

Research Article

Assessment of Bearing Length Impact on Capacity of Transverse Stiffeners

Nima Fakhhar Hasani ¹, Yousef Hosseinzadeh ^{2*}

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

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



Citation: Fakhhar Hasani, N., and Hosseinzadeh, Y. (2026), "Assessment of Bearing Length Impact on Capacity of Transverse Stiffeners", *Journal of Steel & Structures*, 20(53), pp.106-121. (In Persian)

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.601143.1059>

Article info:

Article History:

Received: 19 March 2026

Revised: 20 July 2026

Accepted: 29 July 2026

Published: 23 September 2026

Keywords:

Bearing Length
Transverse Stiffener
Concentrated Load
Web Compression Buckling
Local Instability

ABSTRACT

Background: In steel connections, transverse stiffeners are utilized to increase the web and flange capacity against local instabilities induced by concentrated loads. This paper investigates the effect of bearing length on the capacity of transverse stiffeners subjected to double concentrated compression loading. Existing design provisions for determining the compressive capacity of transverse stiffeners do not account for the bearing length variable, and limited information is available regarding the local instability of steel sections under concentrated loads with varying bearing lengths.

Methods: Initially, a finite element model was created in ABAQUS to investigate the local instability phenomenon, and its accuracy was validated against experimental data. To evaluate the buckling behavior of the specimens, a Static Riks analysis was performed, incorporating geometric non-linearity and an initial geometric imperfection equal to 0.001% of the first buckling mode shape. C3D8R solid elements were assigned to the steel member and loading plates, while S4 shell elements were used for the transverse stiffeners. The welded connections of the stiffeners were modeled using the Embedded Region constraint. Subsequently, a parametric study comprising 54 numerical models was conducted to evaluate their behavior under double concentrated compression loading.

Results: Results from the finite element analysis demonstrated that increasing the bearing length enhances both web capacity and transverse stiffener capacity. Additionally, the compressive capacity of the transverse stiffeners was evaluated using AISC 360-22 provisions and compared with the numerical results. The effective capacity of these components under double compression loading ranged from 35% to 96% of the theoretical values predicted by the specification. Consequently, a modified equation and recommendations were proposed for determining the capacity of transverse stiffeners.

Conclusion: The results of this research indicated that bearing length is a governing parameter influencing the capacity of transverse stiffeners. In addition, existing specification provisions are unconservative in predicting the capacity of these components. By using the proposed equation, the actual capacity of transverse stiffeners can be estimated with higher accuracy. The engineering application of these research findings lies in the optimization of steel connection design.

* 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

Controlling the local stability of steel sections subjected to concentrated loads is an important step in the design of steel connections. Concentrated compressive forces applied to steel members can induce local buckling and cause a sudden reduction in load-carrying capacity. To mitigate these instabilities, transverse stiffeners are widely utilized, significantly enhancing the local capacity of the steel members under concentrated loads. Previous research indicates that increasing the bearing length enhances the local load-bearing capacity of column webs; however, current design provisions in the AISC 360-22 specification for controlling local stability using transverse stiffeners do not account for the bearing length parameter. This loading condition typically occurs in transfer beams supporting upper-story columns and near the end regions of simply supported beams subjected to heavy support reactions. Therefore, investigating this effect is essential. This study aims to evaluate the influence of bearing length on the capacity of transverse stiffeners under double compression loading. Furthermore, very limited technical information, experimental data, and design criteria are available regarding the structural behavior and local failure mechanisms of transverse stiffeners in IPB and IPE sections under these conditions. This lack of technical data may lead to inaccurate capacity predictions under double-compression loading, potentially overestimating the actual resistance of transverse stiffeners and compromising structural safety. To address this limitation, this paper systematically evaluates the structural behavior of transverse stiffeners in these sections, quantifies the safety margins of current AISC criteria, and proposes reliable design recommendations.

Methods

Finite element (FE) models of the specimens were 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 specimens had a constant length of 1.2 m, and the loading plates had a height of 15 cm with a width matching the flange width of the section. Steel material properties were defined as isotropic with multi-linear true stress-strain curves. The steel member 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 transverse stiffeners were extended into the member cross-section by one mesh thickness, utilizing the "Embedded Region" constraint to ensure full rigidity at the joints, while "Tie" constraints connected the member flanges to the loading plates. Three-dimensional eight-node solid elements with reduced integration (C3D8R) were assigned to the steel member and loading plates, while four-node shell elements (S4) were used for the transverse stiffeners. 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. Displacement-controlled loading was applied to the top surface, with the loading plates constrained to move only perpendicular to the flanges. The failure criterion for the compression specimens was defined based on the load-displacement curve in accordance with the recommendations of EN 1993-1-14. Finally, the optimal mesh size was determined through a mesh sensitivity analysis and validated by comparing the numerical results and mesh patterns against reference experimental data.

Results

Results from the finite element analysis demonstrate that increasing the bearing length enhances both steel web capacity and transverse stiffener capacity. The ultimate local load-bearing capacities of the transverse stiffeners extracted from parametric finite element analyses were evaluated and compared against theoretical predictions derived from AISC 360-22

specifications. The comparative findings indicate that existing design criteria are unconservative when applied to the modeled specimens. Furthermore, evaluation of the reinforced specimens demonstrated that the effective load-bearing capacity of transverse stiffeners under double compression loading ranges from 35% to 96% of theoretical values. To capture this variance, a linear modification factor (C) was developed as a function of bearing length, leading to a modified design equation and recommendations for transverse stiffeners.

Conclusion

In conclusion, the results of this research indicate that bearing length is a governing parameter influencing the capacity of transverse stiffeners. This comprehensive numerical investigation confirms that current design specifications are unconservative in predicting the capacity of transverse stiffeners under concentrated double-compression forces. The primary technical contribution of this research is the successful development of a modified analytical equation tailored specifically for IPE and IPB profiles. By accurately estimating stiffener capacity, the proposed equation optimizes the design of steel connections.

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 modeling and data analyzing 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 authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

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

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.

مقاله پژوهشی

ارزیابی تأثیر طول بارگذاری بر ظرفیت سخت‌کننده‌های عرضی

نیما فخار حسنی^۱، یوسف حسین‌زاده^{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), "Assessment of Bearing Length Impact on Capacity of Transverse Stiffeners", *Journal of Steel & Structures*, 20(53), pp.106-121. (In Persian)

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.601143.1059>

چکیده

زمینه پژوهش: در اتصالات فولادی، استفاده از سخت‌کننده‌های عرضی موجب افزایش ظرفیت جان و بال اعضا در برابر ناپایداری‌های موضعی ناشی از بارهای متمرکز می‌شود. در این مقاله، تأثیر طول بارگذاری بر ظرفیت سخت‌کننده‌های عرضی تحت اثر بارگذاری فشار دوطرفه بررسی می‌شود. ضوابط موجود برای تعیین ظرفیت فشاری سخت‌کننده‌های عرضی، تغییر طول بارگذاری را در نظر نمی‌گیرد و اطلاعات محدودی در مورد ناپایداری موضعی مقاطع فولادی تحت اثر بارهای متمرکز با طول بارگذاری متفاوت وجود دارد.

روش پژوهش: در ابتدا مدل اجزای محدود برای بررسی پدیده ناپایداری موضعی ایجاد و دقت آن با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ارزیابی شد. مقاطع فولادی به همراه سخت‌کننده‌های عرضی در نرم‌افزار Abaqus شبیه‌سازی شدند. به منظور بررسی رفتار کمانش در نمونه‌ها، از تحلیل Static Riks با لحاظ نمودن رفتار غیرخطی هندسی و اعمال نقص اولیه معادل 0.01% شکل مود اول کمانش استفاده شد. برای ستون و صفحات بارگذاری از المان جامد C3D8R و برای سخت‌کننده‌های عرضی از المان پوسته‌ای S4 در شبیه‌سازی استفاده شد. اتصال جوش سخت‌کننده‌های عرضی نیز با قید Embedded Region مدل شد. در ادامه، یک مطالعه پارامتریک شامل ۵۴ مدل عددی به منظور ارزیابی رفتار آن‌ها تحت بارگذاری فشاری متمرکز دوطرفه انجام شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود نشان داد که افزایش طول بارگذاری موجب افزایش ظرفیت جان مقاطع فولادی و سخت‌کننده‌های عرضی می‌شود. همچنین ظرفیت فشاری سخت‌کننده‌های عرضی با استفاده از ضوابط آیین‌نامه AISC 360-22 تعیین و با نتایج تحلیل اجزای محدود مقایسه شد. ظرفیت مؤثر این اجزا تحت اثر فشار دوطرفه بین 35% تا 96% مقادیر نظری پیش‌بینی شده توسط آیین‌نامه تعیین شد. بر این اساس، موارد اصلاحی و پیشنهادی مربوطه برای تعیین ظرفیت سخت‌کننده‌های عرضی در مقاطع فولادی ارائه شد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که طول بارگذاری، یک پارامتر حاکم بر ظرفیت سخت‌کننده‌های عرضی است. همچنین روابط آیین‌نامه‌ای در پیش‌بینی ظرفیت این اجزا، غیرمحافظة‌کارانه عمل می‌کنند. با استفاده از رابطه پیشنهادی این پژوهش، می‌توان ظرفیت واقعی سخت‌کننده‌های عرضی را با دقت بالاتری تخمین زد. کاربرد مهندسی نتایج این تحقیق، بهینه‌سازی طراحی اتصالات فولادی است.

اطلاعات مقاله:

سابقه مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۸ اسفند ماه ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۲۹ تیر ماه ۱۴۰۵

تاریخ پذیرش: ۷ مرداد ماه ۱۴۰۵

تاریخ انتشار: ۱ مهر ماه ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

طول بارگذاری

سخت‌کننده عرضی

بار متمرکز

کمانش فشاری جان

ناپایداری موضعی

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

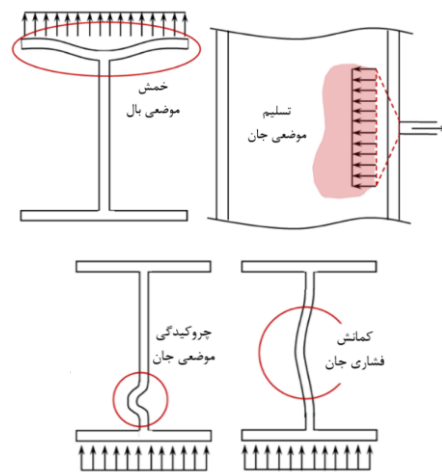
حقوق نشر این مقاله برای نویسنده (گان) محفوظ است و حقوق انتشار آن به انتشارات انجمن سازه‌های فولادی ایران واگذار شده است. محتوای این مقاله تابع قوانین و شرایط مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY-NC 4.0) می‌باشد. برای اطلاعات بیشتر، لطفاً به وبسایت

مربوطه مراجعه فرمایید. <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>



۱- مقدمه

کنترل پایداری موضعی مقاطع فولادی در برابر بارهای متمرکز، همواره از مراحل اصلی در طراحی اتصالات فولادی است. در مقاطع فولادی، اعمال بارهای متمرکز فشاری می‌تواند منجر به کمناش موضعی و افت ناگهانی ظرفیت شود. به منظور کنترل این ناپایداری‌ها، استفاده از سخت‌کننده‌های عرضی می‌تواند ظرفیت موضعی سازه در برابر بارهای متمرکز را به طور چشم‌گیری ارتقا بخشد. بر اساس آیین‌نامه AISC 360-22 [۱] با افزودن سخت‌کننده‌های عرضی می‌توان از وقوع حالات حدی تسلیم موضعی جان^۱، خمش موضعی بال^۲، چروکیدگی موضعی جان^۳ و کمناش فشاری جان^۴ در محل اعمال بار متمرکز جلوگیری نمود. حالات حدی خرابی در شکل (۱) نشان داده شده است.



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

برای کنترل حالت حدی کمناش فشاری جان در ابتدا تیموشنکو^۵ و گی^۶ رابطه‌ای برای محاسبه نیروی بحرانی کمناش الاستیک ورق با شرایط مرزی مفصلی ارائه نمودند [۳].

در ادامه چن^۷ و اوپنهایم^۸ و نیولین^۹ 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 [۴ و ۵]. در نهایت، آن‌ها رابطه ارائه‌شده توسط تیموشنکو و گی^۶

برای کمناش فشاری جان ستون‌ها را با اعمال برخی تغییرات و اعمال شرایط محافظه‌کارانه اصلاح نمودند.

شربورن^{۱۰} و مورتی^{۱۱} شبیه‌سازی‌های کامپیوتری برای بررسی رفتار جان ستون‌های H شکل در اتصالات فولادی را انجام دادند [۶]؛ نتایج بررسی نشان داد که سخت‌کننده‌های عرضی، موجب افزایش مقاومت ستون در جهت عمود بر بال ستون می‌شود. آن‌ها نشان دادند که سخت‌کننده‌های عرضی می‌توانند به طور میانگین ظرفیت ستون در برابر بارهای متمرکز را تا چهار برابر افزایش دهند.

الگالی^{۱۲} و سالکر^{۱۳} پدیده چروکیدگی موضعی جان در مقاطع فولادی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشات 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 بررسی نشان داد که کاربرد ورق پیوستگی، از ایجاد کمناش‌های موضعی جلوگیری می‌نماید. باین‌حال، استفاده از ورق‌های لاغر در ساخت ستون‌های جعبه‌ای موجب گسیختگی و انهدام اتصالات تیر به ستون، به ویژه 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^{۱۴} و یونگ^{۱۵} با مطالعه بر روی تأثیر ورق پیوستگی در اتصالات گیردار تیر فولادی به ستون بتنی با روکش فولادی^{۱۶} دریافتند که استفاده از ورق‌های پیوستگی موجب افزایش مقاومت اتصال و مقاومت برشی بتن می‌شود [۱۰].

ترن^{۱۷} 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 AISC 360-22 [۱] مورد مقایسه قرار دادند و در نهایت

¹⁰ Sherbourne

¹¹ Murthy

¹² Elgaaly

¹³ Salker

¹⁴ Chou

¹⁵ Uang

¹⁶ Steel Encased Reinforced Concrete

¹⁷ Tran

¹ Web Local Yielding

² Local Flange Bending

³ Web Local Crippling

⁴ Web Compression Buckling

⁵ Timoshenko

⁶ Gere

⁷ Chen

⁸ Oppenheim

⁹ Newlin

برای کاهش هزینه‌های طراحی و اجرای ورق پیوستگی، پیشنهادهایی ارائه نمودند. نتایج نشان داد که می‌توان از جوش گوشه به جای جوش نفوذی در اتصال ورق‌های پیوستگی بهره برد [۱۱].

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، به طور میانگین ۱۰۳٪ بوده و بین ۸۲٪ تا ۱۲۳٪ متغیر است [۱۲].

مشایخ و یونگ^۱ آزمایشاتی 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 به صورت 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 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 [۱] برای برخی از مقاطع بال‌پهن مناسب نیست.

فخار حسنی و حسین‌زاده ظرفیت موضعی و ظرفیت ورق‌های پیوستگی در مقاطع جعبه‌ای و جفت IPE را تحت اثر بارهای متمرکز بررسی کردند [۱۸ و ۱۹]. نتایج تحلیل مدل‌های اجزای محدود نشان داد که ضوابط ارائه‌شده برای حالت حدی کماتش فشاری جان و طراحی ورق‌های پیوستگی تحت اثر فشار دوطرفه توسط آیین‌نامه AISC 360-22 [۱] برای مقاطع بررسی‌شده، مناسب نیست.

منکولاسی^۵ و **همکاران** به صورت عددی تأثیر طول اتکایی بار متمرکز بر ظرفیت مقاطع بال‌پهن در برابر کماتش فشاری جان را مورد بررسی قرار دادند [۲۰]. مطالعات آن‌ها نشان داد که افزایش طول بار، ظرفیت جان در برابر کماتش فشاری را افزایش می‌دهد. درنهایت، آن‌ها ضرایبی را برای اصلاح رابطه ارائه‌شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 پیشنهاد نمودند تا اثر طول بارگذاری را در نظر بگیرد.

سنر^۶ و **همکاران** نیز مطالعات آزمایشگاهی و عددی در مورد ظرفیت مقاطع فولادی در برابر پدیده کماتش فشاری جان انجام دادند. آن‌ها متغیر طول بارگذاری اعمال‌شده به مقطع را مورد بررسی قرار داده و با مقادیر نظری ارائه‌شده توسط رابطه پیشنهادی آیین‌نامه AISC 360-22 مورد مقایسه قرار دادند [۲۱]. بررسی‌ها نشان داد که طول بار اعمال‌شده نقش مهمی در ظرفیت موضعی مقاطع بال‌پهن دارد که این موضوع در رابطه پیشنهادی آیین‌نامه لحاظ نشده و با افزایش طول بارگذاری، جان ستون می‌تواند تا پنج برابر مقدار ارائه‌شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 در برابر پدیده کماتش فشاری جان ظرفیت داشته باشد.

نتایج تحقیقات پیشین نشان داد که افزایش طول بارگذاری می‌تواند موجب افزایش ظرفیت باربری موضعی مقاطع فولادی شود، اما در ضوابط ارائه‌شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 برای کنترل پایداری موضعی با استفاده از سخت‌کننده‌های عرضی، پارامتر طول بارگذاری لحاظ نشده است. از این رو، انجام پژوهشی در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این تحقیق، ارزیابی تأثیر طول بارگذاری بر ظرفیت سخت‌کننده‌های عرضی تحت اثر فشار دوطرفه است. این حالت بارگذاری به طور معمول در تیرهای

⁵ Menkulasi
⁶ Sener

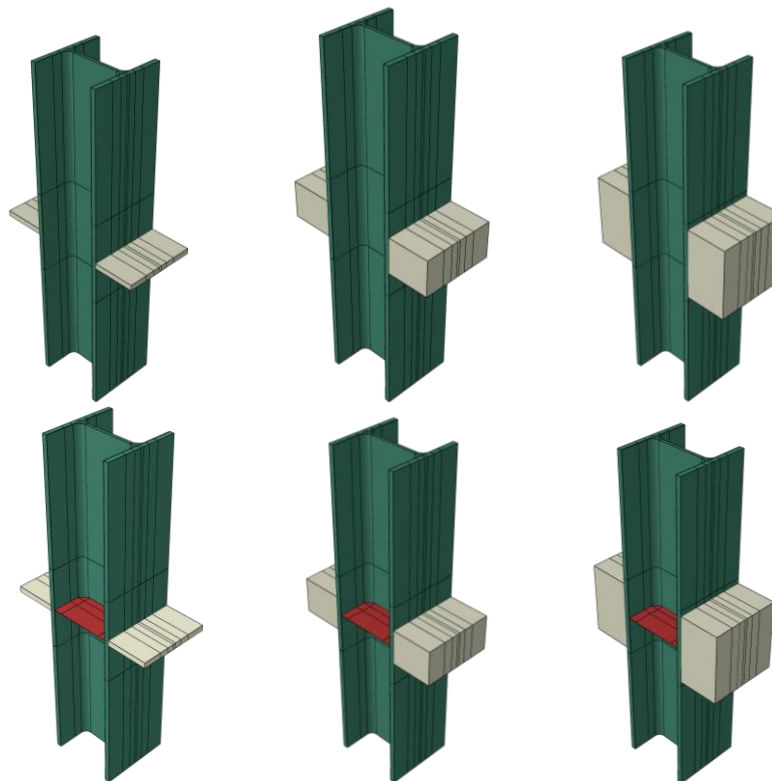
¹ Uang
² Prinz
³ Kowalkowski
⁴ Rodilla

به صورت یک ستون فرضی در برابر کل نیروی محوری فشاری طراحی شوند. ارتفاع مؤثر ستون فرضی برابر 0.75 ارتفاع آزاد جان در فاصله بین دو بال در نظر گرفته می شود. مقطع ستون فرضی عبارت است از مقطع جفت سخت کننده عرضی به اضافه نواری از جان که پهنای آن برای سخت کننده های عرضی میانی معادل 25 برابر ضخامت جان ستون در نظر گرفته می شود.

۲- روش تحقیق

۱-۲- مدل اجزای محدود

مدل های اجزای محدود، در نرم افزار اجزای محدود Abaqus ایجاد شده اند [۲۲]. برای ارزیابی صحت تحلیل اجزای محدود، از داده های آزمایش و نتایج مدل سازی عددی رودیلا و کوالکوفسکی استفاده شد [۱۶ و ۱۷]. پیکربندی نمونه ها در شکل (۲) نشان داده شده است. طول مقاطع به عنوان یک متغیر ثابت برابر $1/2$ متر در نظر گرفته شد. ارتفاع صفحات بارگذاری 15 سانتی متر و عرض آن ها برابر با بال مقطع تعیین شد. مصالح ستون و اجزای آن به صورت ایزوتروپیک^۱ و روابط تنش-کرنش مصالح به صورت نمودارهای چندخطی معرفی شدند.



شکل ۲- پیکربندی مدل اجزای محدود نمونه ها

انتقال بار ستون های طبقات فوقانی و نواحی انتهایی تیرهای با تکیه گاه ساده برای تحمل عکس العمل تکیه گاهی سنگین رخ می دهد. در این تحقیق ابتدا مدل های اجزای محدود برای بررسی رفتار مقاطع فولادی تحت اثر بار متمرکز ایجاد و دقت آن با استفاده از داده های آزمایشگاهی ارزیابی شد. سپس، رفتار 54 نمونه با و بدون سخت کننده های عرضی تحت اثر بارگذاری فشار دوطرفه تعریف شده در آیین نامه AISC 360-22 بررسی شد. در ادامه نوع خرابی و ظرفیت مدل های عددی با ضوابط ارائه شده توسط آیین نامه مورد مقایسه قرار گرفت و در انتها نتایج و پیشنهاد های مربوطه شرح داده شد.

۱-۱- مبانی نظری تحقیق

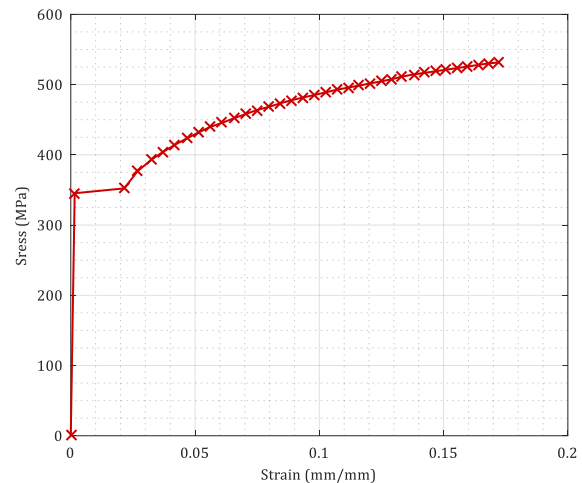
ضوابط طراحی در آیین نامه AISC 360-22 [۱]، به منظور تأمین پایداری بال و جان ستون ها در تمام حالات حدی خرابی محتمل برای مقاطع I شکل ارائه شده است. در صورت کماتش جان ستون، بر اساس آیین نامه AISC 360-22 نیاز به تعبیه سخت کننده های عرضی در مقابل نیروی متمرکز فشاری است. سخت کننده های عرضی باید به طور متقارن و تمام عمق تعبیه شوند و به هر دو بال و نیز به جان عضو جوش شوند. سخت کننده های عرضی باید

¹ Isotropic

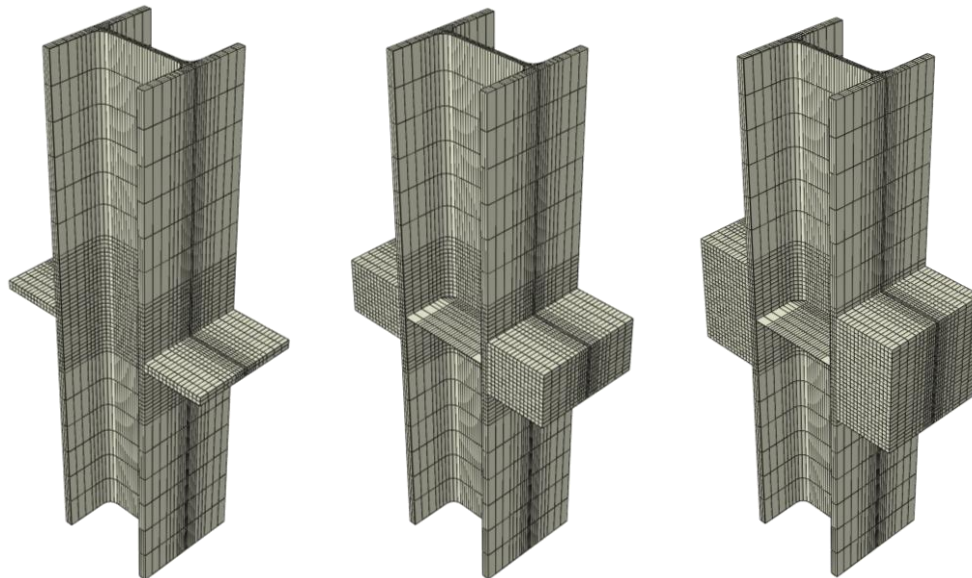
منحنی تنش-کرنش مهندسی ارائه‌شده توسط رودیلا و کوالکوفسکی [۱۷] برای مدل‌های اجزای محدود، با استفاده از روابط پیشنهادی برونو^۱ و همکاران به منحنی تنش-کرنش حقیقی نشان داده‌شده در شکل (۳) تبدیل شد [۲۳]. مصالح فولادی از رده ASTM A992 با تنش تسلیم ۳۴۵ و تنش نهایی ۵۳۰ مگاپاسکال است. همچنین مدول الاستیسیته 2×10^5 مگاپاسکال و ضریب پواسون مصالح ۰/۳ در نظر گرفته شده است. صفحات بارگذاری به‌صورت الاستیک معرفی شد.

سخت‌کننده‌های عرضی به اندازه ضخامت یک مش، در محل قرارگیری خود، بزرگ‌تر شبیه‌سازی شده و وارد مقطع عضو می‌شوند. برای اتصال بین سخت‌کننده‌ها و ستون، از گزینه Embedded Region استفاده شد تا گیرداری لازم تأمین شود [۱۷]. به‌منظور اتصال ستون و صفحه بارگذاری، از گزینه tie استفاده شد. ستون و صفحات بارگذاری با المان‌های جامد مکعبی شش وجهی از نوع C3D8R و سخت‌کننده‌های عرضی با المان‌های پوسته‌ای از نوع S4 شبیه‌سازی شدند. برای تحلیل نمونه‌ها 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 مدل‌سازی مقاطع اعمال شد. نقص هندسی، به‌صورت درصدی از مود اول کماتش حاصل از تحلیل کماتش به مدل اعمال می‌شود. مقدار مناسب نقص هندسی ۰/۰۰۱٪ برای ستون‌ها تعیین شد [۱۷]. برای شبیه‌سازی شرایط اتصالات فولادی، صفحات بارگذاری فقط قادر به حرکت در جهت عمود به بال ستون هستند. بارگذاری نیز به‌صورت جابه‌جایی کنترل‌شده و با اعمال یک جابه‌جایی روی سطح فوقانی صفحات بارگذاری به عضو فولادی اعمال می‌شود. اندازه مش مناسب بر اساس تحلیل حساسیت و مقایسه نتایج با الگوی مش و داده‌های آزمایش مرجع به‌دست آمد [۱۷]. الگوی مش ستون‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است.

منحنی تنش-کرنش مهندسی ارائه‌شده توسط رودیلا و کوالکوفسکی [۱۷] برای مدل‌های اجزای محدود، با استفاده از روابط پیشنهادی برونو^۱ و همکاران به منحنی تنش-کرنش حقیقی نشان داده‌شده در شکل (۳) تبدیل شد [۲۳]. مصالح فولادی از رده ASTM A992 با تنش تسلیم ۳۴۵ و تنش نهایی ۵۳۰ مگاپاسکال است. همچنین مدول الاستیسیته 2×10^5 مگاپاسکال و ضریب پواسون مصالح ۰/۳ در نظر گرفته شده است. صفحات بارگذاری به‌صورت الاستیک معرفی شد.



شکل ۳- نمودار تنش-کرنش مصالح فولادی

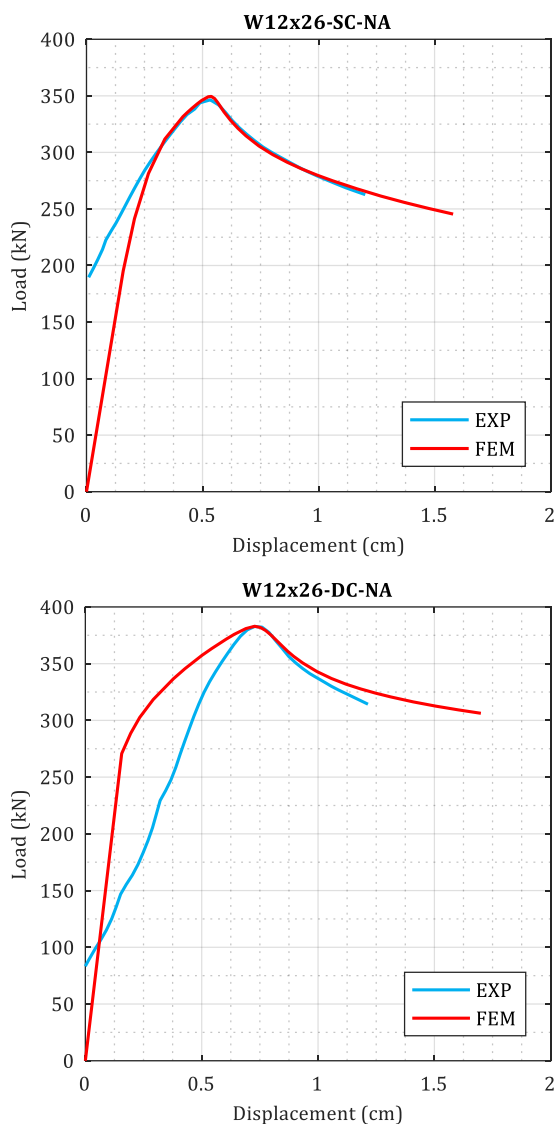


شکل ۴- مش‌بندی مدل اجزای محدود نمونه‌ها

معیار خرابی نمونه‌های تحت اثر فشار، بر اساس منحنی بار-جابه‌جایی و ضوابط پیشنهادشده توسط آیین‌نامه

EN 1993-1-14 تعیین شد [۲۴]. در مواردی که کماتش سخت‌کننده‌ها رخ داده و منحنی دارای نقطه اوج و افت بار

¹ Bruno



شکل ۵- نمودار نیرو-جابجایی مدل‌های اجزای محدود و داده‌های آزمایش [۲۵]

۳- مطالعه پارامتریک

ظرفیت سخت‌کننده‌های عرضی با استفاده از مطالعه پارامتریک ارزیابی شده است. برای ساخت نمونه‌ها از مقاطع IPE و IPB به عنوان مقاطع پرکاربرد در صنعت ساختمان به همراه ضخامت‌های رایج سخت‌کننده استفاده شده است. طول بارگذاری نیز به عنوان ضریبی از عمق نیم‌رخ تعیین شد. البته برای نسبت‌های کوچک طول بارگذاری به عمق مقطع به عنوان نماینده اتصالات گیردار، طول بارگذاری ثابت ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در نام‌گذاری مدل‌ها عدد پس از lb و t به ترتیب معرف نسبت طول بارگذاری به عمق مقطع و ضخامت سخت‌کننده‌ها بر حسب میلی‌متر است. همچنین نمونه‌های بدون سخت‌کننده نیز با عبارت NA مشخص شده‌اند. متغیرهای تحقیق شامل ابعاد مقطع، ضخامت

ناگهانی بود، بار متناظر با نقطه پیک به عنوان ظرفیت نهایی تعیین می‌شود. در مقابل، برای نمونه‌هایی که به دلیل رفتار پایداری پس‌کمانش، فاقد افت بار بودند و یا قبل از افت بار دچار پلاستیسیته کامل شدند، بار متناظر با رسیدن کرنش پلاستیک معادل به مقدار ۰.۵٪ تعیین شد.

۲-۲- صحت‌سنجی مدل اجزای محدود

با تحلیل اجزای محدود، رفتار نمونه‌های ستون‌های دارای سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده تحت اثر بار متمرکز مرجع [۱۷ و ۲۵] تعیین شد. حداکثر خطای مدل‌های اجزای محدود در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، در جدول (۱) نشان داده شده است. با توجه به مقادیر جدول (۱)، مدل‌های اجزای محدود ایجادشده با حداکثر خطای ۱۲٪/۷، دارای دقت مناسب جهت استفاده در مطالعات پارامتریک است. نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از تحلیل دو نمونه از مدل‌های اجزای محدود و آزمایش نیز در شکل (۵) نشان داده شده است. در نمودارهای نیرو-جابجایی، نمودار مربوط به آزمایشات به سمت چپ انتقال یافت تا اثر لقی اولیه جک حذف شود. مدل‌های اجزای محدود به خوبی توانسته‌اند محدوده بار اوج، روند افت بار در شاخه نزولی و الگوی خرابی نهایی را منطبق بر مشاهدات آزمایشگاهی شبیه‌سازی نماید.

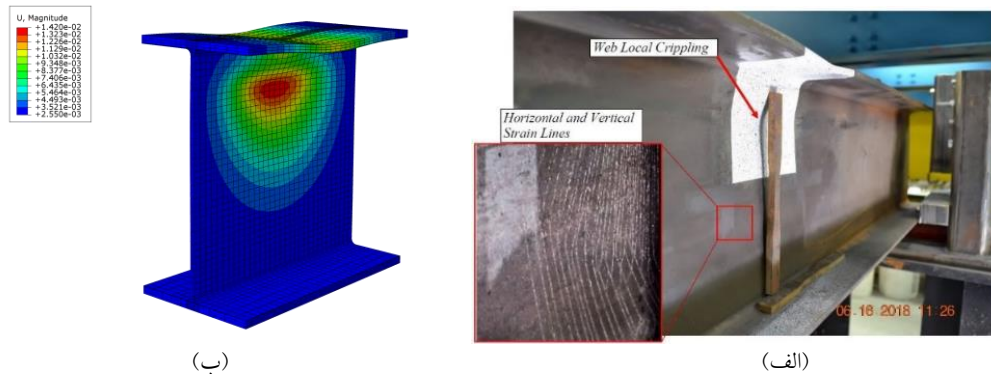
جدول ۱- مقایسه نتایج تحلیل عددی با داده‌های آزمایش [۲۵]

نام نمونه	ظرفیت نهایی (kN)		تفاوت (%)
	Exp. data	FEM	
W12x26-SC-E0	۶۵۹٫۴	۷۰۶٫۴	۷٫۱۲
W12x26-SC-NA	۳۴۶٫۵	۳۴۹٫۴	۰٫۸۳
W12x26-DC-E0	۹۸۱٫۶	۹۴۷٫۴	۳٫۶۱
W12x26-DC-NA	۳۸۲٫۸	۳۸۲٫۹	۰٫۰۲

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.

تغییر یافته‌اند. نمونه‌های مدل‌سازی شده برای مطالعه پارامتریک در جدول (۲) نشان داده شده است.

سخت‌کننده‌های عرضی و طول بارگذاری هستند که جهت تفکیک اثر واقعی طول بارگذاری، متغیرها در هر گروه به صورت مستقل



شکل ۶- چروکیدگی موضعی جان نمونه W12x26 تحت اثر فشار الف) سازوکار خرابی ستون [۲۵]
ب) توزیع جابه‌جایی حاصل از تحلیل اجزای محدود

۳-۱- ارزیابی رفتار سخت‌کننده‌های عرضی تحت اثر فشار دوطرفه

تمام نتایج مربوط به بارگذاری و تحلیل نمونه‌ها در جدول‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. با توجه به ارتفاع محدود سخت‌کننده‌ها و نتایج تحلیل این پژوهش، ظرفیت نظری سخت‌کننده‌های عرضی بر اساس ضوابط آیین‌نامه AISC 360-22 طبق رابطه (۱)، با فرض برابری تنش تسلیم با تنش کماتش محاسبه شد؛ چراکه هیچ‌گونه مشکلی ناشی از لاغری سخت‌کننده‌ها در نمونه‌های مدل‌سازی شده این پژوهش مشاهده نشد [۱۸]. ظرفیت مؤثر حاصل از اختلاف نتایج تحلیل نمونه‌های با و بدون سخت‌کننده نیز در جدول‌ها گنجانده شده است. با توجه به نتایج جدول‌های (۳) و (۴)، با افزایش طول بارگذاری، ظرفیت جان مقاطع فولادی و سخت‌کننده‌های عرضی افزایش و همچنین با کاهش لاغری سخت‌کننده‌ها، راندمان سخت‌کننده‌ها افزایش می‌یابد. ضوابط آیین‌نامه نیز برای طراحی سخت‌کننده‌های عرضی در تمام نمونه‌ها غیرمحافظة‌کارانه است.

$$R_n = ((25 \times t_w^2) + ((b - t_w) \times t_s)) \times F_y \quad (1)$$

که (t_w) ضخامت جان مقطع، (t_s) ضخامت سخت‌کننده، (b) عرض بال مقطع و (F_y) تنش تسلیم فولاد هستند. تنش حاصل از بارگذاری در لحظه نهایی و وقوع خرابی نمونه IPB260-t12 و IPE240-t10 در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. با افزایش طول بارگذاری، بخش بیش‌تری از جان، درگیر تنش ایجادشده می‌شود.

جدول ۲- نمونه‌های مطالعه پارامتریک

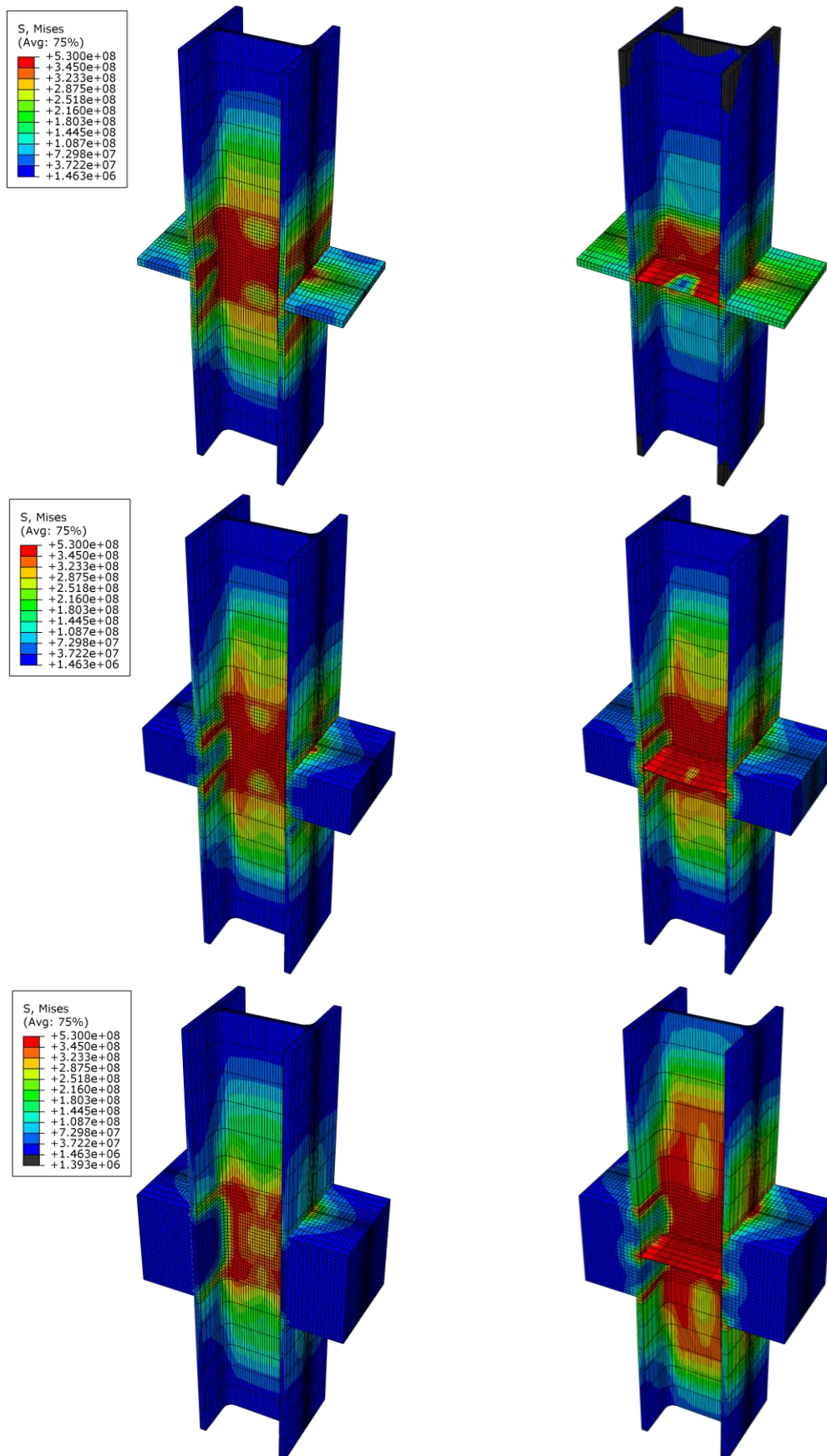
نام‌گذاری نمونه‌ها	
IPE180-lb0.11-NA	IPB200-lb0.1-NA
IPE180-lb0.5-NA	IPB200-lb0.5-NA
IPE180-lb1-NA	IPB200-lb1-NA
IPE180-lb0.11-t5	IPB200-lb0.1-t10
IPE180-lb0.5-t5	IPB200-lb0.5-t10
IPE180-lb1-t5	IPB200-lb1-t10
IPE180-lb0.11-t10	IPB200-lb0.1-t12
IPE180-lb0.5-t10	IPB200-lb0.5-t12
IPE180-lb1-t10	IPB200-lb1-t12
IPE240-lb0.08-NA	IPB260-lb0.08-NA
IPE240-lb0.5-NA	IPB260-lb0.5-NA
IPE240-lb1-NA	IPB260-lb1-NA
IPE240-lb0.08-t10	IPB260-lb0.08-t12
IPE240-lb0.5-t10	IPB260-lb0.5-t12
IPE240-lb1-t10	IPB260-lb1-t12
IPE240-lb0.08-t12	IPB260-lb0.08-t15
IPE240-lb0.5-t12	IPB260-lb0.5-t15
IPE240-lb1-t12	IPB260-lb1-t15
IPE300-lb0.07-NA	IPB320-lb0.07-NA
IPE300-lb0.5-NA	IPB320-lb0.5-NA
IPE300-lb1-NA	IPB320-lb1-NA
IPE300-lb0.07-t10	IPB320-lb0.07-t15
IPE300-lb0.5-t10	IPB320-lb0.5-t15
IPE300-lb1-t10	IPB320-lb1-t15
IPE300-lb0.07-t15	IPB320-lb0.07-t20
IPE300-lb0.5-t15	IPB320-lb0.5-t20
IPE300-lb1-t15	IPB320-lb1-t20

جدول ۳- مقایسه ظرفیت نظری با ظرفیت مؤثر سخت‌کننده‌های عرضی در مقاطع IPE بر اساس AISC 360-22

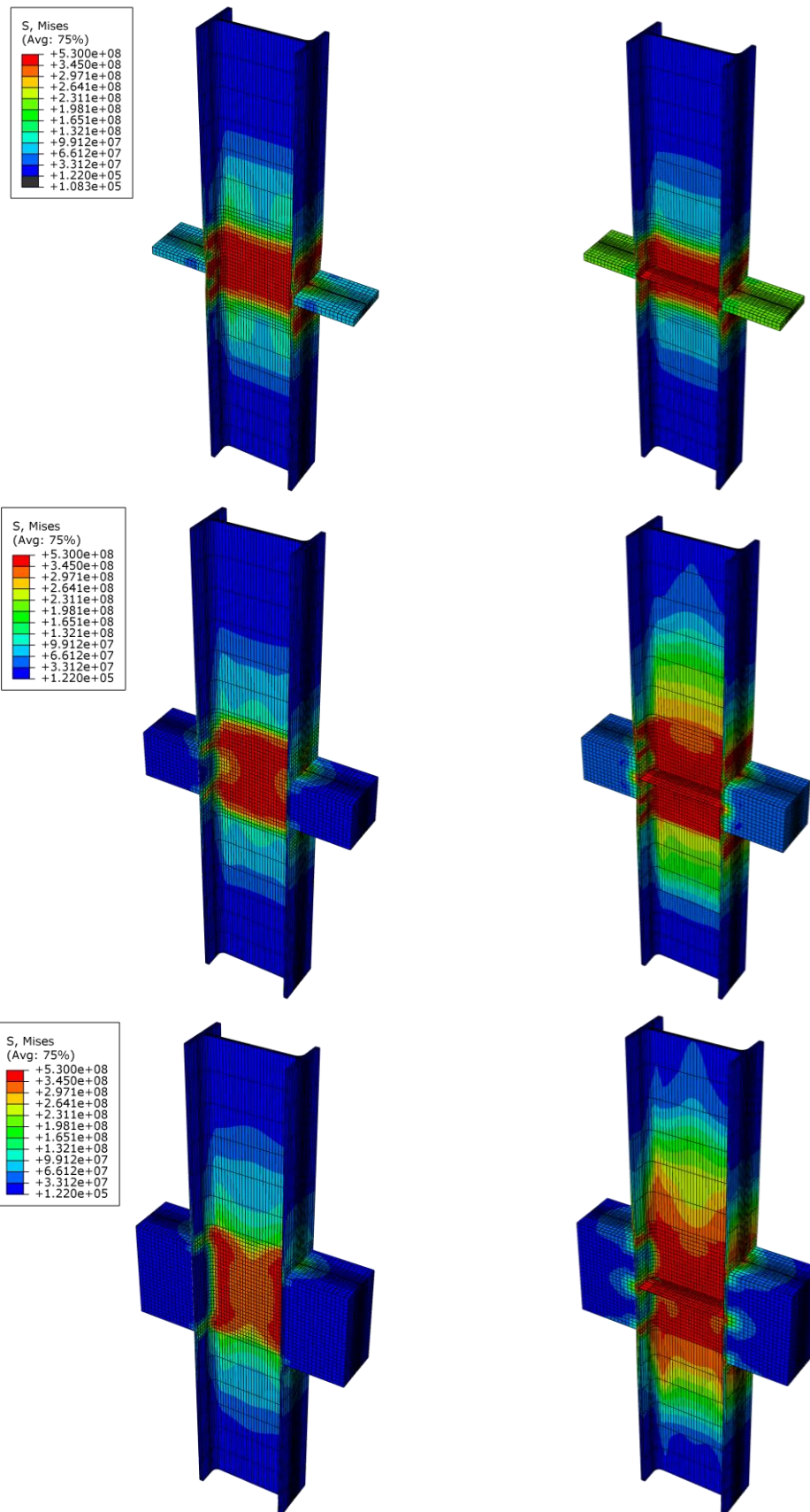
نام مقطع	lb/d	ضخامت سخت‌کننده‌ها (mm)	P_{FEM} (kN)	ظرفیت مؤثر سخت‌کننده‌ها (kN)	ظرفیت نظری سخت‌کننده‌ها (kN)	نسبت ظرفیت مؤثر به ظرفیت نظری
IPE 180	۰/۱۱	NA	۲۶۰/۳	-	-	-
	۰/۱۱	۵	۳۹۸	۱۳۷/۷	-	۰/۳۵
	۰/۵	NA	۳۳۶/۶	-	۳۹۰/۱	-
	۰/۵	۵	۵۸۶/۶	۲۵۰	-	۰/۶۴
	۱	NA	۴۷۲/۹	-	-	-
	۱	۵	۷۱۵/۸	۲۴۲/۹	-	۰/۶۳
	۰/۱۱	NA	۲۶۰/۳	-	-	-
	۰/۱۱	۱۰	۵۲۹/۳	۲۶۹	-	۰/۵۰
	۰/۵	NA	۳۳۶/۶	-	۵۳۷/۹	-
	۰/۵	۱۰	۷۸۳/۲	۴۴۶/۶	-	۰/۸۳
	۱	NA	۴۷۲/۹	-	-	-
	۱	۱۰	۸۷۷/۴	۴۰۴/۵	-	۰/۷۵
IPE 240	۰/۰۸	NA	۳۹۳/۱	-	-	-
	۰/۰۸	۱۰	۷۷۴/۵	۳۸۱/۴	-	۰/۵۳
	۰/۵	NA	۵۰۳/۹	-	۷۲۴/۱	-
	۰/۵	۱۰	۱۰۸۴/۹	۵۸۱	-	۰/۸۰
	۱	NA	۷۰۳/۷	-	-	-
	۱	۱۰	۱۳۵۰/۷	۶۴۷	-	۰/۸۹
	۰/۰۸	NA	۳۹۳/۱	-	-	-
	۰/۰۸	۱۲	۸۲۹/۸	۴۳۶/۷	-	۰/۵۴
	۰/۵	NA	۵۰۳/۹	-	۸۰۲/۷	-
	۰/۵	۱۲	۱۱۹۷/۴	۶۹۳/۵	-	۰/۸۶
	۱	NA	۷۰۳/۷	-	-	-
	۱	۱۲	۱۴۳۷	۷۳۳/۳	-	۰/۹۱
IPE 300	۰/۰۷	NA	۴۷۶/۶	-	-	-
	۰/۰۷	۱۰	۹۶۶/۱	۴۸۹/۵	-	۰/۵۳
	۰/۵	NA	۶۸۱/۸	-	۹۲۷/۸	-
	۰/۵	۱۰	۱۳۸۸/۴	۷۰۶/۶	-	۰/۷۶
	۱	NA	۹۸۲/۵	-	-	-
	۱	۱۰	۱۸۱۸/۷	۸۳۶/۲	-	۰/۹۰
	۰/۰۷	NA	۴۷۶/۶	-	-	-
	۰/۰۷	۱۵	۱۱۶۲/۵	۶۵۸/۹	-	۰/۵۸
	۰/۵	NA	۶۸۱/۸	-	۱۱۷۴/۳	-
	۰/۵	۱۵	۱۶۵۴/۴	۹۷۲/۶	-	۰/۸۳
	۱	NA	۹۸۲/۵	-	-	-
	۱	۱۵	۲۰۹۱/۸	۱۱۰۹/۳	-	۰/۹۴

جدول ۴- مقایسه ظرفیت نظری با ظرفیت مؤثر سخت‌کننده‌های عرضی در مقاطع IPB بر اساس AISC 360-22

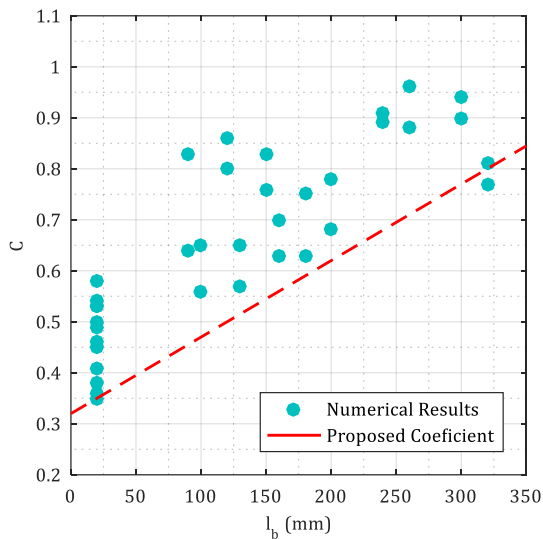
نسبت ظرفیت مؤثر به ظرفیت نظری	ظرفیت نظری سخت‌کننده‌ها (kN)	ظرفیت مؤثر سخت‌کننده‌ها (kN)	P _{FEM} (kN)	ضخامت سخت‌کننده‌ها (mm)	lb/d	نام مقطع
-	-	-	۷۴۵٫۷	NA	۰٫۱	IPB 200
۰٫۳۶	-	۴۸۷	۱۲۳۲٫۷	۱۰	۰٫۱	
-	۱۳۵۷٫۶	-	۸۷۹٫۶	NA	۰٫۵	
۰٫۵۶		۷۵۸٫۵	۱۶۳۸٫۱	۱۰	۰٫۵	
-		-	۱۱۳۰٫۵	NA	۱	
۰٫۶۸		۹۲۱	۲۰۵۱٫۵	۱۰	۱	
-	۱۴۸۹٫۴	-	۷۴۵٫۷	NA	۰٫۱	
۰٫۴۵		۶۷۵٫۸	۱۴۲۱٫۲	۱۲	۰٫۱	
-		-	۸۷۹٫۶	NA	۰٫۵	
۰٫۶۵		۹۶۴	۱۸۴۳٫۶	۱۲	۰٫۵	
-		-	۱۱۳۰٫۵	NA	۱	
۰٫۷۸		۱۱۵۷٫۲	۲۲۸۷٫۷	۱۲	۱	
-	۱۸۹۷٫۵	-	۹۸۹٫۶	NA	۰٫۰۸	IPB 260
۰٫۳۸		۷۲۸٫۵	۱۷۱۸٫۱	۱۲	۰٫۰۸	
-		-	۱۲۹۷	NA	۰٫۵	
۰٫۵۷		۱۰۹۱٫۵	۲۳۸۸٫۵	۱۲	۰٫۵	
-		-	۱۵۵۲٫۲	NA	۱	
۰٫۸۸		۱۶۷۱٫۱	۳۲۲۳٫۳	۱۲	۱	
-	۲۱۵۶٫۲	-	۹۸۹٫۶	NA	۰٫۰۸	
۰٫۴۹		۱۰۵۶٫۴	۲۰۴۶	۱۵	۰٫۰۸	
-		-	۱۲۹۷	NA	۰٫۵	
۰٫۶۵		۱۳۹۸٫۲	۲۶۹۵٫۲	۱۵	۰٫۵	
-		-	۱۵۵۲٫۲	NA	۱	
۰٫۹۶		۲۰۷۳٫۹	۳۲۲۶٫۱	۱۵	۱	
-	۲۶۳۳٫۶	-	۱۳۷۴٫۹	NA	۰٫۰۷	IPB 320
۰٫۴۱		۱۰۷۳٫۹	۲۴۴۸٫۸	۱۵	۰٫۰۷	
-		-	۱۶۸۵	NA	۰٫۵	
۰٫۶۳		۱۶۶۸٫۴	۳۳۵۳٫۴	۱۵	۰٫۵	
-		-	۲۰۳۱٫۴	NA	۱	
۰٫۷۷		۲۰۲۴٫۱	۴۰۵۵٫۵	۱۵	۱	
-	۳۱۳۱٫۳	-	۱۳۷۴٫۹	NA	۰٫۰۷	
۰٫۴۶		۱۴۵۰٫۱	۲۸۲۵	۲۰	۰٫۰۷	
-		-	۱۶۸۵	NA	۰٫۵	
۰٫۷۰		۲۱۲۹٫۹	۳۸۷۷٫۹	۲۰	۰٫۵	
-		-	۲۰۳۱٫۴	NA	۱	
۰٫۸۱		۲۵۴۲٫۷	۴۵۷۴٫۱	۲۰	۱	



شکل ۷- تنش حاصل از بارگذاری در نمونه IPB260-t12 تحت اثر فشار دوطرفه در لحظه خرابی



شکل ۸- تنش حاصل از بارگذاری در نمونه IPE240-t10 تحت اثر فشار دوطرفه در لحظه خرابی



شکل ۹- مقایسه رابطه (۲) با نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر طول بارگذاری بر رفتار موضعی مقاطع فولادی دارای سخت‌کننده عرضی در مواجهه با بارهای متمرکز فشاری به وسیله مدل‌های اجزای محدود بررسی و تحلیل شد. نتایج و نکات برجسته این پژوهش، به شرح زیر است:

۱. افزایش طول بارگذاری موجب افزایش ظرفیت سخت‌کننده‌های عرضی و جان مقاطع فولادی می‌شود.
۲. در مقاطع فولادی بدون سخت‌کننده عرضی، حالت حدی کمناش فشاری جان، حالت حاکم بر خرابی مقاطع است.
۳. مقاطع فولادی دارای سخت‌کننده عرضی با کمناش سخت‌کننده یا با رسیدن به حد پلاستیسیته مصالح، منهدم شدند.
۴. ضوابط ارائه شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 برای محاسبه ظرفیت سخت‌کننده‌های عرضی، مناسب نیست و برای تمام نمونه‌ها مقادیر غیرمحافظة کارانه ارائه می‌کند.
۵. سخت‌کننده‌های عرضی، علاوه بر مشارکت در بار متمرکز وارده، برای جان مقاطع فولادی مهار، جانبی نیز ایجاد می‌کنند.
۶. ظرفیت سخت‌کننده‌های عرضی مورد مطالعه در این پژوهش، بین ۳۵٪ تا ۹۶٪ مقادیر نظری ارائه شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 برای پیش‌بینی ظرفیت سخت‌کننده‌های عرضی است.
۷. رابطه اصلاحی برای تعیین ظرفیت فشاری سخت‌کننده‌های عرضی پیشنهاد شد. این رابطه برای تمامی مقاطع دارای نسبت‌های هندسی و شرایط بارگذاری مشابه با نمونه‌های این پژوهش، معتبر خواهد بود.
۸. انجام آزمایشات تجربی برای توسعه روابط سازگار با ظرفیت مؤثر سخت‌کننده‌های عرضی، ضرورت دارد.

سخت‌کننده‌های عرضی علاوه بر مقاومت در برابر بار وارده، به عنوان مهارجانبی جان مقطع فولادی نیز عمل کرده و موجب افزایش ظرفیت موضعی می‌شوند. در این شرایط، کمناش جان به تأخیر افتاده و این امکان فراهم می‌شود که قبل از وقوع کمناش سخت‌کننده‌ها و جان مقطع، بخش بسیار وسیع‌تری از جان وارد مرحله تسلیم شده و ظرفیت باربری افزایش یابد. همچنین، این عملکرد مهاری و مشارکت جان در تحمل بار، نشان‌دهنده فلسفه ضوابط آیین‌نامه‌ای در منظور نمودن بخشی از جان مقطع (نواری معادل ۲۵ برابر ضخامت جان) در تعیین مقطع ستون فرضی برای محاسبه ظرفیت فشاری سخت‌کننده‌ها است. در تمام نمونه‌های بدون سخت‌کننده، کمناش فشاری جان حاکم بر خرابی ستون‌ها تعیین شد. رفتار خرابی غالب سخت‌کننده‌ها کمناش سخت‌کننده‌های عرضی تعیین شد؛ اما برخی نمونه‌های با افزایش طول بارگذاری، قبل از کمناش سخت‌کننده به حد پلاستیسیته مصالح رسیدند. با توجه به نتایج جدول‌های (۳) و (۴)، اختلاف میان ظرفیت عددی و نظری، عمدتاً تابع طول بارگذاری است. در این میان، ضخامت سخت‌کننده‌ها و سایر مشخصات هندسی مقطع، نقش ثانویه داشته و موجب نوسانات محدودتری در هر مقطع می‌شوند. از آنجاکه ضوابط موجود در آیین‌نامه، متغیر طول بارگذاری را لحاظ نکرده است، این رابطه ذاتاً برای ارزیابی مقاطع تحت بار متمرکز فشاری دوطرفه در این پژوهش دارای خطا است. برای افزایش دقت طراحی اتصالات فولادی، پیشنهاد می‌شود ضریب (C) (رابطه (۲)) به مقدار نظری ظرفیت سخت‌کننده‌های عرضی اضافه شود تا سازگاری مناسبی بین ظرفیت واقعی و ظرفیت نظری ایجاد شود.

$$C = 0.0015l_b + 0.32 \quad (2)$$

که (l_b) طول بارگذاری بر حسب میلی‌متر است.

رابطه (۲) یک رابطه خطی به دست آمده از داده‌های کران پایین پژوهش است. ضریب (C) به صورت محافظه کارانه برای اکثر نمونه‌ها، قادر به اصلاح ظرفیت سخت‌کننده‌های عرضی بر اساس تابعی از طول بارگذاری است. مقادیر تعیین شده با استفاده از رابطه (۲) و داده‌های به دست آمده از تحلیل مدل‌های عددی، در شکل (۹) نشان داده شده است. رابطه (۲) برای تمام مقاطع با نسبت‌های هندسی مشابه نمونه‌های این پژوهش معتبر خواهد بود. برای تعیین رابطه دقیق‌تر جهت تعیین ظرفیت سخت‌کننده‌های عرضی، باید آزمایشات تجربی بیش‌تری انجام شود.

- [16] Alvarez Rodilla, J., and Kowalkowski, K. (2021), "Determination of Capacities of Eccentric Stiffeners Part 1: Experimental Studies", Engineering Journal, 58(2), pp.79-98.
- [17] Alvarez Rodilla, J., and Kowalkowski, K. (2021), "Determination of Capacities of Eccentric Stiffeners Part 2: Analytical Studies", Engineering Journal, 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 & Construction Engineering, 12(9), pp.66-81.
- [19] Fakhar Hasani, N., and Hosseinzadeh, Y. (2026), "Assessment of Local Web Instability in Double-IPE Built-Up Column Subjected to Double Compression Loading", Journal of Steel & Structure, 20(51), pp.55-68.
- [20] Menkulasi, F., Farzana, N., Moen, C.D., and Eatherton, M.R. (2016), "Revisiting Web Compression Buckling for Wide Flange Sections", in Proceedings of the Annual Stability Conference, Structural Stability Research Council, Orlando, FL, pp.148-162.
- [21] Sener, K., Witte, J., and Varma, A. H. (2019), "On the Influence of Load Width on Web Compression Buckling Strength", in Proceedings of the Annual Stability Conference, Structural Stability Research Council, St. Louis, MO, pp.447-459.
- [22] ABAQUS. "Abaqus/CAE User's Manual. V2021: Dassault Systems, Inc." Dassault Systems. <http://www.simulia.com>.
- [23] Bruneau, M., Uang, C.M., and Whittaker, A.S. (1998), "Ductile Design of Steel Structures", McGraw-Hill, New York, NY.
- [24] prEN 1993-1-14. Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-14: Design assisted by finite element analysis, (2023), E. C. f. Standardization.
- [25] Kowalkowski, K.J., and Alvarez Rodilla, J. (2019), "Analysis and Design of Eccentric Stiffeners Part of Moment Connections to Column Flanges", Final Report for AISC, Chicago, Ill.
- [1] Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-22, (2022), AISC, American Institute of Steel Construction, Inc. 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 & Construction Engineering, 12(9), pp.82-104.
- [3] Timoshenko, S.P., and Gere, J.M. (1985), "Theory of Elastic Stability", McGraw-Hill.
- [4] Chen, W.F., and Oppenheim, I.J. (1970), "Web Buckling Strength of Beam-to-Column Connections", Fritz Engineering Laboratory Report No.333.10, Lehigh University, Bethlehem, PA.
- [5] Newlin, D., and Chen, W. (1971), "Strength and Stability of Column Web in Welded Beam-to-Column Connections", Fritz Engineering Laboratory Report No.333.14, Lehigh University, Bethlehem, PA.
- [6] Sherbourne, A., and Murthy, D. (1978), "Computer Simulation of Column Webs in Structural Steel Connections", Computers & Structures, 8(3-4), pp.479-490.
- [7] Elgaaly, M., and Salkar, R. (1991), "Web Crippling under Edge Loading", Proceedings of the National Steel Construction Conference, Washington, D.C., AISC, pp.7-3-7-21.
- [8] Chen, S.J., and Chen, G.K. (1990), "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.221-231.
- [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., and Prinz, G.S. (2019), "Effect of Continuity-Plate Alignment on the Capacity of Welded Beam-to-Column Moment Connections", Engineering Structures, 198, p.109550.