

Determination of the continuity plate capacity in box section columns

Nima Fakhhar Hasani¹, Yousef Hosseinzadeh^{2*}

1- M.Sc Student in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

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

ABSTRACT

In the design of moment connections in steel frames, continuity plates are used to ensure the stability of the panel zone against concentrated loads on the column flange. The criteria for determining the capacity of continuity plates have been developed based on research on the behavior of wide flange sections, and there is limited information on the behavior of box sections under local loads. In this paper, the capacity of continuity plates in box sections under concentrated loads is determined. Initially, a finite element model is created to investigate local instability under concentrated loads and its accuracy is evaluated using available experimental data. Subsequently, the behavior of 56 box column specimens subjected to three types of concentrated loads, including single compression, double compression and single tension was investigated. The governing limit states in column failure were identified as buckling of the continuity plate under compression, yielding of the continuity plate and failure of the loading plate weld under tension. The capacity of the continuity plate in box sections was determined using code provisions and compared with the results of finite element analysis. The investigation revealed that the slenderness of the continuity plate is a significant factor affecting its capacity. Furthermore, the commonly used design criteria for determining the capacity of continuity plates under compressive loads in most columns are non-conservative, resulting in an effective capacity of continuity plates ranging from -28% to 140% of the nominal capacity. However, the provisions presented for determining the capacity of continuity plates under tensile loads show better agreement with numerical analysis results, with the effective capacity of continuity plates under tensile loads ranging from 34% to 137% of the nominal capacity. Modification factors are proposed for determining the capacity of continuity plates under compressive loads in box columns.

ARTICLE INFO

Receive Date: 22 December 2024

Revise Date: 24 February 2025

Accept Date: 02 March 2025

Keywords:

Box Column
Moment Connection
Concentrated Load
Local Instability
Continuity Plate
Finite Element Model

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.495152.3608

*Corresponding author: Yousef Hosseinzadeh.

Email address: hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir

تعیین ظرفیت ورق پیوستگی در ستون‌های با مقاطع جعبه‌ای

نیما فخار حسنی^۱، یوسف حسین زاده^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

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

چکیده

در طراحی اتصالات گیردار قاب‌های فولادی، برای تامین پایداری چشمه اتصال در برابر بارهای متمرکز وارد بر بال ستون، از ورق پیوستگی استفاده می‌شود. ضوابط تعیین ظرفیت ورق‌های پیوستگی، براساس نتایج تحقیق بر روی رفتار مقاطع بال پهن توسعه یافته‌اند و اطلاعات محدودی در مورد رفتار مقاطع جعبه‌ای تحت اثر بارهای موضعی وجود دارد. در این مقاله، ظرفیت ورق پیوستگی مقاطع جعبه‌ای تحت اثر بارهای متمرکز تعیین می‌شود. در ابتدا مدل اجزای محدود برای بررسی پدیده ناپایداری موضعی تحت اثر بار متمرکز ایجاد و دقت آن با استفاده از داده‌های آزمایش موجود ارزیابی شد. در ادامه، رفتار ۵۶ نمونه ستون جعبه‌ای تحت اثر سه نوع بارگذاری متمرکز فشار یک‌طرفه، فشار دوطرفه و کشش یک‌طرفه بررسی شد. حالات حدی حاکم در خرابی ستون‌ها به صورت کمانش ورق پیوستگی تحت اثر فشار، تسلیم ورق پیوستگی و خرابی جوش صفحه بارگذاری تحت اثر کشش، تشخیص داده شد. ظرفیت ورق پیوستگی در مقاطع جعبه‌ای با استفاده از روابط آئین‌نامه تعیین و با نتایج تحلیل اجزای محدود مقایسه شد. بررسی نشان داد که لاغری ورق پیوستگی عامل تاثیرگذار بر ظرفیت ورق پیوستگی است. همچنین ضوابط طراحی رایج برای تعیین ظرفیت ورق‌های پیوستگی تحت اثر فشار، در بیشتر ستون‌های جعبه‌ای غیرمحافظه کارانه بوده و ظرفیت مؤثر ورق‌های پیوستگی بین ۲۸- تا ۱۴۰ درصد ظرفیت نظری می‌باشد. با این وجود، ضوابط ارائه شده برای تعیین ظرفیت ورق‌های پیوستگی تحت اثر کشش سازگاری بیشتری با نتایج تحلیل‌های عددی داشته و ظرفیت مؤثر ورق‌های پیوستگی تحت اثر کشش بین ۳۴ تا ۱۳۷ درصد ظرفیت نظری است. در ادامه پژوهش، ضرایب اصلاحی برای تعیین ظرفیت ورق‌های پیوستگی تحت اثر فشار در ستون‌های جعبه‌ای پیشنهاد شد.

کلمات کلیدی: ستون جعبه‌ای، اتصال گیردار، بار متمرکز، ناپایداری موضعی، ورق پیوستگی، مدل اجزای محدود.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.495152.3608	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.495152.3608	۱۴۰۴/۰۹/۳۰	۱۴۰۳/۱۲/۱۲	۱۴۰۳/۱۲/۱۲	۱۴۰۳/۱۲/۰۶	۱۴۰۳/۱۰/۰۲
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				یوسف حسین زاده		
				hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir		

۱- مقدمه

در اتصالات گیردار تیر به ستون فولادی، مقطع ستون باید بتواند در برابر نیروهای متمرکز وارده مقاومت لازم را داشته باشد. در صورت کمبود ظرفیت بال و جان ستون در برابر نیروی متمرکز، با استفاده از ضوابط ارائه شده در آیین نامه AISC 360-22 [۱] ورق پیوستگی^۱ طراحی و اجرا می شود. با افزودن ورق های پیوستگی، از وقوع حالات حدی تسلیم موضعی جان^۲، خمش موضعی بال^۳، لهیدگی موضعی جان^۴ و کمانش فشاری جان^۵ طبق آیین نامه AISC 360-22 [۱] در محل اعمال بار متمرکز جلوگیری می شود.

شربورن و مورتی^۶ [۲] شبیه سازی های کامپیوتری برای بررسی رفتار جان ستون های H شکل در اتصالات فولادی را انجام دادند؛ بررسی آنها نشان داد که ورق های پیوستگی موجب افزایش مقاومت ستون در جهت عمود بر بال ستون می شود. آنها نشان دادند که ورق های پیوستگی بطور میانگین ظرفیت ستون در برابر بارهای متمرکز را تا چهار برابر افزایش می دهند. الگالی و سالکر^۷ [۳] پدیده لهیدگی موضعی جان در مقاطع فولادی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشات نشان داد که قرار دادن سخت کننده در محل اعمال بار متمرکز می تواند از وقوع خرابی های موضعی جلوگیری نموده و مقاومت عضو را افزایش دهد.

چن و چن^۸ [۴] نیز خرابی اتصالات گیردار تیر به ستون جعبه ای را بررسی نمودند. نتایج این بررسی نشان داد که کاربرد ورق پیوستگی، از ایجاد کمانش های موضعی جلوگیری می نماید. با این حال، استفاده از ورق های لاغر در ساخت ستون های جعبه ای باعث گسیختگی و انهدام اتصالات تیر به ستون، به ویژه در محل اتصال ورق پیوستگی و بال تیر به ستون می شود. حجار و همکاران^۹ [۵] رفتار اتصالات گیردار دارای ورق پیوستگی را مورد آزمایش و مطالعه قرار دادند و با مقایسه ضوابط آیین نامه ای با نتایج پژوهش خود پیشنهاداتی در رابطه با جزئیات طراحی ورق های پیوستگی ارائه نمودند. چو و یونگ^{۱۰} [۶] با مطالعه بر روی تأثیر ورق پیوستگی در اتصالات گیردار تیر فولادی به ستون بتنی با روکش فولادی^{۱۱} دریافتند که استفاده از ورق های پیوستگی موجب افزایش مقاومت اتصال و مقاومت برشی بتن می شود. ترن و همکاران^{۱۲} [۷] با استفاده از مدل های عددی، رفتار ورق های پیوستگی در قاب های خمشی ویژه را بررسی نموده و نتایج تحقیقات خود را با ضوابط مربوط به ورق های پیوستگی در آیین نامه AISC 360-22 [۱] مورد مقایسه قرار دادند و در نهایت برای کاهش هزینه های طراحی و اجرای ورق پیوستگی و جوش آن، پیشنهاداتی ارائه نمودند. نتایج نشان داد که می توان از جوش گوشه بجای جوش نفوذی در اتصال ورق های پیوستگی بهره برد. سالکر و همکاران^{۱۳} [۸] تحقیقاتی در مورد لهیدگی موضعی جان در ستون های بال پهن دارای سخت کننده با ارتفاعی کمتر از ارتفاع خالص بین بال ها انجام دادند. در این پژوهش، ستون ها تحت اثر فشار یک طرفه بارگذاری و مورد تحلیل قرار گرفتند. نسبت ظرفیت واقعی ستون ها به ظرفیت محاسبه شده طبق ضوابط آیین نامه، به طور میانگین ۱۰۳ درصد و بین ۰/۸۲ تا ۱/۲۳ درصد متغیر بود.

مشایخ و یونگ^{۱۴} [۹] آزمایشاتی تمام مقیاس برای ارزیابی رفتار ورق های پیوستگی در قاب های خمشی فولادی ویژه انجام دادند. بررسی ها نشان داد که استفاده از جوش گوشه در اتصال ورق های پیوستگی به ستون امکان پذیر بوده و نوع جوش بر عملکرد اتصال تأثیرگذار نیست. احمدی و قبادی^{۱۵} [۱۰] برای تعیین رفتار و ظرفیت ورق های پیوستگی شیب دار در قاب های خمشی فولادی ویژه تحقیقاتی را انجام دادند. هنگامیکه تیرهایی با عمق متفاوت به ستون متصل می شوند معمولاً ورق پیوستگی بصورت شیب دار اجرا می شود.

¹ Continuity Plate

² Web Local Yielding

³ Local Flange Bending

⁴ Web local Crippling

⁵ Web Compression Buckling

⁶ Sherbourne and Murthy

⁷ Elgaaly and Salker

⁸ Chen and Chen

⁹ Hajjar et al

¹⁰ Chou and Uang

¹¹ Steel Encased Reinforced Concrete

¹² Tran et al

¹³ Salker et al

¹⁴ Mashayekh and Uang

¹⁵ Ahmady and Ghobadi

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.

نورود و پرینز^{۱۶} [۱۱] تاثیر 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. کوالکوفسکی و رودیلا^{۱۷} [۱۲] و [۱۳] نیز تحقیقاتی در مورد تاثیر خروج از مرکزیت بر ظرفیت سخت‌کننده‌ها 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. مقایسه ظرفیت ستون‌های دارای سخت‌کننده با مقدار نظری محاسبه شده ظرفیت سخت‌کننده‌ها نشان داد که در اکثر موارد، مقدار ظرفیت نظری سخت‌کننده‌ها بیشتر بوده و طراحی غیر محافظه‌کارانه می‌باشد.

روابط تعیین ظرفیت و حد لاغری ورق پیوستگی تحت اثر بارهای متمرکز، برای مقاطع I و H شکل، توسعه داده شده و در آئین - نامه طراحی سازه‌های فولادی AISC 360-22 [۱] وارد شده‌اند. برای مقاطع جعبه‌ای تحت اثر بارهای متمرکز، رابطه‌ای وجود ندارد. در نتیجه انجام پژوهشی در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. در بخش طراحی ورق‌های پیوستگی ملاحظات لرزه‌ای AISC 341-22 [۱۴]، به دلیل نبود روابط طراحی زیر بارهای متمرکز در ستون‌های جعبه‌ای، با چشم‌پوشی از ظرفیت ستون، طرح ورق پیوستگی برای تحمل تمام نیروی متمرکز، پیشنهاد شده‌است. هدف از این پژوهش تعیین و مقایسه ظرفیت ورق پیوستگی در ستون‌های جعبه‌ای با روابط ارائه شده در آئین نامه می‌باشد تا بتوان درک مناسبی از رفتار ورق پیوستگی ستون‌های جعبه‌ای در طراحی‌ها داشت. در این تحقیق ابتدا مدل‌های اجزای محدود برای بررسی رفتار ستون جعبه‌ای تحت اثر بار متمرکز ایجاد و دقت آن با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ارزیابی شد. سپس، رفتار ستون‌های جعبه‌ای تحت اثر سه نوع بارگذاری متمرکز از نوع فشار یک‌طرفه، فشار دوطرفه و کشش یک‌طرفه تعریف شده در آئین‌نامه AISC 360-22 [۱] بررسی شد. در ادامه نوع خرابی و ظرفیت ستون‌ها با ضوابط ارائه شده توسط آئین‌نامه مورد مقایسه قرار گرفت و در انتها نتایج و پیشنهادات مربوطه شرح داده شده‌است.

۲-۱ مبانی نظری تحقیق

در اتصالات گیردار تیر به ستون فولادی، نیروهای متمرکز فشاری و کششی قابل توجهی از بال تیر به ستون منتقل می‌شود. ضوابط طراحی در آئین‌نامه AISC 360-22 [۱]، به منظور تامین پایداری بال و جان ستون در تمام حالات حدی خرابی محتمل برای مقاطع I و H شکل ارائه شده‌است. بر این اساس، ظرفیت ستون در برابر نیروهای متمرکز برای چهار حالت حدی خمشی موضعی بال (رابطه ۱)، تسلیم موضعی جان (رابطه ۲)، لهیدگی موضعی جان (رابطه ۳) و کماتش فشاری جان (رابطه ۴) محاسبه می‌شود. روابط ارائه شده در این بخش، تنها برای حالت بررسی پایداری در فاصله زیاد از انتهای ستون، می‌باشد.

$$R_n = 6 / 25 F_y t_f^2 \quad \phi = 0 / 9 \quad (۱)$$

$$R_n = F_y t_w (5k + l_b) \quad \phi = 1 \quad (۲)$$

$$R_n = 0 / 8 (2t_w)^2 [1 + 3 \left(\frac{l_b}{d}\right) \left(\frac{2t_w}{t_f}\right)^{1/5}] \sqrt{\frac{E F_y t_f}{2t_w}} \quad \phi = 0 / 75 \quad (۳)$$

$$R_n = \frac{24(2t_w)^3 \sqrt{E F_y}}{h} \quad \phi = 0 / 9 \quad (۴)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} &= F_y \quad \text{تنش تسلیم بال} \\ &= t_f \quad \text{ضخامت بال} \\ &= l_b \quad \text{طول اتکای بار متمرکز} \\ &= d \quad \text{ارتفاع کلی مقطع} \end{aligned}$$

¹⁶ Norwood and Prinz

¹⁷ Rodilla and Kowalkowski

$$\begin{aligned}
 &= F_{yw} \quad \text{تنش تسلیم جان} \\
 &= t_w \quad \text{ضخامت جان ستون} \\
 &= k \quad \text{برای مقاطع جعبه‌ای با جوش نفوذی، برابر با ضخامت ستون} \\
 &= E \quad \text{مدول الاستیسیته فولاد} \\
 &= h \quad \text{ارتفاع آزاد جان} \\
 &= \phi \quad \text{ضریب کاهش مقاومت در روش LRFD}
 \end{aligned}$$

بر اساس آیین‌نامه AISC 360-22 [۱] در صورت نیاز به تعبیه سخت‌کننده عرضی در مقابل نیروهای متمرکز فشاری و کششی، سخت‌کننده تمام عمق در ستون تعبیه و به بال و جان ستون جوش می‌شود. طراحی سخت‌کننده نیروی متمرکز کششی مانند اعضای کششی است. سخت‌کننده فشاری، به صورت ستونی با ارتفاع 0.75 ارتفاع آزاد سخت‌کننده فرض می‌شود. مقطع ستون فرضی برابر سطح مقطع سخت‌کننده به همراه نواری از جان با پهنای معادل 2.5 برابر ضخامت جان ستون برای سخت‌کننده‌های میانی و 1.2 برابر ضخامت جان ستون برای سخت‌کننده‌های انتهایی در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین لاغری سخت‌کننده طبق آیین‌نامه AISC 341-22 [۱۴]، نسبت پهنای به ضخامت سخت‌کننده با یک لبه مقید در ستون‌های H شکل نباید از مقادیر رابطه ۵ بیشتر باشد. البته در قسمت قاب‌های خمشی به لاغری سخت‌کننده‌ها در ستون‌های جعبه‌ای اشاره‌ای نشده است اما می‌توان حد لاغری تعیین شده برای ورق‌های دارای دو لبه مقید طبق رابطه ۶ را بکار برد.

$$\lambda_s = \frac{b_s}{t_s} \leq \lambda = 0.56 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} \quad (5)$$

$$\lambda_s = \frac{b_s}{t_s} \leq \lambda = 1.49 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} \quad (6)$$

که در آن:

$$\begin{aligned}
 \lambda_s &= \text{لاغری سخت‌کننده} \\
 b_s &= \text{پهنای سخت‌کننده (ارتفاع آزاد بین ورق‌های ستون جعبه‌ای)} \\
 t_s &= \text{ضخامت سخت‌کننده} \\
 E &= \text{مدول الاستیسیته فولاد} \\
 R_y &= \text{نسبت تنش تسلیم مورد انتظار به تنش تسلیم مشخصه فولاد} \\
 F_y &= \text{تنش تسلیم فولاد}
 \end{aligned}$$

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 کوالکوفسکی و رودیلا [۱۲] و [۱۳] استفاده شد. مصالح ستون و اجزای آن به صورت ایزوتروپیک^{۱۸} و روابط تنش- کرنش مصالح به صورت نمودارهای چندخطی معرفی شدند. کوالکوفسکی و رودیلا برای مدل‌های اجزای محدود، رابطه تنش- کرنش شکل ۱- الف را پیشنهاد نمودند. مصالح فولادی از رده ASTM A992 با تنش تسلیم 345 و تنش نهایی 448 مگاپاسکال می‌باشد. همچنین مدول الاستیسیته 2×10^5 مگاپاسکال و ضریب پواسون مصالح 0.3 در نظر گرفته شده است. مصالح صفحات بارگذاری به صورت الاستیک^{۱۹} معرفی شد. نتایج آزمایش نشان داد که در ستون‌های تحت اثر کشش یکطرفه، شکست و خرابی جوش، حاکم بر رفتار ستون است. بنابراین، شبیه‌سازی جوش در مدل‌های تحت اثر کشش یکطرفه ضروری است. با استفاده از نتایج تحقیقات بومن و کویین^{۲۰} [۱۶] و کارتال و همکاران^{۲۱} [۱۷]، منحنی تنش- کرنش فلز جوش برای الکتروود E70، مطابق شکل ۱- ب، با تنش نهایی 567 و مدول الاستیسیته 2×10^5 مگاپاسکال در نظر گرفته شد. اجزای ستون، صفحه بارگذاری و جوش با المان‌های مکعبی شش وجهی از نوع C3D8R و ورق‌های سخت‌کننده با المان‌های Shell از نوع S4، شبیه‌سازی شدند. برای نمونه‌های فشاری از تحلیل Static Riks و برای نمونه‌های کششی از تحلیل General Static با لحاظ کردن رفتار غیرخطی هندسی، استفاده شد. سخت‌کننده‌های

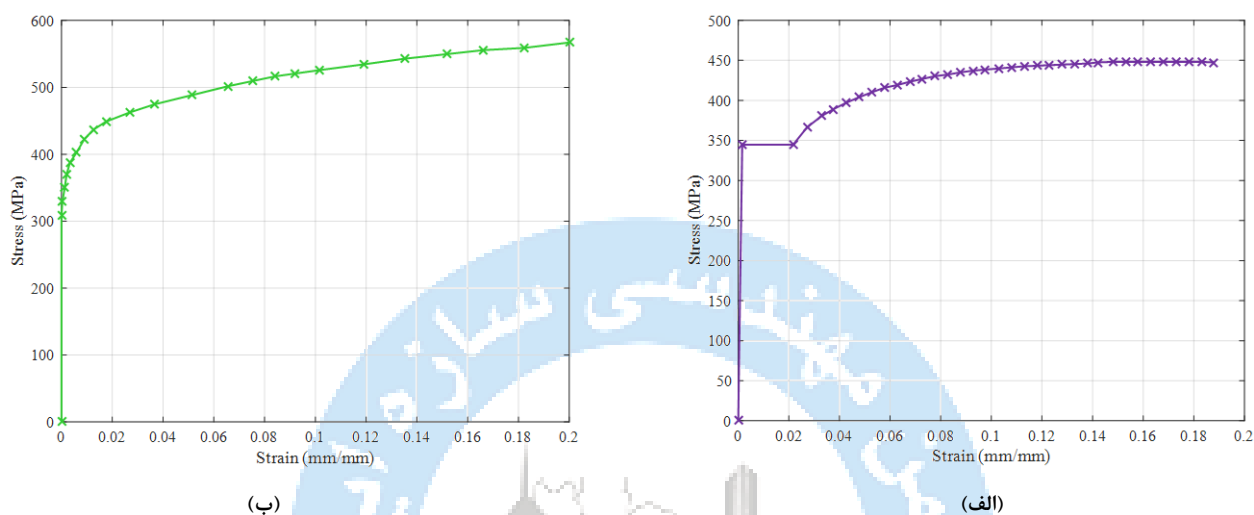
¹⁸ Isotropic

¹⁹ Elastic

²⁰ Bowman and Quinn

²¹ Kartal et al

تکیه‌گاهی و ورق‌های پیوستگی به اندازه ضخامت یک مش، در محل فراگیری خود بزرگتر شبیه‌سازی شده و وارد مقطع ستون می‌شوند [۱۳]. برای اتصال ورق پیوستگی و ستون، از گزینه Embedded Region استفاده شد تا گیرداری لازم تامین شود. برای اتصال ستون و صفحه بارگذاری، از گزینه tie استفاده شد. با توجه به نقش جوش صفحه بارگذاری در میزان مقاومت ستون تحت اثر کشش یکطرفه، جوش صفحه اتصال شبیه‌سازی و به روش tie به ستون و صفحه بارگذاری متصل شد. المان‌های جوش، از نوع C3D8 انتخاب شد. اندازه مش مناسب با تحلیل حساسیت و مقایسه نتایج با داده‌های آزمایش به دست آمد. معیار خرابی نمونه‌های تحت فشار، رسیدن به حداکثر ظرفیت و برای نمونه‌های تحت کشش، عبور تنش نهایی جوش از یک ششم بعد جوش نفوذی تعیین شد [۱۳].

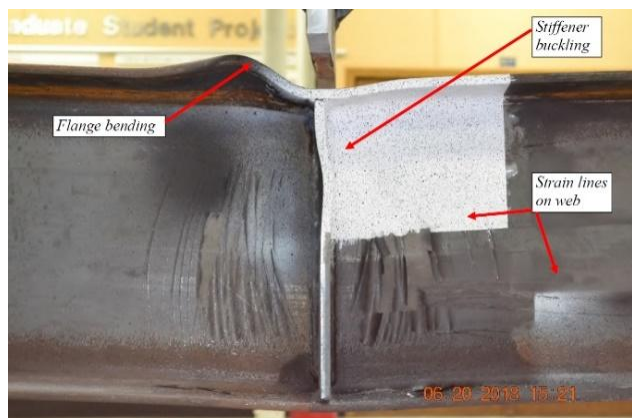


شکل ۱: نمودار تنش - کرنش مصالح

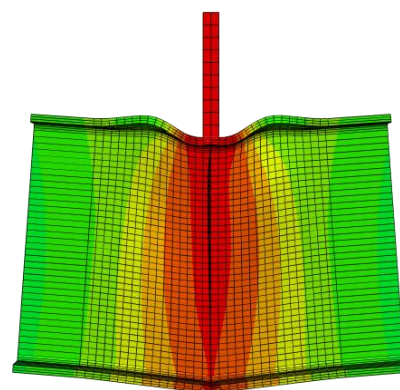
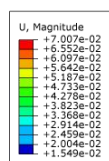
ب- فلز جوش کارتل و همکاران [۱۷]

الف- مدل اجزای محدود کوالکوفسکی و رودیلا [۱۳]

با تحلیل اجزای محدود، رفتار نمونه ستون‌های دارای سخت‌کننده زیر بار متمرکز مرجع [۱۸] و [۱۳] تعیین شد. در شکل ۲ توزیع تغییرشکل مدل اجزای محدود این پژوهش به همراه مکانیزم خرابی و تغییرشکل نمونه آزمایش [۱۸] مقایسه شده است. خرابی ستون در هر دو حالت، در اثر کماتش سخت‌کننده تحت اثر فشار یکطرفه ایجاد شده است. توزیع تنش حاصل از تحلیل مدل اجزای محدود در شکل ۳- الف و خرابی مشاهده شده نمونه در شکل ۳- ب نشان داده شده است؛ ستون در هر دو مدل، با کماتش سخت‌کننده تحت اثر فشار دوطرفه، دچار خرابی می‌شود. نمودارهای بار-جابجایی حاصل از تحلیل مدل‌های اجزای محدود و آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. در نمونه W12×26، حداکثر خطای مدل اجزای محدود در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی [۱۸]، در فشار یکطرفه ۳٫۰۳ درصد و در نمونه W24×131، حداکثر خطای مدل اجزای محدود در مقایسه با نتایج تحلیل مرجع [۱۳] در فشار دوطرفه برابر با ۰٫۳۶ درصد می‌باشد. بنابراین، مدل اجزای محدود ایجاد شده دارای دقت مناسب جهت استفاده در مطالعات پارامتریک می‌باشد.



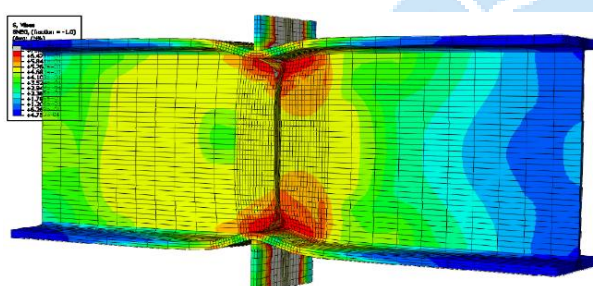
(ب)



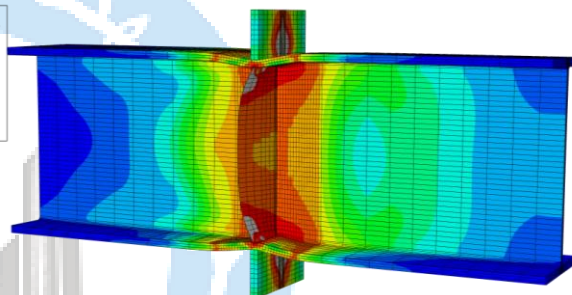
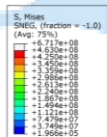
(الف)

شکل ۲: کماتش سخت کننده نمونه W12×26 تحت اثر فشار یک طرفه

الف - توزیع جابجایی حاصل از تحلیل اجزای محدود ب - مکانیزم خرابی ستون [۱۸]



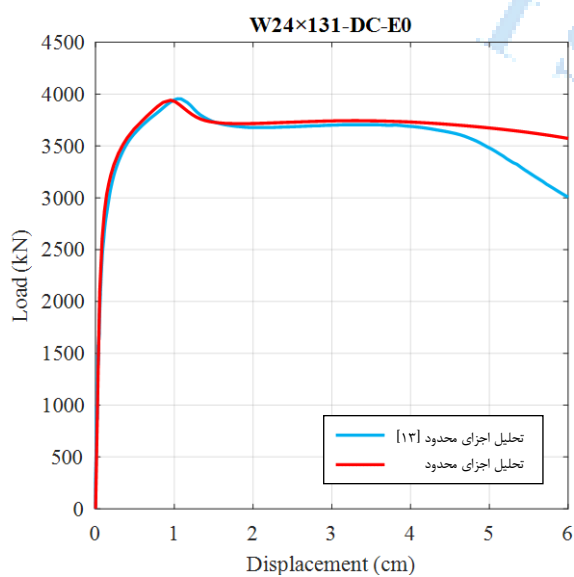
(ب)



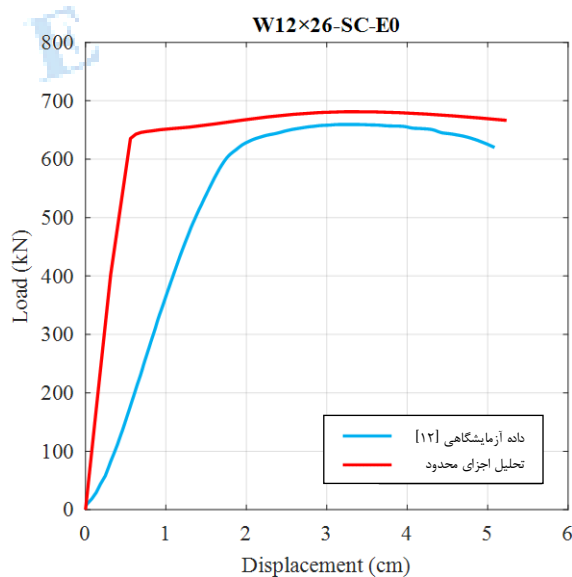
(الف)

شکل ۳: توزیع تنش و کماتش سخت کننده نمونه W24×131 تحت اثر فشار دوطرفه

الف - نتایج تحلیل اجزای محدود ب - نتایج تحلیل مرجع [۱۳]



(ب)



(الف)

شکل ۴: نمودارهای بار جابجایی مدل‌های اجزای محدود و داده‌های آزمایش
 الف- مقایسه نمودار بار-جابجایی تحلیل اجزای محدود با داده‌های آزمایش [۱۲]
 ب- مقایسه نمودار بار-جابجایی تحلیل اجزای محدود با نتایج مرجع [۱۳]

۳- مطالعه پارامتریک

تأثیر ابعاد ستون جعبه‌ای، ضخامت ورق پیوستگی و صفحه بارگذاری بر ظرفیت ستون در برابر بارهای متمرکز با استفاده از مطالعه پارامتریک ارزیابی شده است. مدل‌ها براساس بعد و ضخامت ستون، حالت بارگذاری، ضخامت ورق پیوستگی و ضخامت صفحه بارگذاری (فقط در نمونه‌های تحت اثر کشش) نام‌گذاری شده‌اند. برای حالت فشار یکطرفه^{۲۲} SC، فشار دوطرفه^{۲۳} DC و برای کشش یکطرفه^{۲۴} ST استفاده شده است. در ستون‌های تحت اثر کشش، ضخامت صفحه بارگذاری با عدد بعد از حرف W مشخص می‌شود. نمونه‌های طراحی شده برای مطالعه پارامتریک در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱: نمونه‌های مطالعه پارامتریک

Column Specimen			
BOX 300×15 SC-1	BOX 300×15 DC-1	BOX 300×15 ST-1-W2	BOX 300×15 ST-2-W4
BOX 300×30 SC-1	BOX 300×30 DC-1	BOX 300×30 ST-1-W2	BOX 300×30 ST-2-W4
BOX 400×20 SC-1	BOX 400×20 DC-1	BOX 400×20 ST-1-W2	BOX 400×20 ST-2-W4
BOX 400×35 SC-1	BOX 400×35 DC-1	BOX 400×35 ST-1-W2	BOX 400×35 ST-2-W4
BOX 500×25 SC-1	BOX 500×25 DC-1	BOX 500×25 ST-1-W2	BOX 500×25 ST-2-W4
BOX 500×35 SC-1	BOX 500×35 DC-1	BOX 500×35 ST-1-W2	BOX 500×35 ST-2-W4
BOX 600×30 SC-1	BOX 600×30 DC-1	BOX 600×30 ST-1-W2	BOX 600×30 ST-2-W4
BOX 600×50 SC-1	BOX 600×50 DC-1	BOX 600×50 ST-1-W2	BOX 600×50 ST-2-W4
BOX 300×15 SC-2	BOX 300×15 DC-2	BOX 300×15 ST-2-W2	
BOX 300×30 SC-2	BOX 300×30 DC-2	BOX 300×30 ST-2-W2	
BOX 400×20 SC-2	BOX 400×20 DC-2	BOX 400×20 ST-2-W2	
BOX 400×35 SC-2	BOX 400×35 DC-2	BOX 400×35 ST-2-W2	
BOX 500×25 SC-2	BOX 500×25 DC-2	BOX 500×25 ST-2-W2	
BOX 500×35 SC-2	BOX 500×35 DC-2	BOX 500×35 ST-2-W2	
BOX 600×30 SC-2	BOX 600×30 DC-2	BOX 600×30 ST-2-W2	
BOX 600×50 SC-2	BOX 600×50 DC-2	BOX 600×50 ST-2-W2	

۳-۱ بررسی لاغری و ظرفیت ورق‌های پیوستگی تحت اثر بارهای متمرکز

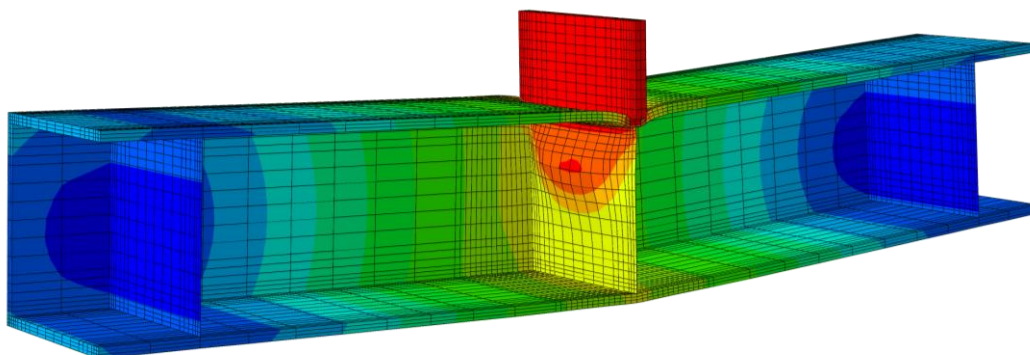
در این بخش ظرفیت سخت‌کننده‌ها در حالت هم مرکز بررسی می‌شود. تمام نتایج مربوط به ستون‌های دارای سخت‌کننده هم مرکز در سه حالت بارگذاری فشار یکطرفه (SC)، کشش یکطرفه (ST) و فشار دوطرفه (DC) در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است. همچنین در این جداول ابعاد و لاغری سخت‌کننده‌ها و اندازه بعد جوش نیز مشخص شده است. ظرفیت نظری سخت‌کننده‌ها براساس روابط آیین نامه AISC 360-22 [۱] محاسبه شده و ظرفیت موثر حاصل از اختلاف نتایج تحلیل نمونه‌های با ورق پیوستگی و بدون ورق پیوستگی هم در جدول گنجانده شده است. در ستون انتهایی جدول، نسبت ظرفیت موثر به ظرفیت نظری نشان داده شده است. کمانش

²² Single Compression

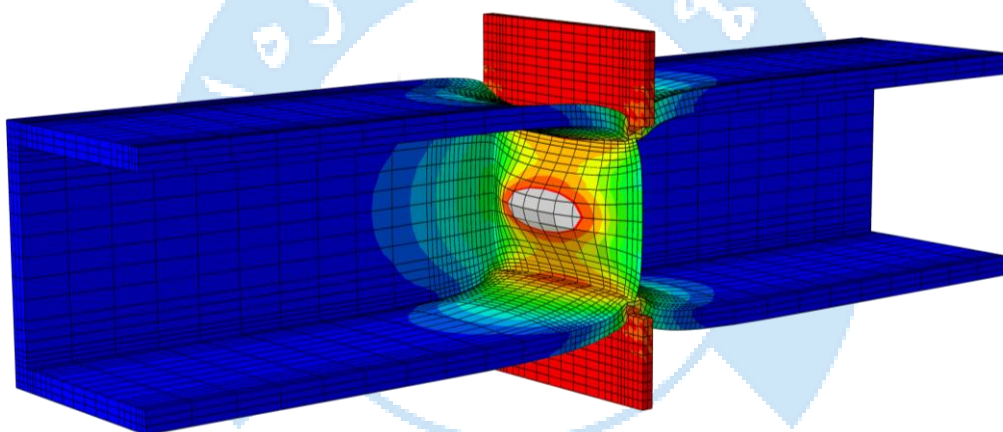
²³ Double Compression

²⁴ Single Tension

ورق پیوستگی تحت اثر فشار یک طرفه در شکل ۵ و تحت اثر فشار دوطرفه در شکل ۶ و همچنین میزان تسلیم ورق پیوستگی تحت اثر کشش یک طرفه در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۵: نمونه BOX 300x15 SC-1 تحت جابجایی پنج سانتی متر



شکل ۶: نمونه BOX 400x35 DC-2 تحت جابجایی پنج سانتی متر

جدول ۲: ظرفیت نظری و ظرفیت موثر ورق‌های پیوستگی با ضخامت یک سانتی متر تحت اثر نیروهای متمرکز

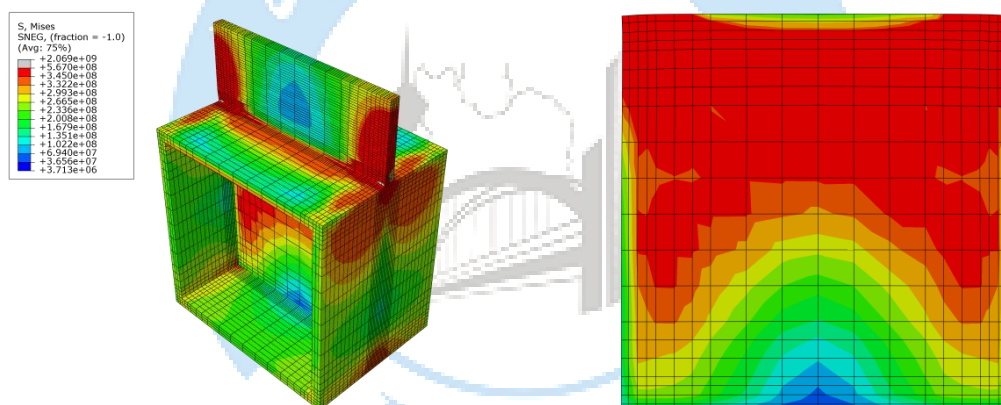
Column Specimen	Loading	Weld (cm)	ts (cm)	bs (cm)	λ_s	λ	Theoretically Stiffener Capacity (kN)	Effective Stiffener Capacity (kN)	Ratio
BOX 300x15	SC	NA	۱	۲۷	۲۷	۳۳٫۴۵	۱۱۹۰	۶۰٫۵	۰٫۵۱
BOX 300x30	SC	NA	۱	۲۴	۲۴	۳۳٫۴۵	۱۳۴۵	۵۹۰	۰٫۴۴
BOX 400x20	SC	NA	۱	۳۶	۳۶	۳۳٫۴۵	۱۵۸۷	۱۳۴۹	۰٫۸۵
BOX 400x35	SC	NA	۱	۳۳	۳۳	۳۳٫۴۵	۱۷۴۲	۱۰۰۶	۰٫۵۸
BOX 500x25	SC	NA	۱	۴۵	۴۵	۳۳٫۴۵	۱۹۸۴	۱۸۰۱	۰٫۹۱
BOX 500x35	SC	NA	۱	۴۳	۴۳	۳۳٫۴۵	۲۰۸۷	۱۳۵۲	۰٫۶۵
BOX 600x30	SC	NA	۱	۵۴	۵۴	۳۳٫۴۵	۲۳۸۰	۱۵۲۰	۰٫۶۴
BOX 600x50	SC	NA	۱	۵۰	۵۰	۳۳٫۴۵	۲۵۸۷	۱۱۴۵	۰٫۴۴
BOX 300x15	DC	NA	۱	۲۷	۲۷	۳۳٫۴۵	۱۱۹۰	۱۴۰۹	۱٫۱۸
BOX 300x30	DC	NA	۱	۲۴	۲۴	۳۳٫۴۵	۱۳۴۵	۴۰٫۵	۰٫۳۰

BOX 400x20	DC	NA	۱	۳۶	۳۶	۳۳,۴۵	۱۵۸۷	۱۷۰۰	۱,۰۷
BOX 400x35	DC	NA	۱	۳۳	۳۳	۳۳,۴۵	۱۷۴۲	۱۲۰	۰,۰۷
BOX 500x25	DC	NA	۱	۴۵	۴۵	۳۳,۴۵	۱۹۸۴	۱۵۱۰	۰,۷۶
BOX 500x35	DC	NA	۱	۴۳	۴۳	۳۳,۴۵	۲۰۸۷	۱۰۵۰	۰,۵۰
BOX 600x30	DC	NA	۱	۵۴	۵۴	۳۳,۴۵	۲۳۸۰	۱۵۹۳	۰,۶۷
BOX 600x50	DC	NA	۱	۵۰	۵۰	۳۳,۴۵	۲۵۸۷	-۷۲۶	-۰,۲۸
BOX 300x15	ST	۲	۱	۲۷	۲۷	NA	۹۳۱	۹۰۰	۰,۹۷
BOX 300x30	ST	۲	۱	۲۴	۲۴	NA	۸۲۸	۶۳۹	۰,۷۷
BOX 400x20	ST	۲	۱	۳۶	۳۶	NA	۱۲۴۲	۱۴۹۱	۱,۲۰
BOX 400x35	ST	۲	۱	۳۳	۳۳	NA	۱۱۳۸	۱۲۳۸	۱,۰۹
BOX 500x25	ST	۲	۱	۴۵	۴۵	NA	۱۵۵۲	۱۷۵۶	۱,۱۳
BOX 500x35	ST	۲	۱	۴۳	۴۳	NA	۱۴۸۳	۱۷۲۰	۱,۱۶
BOX 600x30	ST	۲	۱	۵۴	۵۴	NA	۱۸۶۳	۱۹۹۷	۱,۰۷
BOX 600x50	ST	۲	۱	۵۰	۵۰	NA	۱۷۲۵	۱۴۴۷	۰,۸۴

جدول ۳: ظرفیت نظری و ظرفیت موثر ورق‌های پیوستگی با ضخامت دو سانتی‌متر تحت اثر نیروهای متمرکز

Column Specimen	Loading	Weld (cm)	ts (cm)	bs (cm)	λ_s	λ	Theoretically Stiffener Capacity (kN)	Effective Stiffener Capacity (kN)	Ratio
BOX 300x15	SC	NA	۲	۲۷	۱۳,۵	۳۳,۴۵	۲۱۲۲	۷۷۰	۰,۳۶
BOX 300x30	SC	NA	۲	۲۴	۱۲	۳۳,۴۵	۲۱۷۳	۹۲۳	۰,۴۲
BOX 400x20	SC	NA	۲	۳۶	۱۸	۳۳,۴۵	۲۸۲۹	۲۰۲۵	۰,۷۲
BOX 400x35	SC	NA	۲	۳۳	۱۶,۵	۳۳,۴۵	۲۸۸۱	۱۹۸۹	۰,۶۹
BOX 500x25	SC	NA	۲	۴۵	۲۲,۵	۳۳,۴۵	۳۵۳۶	۳۲۸۱	۰,۹۳
BOX 500x35	SC	NA	۲	۴۳	۲۱,۵	۳۳,۴۵	۳۵۷۱	۳۰۸۵	۰,۸۶
BOX 600x30	SC	NA	۲	۵۴	۲۷	۳۳,۴۵	۴۲۴۳	۲۷۴۵	۰,۶۵
BOX 600x50	SC	NA	۲	۵۰	۲۵	۳۳,۴۵	۴۳۱۲	۳۷۹۸	۰,۸۸
BOX 300x15	DC	NA	۲	۲۷	۱۳,۵	۳۳,۴۵	۲۱۲۲	۲۹۷۴	۱,۴۰
BOX 300x30	DC	NA	۲	۲۴	۱۲	۳۳,۴۵	۲۱۷۳	۲۸۷۶	۱,۳۲
BOX 400x20	DC	NA	۲	۳۶	۱۸	۳۳,۴۵	۲۸۲۹	۳۴۱۲	۱,۲۱
BOX 400x35	DC	NA	۲	۳۳	۱۶,۵	۳۳,۴۵	۲۸۸۱	۲۳۱۳	۰,۸۰
BOX 500x25	DC	NA	۲	۴۵	۲۲,۵	۳۳,۴۵	۳۵۳۶	۴۰۸۴	۰,۱۵
BOX 500x35	DC	NA	۲	۴۳	۲۱,۵	۳۳,۴۵	۳۵۷۱	۳۱۷۲	۰,۸۹
BOX 600x30	DC	NA	۲	۵۴	۲۷	۳۳,۴۵	۴۲۴۳	۴۹۵۷	۱,۱۷
BOX 600x50	DC	NA	۲	۵۰	۲۵	۳۳,۴۵	۴۳۱۲	۲۹۲۱	۰,۶۸
BOX 300x15	ST	۲	۲	۲۷	۱۳,۵	NA	۱۸۶۳	۱۰۱۷	۰,۵۵
BOX 300x30	ST	۲	۲	۲۴	۱۲	NA	۱۶۵۶	۱۱۶۵	۰,۷۰
BOX 400x20	ST	۲	۲	۳۶	۱۸	NA	۲۴۸۴	۲۵۹۶	۱,۰۵
BOX 400x35	ST	۲	۲	۳۳	۱۶,۵	NA	۲۲۷۷	۲۲۲۱	۰,۹۸
BOX 500x25	ST	۲	۲	۴۵	۲۲,۵	NA	۳۱۰۵	۳۲۶۵	۱,۰۵

BOX 500x35	ST	۲	۲	۴۳	۲۱٫۵	NA	۲۹۶۷	۳۰۶۷	۱٫۰۳
BOX 600x30	ST	۲	۲	۵۴	۲۷	NA	۳۷۲۶	۳۸۷۴	۱٫۰۴
BOX 600x50	ST	۲	۲	۵۰	۲۵	NA	۳۴۵۰	۲۹۶۵	۰٫۸۶
BOX 300x15	ST	۴	۲	۲۷	۱۳٫۵	NA	۱۸۶۳	۶۳۱	۰٫۳۴
BOX 300x30	ST	۴	۲	۲۴	۱۲	NA	۱۶۵۶	۹۰۲	۰٫۵۴
BOX 400x20	ST	۴	۲	۳۶	۱۸	NA	۲۴۸۴	۲۴۸۶	۱٫۰۰
BOX 400x35	ST	۴	۲	۳۳	۱۶٫۵	NA	۲۲۷۷	۲۳۲۲	۱٫۰۲
BOX 500x25	ST	۴	۲	۴۵	۲۲٫۵	NA	۳۱۰۵	۴۰۱۹	۱٫۲۹
BOX 500x35	ST	۴	۲	۴۳	۲۱٫۵	NA	۲۹۶۷	۴۰۶۰	۱٫۳۷
BOX 600x30	ST	۴	۲	۵۴	۲۷	NA	۳۷۲۶	۴۷۰۲	۱٫۲۶
BOX 600x50	ST	۴	۲	۵۰	۲۵	NA	۳۴۵۰	۴۱۵۵	۱٫۲۰

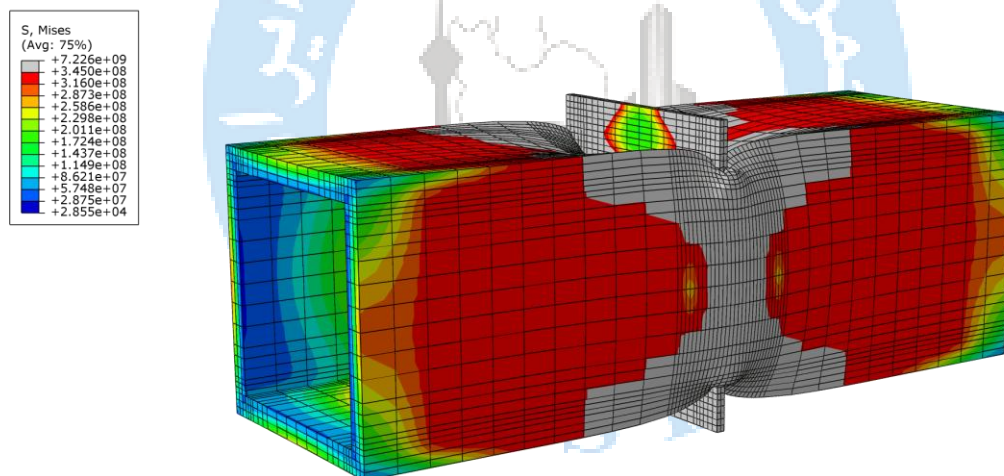


شکل ۷: تسلیم ورق پیوستگی در نمونه BOX 400x20 ST-1-W2 تحت اثر کشش یک طرفه

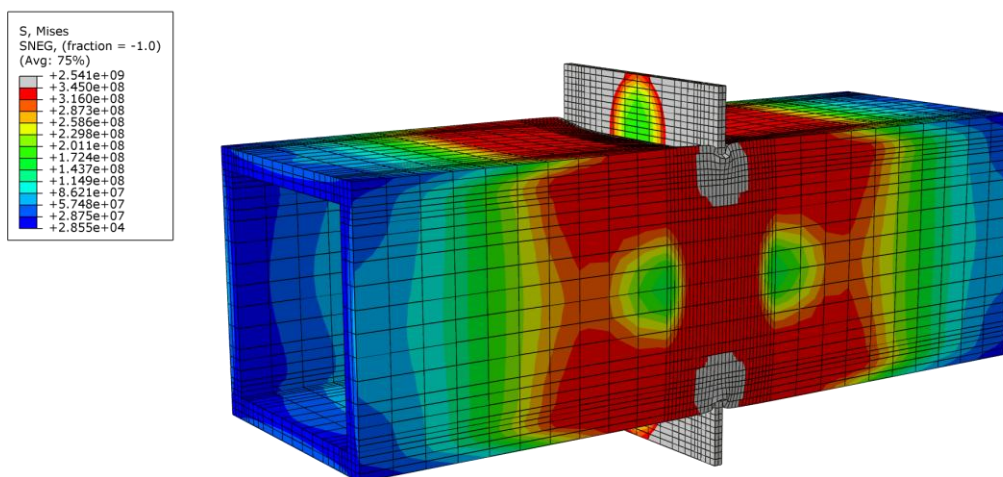
در تمام ستون‌های تحت اثر فشار، کمانش ورق پیوستگی و در ستون‌های تحت اثر کشش، تسلیم ورق پیوستگی و خرابی جوش صفحه بارگذاری، حالت حاکم بر خرابی ستون‌ها می‌باشد. بررسی‌ها نشان داد که لاغری ورق پیوستگی می‌تواند عاملی تأثیرگذار بر ظرفیت ستون‌ها باشد. ورق‌های پیوستگی با لاغری بیشتر از رابطه ۶ و یا برخی از ورق‌های پیوستگی با ضخامت یک سانتی‌متر تحت اثر فشار دوطرفه، در برخی موارد نتایجی ناسازگار با بقیه نمونه‌ها نشان دادند؛ به عنوان مثال در نمونه ستون BOX 600x50 DC، ظرفیت ستون با ورق پیوستگی کمتر از ستون بدون ورق پیوستگی می‌باشد. این نتایج ناسازگار در ستون‌های بال پهن دارای سخت‌کننده لاغر نیز مشاهده شده بود [۱۸]. مقدار تنش‌ها برای نمونه BOX 600x50 DC در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان داده شده‌است. به نظر می‌رسد با توجه به اینکه کمانش ورق پیوستگی تحت اثر فشار دوطرفه بحرانی تر می‌باشد؛ هنگامی که از ورق پیوستگی لاغر در ستون‌های تحت اثر فشار دوطرفه استفاده می‌شود، جان‌های ستون همانند حالت ستون بدون ورق پیوستگی، درگیر نیروی وارده و افزایش تنش نمی‌شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در این حالت با وجود تسلیم ورق‌های پیوستگی، بار وارده به جان ستون منتقل نشده و تسلیم موضعی و کمانش زود هنگام موجب خرابی ستون در ظرفیت‌های پایین می‌شود.

ورق‌های پیوستگی لاغرتر از حد تعیین شده توسط آیین‌نامه و ورق‌های پیوستگی با ضخامت یک سانتی‌متر تحت اثر فشار دوطرفه، برای بررسی ظرفیت ورق‌های پیوستگی در نظر گرفته نمی‌شوند. با بررسی جداول ۲ و ۳ می‌توان دریافت که بطور کلی ورق‌های پیوستگی در مقاطع با فشردگی متوسط، عملکرد بهتری دارند و در اکثر موارد ظرفیت مؤثر ورق‌های پیوستگی تحت اثر نیروهای فشاری کمتر از مقدار نظری محاسبه شده می‌باشد. در نمونه‌های تحت کشش، ظرفیت مؤثر ورق‌های پیوستگی سازگاری مناسبی با مقدار نظری محاسبه شده دارد.

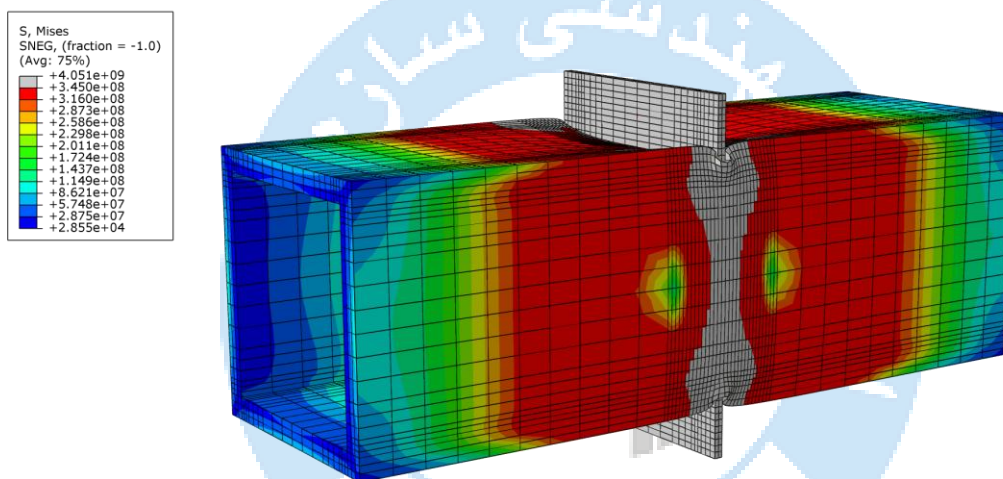
نسبت ظرفیت مؤثر به ظرفیت نظری در جداول ۲ و ۳ نشان می‌دهد که ظرفیت ورق‌های پیوستگی تحت فشار دوطرفه نسبت به فشار یکطرفه بیشتر است. در حالت بارگذاری به صورت فشار دوطرفه، تنش‌های خمشی و برشی ناشی از بار متمرکز حذف شده و به نظر می‌رسد ورق‌های پیوستگی علاوه بر مقاومت در برابر بار وارده، مهار جانبی جان‌های ستون را نیز تامین می‌کنند. با ایجاد مهار جانبی در ستون‌ها، جان ستون‌ها نیروی بیشتری جذب نموده و در طولی بیشتر از $5k+l_b$ به تسلیم می‌رسند. نسبت ظرفیت مؤثر ورق‌های پیوستگی به ظرفیت نظری محاسبه شده در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نشان داده شده است. ضریب کاهش مقاومت برای سخت‌کننده تحت فشار، طبق آیین‌نامه AISC 360-22 [۱] برابر ۰/۹ تعیین شده است؛ نتایج شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهد که بهتر است از ضریب کاهش مقاومت برای فشار یک‌طرفه ۰/۵۵ و برای فشار دوطرفه ۰/۸ استفاده شود. با توجه به شکل ۱۳، ظرفیت مؤثر ورق‌های پیوستگی تحت اثر کشش، سازگاری مناسبی با مقدار نظری محاسبه شده دارد. در نهایت برای تعیین دقیق رفتار ورق‌های پیوستگی، انجام آزمایشات تمام مقیاس برای بدست آوردن ضوابط تعیین ظرفیت ورق‌های پیوستگی در ستون‌های جعبه‌ای ضرورت دارد.



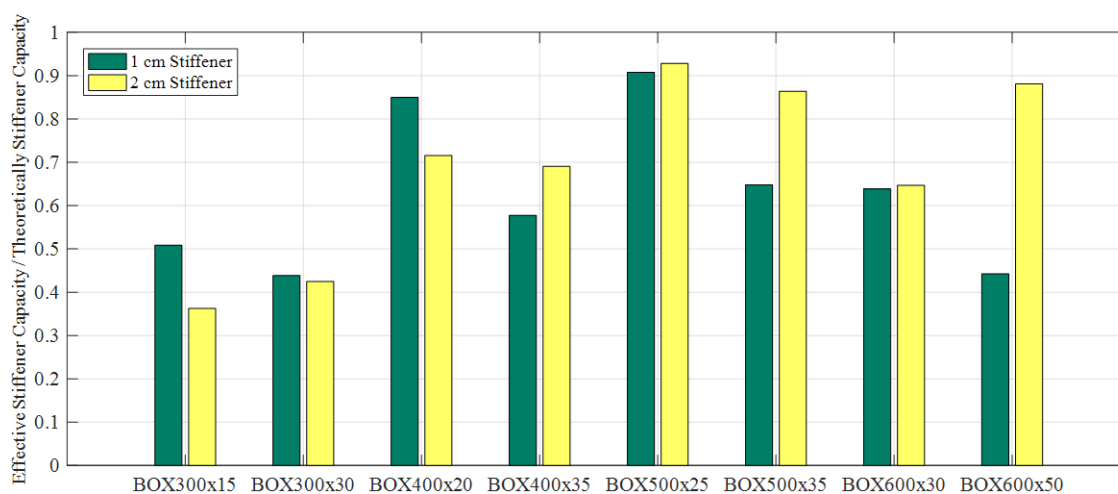
شکل ۸: نمونه BOX 600x50 DC بدون ورق پیوستگی در لحظه اخلابی



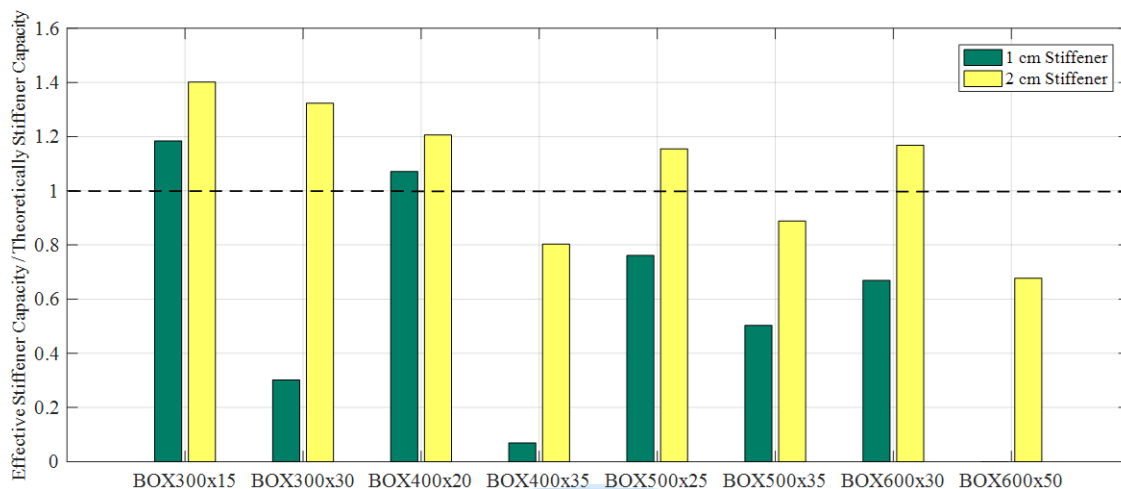
شکل ۹: نمونه BOX 600x50 DC دارای ورق پیوستگی با ضخامت یک سانتی‌متر در لحظه خرابی



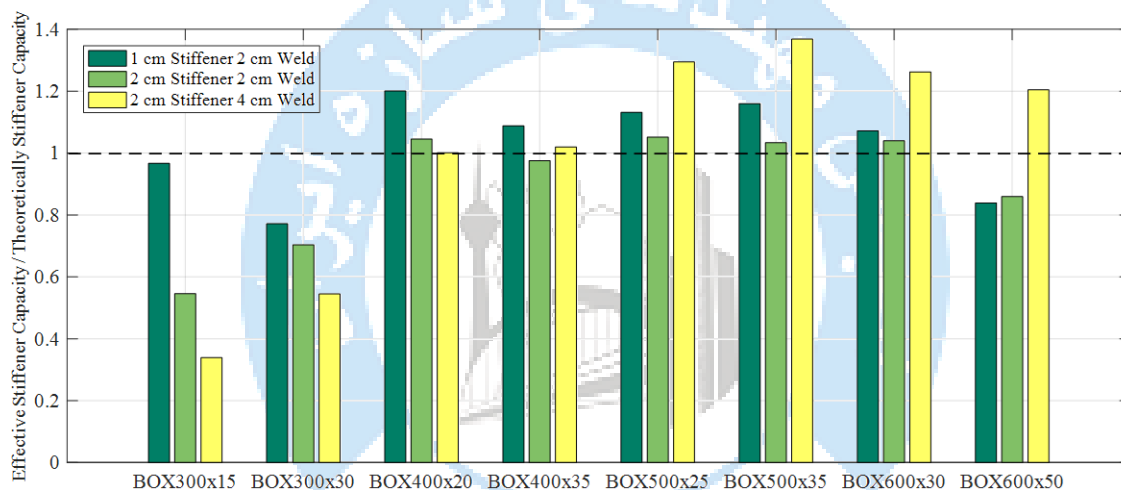
شکل ۱۰: نمونه BOX 600x50 DC دارای ورق پیوستگی با ضخامت دو سانتی‌متر در لحظه خرابی



شکل ۱۱: مقایسه نسبت ظرفیت مؤثر به ظرفیت نظری ورق‌های پیوستگی تحت اثر فشار یک‌طرفه



شکل ۱۲: مقایسه نسبت ظرفیت مؤثر به ظرفیت نظری ورق‌های پیوستگی تحت اثر فشار دوطرفه



شکل ۱۳: مقایسه نسبت ظرفیت مؤثر به ظرفیت نظری ورق‌های پیوستگی تحت اثر کشش یک‌طرفه

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل‌های اجزای محدود برای تعیین رفتار ورق پیوستگی در ستون‌های جعبه‌ای تحت اثر بارهای متمرکز پیشنهاد شد. در ادامه، برای مدل‌سازی اجزای محدود از نرم‌افزار آباکوس استفاده شد و ستون‌های مورد بررسی تحت اثر فشار و کشش یک‌طرفه و فشار دوطرفه قرار گرفتند. نتایج این تحقیق به شرح زیر می‌باشد.

- (۱) حالت حدی حاکم بر خرابی ستون‌های جعبه‌ای تحت اثر فشار، کمانش ورق پیوستگی می‌باشد.
- (۲) حالت حدی حاکم بر خرابی ستون‌های جعبه‌ای تحت اثر کشش، تسلیم ورق پیوستگی و خرابی جوش صفحه بارگذاری می‌باشد.
- (۳) ضوابط ارائه شده برای محاسبه ظرفیت ورق‌های پیوستگی تحت اثر فشار مقادیر غیرمحافظة کارانه ارائه می‌کند؛ اما ضوابط ارائه شده برای محاسبه ظرفیت ورق‌های پیوستگی تحت اثر کشش، سازگاری مناسبی با نتایج تحلیل‌های عددی دارد.
- (۴) ظرفیت مؤثر ورق‌های پیوستگی تحت اثر فشار یک‌طرفه، بین ۳۶ تا ۹۳ درصد ظرفیت نظری محاسبه شده می‌باشد.

- ۵) ظرفیت مؤثر ورق‌های پیوستگی تحت اثر فشار دوطرفه، بین ۲۸- تا ۱۴۰ درصد ظرفیت نظری محاسبه شده می‌باشد.
- ۶) ظرفیت مؤثر ورق‌های پیوستگی تحت اثر کشش یک‌طرفه، بین ۳۴ تا ۱۳۷ درصد ظرفیت نظری محاسبه شده می‌باشد.
- ۷) لاغری ورق‌های پیوستگی عامل تأثیرگذار بر ظرفیت ورق‌های پیوستگی تحت اثر فشار می‌باشد. انجام آزمایشات تجربی برای تعیین حد لاغری مناسب برای ورق‌های پیوستگی تحت اثر فشار دوطرفه ضرورت دارد. همچنین انجام آزمایشات تجربی برای توسعه ضوابط مربوط به ظرفیت ورق‌های پیوستگی در ستون‌های جعبه‌ای، ضرورت دارد.
- ۸) برای محاسبه ظرفیت ورق‌های پیوستگی تحت اثر فشار، باید از ضریب کاهش مقاومت ۰/۵۵ برای فشار یک‌طرفه و ۰/۸ برای فشار دوطرفه استفاده شود.

مراجع

- [1] AISC (2022). Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-22. American Institute of Steel Construction, Inc. Chicago, IL.
- [2] Sherbourne, A. and Murthy, D. (1978). Computer simulation of column webs in structural steel connections. *Computers & Structures*. 8(3-4), p. 479-490.
- [3] Elgaaly, M. and Salkar, R. (1991). Web crippling under edge loading. Proceedings of AISC National Steel Construction Conference.
- [4] 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), p. 381-394.
- [5] 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), p. 189-211.
- [6] 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), p. 96-104.
- [7] 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), p. 181-200.
- [8] Salkar, R. Salkar, A. and Davids, W. (2015). Crippling of Webs with Partial Depth Stiffeners under Patch Loading. *Engineering Journal-American Institute of Steel Construction*. 52(4), p. 221-232.
- [9] Mashayekh, A. and Uang, C.-M. (2018). Experimental evaluation of a procedure for SMF continuity plate and weld design. *Engineering Journal*. 55(2), p. 109-122.
- [10] Jazany, R.A. and Ghobadi, M. (2017). Design methodology for inclined continuity plate of panel zone. *Thin-Walled Structures*. 113, p. 69-82.

- [11] Norwood, J. and Prinz, G.S. (2019). Effect of Continuity Plate Eccentricity on the Performance of Welded Beam-to-Column Connections. *Engineering Structures*. 198.
- [12] Rodilla, J.A. and Kowalkowski, K. (2021). Determination of Capacities of Eccentric Stiffeners Part 1: Experimental Studies. *Engineering Journal-American Institute of Steel Construction*. 58(2), p. 79-98.
- [13] 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), p. 99-122.
- [14] AISC (2022). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 341-22. American Institute of Steel Construction, Inc. Chicago, IL.
- [15] ABAQUS (2020). "ABAQUS/Standard User's Manuals, Version 6.14." Available at: <http://62.108.178.35:2080/v6.14/books/hhp/default.htm?startat=pt02ch02s01.html>.
- [16] Bowman, M.D. and Quinn, B.P. (1994). Examination of Fillet Weld Strength. *Engineering Journal-American Institute of Steel Construction*. 31, p. 98-108.
- [17] Kartal, M. Molak, R.M. Turski, M. Gungor, S. Fitzpatrick, M.E. and Edwards, L. (2007). Determination of weld metal mechanical properties utilising novel tensile testing methods. *Applied Mechanics and Materials*. 7, p. 127-132.
- [18] 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, Ill .