

تأثیر طول اتکایی بار متمرکز بر ظرفیت کمانش فشاری جان مقاطع فولادی

نیما فخار حسنی^۱، یوسف حسین زاده^{*۲}

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

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

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- nima.fakhar.h@phd.tabrizu.ac.ir

۲- hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir

چکیده:

کنترل کمانش فشاری جان برای جلوگیری از ناپایداری موضعی در مقاطع فولادی ضرورت دارد. ضوابط موجود برای تعیین ظرفیت فشاری جان، براساس نتایج تحقیق بر روی مقاطع بال پهن توسعه یافته و در رابطه پیشنهادی آیین نامه AISC 360-22، اثر طول اتکایی در کنترل کمانش فشاری جان زیر اثر بار متمرکز لحاظ نشده است. در این مقاله، اثر طول اتکایی بار متمرکز بر ظرفیت کمانش فشاری جان نیمرخ‌های IPE و IPB تعیین می‌شود. مدل اجزای محدود برای بررسی رفتار جان مقاطع فولادی تحت اثر بار متمرکز ایجاد و دقت آن با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ارزیابی و رفتار مقاطع فولادی تحت اثر فشار دوطرفه مطالعه شد. بررسی‌ها نشان داد که طول اتکایی بار متمرکز نقش قابل ملاحظه‌ای در ظرفیت کمانش جان دارد و افزایش آن می‌تواند ظرفیت مقطع را بین ۱۸ تا ۱۰۶ درصد افزایش دهد. در ادامه، ضرایب اصلاحی برای رابطه آیین نامه در تعیین ظرفیت کمانش فشاری جان ارائه شد.

واژگان کلیدی:

کمانش فشاری جان، طول اتکایی بار متمرکز، ناپایداری موضعی، اثر بار متمرکز، مدل اجزای محدود.

* یوسف حسین زاده، استاد دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه تبریز.

ایمیل: hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

The effect of bearing length on the web compression buckling capacity of steel sections

Nima Fakhar Hasani¹, Yousef Hosseinzadeh²

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

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

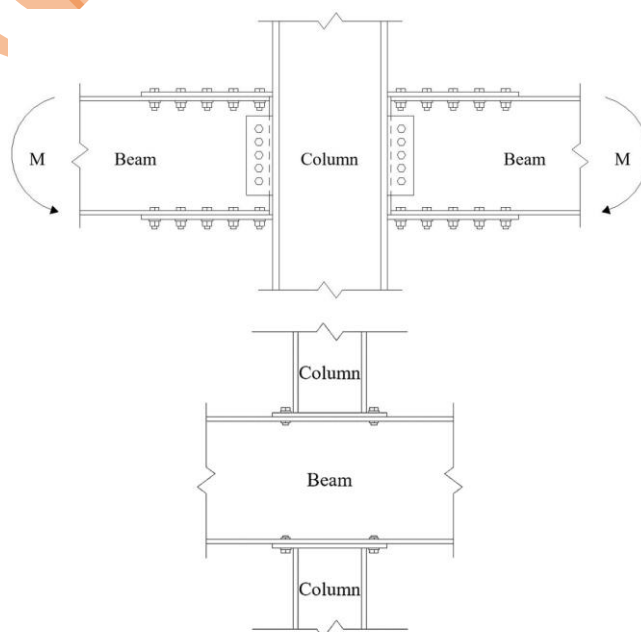
Abstract:

The control of web compression buckling in steel sections is essential to prevent local instability. The existing design criteria for determining web compression buckling capacity have been developed primarily based on research and test results on wide-flange sections, and there is limited information regarding the behavior of other section types. Moreover, the effect of bearing length is not considered in the proposed equation of AISC 360-22 for controlling web compression buckling. In this paper, the influence of bearing length on the compressive buckling capacity of steel section webs is investigated. Initially, a finite element model was developed using Abaqus software to examine the behavior of steel member webs under concentrated loading, and its accuracy was validated using numerical and experimental data. Subsequently, the behavior of 24 specimens, including IPE and IPB sections, was studied under the double compression loading condition defined in AISC 360-22. This study enabled the evaluation of the effectiveness of bearing length in enhancing the local stability of steel members. The governing failure limit state in steel members was identified as web compression buckling. The local failure capacity of steel member webs was determined using the AISC 360-22 specification and compared with the results of finite element analysis. For moment connections, in general, the equation provided by the design code proved conservative for IPE sections and non-conservative for IPB sections. The research results demonstrate that bearing length plays a significant role in web buckling capacity and its effect should be considered in determining web compression buckling capacity. Increasing the bearing length can enhance the web section capacity by between 18% and 106%. Finally, suggestions and modification factors for the criteria provided by AISC 360-22 for controlling the web compression buckling limit state are presented. These proposed coefficients improve accuracy and efficiency in the design of steel members.

Keywords: Web Compression Buckling, Length of Bearing, Local Instability, Concentrated Load Effect, Finite Element Model.

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

تنش ناشی از اعمال بار متمرکز، می‌تواند باعث خرابی و ناپایداری موضعی عضو فولادی شود. کنترل ناپایداری موضعی، برای اعضای با ظرفیت کلی کافی، ضرورت دارد. در بخش *J10* آیین‌نامه *AISC 360-22* [۱]، حالات حدی خرابی محتمل جان و بال مقاطع فولادی تحت اثر بارهای متمرکز معرفی شده‌است. مقاومت مقطع با توجه به کمترین ظرفیت محاسبه شده در حالات حدی تسلیم موضعی جان^۱، خمش موضعی بال^۲، چروکیدگی موضعی جان^۳ و کمناش فشاری جان^۴، براساس آیین‌نامه *AISC 360-22* [۱] تعیین می‌شود. در صورت اعمال یک جفت بار متمرکز فشاری یکسان و در خلاف جهت یکدیگر به عضو فولادی، حالت حدی کمناش فشاری جان کنترل می‌شود. با توجه به شکل (۱)، این حالت حدی می‌تواند در اتصالات گیردار تحت اثر بارهای ثقلی و محل اعمال بارهای متمرکز در تیرها ایجاد شود. در صورت کمبود ظرفیت مقطع، سخت‌کننده عرضی طرح و اجرا می‌شود.



شکل ۱: حالت‌های ایجاد کمناش فشاری جان در اعضای فولادی

در ابتدا، تیموشنکو و گی^۵ [۲] رابطه‌ای برای محاسبه نیروی بحرانی کمناش الاستیک ورق با شرایط مرزی مفصلی ارائه نمودند. در ادامه چن و اوپنهایم^۶ [۳] در سال ۱۹۷۰ و نیولین و چن^۷ [۴] در سال ۱۹۷۱ 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 ارائه شده توسط تیموشنکو و گی^۵ برای کمناش فشاری جان ستون‌ها را با اعمال برخی تغییرات و اعمال شرایط محافظه‌کارانه اصلاح نمودند.

لاگرکوئیست و جانسون^۸ [۵] تعدادی شاه‌تیر فولادی را تحت اثر چند نوع بارگذاری قرار داده و ظرفیت مقاطع را تحت اثر بارهای متمرکز بررسی نمودند. در نهایت با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، روش‌هایی برای محاسبه ظرفیت مقاطع تحت اثر بارهای متمرکز پیشنهاد شد. یام و همکاران^۹ [۶] پدیده کمناش موضعی جان در انتهای تیرهای فرعی با اتصالات مفصلی را مورد ارزیابی قرار دادند. در اینگونه اتصالات با برش بال بالایی مقطع، مقاومت آن کاهش می‌یابد. یام و همکاران با انجام آزمایشات تمام مقیاس، رابطه‌ای برای تعیین ظرفیت مقاطع برش خورده در برابر کمناش جان ناشی از برش وارده را پیشنهاد نمودند.

منکولاسی و همکاران^{۱۰} [۷] به صورت عددی تأثیر طول اتکایی بار متمرکز بر ظرفیت مقاطع بال پهن در برابر کمناش فشاری جان را مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آن‌ها نشان داد که افزایش عرض بار، ظرفیت جان در برابر کمناش فشاری را افزایش می‌دهد. در نهایت، آنها ضرایبی را برای اصلاح رابطه ارائه شده توسط آیین‌نامه *AISC 360-22* پیشنهاد کردند تا اثر طول بارگذاری را در نظر بگیرد. سنر و همکاران^{۱۱} [۸] نیز مطالعات آزمایشگاهی و عددی در مورد ظرفیت مقاطع فولادی در برابر پدیده کمناش فشاری جان انجام دادند. آن‌ها متغیر طول بارگذاری اعمال شده به مقطع را مورد بررسی قرار داده و با مقادیر نظری ارائه شده توسط رابطه پیشنهادی آیین‌نامه *AISC 360-22* مورد مقایسه قرار

^۵ Timoshenko and Gere

^۶ Chen and Oppenheim

^۷ Newlin and Chen

^۸ Lagerqvist and Johansson

^۹ Yam et al

^{۱۰} Menkulasi et al.

^{۱۱} Sener et al

^۱ Web Local Yielding

^۲ Local Flange Bending

^۳ Web local Crippling

^۴ Web Compression Buckling

دادند. بررسی‌ها نشان داد که طول بار اعمال شده نقش مهمی در ظرفیت ستون در مقاطع بال پهن دارد که این موضوع در رابطه پیشنهادی آیین‌نامه *AISC 360-22* لحاظ نشده و با افزایش طول بارگذاری، جان ستون می‌تواند تا پنج برابر مقدار ارائه شده توسط آیین‌نامه *AISC 360-22* در برابر پدیده کمناش فشاری جان ظرفیت داشته باشد.

رودیلا و کووالکوفسکی^۱ [۹] و [۱۰] تحقیقاتی در مورد تأثیر خروج از مرکزیت بر ظرفیت سخت‌کننده‌ها انجام دادند. نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌های المان محدود مقاطع بال پهن تحت اثر بارهای متمرکز مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تحقیقات نشان داد که رابطه ارائه شده برای حالت حدی کمناش فشاری جان توسط آیین‌نامه *AISC 360-22* برای پیش‌بینی ظرفیت جان برخی ستون‌ها تحت اثر بارهای متمرکز فشاری مناسب نیست. فخار حسنی و حسین‌زاده [۱۱] ظرفیت باربری بال و جان‌های مقاطع جعبه‌ای را تحت اثر بارهای متمرکز بررسی کردند. مدل‌های المان محدود ستون‌های جعبه‌ای تحت اثر بارهای متمرکز قرار گرفتند و نتایج نشان داد که رابطه ارائه شده برای حالت حدی کمناش فشاری جان توسط آیین‌نامه *AISC 360-22* برای مقاطع جعبه‌ای مناسب نیست.

افزودن ورق پیوستگی موجب جلوگیری از کمناش فشاری جان و افزایش پایداری چشمه اتصال می‌شود. نقی‌پور و سپاسگذار [۱۲] با شبیه‌سازی‌های عددی، رفتار لرزه‌ای، شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی اتصالات خمشی دارای ورق پیوستگی با مقطع کاهش‌یافته در تیرهای دبل را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که تضعیف بال‌ها بدون کاهش محسوس در سختی اولیه اتصال، عملکرد چرخه‌ای و شکل‌پذیری چشمه اتصال را به طور چشمگیری ارتقا می‌دهد. کافی و طریقی [۱۳] نیز به دلیل دشواری اجرا و بازرسی جوش ورق‌های پیوستگی در ستون‌های قوطی، پیشنهادهایی برای حذف ورق پیوستگی ارائه نمودند. نتایج نشان داد حذف کامل ورق‌های پیوستگی موجب افت قابل‌توجهی در ظرفیت باربری، سختی و جذب انرژی اتصال می‌شود، در حالی که راهکارهای پیشنهادی این افت را به کمتر از ۱۲ درصد کاهش دادند.

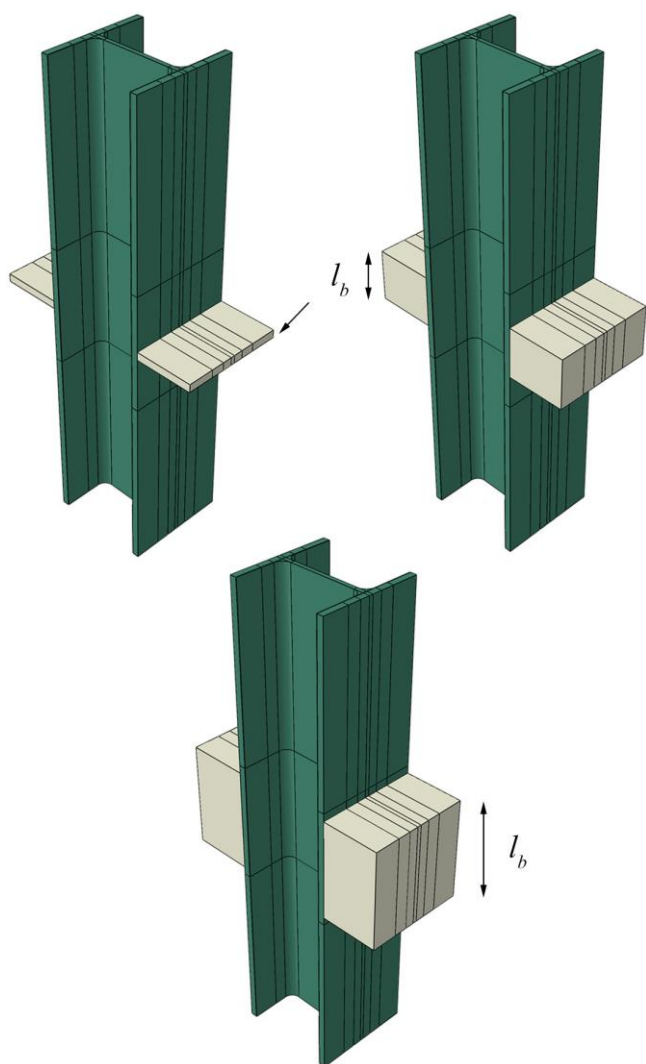
^۱ Rodilla and Kowalkowski

اگرچه در اتصالات گیردار، تعبیه سخت‌کننده‌های عرضی برای کنترل ناپایداری موضعی امری رایج است، اما طبق ضوابط آیین‌نامه‌ای، طراحی و اجرای این سخت‌کننده‌ها منوط به کمبود ظرفیت مقطع تحت اثر بارهای متمرکز است. از این رو، تعیین ظرفیت جان بدون سخت‌کننده، گام نخست در فرآیند طراحی محسوب می‌شود. علاوه بر این، حالت حدی کمناش فشاری جان منحصراً محدود به اتصالات گیردار نیست و این پدیده می‌تواند در تیرها نیز تحت اثر بارهای متمرکز رخ دهد. رابطه تعیین ظرفیت جان مقاطع فولادی در برابر کمناش فشاری، برای مقاطع بال پهن توسعه داده شده و متغیر طول بار متمرکز را نیز در نظر نمی‌گیرد. همچنین نتایج تحقیقات گذشته در مورد تأثیر طول بارگذاری نیز کافی نیست و دقت نتایج برای مقاطع رایج در ایران مشخص نمی‌باشد. بطور کلی مطالعات محدودی در مورد رفتار مقاطع *IPE* و *IPB* تحت اثر بارهای متمرکز انجام شده‌است. در نتیجه انجام پژوهشی در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق ابتدا مدل‌های اجزای محدود برای بررسی رفتار نیمرخ‌های فولادی تحت اثر بار متمرکز ایجاد و دقت آن با استفاده از داده‌های عددی و آزمایشگاهی ارزیابی شد. در ادامه، رفتار ۲۴ مدل اجزای محدود با مقاطع مختلف تحت اثر بارگذاری فشار دوطرفه تعریف شده در آیین‌نامه *AISC 360-22* [۱] مورد تحلیل قرار گرفت. سپس نوع خرابی و ظرفیت ستون‌ها با رابطه ارائه شده توسط آیین‌نامه مورد مقایسه قرار گرفت و ضرایب اصلاحی مربوطه پیشنهاد شد. در انتها نتایج و پیشنهادات مربوطه شرح داده شده‌است.

۱-۱- مبانی نظری تحقیق

در اتصالات اعضای فولادی، نیروهای متمرکز قابل توجهی منتقل می‌شود. براساس آیین‌نامه *AISC 360-22* [۱]، ظرفیت ستون در برابر نیروهای متمرکز فشاری برای حالت حدی کمناش فشاری جان با استفاده از رابطه (I) محاسبه می‌شود. رابطه (I) بطور تقریبی برای نسبت طول بارگذاری به عمق مقطع (l_b/d) کوچک‌تر از ۱ مناسب است در صورتی که نسبت طول بارگذاری نسبت به عمق مقطع بزرگ باشد [۱]، جان عضو باید به عنوان یک عضو فشاری طراحی شود. حالت حدی خرابی در شکل (۲) نشان داده شده‌است. رابطه ارائه شده در این بخش، تنها برای حالت بررسی پایداری در فاصله زیاد از انتهای ستون، می‌باشد.

برای مدل‌های اجزای محدود، با استفاده از روابط پیشنهادی برونو و همکاران^۲ [۱۶] به منحنی تنش-کرنش حقیقی نشان داده شده در شکل (۴) تبدیل شد. مصالح فولادی از رده *ASTM A992* با تنش تسلیم 345 MPa و تنش نهایی 530 MPa می‌باشد. همچنین مدول الاستیسیته $2 \times 10^5 \text{ MPa}$ و نسبت پواسون مصالح 0.3 در نظر گرفته شده است. مصالح صفحات بارگذاری به صورت الاستیک^۳ معرفی شد.



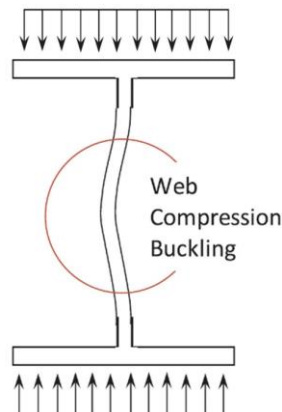
شکل ۳: پیکربندی مدل‌های اجزای محدود

$$R_n = \frac{24t_w^3 \sqrt{EF_{yw}}}{h}$$

(1)

که در آن:

$$\begin{aligned} t_w &= \text{ضخامت جان} & F_{yw} &= \text{تنش تسلیم جان} \\ E &= \text{مدول الاستیسیته فولاد} & h &= \text{ارتفاع آزاد جان} \end{aligned}$$



شکل ۲: حالت حدی خرابی ستون تحت اثر فشار دوطرفه [۱۴]

۲- روش تحقیق

۲-۱- مدل اجزای محدود

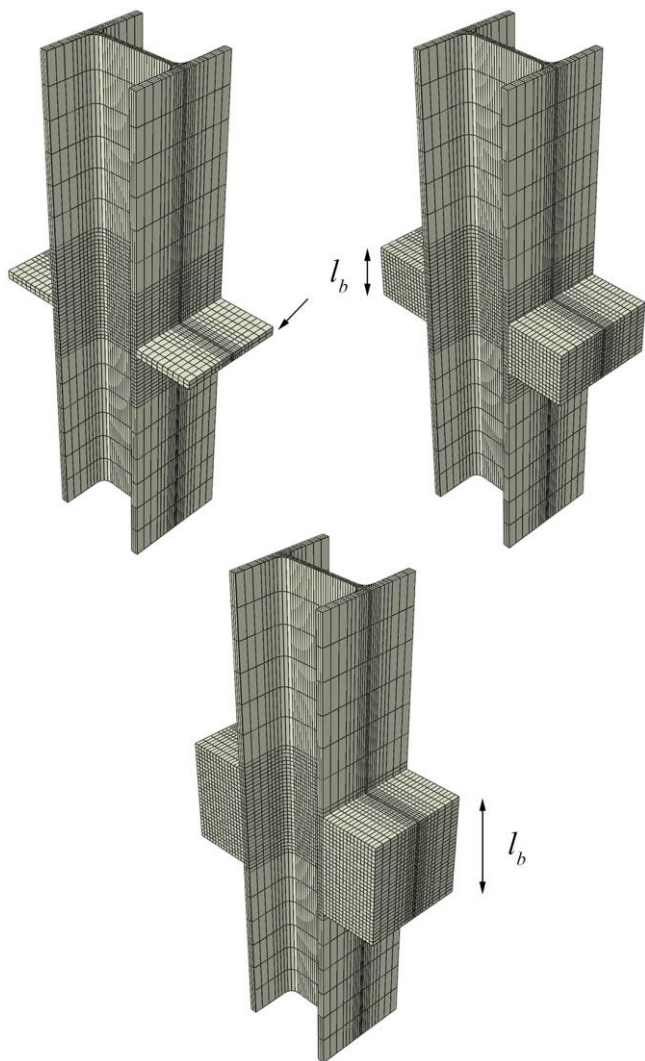
مدل‌های اجزای محدود ستون‌ها، در نرم‌افزار اجزای محدود *ABAQUS 2020* [۱۵] ایجاد شده‌اند. برای ارزیابی صحت تحلیل اجزای محدود، از داده‌های آزمایش و نتایج مدل‌سازی عددی رودیلا و کوالکوفسکی [۹] و [۱۰] استفاده شد. پیکربندی کلی نمونه‌ها در شکل (۳) نشان داده شده‌است. طول نمونه‌ها به عنوان یک متغیر ثابت برابر $1/2$ متر در نظر گرفته شد. ارتفاع صفحات بارگذاری 15 سانتی‌متر و عرض آن‌ها برابر با بال ستون تعیین شد.

برای شبیه‌سازی شرایط اتصالات فولادی، درجات آزادی صفحات بارگذاری در تمام جهات محدود شده و صفحه بارگذاری فقط می‌تواند در جهت عمود بر بال ستون حرکت کند. بارگذاری نیز بصورت جابجایی کنترل بوده و با اعمال یک جابجایی روی سطح فوقانی صفحه بارگذاری به مقطع فولادی اعمال می‌شود. مصالح ستون و اجزای آن به صورت ایزوتروپیک^۱ و روابط تنش-کرنش مصالح به صورت نمودارهای چندخطی معرفی شدند. منحنی تنش-کرنش مهندسی ارائه شده توسط رودیلا و کوالکوفسکی [۱۰]

^۲ Bruno et al

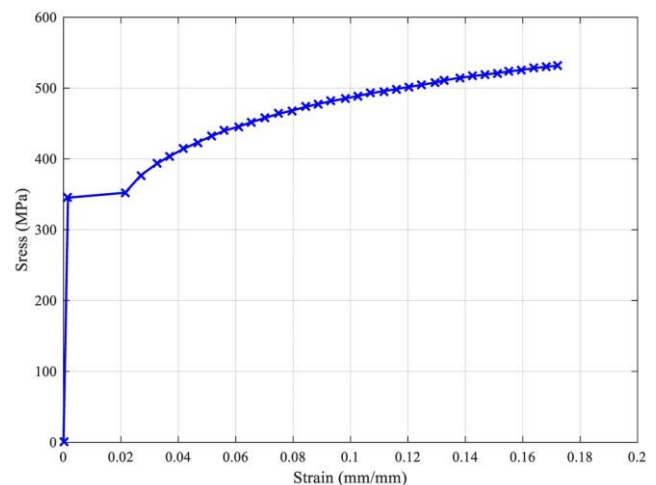
^۳ Elastic

^۱ Isotropic



شکل ۵: مشبندی مدل‌های اجزای محدود

اجزای محدود (شکل ۷-ا) با داده‌های شبیه‌سازی عددی [۱۰] (شکل ۷-ب) مقایسه شده‌است. ستون در هر دو مدل، تحت اثر فشار دوطرفه دچار کماتش فشاری جان شده و دچار خرابی می‌شود. با توجه به شکل (۶) و (۷)، پدیده تمرکز تنش و کرنش در مجاورت محل اعمال بار متمرکز به ستون ایجاد شده و در نواحی دورتر، تنش‌های ناشی از بار وارده کاهش می‌یابد. نمودارهای بار-جابجایی حاصل از تحلیل مدل‌های اجزای محدود و آزمایش در شکل (۸) نشان داده شده‌است. در نمودارهای بار-جابجایی، نمودار مربوط به داده آزمایشگاهی به سمت چپ انتقال یافت تا اثر لقی اولیه جک حذف شود.



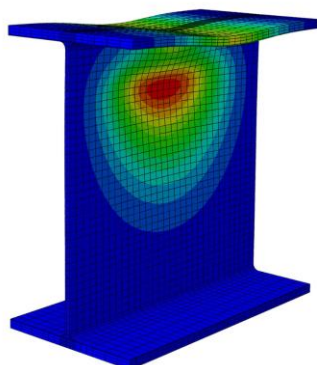
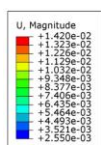
شکل ۴: نمودار تنش-کرنش حقیقی مصالح فولادی

ستون و صفحات بارگذاری با المان‌های مکعبی شش وجهی از نوع *C3D8R* شبیه‌سازی شدند. برای اتصال عضو فولادی و صفحه بارگذاری، از گزینه *tie* استفاده شد. تحلیل مدل‌ها در دو گام انجام شد؛ ابتدا تحلیل کماتش برای استخراج شکل مد اول کماتش انجام گرفت. سپس در گام دوم، برای تحلیل ستون‌ها از تحلیل *Static Riks* با لحاظ کردن رفتار غیرخطی هندسی، استفاده شد. برای آغاز کماتش و در نظر گرفتن خطای ساخت، نقص هندسی در گام دوم تحلیل اعمال شد. نقص هندسی، بصورت درصدی از مد اول کماتش حاصل از تحلیل کماتش به مدل اعمال شد. مقدار مناسب نقص هندسی ۰.۰۱٪ تعیین شد [۱۰]. اندازه مش مناسب با تحلیل حساسیت و مقایسه نتایج با داده‌های آزمایش به دست‌آمد [۱۰]. الگوی مش ستون‌ها در شکل (۵) نشان داده شده‌است. معیار خرابی نمونه‌های تحت اثر فشار، رسیدن به حداکثر ظرفیت تعیین شد.

۲-۲- صحت سنجی مدل اجزای محدود

با تحلیل اجزای محدود، رفتار نمونه ستون بدون سخت‌کننده مرجع زیر بار متمرکز تعیین شد. در شکل (۶) توزیع تغییرشکل مدل اجزای محدود این پژوهش به همراه مکانیزم^۱ خرابی و تغییرشکل نمونه آزمایشگاهی [۱۷] مقایسه شده‌است. خرابی ستون در هر دو حالت، در اثر کماتش موضعی جان تحت اثر فشار دوطرفه ایجاد شده‌است. در شکل (۷) نیز توزیع تنش حاصل از تحلیل مدل

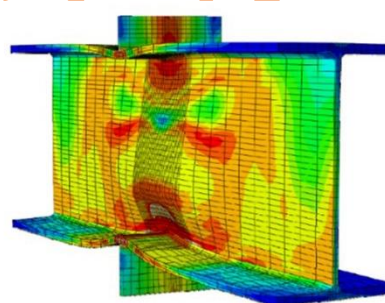
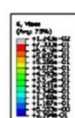
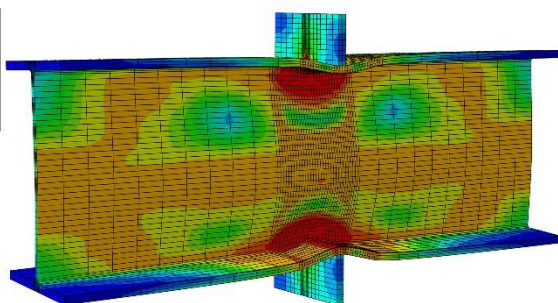
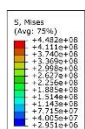
^۱ Mechanism



(b)

(a)

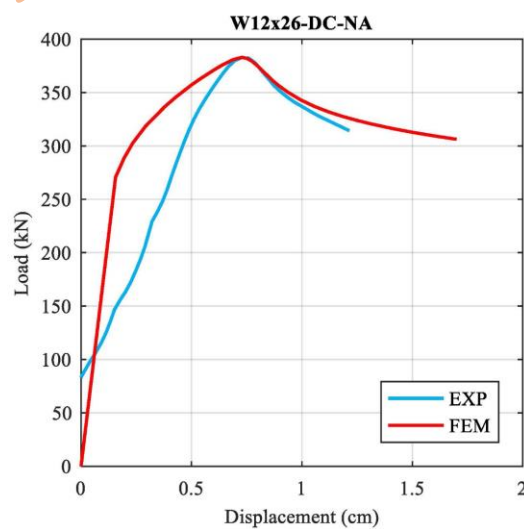
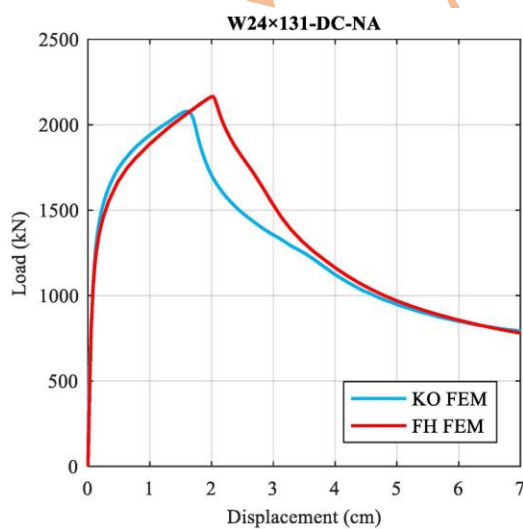
شکل ۶: کمانش موضعی جان نمونه W12x26 تحت اثر فشار دوطرفه
 (a) مکانیزم خرابی ستون [۱۷] (b) توزیع جابجایی حاصل از تحلیل اجزای محدود



(b)

(a)

شکل ۷: توزیع تنش و کمانش فشاری در جان نمونه W24x131 تحت اثر فشار دوطرفه
 (a) نتایج تحلیل مرجع [۱۰] (b) نتایج تحلیل اجزای محدود



(b)

(a)

شکل ۸: نمودارهای بار جابجایی مدل‌های اجزای محدود و داده‌های آزمایش
 (a) مقایسه نمودار بار - جابجایی تحلیل اجزای محدود با داده‌های آزمایش [۱۷]
 (b) مقایسه نمودار بار - جابجایی تحلیل اجزای محدود با نتایج مرجع [۱۰]

کند. نمودارهای بار - جابجایی تمام مقاطع فولادی در شکل (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. با افزایش نسبت طول بارگذاری به عمق مقطع، ظرفیت جان مقطع افزایش می یابد اما کمانش سریع تر رخ داده و مقطع با تحمل تغییر شکل های کمتر دچار خرابی می شود.

جدول ۱: نمونه های مطالعه پارامتریک

Specimen	I_b (mm)	I_b/d
IPE 120	۲۰	۰٫۱۷
IPE 180	۲۰	۰٫۱۱
IPE 240	۲۰	۰٫۰۸
IPE 300	۲۰	۰٫۰۷
IPB 140	۲۰	۰٫۱۴
IPB 200	۲۰	۰٫۱
IPB 260	۲۰	۰٫۰۸
IPB 320	۲۰	۰٫۰۶
IPE 120	۶۰	۰٫۵
IPE 180	۹۰	۰٫۵
IPE 240	۱۲۰	۰٫۵
IPE 300	۱۵۰	۰٫۵
IPB 140	۷۰	۰٫۵
IPB 200	۱۰۰	۰٫۵
IPB 260	۱۳۰	۰٫۵
IPB 320	۱۶۰	۰٫۵
IPE 120	۱۲۰	۱
IPE 180	۹۰	۱
IPE 240	۲۴۰	۱
IPE 300	۳۰۰	۱
IPB 140	۱۴۰	۱
IPB 200	۲۰۰	۱
IPB 260	۲۶۰	۱
IPB 320	۳۲۰	۱

۳ - ۲ - مقایسه ظرفیت جان مقاطع فولادی با ضوابط

آیین نامه AISC

ظرفیت پیش بینی شده توسط ضوابط آیین نامه AISC 360-22 [۱] به همراه نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود در جدول (۲) نشان داده شده است. رابطه ارائه شده برای کمانش فشاری جان (رابطه I) تأثیر طول بارگذاری را در نظر نمی گیرد و

در نمونه $W12 \times 26$ ، حداکثر خطای مدل اجزای محدود در مقایسه با داده های آزمایشگاهی، در فشار یکطرفه $۰٫۰۲\%$ و در نمونه $W24 \times 131$ ، حداکثر خطای مدل اجزای محدود در مقایسه با نتایج تحلیل مرجع [۱۰] در فشار دوطرفه برابر با $۰٫۱۴\%$ می باشد. بنابراین، مدل اجزای محدود ایجاد شده دارای دقت مناسب جهت استفاده در مطالعات پارامتریک^{۱۸} می باشد.

۳ - مطالعه پارامتریک

تأثیر طول بارگذاری بر ظرفیت اعضای فولادی در برابر بارهای متمرکز فشاری با استفاده از مطالعه پارامتریک ارزیابی شده است. بدین منظور، ۲۴ نمونه شامل چهار مقطع IPE و چهار مقطع IPB تحت اثر فشار صفحات بارگذاری با سه ابعاد مختلف طراحی و تحلیل شده اند. متغیرهای تحقیق شامل ابعاد مقطع و صفحه بارگذاری می باشد. طول صفحات بارگذاری براساس ضریبی از نسبت طول بارگذاری به عمق مقطع (I_b/d) تعیین شد. برای نسبت های کوچک طول بارگذاری به عمق مقطع (I_b/d) به عنوان نماینده اتصالات گیردار، ضخامت ثابت ۲۰ میلی متر در نظر گرفته شد. نمونه های مدلسازی شده برای مطالعه پارامتریک در جدول (۱) نشان داده شده است.

۳ - ۱ - بررسی تأثیر طول بارگذاری بر ظرفیت جان اعضای فولادی

تحت اثر فشار دوطرفه، در تمام نمونه ها کمانش فشاری جان حالت حدی حاکم بر خرابی تعیین شد. نتایج تحلیل اجزای محدود در جدول (۲) نشان داده شده است. با افزایش طول بارگذاری، ظرفیت تمام مقاطع فولادی افزایش پیدا می کند. افزایش ظرفیت نمونه ها نسبت به کمترین مقدار I_b/d در هر مقطع، برحسب درصد در جدول (۲) نشان داده شده است (Loading Width Effect %). افزایش طول بارگذاری می تواند ظرفیت اعضای فولادی را بین ۱۸٪ تا ۱۰۶٪ افزایش دهد. همانطور که مشاهده می شود، طول بارگذاری نقش قابل توجهی در ظرفیت کمانش جان مقاطع فولادی ایفا می کند. کمانش فشاری جان مقطع $IPE 240$ در شکل (۹) نشان داده شده است. با افزایش طول بارگذاری، بخش بیشتری از جان عضو درگیر بار وارده شده و مقاومت مقطع افزایش پیدا می -

^{۱۸} Parametric

مقاطع *IPE* و ضریب اصلاحی C_2 برای مقاطع *IPB* براساس روابط (3) و (4) اضافه شده است. براساس نمودارهای شکل (۱۲)، ضرایب پیشنهادی برای اکثر نمونه‌ها مقادیری محافظه کارانه ارائه می‌کند.

$$R_n = C_n \frac{24t_w^3 \sqrt{EF_{yw}}}{h} \quad (2)$$

$$C_1 = 0.008931 l_b + 0.6828 \quad (3)$$

$$C_2 = 0.003069 l_b + 0.5120 \quad (4)$$

که در آن:

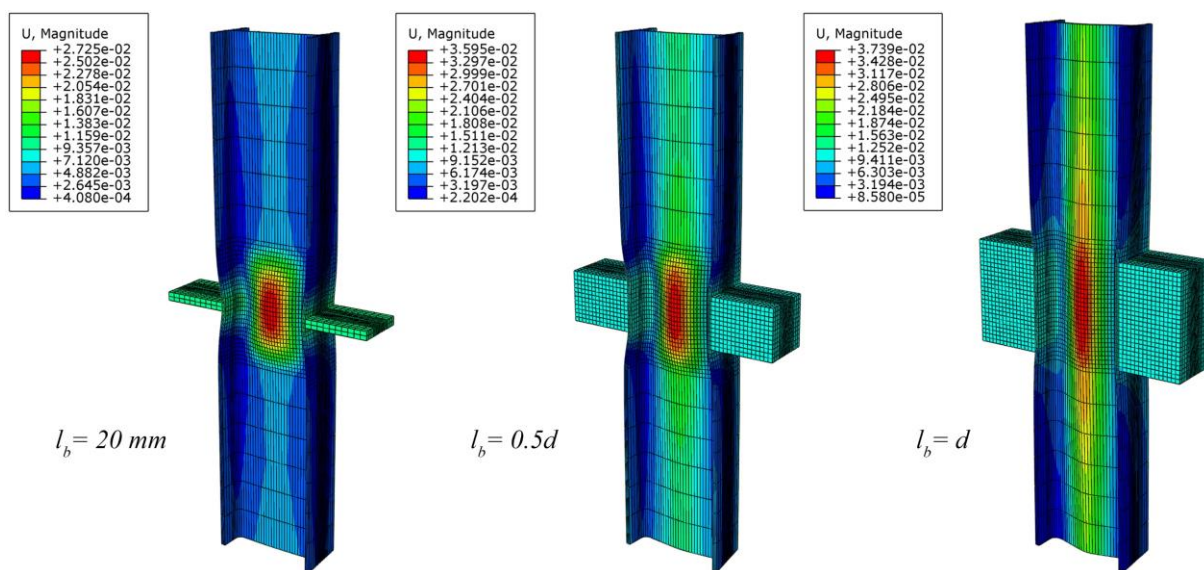
$$l_b = \text{طول بارگذاری بر حسب میلی‌متر}$$

برای تمام حالات بارگذاری مقداری یکسان ارائه می‌کند. برای حالت l_b/d کوچک، بطور کلی رابطه (1) برای مقاطع *IPE* محافظه کارانه و برای مقاطع *IPB* غیرمحافظه کارانه می‌باشد. اما با افزایش نسبت l_b/d و افزایش ظرفیت جان مقطع، مقادیر ارائه شده توسط رابطه (1) برای اکثر مقاطع غیراقتصادی می‌شود. برای مقاطع *IPE* مقدار نظری ارائه شده توسط رابطه (1) برای حالت حدی کماتش فشاری جان بین ۲۹٪ تا ۱۰۵٪ و برای مقاطع *IPB* بین ۶۶٪ تا ۱۶۱٪ ظرفیت حاصل از تحلیل اجزای محدود می‌باشد.

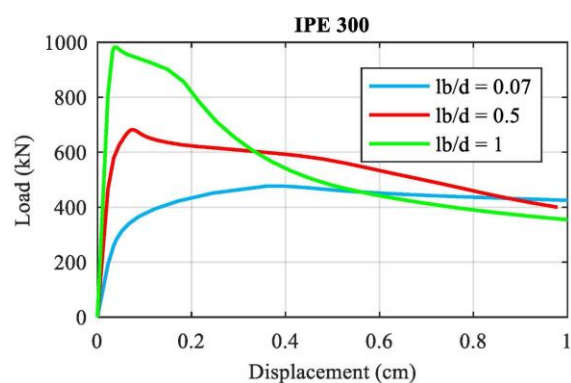
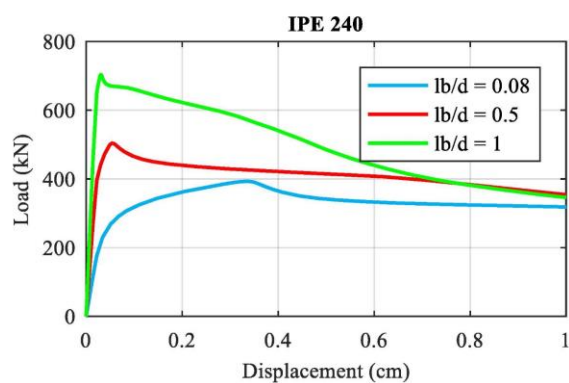
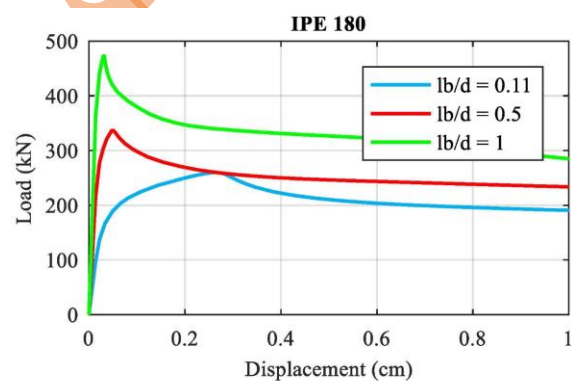
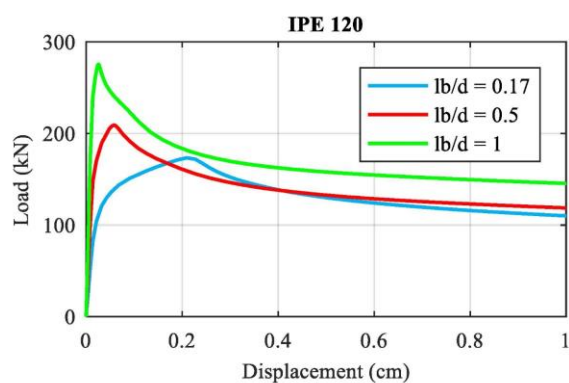
با توجه به نتایج جدول (۲)، تعیین رابطه طراحی حالت حدی کماتش فشاری جان که متغیر طول بارگذاری را نیز در نظر بگیرد، ضروری می‌باشد. برای اعمال متغیر طول بارگذاری در رابطه (1)، رابطه (2) پیشنهاد می‌شود که به آن ضریب اصلاحی C_1 برای

جدول ۲: مقایسه ظرفیت مقاطع فولادی تحت اثر فشار دوطرفه با طول بارگذاری متفاوت

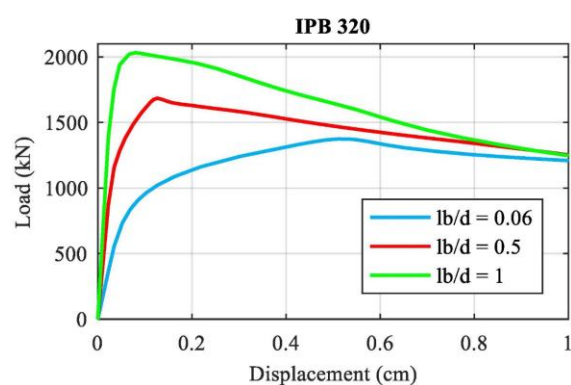
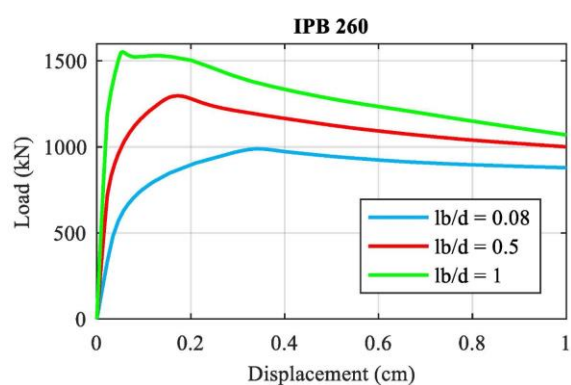
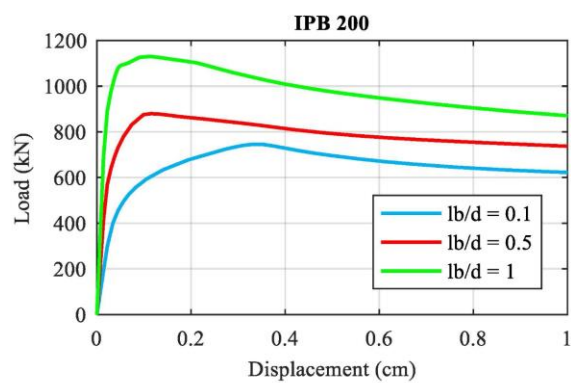
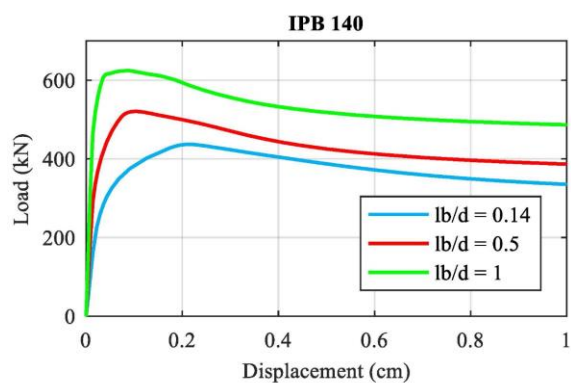
Steel Section	l_b (mm)	l_b/d	P_{FEM} (kN)	Loading Width Effect %	R_n AISC (kN)	Ratio P_{FEM} / R_n AISC
IPE 120	۲۰	۰٫۱۷	۱۷۳٫۴	۱۰۰	۱۸۲٫۶	۰٫۹۵
	۶۰	۰٫۵	۲۰۹	۱۲۱	۱۸۲٫۶	۱٫۱۴
	۱۲۰	۱	۳۷۵٫۵	۱۵۹	۱۸۲٫۶	۱٫۵۱
IPE 180	۲۰	۰٫۱۱	۲۶۰٫۳	۱۰۰	۲۰۳٫۳	۱٫۲۸
	۹۰	۰٫۵	۳۳۶٫۶	۱۲۹	۲۰۳٫۳	۱٫۶۵
	۱۸۰	۱	۴۷۲٫۹	۱۸۲	۲۰۳٫۳	۲٫۳۳
IPE 240	۲۰	۰٫۰۸	۳۹۳٫۱	۱۰۰	۲۵۰	۱٫۵۷
	۱۲۰	۰٫۵	۵۰۳٫۹	۱۲۸	۲۵۰	۲٫۰۲
	۲۴۰	۱	۷۰۳٫۷	۱۷۹	۲۵۰	۲٫۸۱
IPE 300	۲۰	۰٫۰۷	۴۷۶٫۶	۱۰۰	۲۸۷٫۷	۱٫۶۶
	۱۵۰	۰٫۵	۶۸۱٫۸	۱۴۳	۲۸۷٫۷	۲٫۳۷
	۳۰۰	۱	۹۸۲٫۵	۲۰۶	۲۸۷٫۷	۳٫۴۱
IPB 140	۲۰	۰٫۱۴	۴۳۶٫۹	۱۰۰	۷۰۴٫۹	۰٫۶۲
	۷۰	۰٫۵	۵۲۰٫۷	۱۱۹	۷۰۴٫۹	۰٫۷۴
	۱۴۰	۱	۶۲۴٫۵	۱۴۳	۷۰۴٫۹	۰٫۸۹
IPB 200	۲۰	۰٫۱	۷۴۵٫۷	۱۰۰	۱۰۸۴٫۶	۰٫۶۹
	۱۰۰	۰٫۵	۸۷۹٫۶	۱۱۸	۱۰۸۴٫۶	۰٫۸۱
	۲۰۰	۱	۱۱۳۰٫۵	۱۵۲	۱۰۸۴٫۶	۱٫۰۴
IPB 260	۲۰	۰٫۰۸	۹۸۹٫۶	۱۰۰	۱۱۲۶٫۳	۰٫۸۸
	۱۳۰	۰٫۵	۱۲۹۷	۱۳۱	۱۱۲۶٫۳	۱٫۱۵
	۲۶۰	۱	۱۵۵۲٫۲	۱۵۷	۱۱۲۶٫۳	۱٫۳۸
IPB 320	۲۰	۰٫۰۶	۱۳۷۴٫۹	۱۰۰	۱۳۴۷٫۵	۱٫۰۲
	۱۶۰	۰٫۵	۱۶۸۵	۱۲۳	۱۳۴۷٫۵	۱٫۲۵
	۳۲۰	۱	۲۰۳۱٫۴	۱۴۸	۱۳۴۷٫۵	۱٫۵۱



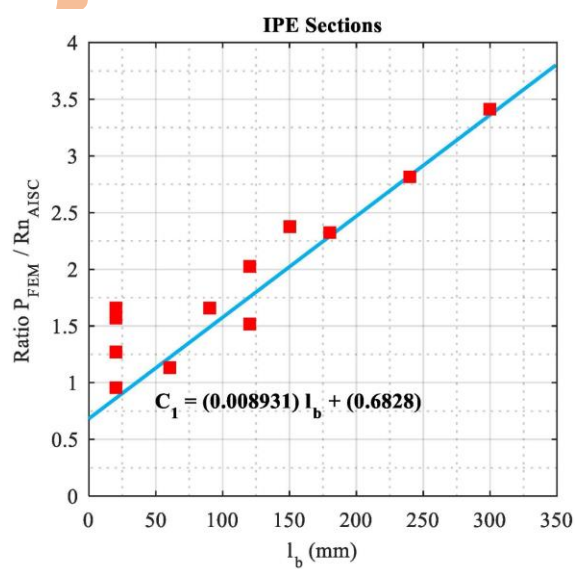
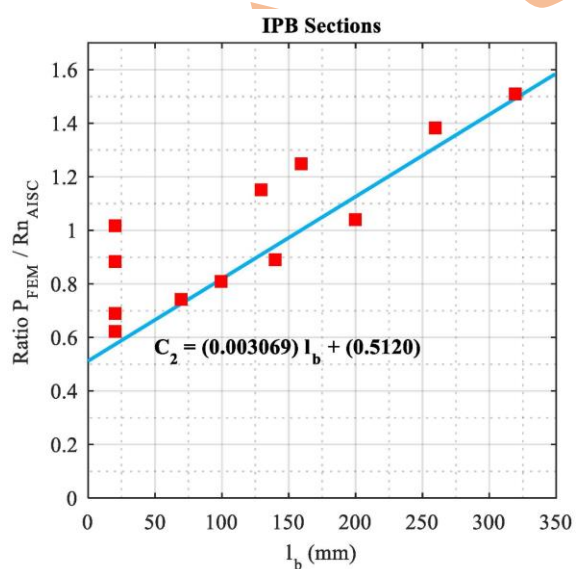
شکل ۹: کمانش فشاری جان نیمرخ IPE 240 تحت اثر فشار دوطرفه با طول بارگذاری متفاوت



شکل ۱۰: نمودار بار - جابجایی مقاطع IPE تحت اثر فشار دوطرفه



شکل ۱۱: نمودار بار-جابجایی مقاطع *IPB* تحت اثر فشار دوطرفه



شکل ۱۲: مقایسه نسبت ظرفیت ستون‌های تحت اثر فشار به ظرفیت نظری براساس طول بارگذاری برای مقاطع *IPB* و *IPE*

۴ - نتیجه گیری

در این پژوهش، مدل‌های اجزای محدود برای تعیین رفتار مقاطع فولادی تحت اثر بارهای متمرکز فشاری پیشنهاد شد. در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس نمونه‌های مورد بررسی تحت اثر فشار دوطرفه قرار گرفتند. نتایج این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- در تمام نمونه‌ها، حالت حدی کمانش فشاری جان حالت حاکم بر خرابی می‌باشد.
- ۲- با افزایش طول بارگذاری، ظرفیت جان مقاطع فولادی در برابر کمانش فشاری بین ۱۸٪ تا ۱۰۶٪ افزایش می‌یابد.
- ۳- متغیر طول بارگذاری نقش قابل توجهی در ظرفیت جان مقاطع فولادی دارد اما رابطه ارائه شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 تأثیر آن را در نظر نمی‌گیرد.
- ۴- رابطه ارائه شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 برای حالت حدی کمانش فشاری جان در اتصالات گیردار، بطور کلی برای مقاطع IPE محافظه‌کارانه و برای مقاطع IPB غیرمحافظه‌کارانه می‌باشد.
- ۵- در مقاطع IPE، مقدار نظری ارائه شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 برای حالت حدی کمانش فشاری جان بین ۲۹٪ تا ۱۰۵٪ ظرفیت حاصل از تحلیل اجزای محدود می‌باشد.
- ۶- در مقاطع IPB، مقدار نظری ارائه شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 برای حالت حدی کمانش فشاری جان بین ۶۶٪ تا ۱۶۱٪ ظرفیت حاصل از تحلیل اجزای محدود می‌باشد.
- ۷- ضرایب اصلاحی برای تعیین ظرفیت مقاطع فولادی در برابر پدیده کمانش فشاری جان پیشنهاد شد.
- ۸- انجام آزمایشات تجربی برای توسعه روابط سازگار با ناپایداری موضعی مقاطع فولادی IPE و IPB، ضرورت دارد.

تعارض منافع :

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

منابع

1. AISC Committee, 2022. Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-22). American institute of steel construction, Chicago-Illinois.
2. Timoshenko, S.P. and Gere, J.M., 1963. *Theory of elastic stability*. New York: McGraw-Hill.
3. Chen, W.F. and Oppenheim, I.J., 1970. *Web buckling strength of beam-to-column connections*. Fritz Engineering Laboratory.
4. Newlin, D.E. and Chen, W.F., 1971. *Strength and stability of column web in welded beam-to-column connections*. Fritz Engineering Laboratory.
5. Lagerqvist, O. and Johansson, B., 1996. Resistance of I-girders to concentrated loads. *Journal of Constructional Steel Research* 39(2), pp. 87-119. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(96\)00023-5](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(96)00023-5).
6. Yam, MC. Lam, AC. Iu, V. and Cheng, J., 2003. Local web buckling strength of coped steel I beams. *Journal of Structural Engineering* 129(1), pp. 3-11. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:1\(3\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:1(3)).
7. Menkulasi, F., Farzana, N., Moen, C.D. and Eatherton, M.R., 2016. Revisiting web compression buckling for wide flange sections. In *Annual Stability Conference, Florida, USA*.
8. 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. St. Louis, MO*.
9. Rodilla, JA. and Kowalkowski, K., 2021. Determination of Capacities of Eccentric Stiffeners Part 1: Experimental Studies. *Engineering Journal* 58(2), pp.79-98. DOI: <https://doi.org/10.62913/engj.v58i2.1176>.
10. Rodilla, JA. and Kowalkowski, K., 2021. Determination of Capacities of Eccentric Stiffeners Part 2: Analytical Studies. *Engineering Journal* 58(2),

- pp.99-122. DOI:
<https://doi.org/10.62913/engj.v58i2.1175>.
11. 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. [In Persian]. DOI:
<https://doi.org/10.22065/jsce.2025.487940.3567>.
12. Naghipour, M. and Sepasgozar, S.M.E., 2015. Modeling and assessment of reduced beam sections in moment resistant connections of iranain double I-beams. *Sharif Journal of Civil Engineering (SJCE)*, 31.2(2), pp. 3-10. [In Persian]. DOI:
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26764768.1394.312.21.2.9>.
13. Kafi, M.A. and Tarighi, P., 2018. Sugestions to remove the continuity plates of box columns. *Sharif Journal of Civil Engineering (SJCE)*, 34.2(2.1), pp. 143-151. [In Persian]. DOI:
<https://doi.org/10.24200/j30.2018.1351>.
14. Norwood, J. and Prinz, GS., 2019. Effect of continuity plate eccentricity on the performance of welded beam-to-column connections. *Engineering Structures* 198, pp.1-9. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109550>.
15. ABAQUS. 2020 Abaqus/CAE User's Manual. V2021: Dassault Systems, Inc. Available at:
<http://www.simulia.com>.
16. Bruneau, M., Uang, C.M. and Whittaker, A.S., 1998. *Ductile design of steel structures*. New York: McGraw-Hill.
17. Rodilla, J.A. and Kowalkowski, K., 2019. Analysis and Design of Eccentric Stiffeners Part of Moment Connections to Column Flanges. Lawrence Technological University.