDP هستند. استفاده از ورق تقویتی بال باعث افزایش مقاومت خمشی انتهای تیر و تقویت اتصال پیچی آن می‌شود و از ایجاد کمانش در تیر و جداسازی ورق اتصال انتهایی جلوگیری می‌کند. همچنین، خروج از محوریت لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال اتصال از راستای اعمال لنگر، باعث کاهش تأثیر سخت‌کنندگی و ایجاد کمانش موضعی در اتصال می‌شود. جهت بررسی تأثیر پارامتر اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده در رفتار اتصال، مدل‌های اجزاء محدود با اندازه‌ی لبه‌های ۱۰، ۲۰، و ۳۰ میلی‌متر ایجاد شده‌اند. در تمامی مدل‌ها، اندازه‌ی قطعه‌ی P و شیب قطعه‌ی R اتصال ثابت و به ترتیب ۵۰ میلی‌متر و ۱۷ درجه بوده است. در شکل ۲۴، منحنی لنگر دوران اتصال‌ها با اندازه‌ی لبه‌های مختلف و در شکل‌های ۲۵ الی ۲۷، توزیع تنش و کمانش موضعی بال فشاری اتصال‌ها مشاهده می‌شوند. همچنین، در جدول ۷، خلاصه‌ی نتایج ارائه شده است.

در مدل‌ها با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر، کمانش از محل لبه‌ی سخت‌کننده در وسط قطعه‌ی R آغاز و به بال فشاری اتصال گسترش یافته است. در آن‌ها، تغییرشکل در ستون ایجاد نشده است، ولی در مدل با اندازه‌ی لبه‌ی

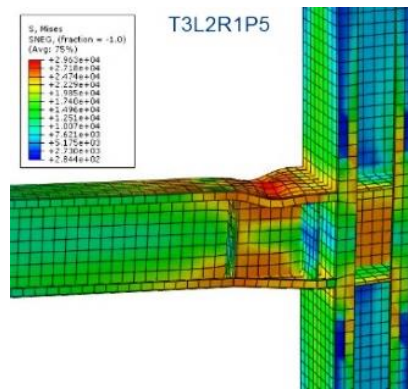


(a) اتصال T₃L₂R₁P₅

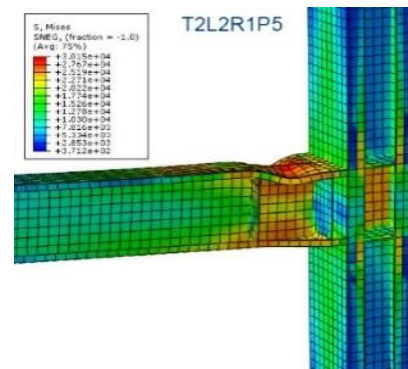


(b) اتصال T₃L₂R₂P₅

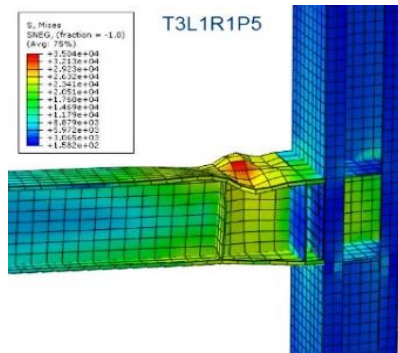
شکل ۲۶. تأثیر تغییر شیب قطعه‌ی R در توزیع تنش در اتصال CCDP با ضخامت ۳ میلی‌متر (N/cm^2).



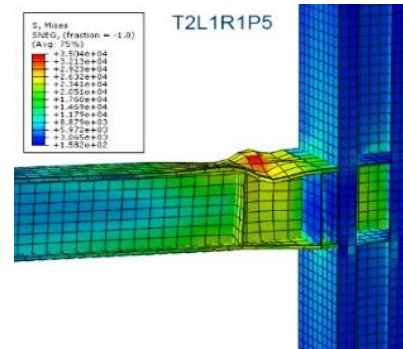
(a) اتصال $T3L1R1P5$ ؛



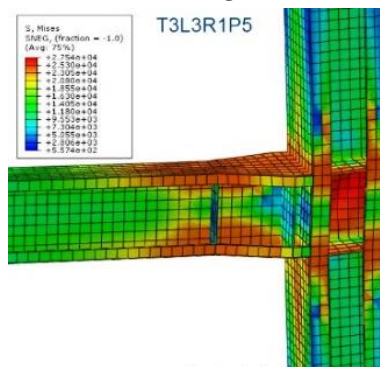
(a) اتصال $T2L1R1P5$ ؛



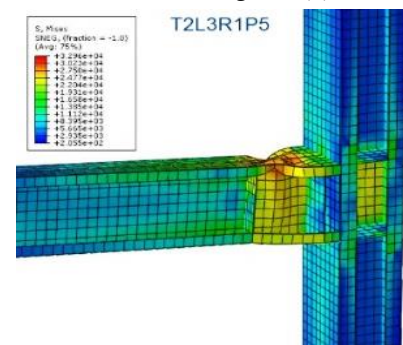
(b) اتصال $T3L2R1P5$ ؛



(b) اتصال $T2L2R1P5$ ؛



(c) اتصال $T3L3R1P5$ ؛



(c) اتصال $T2L3R1P5$ ؛

شکل ۲۶. توزیع تنش و کمانش موضعی در مدل‌های اتصال با ضخامت ورق ۲ میلی‌متر و اندازه‌ی لبه‌های ۱۰، ۲۰، و ۳۰ میلی‌متر (N/cm^2).

جدول ۷. تأثیر اندازه‌ی لبه‌ی L در مقاومت خمشی و سختی اولیه‌ی اتصال CCDP.

Specimen	Initial stiffness (kN.m/rad)	Moment at 0.07 rad(kN.m)
T1L1R1P5	3856	10.76
T1L2R1P5	4058	24.85
T1L3R1P5	4503	29.84
T2L1R1P5	8854	51.69
T2L2R1P5	9065	58.26
T2L3R1P5	9154	64.03
T3L1R1P5	21650	74.02
T3L2R1P5	23880	78.23
T3L3R1P5	25610	95.12

سخت‌کننده‌ی ۳۰ میلی‌متر، به دلیل سختی بالای لبه‌ی بال، کمانش به تیر منتقل شده است. تغییر در اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال باعث تغییر شدید در مقاومت خمشی اتصال‌ها می‌شود. مقاومت خمشی نمونه با لبه‌ی سخت‌کننده‌ی ۱۰ میلی‌متری نسبت به مدل با اندازه‌های لبه‌های سخت‌کننده‌ی ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر به ترتیب ۴۰ و ۹۰ درصد و سختی اولیه در حدود ۵٪ کاهش یافته است.

در اتصال‌ها با ضخامت ۲ میلی‌متر، با افزایش اندازه‌ی لبه‌ی L، رفتار اتصال بهبود یافته و کاهش مقاومت خمشی بعد از لحظه‌ی کمانش لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال کمتر شده است. اتصال با اندازه‌ی لبه‌ی ۳۰ میلی‌متر، مقاومت خمشی بالاتر و کاهش مقاومت خمشی بعد از کمانش بال فشاری کمتری داشته است. اتصال با اندازه‌ی لبه‌ی ۲۰ میلی‌متر، توزیع تنش بهتری داشته و کمترین تنش و تغییرشکل به ستون منتقل شده است. با تغییر در اندازه‌ی لبه‌ی L، تغییری در محل ایجاد کمانش در بال فشاری اتصال رخ نداده

و اتصال همچنان به‌عنوان فیوز خمشی بوده و محل کمانش را کنترل کرده است.

در اتصال‌ها با ضخامت ۳ میلی‌متر، مقاومت خمشی تا دوران ۰/۲ رادیان و قبل از ایجاد کمانش در لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال فشاری یکسان بوده است. با افزایش بارگذاری در مدل با اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی ۱۰ میلی‌متر، افت شدید مقاومت خمشی مشاهده می‌شود. در مدل با اندازه‌ی لبه‌ی ۳۰ میلی‌متر، کمانش در قطعه‌ی اتصال رخ نداده و تغییرشکل و تنش به جان ستون هدایت شده است. در اتصال‌ها با ضخامت ورق ۳ میلی‌متر، استفاده از اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی ۳۰ میلی‌متری باعث افزایش ۸ درصدی سختی اتصال شده و کنترل محل ایجاد خرابی در قطعه‌ی CCDP را غیرممکن ساخته است. تعیین هندسه‌ی مناسب برای کارکرد بهینه‌ی اتصال CCDP، مستلزم کنترل هم‌زمان تأثیر ضخامت ورق و اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی اتصال است. در صورت استفاده از ورق با ضخامت بالاتر و لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بزرگ‌تر، به‌دلیل سختی بالای اتصال نسبت به سختی تیر و ستون، تغییرشکل‌های بزرگ و کمانش موضعی به تیر و ستون هدایت می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک نوع اتصال نیمه‌گیردار نوین با موقعیت آسیب کنترل‌شده (CCDP) برای قاب‌های فولادی سبک سردنوردشده (CFS) معرفی شده است؛ که براساس آیین‌نامه‌ی Eurocode ۳^[۱۸] در دسته‌ی اتصال‌های نیمه‌گیردار طبقه‌بندی می‌شود. هدف اصلی از توسعه‌ی اتصال CCDP، ایجاد گیرداری نسبی در اتصال و تمرکز خرابی و تسلیم در ناحیه‌ای از پیش تعیین‌شده است، تا از تشکیل مفصل پلاستیک در ستون و بروز کمانش موضعی در تیر ممانعت شود. برای دستیابی به هدف تعیین‌شده، ۲۱ مدل اجزاء محدود با پارامترهای هندسی مختلف در نرم‌افزار آباکوس ایجاد و با داده‌های آزمایشگاهی راستی‌آزمایی شده است. مدل‌سازی اجزاء محدود اتصال‌ها، دقت بالایی در پیش‌بینی رفتار نمونه‌ها داشته و در بیشتر موارد، خطای مدل‌های اجزاء محدود کمتر از ۱۰٪ بوده است.

اتصال جدید CCDP از دو بخش R و P تشکیل شده است. قطعه‌ی P جهت دور کردن کمانش و محل آسیب از بر ستون به اتصال اضافه شده است. قطعه‌ی R، وظیفه‌ی کنترل محل آسیب را بر عهده دارد. رفتار اتصال جدید وابسته به

پارامترهای ضخامت ورق، شیب و با عرض قطعه‌ی R، طول قسمت کنترلی P، و اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال اتصال است. تحلیل پارامتریک اتصال پیشنهادی نشان داده است که 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 قطعه‌ی P از ۲۰ به ۷۰ میلی‌متر می‌تواند مقاومت خمشی را تا ۱۹٪ و سختی اولیه‌ی اتصال را تا ۱۲٪ افزایش دهد. در حالی که حذف قطعه‌ی P مانع از هدایت مفصل پلاستیک به محل از پیش تعیین‌شده می‌شود و احتمال ایجاد مفصل پلاستیک در بر ستون را افزایش می‌دهد. افزایش زاویه‌ی شیب قطعه‌ی R از ۹ به ۱۷ درجه، مقاومت خمشی اتصال را در حدود ۱۳٪ افزایش داده و توزیع تنش مناسب‌تری را در مقطع اتصال ایجاد کرده است. بررسی اثر اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال (L)، مشخص شد که افزایش اندازه از ۱۰ به ۳۰ میلی‌متر، باعث افزایش مقاومت خمشی اتصال تا ۹۰٪ شده است. افزایش اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال در اتصال‌ها با ضخامت ورق بالا، باعث افزایش شدید سختی اتصال می‌شود و رفتار فیوز خمشی اتصال را مختل می‌کند 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 تأمین کرد. به‌طوری که در بیشتر نمونه‌های اتصال پیشنهادی، در دوران بیشینه‌ی ۰/۰۷ رادیان، هیچ نوع کمانش و تغییرشکل ماندگار در ستون یا تیر ثبت نشده است.

اتصال نیمه‌گیردار CCDP با کنترل محل آسیب، بهبود مقاومت خمشی، و سهولت ساخت، راهکاری کارآمد برای استفاده در قاب‌های فولادی سردنوردشده به‌ویژه در نواحی لرزه‌خیز فراهم می‌سازد، که تمرکز آسیب اهمیت ویژه‌ای دارد. اتصال CCDP نه فقط موجب افزایش ایمنی سازه در برابر بارهای جانبی می‌شود، بلکه با توجه به کاهش مصرف مصالح، راه‌حلی اقتصادی نیز محسوب می‌شود. طرح پیشنهادی اخیر، یک رویکرد عملی و مقاوم برای ارتقاء عملکرد سازه‌ای و ایمنی سیستم‌های فولادی سبک تحت تقاضاهای تغییرشکل غیرالاستیک ارائه می‌دهد. این تذکر لازم است که استفاده از اتصال پیشنهادی در کارهای اجرایی نیازمند بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی بیشتر و همچنین ارائه‌ی روش‌های دقیق طراحی است.

منابع - References

1. YE, J., Becque, J., Hajirasouliha, I., Mojtabaei, S. M. and LIM, J. B. P. 2018. Development of optimum cold-formed steel sections for maximum energy dissipation in uniaxial bending. *Engineering Structures*, 161, pp. 55-67. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.070>.
2. Mojtabaei, S. M. Kabir, M. Z. Hajirasouliha, I. M. Kargar. 2018. Analytical and experimental study on the seismic performance of cold-formed steel frames.

- Journal of Constructional Steel Research*, 143, pp.18-31. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.12.013>.
3. Serror, M.H., E.M. Hassan, and S.A. Mourad. 2016. Experimental study on the rotation capacity of cold-formed steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 121, pp.216-228. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.02.005>.
4. James B.P Lim, Gregory J. Hancock, G. Charles Clifton, Cao Hung Pham, 2016. DSM for ultimate

- strength of bolted moment-connections between cold-formed steel channel members. *Journal of Constructional Steel Research*, 117, pp.196-203. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.10.005>.
5. Ye, J., Mojtabaei, S. M., Hajirasouliha, I. 2019. 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>.
6. Ye, J., Mojtabaei, S. M., Hajirasouliha, I. and Pilakoutas, K. 2020. 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>.
7. McCrum, D. P., Simon, J., Grimes, M., Broderick, B. M., Lim, J. B. P. and Wrzesien, A. M. 2019. Experimental cyclic performance of cold-formed steel bolted moment resisting frames. *Engineering Structures*, 181, pp.1-14. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.063>.
8. Hassan, E. M., Serror, M. H. and Mourad, S. A. 2017. Numerical prediction of available rotation capacity of cold-formed steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 128, pp.84-98. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.08.010>.
9. Bagheri Sabbagh, A., Petkovski, M., Pilakoutas, K. and Mirghaderi, R., 2012. Cyclic behaviour of bolted cold-formed steel moment connections, FE modelling frame buildings. *Journal of constructional steel research*, 80, pp.100-108. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.09.010>.
10. Seok, S., Lee, J., Sik Choi, C. and Hwang, H. S., 2022. A practical design of cold-formed steel bolted moment connection: numerical investigation with an improved bolt slip bearing model. *J. Build Engineering*, 62. pp.1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105345>.
11. Papargyriou, I., Mojtabaei, S. M., Hajirasouliha, I., Becque, J. and Pilakoutas, K. 2022. Cold-formed steel beam-to-column bolted connections for seismic applications. *Thin-Walled Structures*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108876>.
12. Senapati, S. and Sangle, K. K. 2022. Nonlinear static analysis of cold-formed steel frame with rigid connections. *Results in Engineering*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100503>.
13. Shahini, M., Sabbagh, A. B., Davidson, P. and Mirghaderi. 2019. Development of cold-formed steel moment-resisting connections with bolting friction-slip mechanism for seismic applications. *Thin-walled structures*, 141, pp. 217-231. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.04.011>.
14. Ghasem Pachideh, Mohammadali Kafi, Majid Gholhaki. 2020. Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater. *Structures*, 28, pp. 467-481. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.007>.
15. Ghasem Pachideh, Majid Gholhaki and Mohammadali Kafi. 2020. Experimental and Numerical Evaluation of an Innovative Diamond-Scheme Bracing System Equipped with a Yielding Damper, *Steel and Composite Structures*, 36(2), pp. 197-211. <https://doi.org/10.12989/scs.2020.36.2.197>.
16. 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. 2026. *Journal of Constructional Steel Research*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109988>.
17. AISI-S100-24. 2024. North American specification for the design of cold-formed steel structural members. USA, Chicago. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.08.010>.
18. Eurocode 3. 2023. Design of Steel Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings.
19. M.R. Farajpour, J. Saburi., Y. Hosseinzadeh. 2026. DSM-based design framework and monotonic behavior of a novel semi-rigid flexural fuse moment connection for cold-formed steel frames. *Journal of Structures*, submitted.