

Research Paper

Assessment of Local Web Instability in Double-IPE Built-Up Column Subjected to Double Compression Loading

Nima Fakhhar Hasani¹, Yousef Hosseinzadeh²

1- Ph.D. Student, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Ira

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



Citation: Fakhharhasani, N., and Hosseinzadeh, Y. (2026), "Evaluation of the local buckling of the web of built-up columns composed of double IPE sections under biaxial compressive loading", *Journal of Structure and Steel*, 20(54), e247135.

doi [10.22034/jss.2026.580209.1033](https://doi.org/10.22034/jss.2026.580209.1033)

Article info:

Article History:

Received: 9 November 2025

Revised: 18 January 2026

Accepted: 20 January 2026

Published: 4 April 2026

Keywords:

IPE Built-up Column
Concentrated Load
Local Instability
Web Compression Buckling
Continuity Plate

ABSTRACT

Background: The stability of the panel zone plays a critical role in the performance of steel moment-resisting beam-to-column connections. Continuity plates are commonly used to prevent local instability in the column web and flanges; however, existing design provisions are primarily based on studies of wide-flange sections, and limited information is available regarding the behavior of double-IPE built-up columns under concentrated compression. This study investigates the local load-bearing capacity and instability mechanisms of double-IPE built-up column webs subjected to double compression loading.

Methods: A finite element model was developed to simulate local instability under concentrated load, and its accuracy was validated using available experimental data. The static Riks analysis method was employed to examine buckling behavior, incorporating initial imperfections equal to 0.001% of the first buckling mode shape. Subsequently, the behavior of 15 double-IPE built-up column specimens under double compression loading conditions was examined.

Results: The web and continuity plate capacities were evaluated using the AISC 360-22 provisions. The findings indicate that the actual web compression buckling capacity ranges from 132% to 189% of the theoretical predictions for columns without continuity plates, while the effective load-bearing capacity of continuity plates ranges from 91% to 147% of the theoretical values. Finally, recommendations were developed for determining the capacities of the web and continuity plates in built-up IPE columns.

Conclusion: Current design code criteria are overly conservative in predicting the local capacity of double sections. The proposed coefficients and relations proposed in this study enable a more accurate estimation of the actual capacity of columns.

* Corresponding Author's E-mail: hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir



Copyright for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Iranian Society of Steel Structures Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Introduction

The stability of the panel zone plays a critical role in the overall performance of steel moment-resisting beam-to-column connections under lateral and gravity loads. During severe loading events, highly concentrated forces are transferred from the beam flanges directly into the column, generating extreme localized stress. Continuity plates are commonly used within the connection assembly to mitigate these stress concentrations and successfully prevent local instability mechanisms, such as buckling or yielding, in the column web and flanges. However, a major limitation in current structural engineering practice is that existing design provisions, based on the AISC 360-22 specifications, are based on comprehensive historical studies calibrated for standard wide-flange (H-shaped) sections. Consequently, very limited technical information, experimental data, and design criteria are available regarding the structural behavior, load-bearing boundaries, and localized failure mechanisms of double-IPE built-up columns under concentrated loads. This lack of information often forces structural engineers to rely on overly conservative assumptions, leading to inefficient and non-economical designs. This study directly addresses this research gap by conducting a rigorous investigation into the local load-bearing capacity and instability mechanisms of double-IPE built-up column webs subjected to double compression loading conditions. By systematically evaluating the structural limits of these paired configurations, this paper identifies the inherent safety margins of current code criteria and proposes reliable alternatives for structural design.

Methods

Finite element (FE) model of the columns was developed using ABAQUS 2020 software. To verify the accuracy of the FE analysis, the numerical results were validated against the experimental and numerical data. The column specimens had a constant length of 1.2 m, and the loading

plates matched the column flange width with a thickness of 20 mm. Steel material properties were defined as isotropic with multi-linear true stress-strain curves. The column material is ASTM A992 steel with a yield stress of 345 MPa, an ultimate stress of 530 MPa, an elastic modulus of 2×10^5 MPa, and a Poisson's ratio of 0.3, while the loading plates were modeled as elastic. Geometrically, the continuity plates were extended into the column cross-section by one mesh thickness, utilizing the "Embedded Region" constraint to ensure full rigidity at the joints, while "Tie" constraints connected the column to the loading plates. Column and loading plates were discretized using three-dimensional eight-node solid elements with reduced integration (C3D8R), whereas the continuity plates were simulated using four-node shell elements (S4). Structural stability and post-buckling behavior were evaluated via the Static Riks analysis method considering geometric nonlinearity. The initial geometric imperfection, set to 0.001% of the first buckling mode shape, was applied to account for manufacturing tolerances and buckling initiation. Under displacement control loading applied to the top surface, the loading plates were restricted to move only perpendicular to the column flanges, with the failure criterion defined by reaching the ultimate capacity. Finally, a three-step mesh convergence study showed that mesh density near the load application zone and the web-to-flange root is critical; thus, a fine 1 cm mesh was applied within 15 cm of the loading zone, and a 5 cm mesh elsewhere, while the web and flange cross-sections were divided into 3 and 4 elements, respectively.

Results

The ultimate local load-bearing capacities of the column webs and continuity plates extracted from the parametric finite element analyses were evaluated and compared against the theoretical predictions derived from the AISC 360-22 specifications. The comparative findings indicate a level of conservatism embedded within the existing design equations when applied to double built-up column. Specifically, for the column specimens configured completely without

continuity plates, the actual web compression buckling capacity obtained via the FE simulations ranges from 132% to 189% of the theoretical predictions proposed by the design code. This substantial discrepancy clearly highlights that standard wide-flange formulation significantly underestimate the web buckling capacity of double-IPE sections. To resolve this inefficiency, a modified nominal resistance relation for web capacity was formulated based on the numerical data. Furthermore, the evaluation of reinforced specimens demonstrated that the effective load bearing capacity of the continuity plates under double compression loading ranges from 91% to 147% of the theoretical values. To capture this variance, a quadratic modification factor (C) was developed as a function of the continuity plate slenderness ratio. These findings indicate that while the current code criteria remain safe, their lack of geometric specificity for double IPE sections penalizes design efficiency.

Conclusion

In conclusion, this comprehensive numerical investigation confirms that current design specifications, are conservative in predicting the local capacity and buckling resistance of double-section built-up columns under concentrated forces. The primary technical contribution of this research is the successful development of verified calibration coefficients and modified analytical relations tailored specifically for double IPE profiles. By accurately estimating column capacity, the proposed equations optimize the design of moment connections in steel frames.

Declaration of Generative AI and AI-assisted Technologies in the Writing Process

The authors declare that no generative AI or AI-assisted technologies were used in the writing, editing, or preparation of this manuscript. The authors take full responsibility for the content and accuracy of the information presented herein.

Ethical Consideration

Compliance with ethical guidelines

The author declares that this study is an original research work. All sources, data, software, and methods used are properly cited and referenced. No data fabrication or falsification has occurred, and the research adheres to all academic integrity guidelines and ethical publishing practices.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship and publication of this article.

Author's contributions

First Author: Conceptualization, investigation, methodology, analysis, writing original draft preparation.

Second Author: Investigation, design and supervision, writing, review and editing.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

ارزیابی ناپایداری موضعی جان ستون ساخته شده از جفت نیمرخ IPE تحت اثر بارگذاری فشاری دوطرفه

نیما فخار حسنی^{۱*}، یوسف حسین زاده^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران



Citation: Fakhar hasani, N., and Hosseinzadeh, Y. (2026), "Evaluation of the local buckling of the web of built-up columns composed of double IPE sections under biaxial compressive loading", Journal of Structure and Steel, 20(54), e247135.

doi 10.22034/jss.2026.580209.1033

چکیده

زمینه پژوهش: پایداری چشمه اتصال، از عوامل تعیین کننده عملکرد اتصالات گیردار فولادی است. برای جلوگیری از ناپایداری موضعی در جان و بال ستون از ورق های پیوستگی استفاده می شود. در این مقاله، ظرفیت موضعی ستون های ساخته شده از نیمرخ های IPE تحت اثر بارگذاری فشار دوطرفه بررسی می شود. ضوابط موجود برای تعیین ظرفیت حالت حدی کمانش فشاری جان و ورق های پیوستگی، بر اساس نتایج تحقیق بر روی مقاطع بال پهن توسعه یافته اند و اطلاعات محدودی در مورد رفتار مقاطع جفت IPE تحت اثر بارهای متمرکز وجود دارد.

روش پژوهش: در ابتدا مدل اجزای محدود برای بررسی پدیده ناپایداری موضعی ایجاد و دقت آن با استفاده از داده های آزمایشگاهی ارزیابی شد. ستون های جفت IPE به همراه ورق های پیوستگی در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شدند. برای بررسی رفتار کمانش در نمونه ها، از تحلیل استاتیکی Riks با اعمال نقص اولیه معادل ۰/۰۰۱٪ شکل مود اول کمانش استفاده شد. برای ستون و صفحات بارگذاری از المان C3D8R و برای ورق های پیوستگی از المان پوسته ای S4 در شبیه سازی استفاده شد. برای مدل سازی اتصال جوش، ورق های پیوستگی نیز با قید Embedded Region مدل شد. در ادامه، رفتار ۱۵ نمونه ستون جفت IPE تحت اثر بارگذاری متمرکز فشار دوطرفه بررسی شد.

یافته ها: ظرفیت جان و ورق های پیوستگی ستون ها با استفاده از ضوابط آیین نامه AISC 360-22 تعیین و با نتایج تحلیل اجزای محدود مقایسه شد. نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود نشان می دهد ظرفیت مؤثر کمانش فشاری جان در ستون های بدون ورق پیوستگی، بین ۱۳۲٪ تا ۱۸۹٪ مقادیر نظری آیین نامه است. همچنین ظرفیت مؤثر ورق های پیوستگی تحت اثر فشار دوطرفه در بازه ۹۱٪ تا ۱۴۷٪ مقادیر نظری قرار دارد. بر این اساس، موارد اصلاحی و پیشنهاد های مربوطه برای تعیین ظرفیت جان و ورق های پیوستگی در ستون های جفت IPE ارائه شد.

نتیجه گیری: نتایج این پژوهش بیانگر آن است که روابط آیین نامه ای در پیش بینی مقاومت موضعی مقاطع جفت، محافظه کارانه عمل می کنند. با استفاده از ضرایب و روابط پیشنهادی این پژوهش، می توان ظرفیت واقعی مقاطع را با دقت بالاتری تخمین زد. کاربرد مهندسی نتایج این تحقیق، بهینه سازی طراحی اتصالات گیردار است.

اطلاعات مقاله:

سابقه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۸ آبان ماه ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۲۸ دی ماه ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۳۰ دی ماه ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۱۵ فروردین ماه ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

ستون جفت IPE

بار متمرکز

ناپایداری موضعی

کمانش فشاری جان

ورق پیوستگی

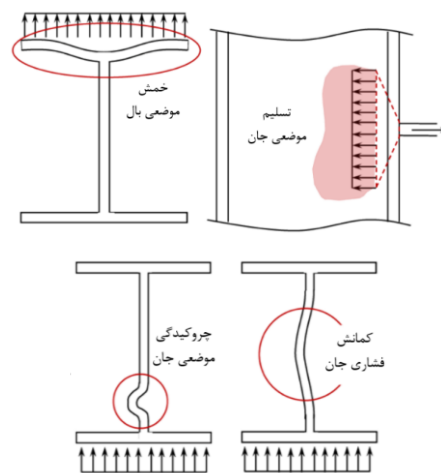
* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir

حقوق نشر این مقاله برای نویسنده (گان) محفوظ است و حقوق انتشار آن به انتشارات انجمن سازه های فولادی ایران واگذار شده است. محتوای این مقاله تابع قوانین و شرایط مجوز بین المللی Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY-NC 4.0) می باشد. برای اطلاعات بیشتر، لطفاً به وبسایت مربوطه مراجعه فرمایید. <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>



۱- مقدمه

قاب خمشی فولادی از جمله سیستم‌های سازه‌ای برای تحمل بارهای جانبی است. پایداری قاب‌های خمشی به عملکرد مناسب چشمه اتصال تحت اثر بارهای متمرکز بستگی دارد. در صورت ایجاد ناپایداری موضعی در بال و جان ستون، ورق‌های پیوستگی^۱ طراحی و اجرا می‌شوند. بر اساس آیین‌نامه^۲ AISC 360-22 با افزودن ورق‌های پیوستگی می‌توان از وقوع حالت‌های حادی تسلیم موضعی جان^۳، خمش موضعی بال^۴، چروکیدگی موضعی جان^۵ و کمناش فشاری جان^۶ در محل اعمال بار متمرکز جلوگیری نمود [۱]. حالات حادی خرابی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- حالات حادی خرابی ستون تحت اثر بارهای متمرکز [۲]

برای کنترل حالت حادی کمناش فشاری جان در ابتدا تیموشنکو^۶ و گی^۷ رابطه‌ای برای محاسبه نیروی بحرانی کمناش الاستیک ورق با شرایط مرزی مفصلی ارائه نمودند.

در ادامه چن^۸ و اوپنهایم^۹ و نیولین^{۱۰} و چن، مطالعاتی بر روی چندین عضو فولادی تحت فشار دوطرفه انجام دادند تا مقاومت جان ستون‌ها در اتصالات گیردار تیر به ستون را ارزیابی کنند. در نهایت، آن‌ها رابطه ارائه‌شده توسط تیموشنکو و گی^۷ برای کمناش فشاری جان ستون‌ها را با اعمال برخی تغییرات و اعمال شرایط محافظه‌کارانه اصلاح نمودند [۳-۵].

شربورن^{۱۱} و مورتی^{۱۲} شبیه‌سازی‌های کامپیوتری برای بررسی رفتار جان ستون‌های H شکل در اتصالات فولادی را انجام دادند؛ نتایج این بررسی نشان داد که ورق‌های پیوستگی موجب افزایش مقاومت ستون در جهت عمود بر بال ستون می‌شود. آن‌ها نشان دادند که ورق‌های پیوستگی می‌توانند به‌طور میانگین ظرفیت ستون در برابر بارهای متمرکز را تا چهار برابر افزایش دهند [۶].

الگالی^{۱۳} و سالکر^{۱۴} پدیده چروکیدگی موضعی جان در مقاطع فولادی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که قراردادن سخت‌کننده در محل اعمال بار متمرکز می‌تواند از وقوع خرابی‌های موضعی جلوگیری نموده و مقاومت عضو را افزایش دهد [۷].

چن و چن نیز خرابی اتصالات گیردار تیر به ستون با مقطع جعبه‌ای را بررسی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد ورق پیوستگی، از ایجاد کمناش‌های موضعی جلوگیری می‌نماید. با این حال، استفاده از ورق‌های لاغر در ساخت ستون‌های جعبه‌ای موجب گسیختگی و انهدام اتصالات تیر به ستون، به‌ویژه در محل اتصال ورق پیوستگی و بال تیر به ستون می‌شود [۸].

حجار و همکاران، رفتار اتصالات گیردار دارای ورق پیوستگی را مورد آزمایش و مطالعه قرار دادند و با مقایسه ضوابط آیین‌نامه‌ای با نتایج پژوهش خود، پیشنهادهایی در رابطه با جزئیات طراحی ورق‌های پیوستگی ارائه نمودند [۹].

چو^{۱۵} و یونگ^{۱۶} با مطالعه بر روی تأثیر ورق پیوستگی در اتصالات گیردار تیر فولادی به ستون بتنی با روکش فولادی^{۱۷}، دریافتند که استفاده از ورق‌های پیوستگی موجب افزایش مقاومت اتصال و مقاومت برشی بتن می‌شود [۱۰].

ترن^{۱۸} و همکاران با استفاده از مدل‌های عددی، رفتار ورق‌های پیوستگی در قاب‌های خمشی ویژه را بررسی نموده و نتایج تحقیقات خود را با ضوابط مربوط به ورق‌های پیوستگی در آیین‌نامه^۱ AISC 360-22 [۱] مورد مقایسه قرار دادند و در نهایت برای کاهش هزینه‌های طراحی و اجرای ورق پیوستگی، پیشنهادهایی ارائه نمودند [۱۱]؛ نتایج نشان داد که می‌توان از

¹¹ Sherbourne

¹² Murthy

¹³ Elgaaly

¹⁴ Salaker

¹⁵ Chou

¹⁶ Uang

¹⁷ Steel Encased Reinforced Concrete

¹⁸ Tran

¹ Continuity Plates

² Web Local Yielding

³ Local Flange Bending

⁴ Web Local Crippling

⁵ Web Compression Buckling

⁶ Timoshenko

⁷ Gere

⁸ Chen

⁹ Oppenheim

¹⁰ Newlin

جوش گوشه به جای جوش نفوذی در اتصال ورق‌های پیوستگی بهره برد.

سالکر و همکاران تحقیقاتی در مورد چروکیدگی موضعی جان در ستون‌های بال‌پهن دارای سخت‌کننده با ارتفاعی کم‌تر از ارتفاع خالص بین بال‌ها انجام دادند. در این پژوهش، ستون‌ها تحت اثر فشار یک‌طرفه بارگذاری و مورد تحلیل قرار گرفتند. نسبت ظرفیت واقعی ستون‌ها به ظرفیت محاسبه‌شده طبق ضوابط آیین‌نامه، به‌طور میانگین ۱۰۳٪ بوده و بین ۸۲٪ تا ۱۲۳٪ متغیر است [۱۲].

مشایخ و یونگ آزمایش‌هایی تمام‌مقیاس برای ارزیابی رفتار ورق‌های پیوستگی در قاب‌های خمشی فولادی ویژه انجام دادند. بررسی‌ها نشان داد که استفاده از جوش گوشه در اتصال ورق‌های پیوستگی به ستون امکان‌پذیر بوده و نوع جوش بر عملکرد اتصال تأثیرگذار نیست [۱۳].

احمدی و قبادی برای تعیین رفتار ورق‌های پیوستگی شیب‌دار در قاب‌های خمشی فولادی ویژه تحقیقاتی را انجام دادند. هنگامی که تیرهایی با عمق متفاوت به ستون متصل می‌شوند، معمولاً ورق پیوستگی به‌صورت شیب‌دار اجرا می‌شود. نتایج تحقیقات نشان داد که ضوابط موجود برای ورق‌های پیوستگی شیب‌دار در خلاف جهت اطمینان بوده و روابطی برای تعیین مقاومت ورق پیوستگی شیب‌دار پیشنهاد نمودند [۱۴].

نورود^۱ و پرینز^۲ تأثیر خروج از مرکزیت ورق‌های پیوستگی بر عملکرد اتصالات جوشی تیر به ستون را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش خروج از مرکزیت بین بال تیر و ورق پیوستگی، منجر به کاهش ظرفیت ورق پیوستگی می‌شود [۱۵].

کوالکوفسکی^۳ و رودیلا^۴ نیز تحقیقاتی در مورد تأثیر خروج از مرکزیت بر ظرفیت سخت‌کننده‌های عرضی انجام دادند. در این تحقیقات، نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌های اجزای محدود تحت اثر سه نوع بارگذاری فشار یک‌طرفه، فشار دوطرفه و کشش یک‌طرفه قرار گرفتند [۱۶ و ۱۷]. مقایسه ظرفیت ستون‌های دارای سخت‌کننده با مقدار نظری محاسبه‌شده ظرفیت سخت‌کننده‌ها نشان داد که در اکثر موارد، مقدار ظرفیت نظری سخت‌کننده‌ها بیش‌تر بوده و طراحی، غیرمحافظة کارانه است. همچنین رابطه

ارائه‌شده برای حالت حدی کماتش فشاری جان توسط آیین‌نامه AISC 360-22 برای برخی از مقاطع بال‌پهن مناسب نیست [۱].

فخار حسنی و حسین‌زاده، ظرفیت موضعی و ظرفیت ورق‌های پیوستگی در مقاطع جعبه‌ای را تحت اثر بارهای متمرکز بررسی نمودند [۲ و ۱۸]. نتایج تحلیل مدل‌های اجزای محدود نشان داد که ضوابط ارائه‌شده برای حالت حدی کماتش فشاری جان تحت اثر فشار دوطرفه و طراحی ورق‌های پیوستگی تحت اثر فشار یک‌طرفه توسط آیین‌نامه AISC 360-22 برای مقاطع جعبه‌ای مناسب نیست [۱].

ضوابط ارائه‌شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 برای کنترل پایداری موضعی و طراحی ورق‌های پیوستگی بر اساس نتایج تحقیق بر روی مقاطع اشکل توسعه یافته است و در مورد مقاطع دیگر با پیکربندی متفاوت از جمله مقاطع جفت، تحقیقات محدودی انجام شده است؛ در نتیجه انجام پژوهشی در این زمینه ضروری به‌نظر می‌رسد [۱].

هدف از این تحقیق، ارزیابی دقت ضوابط ارائه‌شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 در ستون‌های ساخته‌شده از دو نیم‌رخ IPE تحت اثر فشار دوطرفه است [۱]. این نوع ستون‌ها از اتصال دو مقطع اشکل به یکدیگر ساخته می‌شوند و در این پژوهش، «ستون‌های جفت IPE» نامیده می‌شوند. در این روش، عمدتاً به‌دلیل مشکلات اجرایی، ورق‌های پیوستگی در داخل ستون اجرا نشده و فقط در وجه بیرونی ستون‌ها ورق پیوستگی قرار داده می‌شود. با توجه به اجرای ناقص ورق پیوستگی در محل اعمال بار متمرکز، عملکرد موضعی ستون در برابر بار وارده در هاله‌ای از ابهام قرار دارد. در این تحقیق نیز ورق‌های پیوستگی با توجه به مسائل اجرایی در داخل ستون مدل‌سازی نشدند.

در این تحقیق ابتدا مدل‌های اجزای محدود برای بررسی رفتار ستون‌های جفت IPE تحت اثر بار متمرکز ایجاد و دقت آن با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ارزیابی شد؛ سپس، رفتار ستون‌های جفت IPE با و بدون ورق پیوستگی تحت اثر بارگذاری یک‌جفت نیروی فشاری در جهت مخالف هم تعریف شده در آیین‌نامه AISC 360-22 بررسی شد [۱]. در این پژوهش این نوع بارگذاری به اختصار فشار دوطرفه نامیده می‌شود. در ادامه نوع خرابی و ظرفیت مدل‌های عددی با ضوابط ارائه‌شده توسط

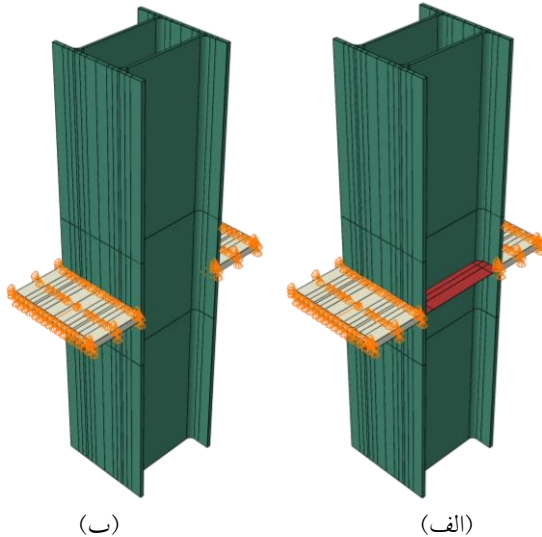
¹ Norwood

² Prinz

³ Kowalkowski

⁴ Rodilla

اجزای محدود، از داده‌های آزمایش و نتایج مدل‌سازی عددی رودیلا و کوالکوفسکی استفاده شد [۱۶ و ۱۷]. پیکربندی ستون‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. طول ستون‌ها به‌عنوان یک متغیر ثابت برابر ۱/۲ متر در نظر گرفته شد. همچنین عرض ورق‌های بارگذاری برابر با عرض بال ستون و ضخامت آن ۲۰ میلی‌متر تعیین شد.



شکل ۲- پیکربندی مدل اجزای محدود ستون‌ها؛ (الف) ستون دارای ورق پیوستگی، (ب) ستون بدون ورق پیوستگی

مصالص ستون و اجزای آن به‌صورت ایزوتروپیک^۱ و روابط تنش-کرنش مصالح به‌صورت نمودارهای چندخطی معرفی شدند. منحنی تنش-کرنش مهندسی ارائه‌شده توسط رودیلا و کوالکوفسکی برای مدل‌های اجزای محدود، با استفاده از روابط پیشنهادی برونو^۲ و همکاران به منحنی تنش-کرنش حقیقی نشان داده‌شده در شکل (۳) تبدیل شد [۱۷ و ۲۰]. مصالح فولادی از رده ASTM A992 با تنش تسلیم ۳۴۵ و تنش نهایی ۵۳۰ مگاپاسکال است. همچنین مدول الاستیسیته ۲۰۰×۱۰^۹ مگاپاسکال و ضریب پواسون مصالح ۰/۳ در نظر گرفته شده است. مصالح صفحات بارگذاری به‌صورت الاستیک معرفی شد.

آیین‌نامه مورد مقایسه قرار گرفت و در انتها نتایج و پیشنهادهای مربوطه شرح داده شده است.

۱-۱- مبانی نظری تحقیق

در اتصالات گیردار تیر به ستون فولادی، نیروهای متمرکز فشاری قابل توجهی از بال تیر به ستون منتقل می‌شود. ضوابط طراحی در آیین‌نامه AISC 360-22، به‌منظور تأمین پایداری بال و جان ستون‌ها در تمام حالت‌های حدی خرابی محتمل برای مقاطع اشکل ارائه شده است [۱]. بر این اساس، برای حالت فشار دوطرفه، ظرفیت ستون در برابر نیروهای فشاری متمرکز باید برای حالت حدی کماتش فشاری جان با استفاده از رابطه (۱) کنترل شود. رابطه ارائه‌شده در این بخش، تنها برای حالت بررسی پایداری در فاصله زیاد از انتهای ستون است. همچنین مقادیر ارائه‌شده توسط رابطه (۱) برای مقاطع دارای چند جان مانند مقاطع جعبه‌ای و جفت IPE، در تعداد جان ستون ضرب می‌شود.

$$R_n = \frac{24t_w^3 \sqrt{E F_{yw}}}{h} \quad (1)$$

که t_w ضخامت جان، F_{yw} تنش تسلیم جان، E مدول الاستیسیته فولاد، h ارتفاع آزاد جان و R_n مقاومت اسمی جان در برابر کماتش فشاری است.

در صورت کماتش جان ستون، بر اساس آیین‌نامه AISC 360-22 نیاز به تعبیه ورق‌های پیوستگی (سخت‌کننده‌های عرضی) در مقابل نیروی متمرکز فشاری است [۱]. ورق‌های پیوستگی باید به‌طور متقارن و تمام‌عمق تعبیه شوند و به هر دو بال و نیز به جان عضو جوش شوند. ورق‌های پیوستگی باید به‌صورت یک ستون فرضی در برابر کل نیروی محوری فشاری طراحی شوند. ارتفاع مؤثر ستون فرضی برابر با ۰/۷۵ ارتفاع آزاد جان در فاصله بین دوابل در نظر گرفته می‌شود. مقطع ستون فرضی عبارت است از مقطع جفت ورق پیوستگی به‌اضافه نواری از جان که پهنای آن برای ورق‌های پیوستگی میانی معادل ۲۵ برابر ضخامت جان ستون در نظر گرفته می‌شود.

۲- روش تحقیق

۱-۲- مدل اجزای محدود

مدل‌های اجزای محدود ستون‌ها، در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS 2020 ایجاد شده‌اند [۱۹]. برای ارزیابی صحت تحلیل

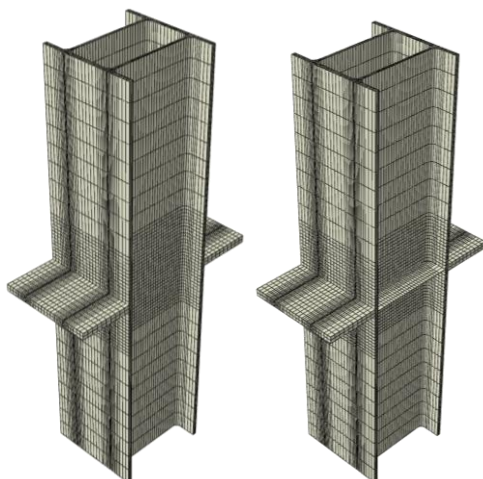
^۱ Isotropic
^۲ Bruno

شد. همچنین در مقطع عرضی ضخامت جان ستون به سه المان و بال ستون به چهار المان مش تقسیم شد که با نزدیک تر شدن به ریشه بال، ریزتر می شوند.

جدول ۱- نتایج مربوط به بررسی همگرایی مش ها در مدل

نام نمونه	ظرفیت نهایی (kN)	تفاوت (%)
HAM 1	128.2	-
HAM 0.5	703.3	548.6
HAM 0.3	769.4	9.4
FINAL MESH	747.8	2.9

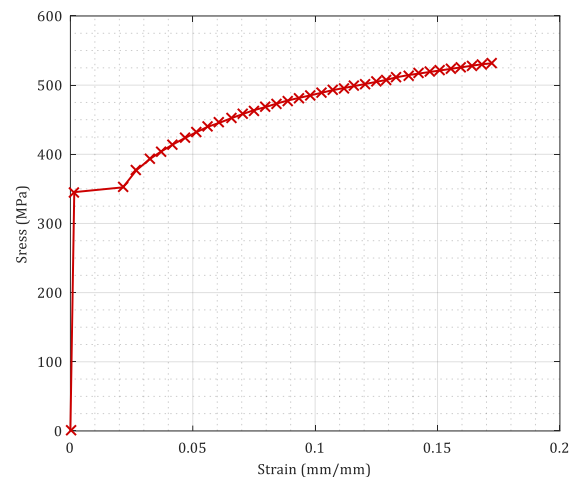
آرایش مش بندی ورق های پیوستگی و ورق های بارگذاری نیز بر اساس مش بندی ستون تعیین شد. معیار خرابی نمونه های تحت اثر فشار، رسیدن به حداکثر ظرفیت، تعیین شد.



شکل ۴- مش بندی مدل اجزای محدود ستون ها

۲-۲- صحت سنجی مدل اجزای محدود

با تحلیل اجزای محدود، رفتار نمونه ستون های دارای سخت کننده و بدون سخت کننده تحت اثر بار متمرکز مرجع [۱۷ و ۲۱] تعیین شد. حداکثر خطای مدل های اجزای محدود در مقایسه با داده های آزمایشگاهی، در جدول (۲) نشان داده شده است. با توجه به مقادیر جدول (۲)، مدل اجزای محدود ایجاد شده دارای دقت مناسب برای استفاده در مطالعات پارامتریک^۱ است. نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از تحلیل دو نمونه از مدل های اجزای محدود و آزمایش نیز در شکل (۵) نشان داده شده است. در نمودارهای نیرو-جابجایی، نمودار مربوط به آزمایش ها به سمت چپ انتقال یافت تا اثر لقی اولیه جک حذف شود.



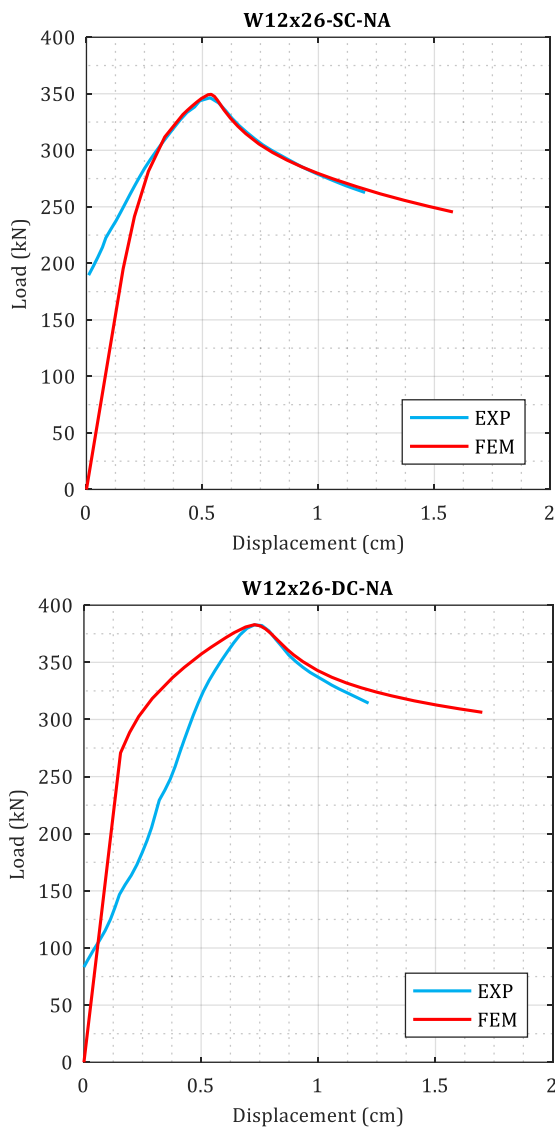
شکل ۳- نمودار تنش-کرنش مصالح فولادی

ورق های پیوستگی به اندازه ضخامت یک مش، در محل قرارگیری خود، بزرگ تر شبیه سازی شده و وارد مقطع ستون می شوند. برای اتصال بین ورق های پیوستگی و ستون، از گزینه Embedded Region استفاده شد تا گیرداری لازم تأمین شود [۱۷]. برای اتصال ستون و صفحه بارگذاری، از گزینه tie استفاده شد. ستون و صفحات بارگذاری با المان های مکعبی شش وجهی از نوع C3D8R و ورق های پیوستگی با المان های Shell از نوع S4، شبیه سازی شدند. برای آنالیز ستون ها از تحلیل Static Riks با لحاظ نمودن رفتار غیرخطی هندسی، استفاده شد. برای آغاز کماتش و در نظر گرفتن خطای ساخت، نقص هندسی نیز در مدل سازی ستون ها اعمال شد. نقص هندسی، به صورت درصدی از مود اول کماتش حاصل از تحلیل کماتش به مدل اعمال می شود. مقدار مناسب نقص هندسی ۰.۰۰۱٪ برای ستون ها تعیین شد [۱۷].

برای شبیه سازی شرایط اتصالات گیردار، صفحات بارگذاری فقط قادر به حرکت در جهت عمود به بال ستون هستند. بارگذاری نیز به صورت جابه جایی-کنترل بوده و با اعمال یک جابه جایی روی سطح فوقانی صفحات بارگذاری به ستون فولادی اعمال می شود. اندازه مناسب مش بر اساس تحلیل حساسیت و مقایسه نتایج با الگوی مش و داده های آزمایش مرجع به دست آمد [۱۷].

تحلیل همگرایی مش در سه مرحله انجام شد که نتایج مربوط به آن، در جدول (۱) نشان داده شده است. در مرحله سوم همگرایی، نتایج با مرحله قبل کم تر از ۱۰٪ اختلاف دارد اما استفاده از الگوی مرحله سوم همگرایی در نمونه ها زمان بر بوده و نیاز به سخت افزار قوی دارد. بررسی ها نشان داد که تعداد مش ها در نزدیک محل اعمال بار و محل ریشه بال ستون ها، تعیین کننده است. الگوی مش ستون ها در شکل (۴) نشان داده شده است. در طول ستون ها تا فاصله ۱۵ سانتی متری از هر دو سمت محل اعمال بار، اندازه المان مش، یک سانتی متر و در فاصله ای دورتر از آن، پنج سانتی متر تعیین

¹ Parametric



شکل ۵- نمودار نیرو-جابجایی مدل‌های اجزای محدود و داده‌های آزمایش [۲۱]

جدول ۲- مقایسه نتایج تحلیل عددی با داده‌های آزمایش [۲۱]

نام نمونه	ظرفیت نهایی (kN)		تفاوت (%)
	Exp.data	FEM	
W12x26-SC-E0	659.4	706.4	7.12
W12x26-SC-NA	346.5	349.4	0.83
W12x26-DC-E0	981.6	947.4	3.61
W12x26-DC-NA	382.8	382.9	0.02

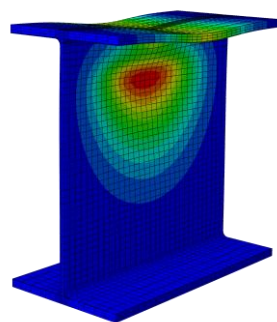
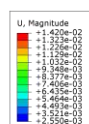
در شکل (۶)، توزیع تغییرشکل مدل اجزای محدود این پژوهش به همراه سازوکار خرابی و تغییرشکل نمونه آزمایش مقایسه شده است. خرابی ستون در هر دو حالت، در اثر چروکیدگی موضعی جان ستون تحت اثر فشار یک‌طرفه ایجاد شده است. با توجه به شکل (۶)، تمرکز کرنش در محل اعمال بار متمرکز به ستون ایجاد شده و در نواحی دورتر، تغییرشکل‌های ناشی از بار وارده کاهش می‌یابد.

۳- مطالعه پارامتریک

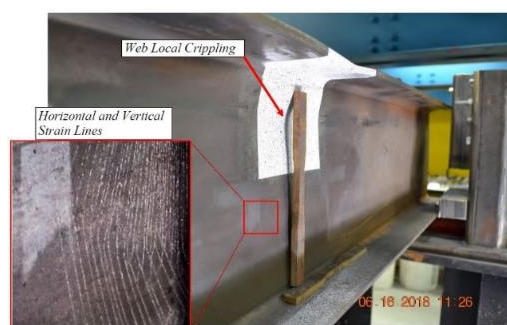
ظرفیت جان و ورق‌های پیوستگی در ستون‌های جفت IPE با استفاده از مطالعه پارامتریک ارزیابی شده است. نام‌گذاری مدل‌ها بر اساس مشخصات مقطع IPE که از آن ساخته شده‌اند، می‌باشد. همچنین در ستون‌های دارای ورق پیوستگی، ضخامت ورق پیوستگی با عدد بعد از حرف t برحسب میلی‌متر مشخص شده است. متغیرهای تحقیق شامل ابعاد مقطع ستون و ورق پیوستگی هستند. نمونه‌های مدل‌سازی شده برای مطالعه پارامتریک در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳- نمونه‌های مطالعه پارامتریک

نام‌گذاری نمونه‌ها		
D-IPE180	C-IPE180-t10	C-IPE180-t15
D-IPE240	C-IPE240-t10	C-IPE240-t15
D-IPE270	C-IPE270-t10	C-IPE270-t15
D-IPE300	C-IPE300-t10	C-IPE300-t20
D-IPE360	C-IPE360-t10	C-IPE360-t20



(ب)



(الف)

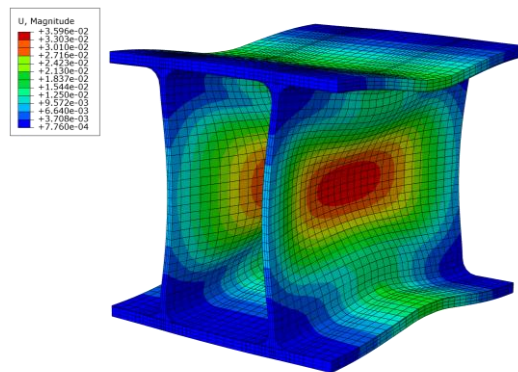
شکل ۶- چروکیدگی موضعی جان نمونه W12x26 تحت اثر فشار؛ (الف) سازوکار خرابی ستون [۲۱]،

(ب) توزیع جابه‌جایی حاصل از تحلیل اجزای محدود

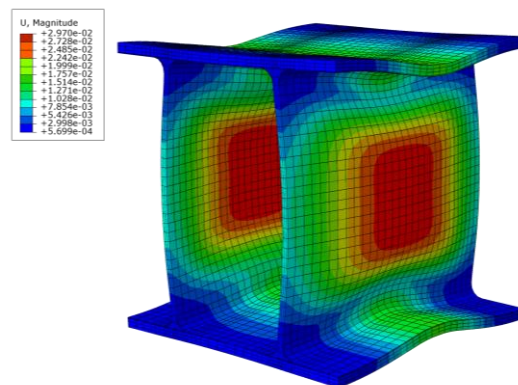
۳-۱- بررسی رفتار ستون‌های جفت IPE تحت اثر فشار

دوطرفه بدون ورق پیوستگی

بر اساس آیین‌نامه AISC 360-22 در طراحی برای نیروهای متمرکز، حالت حدی کماتش فشاری جان تحت اثر فشار دوطرفه برای طراحی موضعی، در نظر گرفته می‌شود [۱]. در تمام ستون‌های بدون ورق پیوستگی نیز کماتش فشاری جان حاکم بر خرابی ستون‌ها تعیین شد. کماتش فشاری جان ستون‌ها در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. کماتش در ستون‌های جفت IPE به صورت تابع نیم‌سینوسی مشاهده شد.



شکل ۷- حالت حدی کماتش فشاری جان در نمونه D-IPE240



شکل ۸- حالت حدی کماتش فشاری جان در نمونه D-IPE300

جدول (۴)، نتایج مربوط به تحلیل ظرفیت تمام ستون‌های جفت IPE بدون ورق پیوستگی را تحت اثر فشار دوطرفه (PFEM) نشان می‌دهد. در این جدول ظرفیت اسمی حالت حدی کماتش فشاری جان ($2 \times R_{n, AISC}$) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه و به همراه نسبت ظرفیت اسمی به ظرفیت واقعی حاصل از تحلیل اجزای محدود نشان داده شده است. با توجه به مقادیر جدول (۴)، ظرفیت اسمی ارائه شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 برای تمام ستون‌ها محافظه کارانه و غیراقتصادی است [۱].

جدول ۴- مقایسه ظرفیت ستون‌ها تحت اثر فشار دوطرفه با رابطه ارائه شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 [۱]

نسبت	$2 \times R_{n, AISC}$ (kN)	P _{FEM} (kN)	نام نمونه
1.32	406.57	538.42	D-IPE180
1.49	500.14	747.84	D-IPE240
1.68	523.42	882.20	D-IPE270
1.75	575.43	1007.00	D-IPE300
1.89	685.05	1294.41	D-IPE360

پیشنهاد می‌شود برای محاسبه ظرفیت جان ستون‌های جفت IPE از رابطه (۲) استفاده شود. تفاوت رابطه (۲) با رابطه (۱) تنها در ضریب توان متغیر ضخامت جان است. بر اساس نتایج جدول (۵)، این رابطه با حداکثر خطایی در حدود ۸ درصد به صورت محافظه کارانه، قادر به پیش‌بینی ظرفیت جان ستون‌های مدل‌سازی شده است. به منظور تعیین رابطه دقیق‌تر برای حالت حدی کماتش فشاری جان در ستون‌های جفت IPE، باید آزمایش‌های تجربی بیشتری انجام شود.

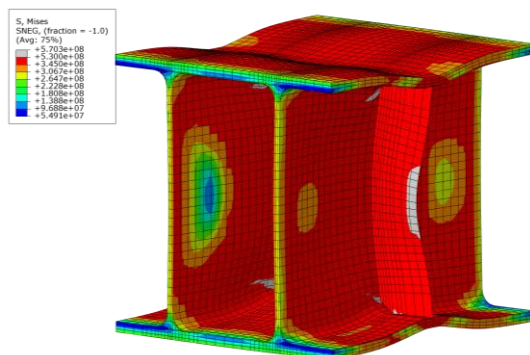
$$R_{n, modified} = \frac{24t_w^{3.6} \sqrt{E F_{yw}}}{h} \quad (2)$$

جدول ۵- مقایسه ظرفیت ستون‌ها تحت اثر فشار دوطرفه با رابطه ویرایش شده آیین‌نامه AISC 360-22 [۱]

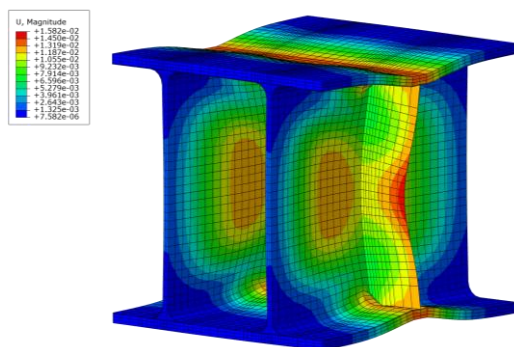
نسبت	$R_{n, modified}$ (kN)	P _{FEM} (kN)	نام نمونه
0.97	552.94	538.42	D-IPE180
1.00	747.29	747.84	D-IPE240
1.08	811.99	882.20	D-IPE270
1.08	932.64	1007.00	D-IPE300
1.08	1192.73	1294.41	D-IPE360

نمودار نیرو-جابجایی ستون‌ها بدون ورق پیوستگی، در شکل (۹) نشان داده شده است. در تمام نمونه‌ها رفتاری یکسان مشاهده شد. در ابتدا تسلیم جان‌های ستون از محل اعمال بار گسترش یافته و با ادامه رفتار غیرخطی و افزایش تغییرشکل‌ها، در نهایت با کماتش فشاری جان به طور ناگهانی مقاومت ستون کاهش می‌یابد.

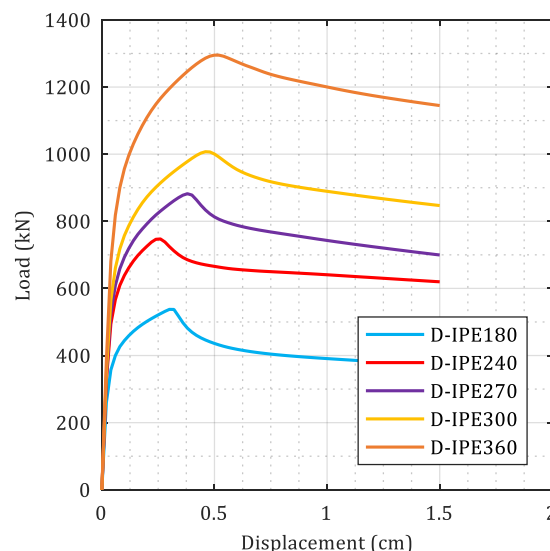
افزایش لاغری ورق‌های پیوستگی در ستون‌های با ابعاد بزرگ‌تر، مقدار نظری ارائه‌شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 بیش‌تر از ظرفیت واقعی ستون بوده و غیرمحافظة‌کارانه است [۱]. همچنین مشکلات ناشی از لاغری ورق‌های پیوستگی در ستون‌های مدل‌سازی‌شده این پژوهش مشاهده نشد [۱۸].



شکل ۱۰- کماتش ورق‌های پیوستگی در نمونه C-IPE270-t15



شکل ۱۱- کماتش ورق‌های پیوستگی در نمونه C-IPE270-t15



شکل ۹- نمودار نیرو-جاب‌جایی ستون‌های بدون ورق پیوستگی

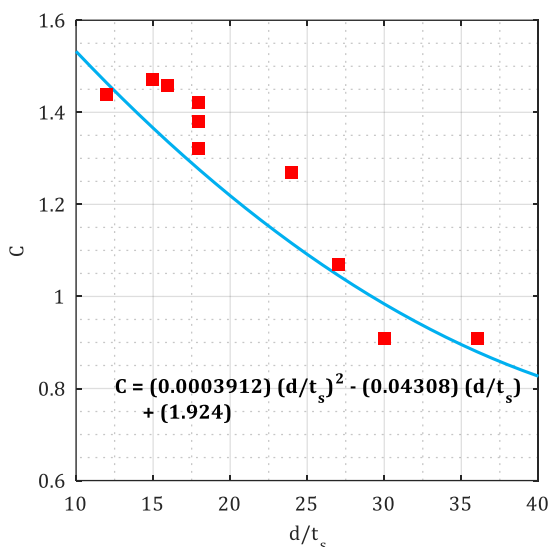
۲-۳- بررسی رفتار ستون‌های جفت IPE تحت اثر فشار دوطرفه دارای ورق پیوستگی

ظرفیت ورق‌های پیوستگی، در این بخش بررسی می‌شود. در تمام ستون‌ها، کماتش ورق پیوستگی و جان ستون، حالت حاکم بر خرابی است. تنش و تغییرشکل نمونه C-IPE270-t15 در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. ورق‌های پیوستگی علاوه بر مقاومت در برابر بار وارده، به‌عنوان مهارجانبی جان‌های ستون نیز عمل کرده و موجب افزایش ظرفیت ستون می‌شوند. تمام نتایج مربوط به بارگذاری و تحلیل ستون‌ها در جدول (۶) ارائه شده است. ظرفیت نظری ورق‌های پیوستگی بر اساس ضوابط آیین‌نامه AISC 360-22 که برای مقاطع I شکل ارائه شده است، با در نظر گرفتن ضخامت هر دو جان محاسبه شده و ظرفیت مؤثر حاصل از اختلاف نتایج تحلیل ستون‌های با ورق پیوستگی و بدون ورق پیوستگی هم در جدول (۶) گنجانده شده است [۱]. با توجه به نتایج جدول (۶)، ضوابط آیین‌نامه برای طراحی ورق‌های پیوستگی برای اکثر ستون‌ها محافظه‌کارانه است؛ اما با

جدول ۶- مقایسه ظرفیت نظری با ظرفیت مؤثر ورق‌های پیوستگی تحت اثر نیروهای متمرکز فشاری

نسبت ظرفیت مؤثر به ظرفیت نظری	ظرفیت نظری ورق‌های پیوستگی (kN)	ظرفیت مؤثر ورق‌های پیوستگی (kN)	P_{FEM} (kN)	ضخامت ورق پیوستگی (mm)	نام نمونه
1.44	534.92	768.48	1306.90	15	D-IPE180
1.32	387.09	509.45	1047.87	10	
-	-	-	538.42	NA	
1.46	695.86	1013.24	1761.08	15	D-IPE240
1.27	499.56	633.27	1381.11	10	
-	-	-	747.84	NA	
1.38	778.32	1077.63	1959.83	15	D-IPE270
1.07	556.83	594.51	1476.71	10	
-	-	-	882.20	NA	
1.47	1108.48	1626.19	2633.19	20	D-IPE300
0.91	615.48	557.45	1564.45	10	
-	-	-	1007.00	NA	
1.42	1255.80	1784.19	3078.60	20	D-IPE360
0.91	696.9	631.7	1926.11	10	
-	-	-	1294.41	NA	

به‌دست‌آمده از تحلیل مدل‌های عددی، در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



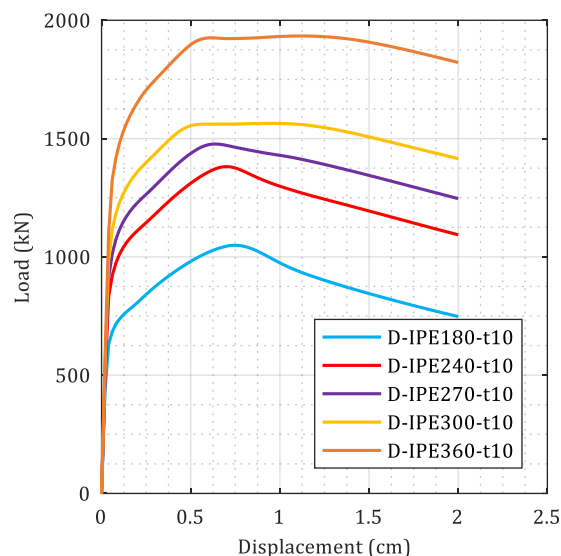
شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. در تمام نمونه‌ها رفتاری یکسان مشاهده شد. تغییر شکل ستون‌های دارای ورق پیوستگی نسبت به حالت بدون ورق پیوستگی بیش‌تر بوده و کاهش مقاومت در آن‌ها ناگهانی نیست.

با توجه به نتایج جدول (۶) به‌منظور افزایش بهره‌وری برای مقاصد طراحی، پیشنهاد می‌شود ضریب C (رابطه (۳)) به مقدار نظری ظرفیت ورق‌های پیوستگی اضافه شود تا سازگاری مناسبی بین ظرفیت واقعی و ظرفیت نظری ایجاد شود.

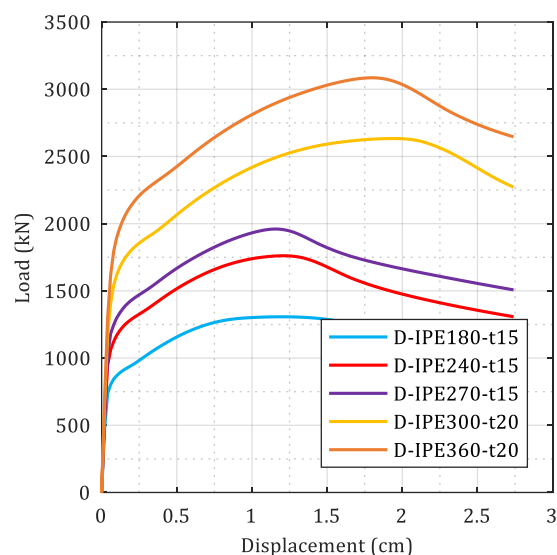
$$C = 0.0003912\left(\frac{d}{t_s}\right)^2 - 0.04308\left(\frac{d}{t_s}\right) + 1.924 \quad (3)$$

که $\left(\frac{d}{t_s}\right)$ نسبت ارتفاع ستون به ضخامت ورق پیوستگی است. رابطه (۳) یک معادله درجه دو به‌دست‌آمده از برازش داده‌های کران پایین پژوهش است. ضریب تبیین (R^2) رابطه (۳)، برابر با ۰/۹۵۹ است. ضریب C به‌صورت محافظه‌کارانه برای اکثر ستون‌ها، قادر به اصلاح ظرفیت ستون بر اساس تابعی از نسبت ارتفاع ستون به ضخامت ورق پیوستگی (d/t_s) است. بررسی‌ها نشان داد که ظرفیت ورق‌های پیوستگی عمده‌تاً تحت تأثیر ضخامت ورق پیوستگی و ارتفاع ستون قرار دارد، زیرا سازوکار خرابی حاکم بر تمامی نمونه‌های مورد بررسی، کمزش ورق‌های پیوستگی است. انتخاب این دو متغیر هندسی، درواقع میزان لاغری ورق پیوستگی را هدف قرار می‌دهد که عامل اصلی و تعیین‌کننده در مقاومت ورق‌های پیوستگی در برابر کمزش فشاری است. مقادیر تعیین‌شده با استفاده از رابطه (۳) و داده‌های

- ۲- حالت حدی حاکم بر خرابی ستون‌های جفت IPE دارای ورق پیوستگی، کماتش ورق پیوستگی و جان ستون است.
- ۳- رابطه ارائه شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 برای محاسبه ظرفیت جان ستون‌ها در حالت حدی کماتش فشاری جان برای ستون‌های جفت IPE مناسب نیست و مقادیر غیراقتصادی ارائه می‌کند.
- ۴- ظرفیت جان ستون‌ها بین ۱۳۲٪ تا ۱۸۹٪ مقدار نظری ارائه شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 برای حالت حدی کماتش فشاری جان ستون‌های مورد مطالعه در این پژوهش است.
- ۵- ضوابط ارائه شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 برای محاسبه ظرفیت ورق‌های پیوستگی در ستون‌های جفت IPE مناسب نیست و برای اکثر ستون‌ها مقادیر غیراقتصادی ارائه می‌کند.
- ۶- مقدار نظری ارائه شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 برای ظرفیت ورق‌های پیوستگی بین ۹۱٪ تا ۱۴۷٪ ظرفیت ورق‌های پیوستگی ستون‌های جفت IPE مورد مطالعه در این پژوهش است.
- ۷- رابطه و ضریب اصلاحی برای تعیین ظرفیت جان ستون‌های جفت IPE در برابر پدیده کماتش فشاری جان و تعیین ظرفیت فشاری ورق‌های پیوستگی پیشنهاد شد.
- ۸- انجام آزمایش‌های تجربی برای توسعه روابط سازگار با ناپایداری موضعی در ستون‌های جفت IPE، ضرورت دارد.



شکل ۱۳- نمودار نیرو-جاب‌جایی ستون‌های دارای ورق پیوستگی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر



شکل ۱۴- نمودار نیرو-جاب‌جایی ستون‌های دارای ورق پیوستگی با ضخامت ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر

۴- نتیجه‌گیری

- در این پژوهش، مدل‌های اجزای محدود برای تعیین رفتار ورق پیوستگی در ستون‌های جفت IPE تحت اثر بارهای متمرکز فشاری بررسی شد. در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس ستون‌های مورد بررسی تحت اثر فشار دوطرفه قرار گرفتند. نتایج این تحقیق به شرح زیر است:
- ۱- در ستون‌های جفت IPE بدون ورق پیوستگی، حالت حدی کماتش فشاری جان، حالت حاکم بر خرابی ستون‌ها است.

- [16] Rodilla, J.A., and Kowalkowski, K. (2021), "Determination of capacities of eccentric stiffeners part 1: experimental studies", Engineering Journal, 58(2), pp.79-98.
- [17] Rodilla, J.A., and Kowalkowski, K. (2021), "Determination of capacities of eccentric stiffeners part 2: analytical studies", Engineering Journal American Institute OF Steel Construction, 58(2), pp.99-122.
- [18] Fakhar hasani, N., and Hosseinzadeh, Y. (2025), "Determination of the continuity plate capacity in box section columns," Journal of Structural and Construction Engineering, 12(9), pp.66-81.
- [19] ABAQUS. Abaqus/CAE User's Manual. V2021: Dassault Systems, Incorporated. Dassault Systems. <http://www.simulia.com>.
- [20] Bruneau, M., Uang, C.M., and Whittaker, A.S. (1998), "Ductile design of steel structures", 389, New York: McGraw-Hill.
- [21] Rodilla, J. A., and Kowalkowski, K. (2019), "Analysis and design of eccentric stiffeners part of moment connections to column flanges", Final Report for AISC, Chicago, IL.
- [1] Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-22, (2022), AISC, American Institute of Steel Construction, Incorporated. Chicago, IL.
- [2] Fakhar hasani, N., and Hosseinzadeh, Y. (2025), "Determination of the bearing capacity of the flange and web of box sections under concentrated loads," Journal of Structural and Construction Engineering, 12(9), pp.82-104.
- [3] Timoshenko, S.P., and Gere, J.M. (2012), "Theory of elastic stability", Courier Corporation.
- [4] Chen, W.F., and Oppenheim, I.J. (1974), "Web buckling strength of beam-to-column connections", Journal of the Structural Division, 100(1), pp.279-285.
- [5] Newlin, D., and Chen, W.F. (1971), "Strength and Stability of Column Web in Welded Beam-to-Column connections fritz engineering laboratory," Report 333.14, Lehigh University, Bethlehem, Pa.
- [6] Sherbourne, A.N., and Murthy, D.N.S. (1978), "Computer simulation of column webs in structural steel connections", Computers and Structures, 8(3-4), pp.479-490.
- [7] Elgaaly, M., and Salkar, R. (1991), "Web crippling under edge loading", In Proceedings of AISC National Steel Construction Conference Chicago, IL. American Institute of Steel Construction, Incorporated.
- [8] Chen, S.J., and Chen, G.K. (1993), "Fracture of steel beam to box column connections", Journal of the Chinese Institute of Engineers, 16(3), pp.381-394.
- [9] Hajjar, J.F., Dexter, R.J., Ojard, S.D., Ye, Y., and Cotton, S.C. (2003), "Continuity plate detailing for steel moment-resisting connections", Engineering Journal, 40(4), pp.189-211.
- [10] Chou, C.C., and Uang, C.M. (2007), "Effects of continuity plate and transverse reinforcement on cyclic behavior of SRC moment connections", Journal of Structural Engineering, 133(1), pp.96-104.
- [11] Tran, A.T., Hassett, P.M., and Uang, C.M. (2013), "A flexibility-based formulation for the design of continuity plates in steel special moment frames", Engineering Journal, 50(3), pp.181-200.
- [12] Salkar, R., Salkar, A., and Davids, W. (2015), "Crippling of webs with partial depth stiffeners under patch loading", Engineering Journal, 52(4), pp.221-232.
- [13] Mashayekh, A., and Uang, C.M. (2018), "Experimental evaluation of a procedure for SMF continuity plate and weld design", Engineering Journal, 55(2), pp.109-122.
- [14] Jazany, R.A., and Ghobadi, M.S. (2017), "Design methodology for inclined continuity plate of panel zone", Thin-Walled Structures, 113, pp.69-82.
- [15] Norwood, J. (2018), "Effect of Continuity Plate Eccentricity on the Performance of Welded Beam-to-Column Connections", University of Arkansas.