

## Comprehensive study of the performance of the beam-to-column connection with reduced section and cylindrical web

Ehsan Ekhveh<sup>1</sup>, Sina Kavei<sup>2</sup>, Seyed Rasoul Mirghaderi<sup>3\*</sup>, Mehdi Ghassemieh<sup>3</sup>

1- Master of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

2- Master of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

3- Professor, Department of Civil Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

To ensure sufficient ductility and prevent brittle failure in moment-resisting frames, RBS (Reduced Beam Section) connections have become widely used in steel structures. However, a primary drawback of conventional RBS connections is the potential for lateral instability and a significant increase in the structure's lateral deformation. To address this issue, new forms of RBS connections, such as the cylindrical web RBS, have been proposed in recent years and have demonstrated effective performance under various loading conditions in past studies. In this study, an analytical evaluation of the cylindrical web RBS connection under seismic loading is conducted. Initially, the analytical equations pertinent to the structural properties and stability of the beam with the cylindrical web are introduced. Using these equations, a comprehensive design procedure for the cylindrical web RBS connection is formulated. Subsequently, a numerical model of the cylindrical web RBS connection is created and analyzed under cyclic loading using the finite element method. The results from this analysis indicate that the proposed connection meets the criteria set by valid international standards, making it suitable for use in special moment-resisting frames. The findings reveal that the relative displacement due to the use of cylindrical web RBS connections can be decreased compared to the conventional RBS connections.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 27 April 2024

**Revise Date:** 28 May 2024

**Accept Date:** 23 September 2024

### Keywords:

Cylindrical web  
Reduced beam section (RBS)  
Seismic behavior  
Plastic hinge  
Finite element method (FEM)

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.468455.3469](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.468455.3469)

\*Corresponding author: Seyed Rasoul Mirghaderi  
Email address: [rmirghaderi@ut.ac.ir](mailto:rmirghaderi@ut.ac.ir)

## بررسی جامع عملکرد اتصال تیر با مقطع کاهش یافته<sup>۱</sup> با جان استوانه‌ای

احسان اخوه<sup>۱</sup>، سینا کاوئی<sup>۲</sup>، سید رسول میرقادری<sup>۳\*</sup>، مهدی قاسمیه<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### چکیده

به منظور فراهم نمودن شکل پذیری کافی و اجتناب از ایجاد شکست ترد در قاب‌های خمشی، استفاده از اتصالات RBS در سازه‌های فولادی رواج گسترده‌ای پیدا کرده است. با این وجود ایراد اساسی فرم متعارف از اتصالات RBS امکان ایجاد ناپایداری جانبی و افزایش قابل توجه تغییر شکل جانبی سازه است. به جهت رفع این عیب، در سال‌های اخیر فرم‌های نوینی برای اتصال RBS پیشنهاد شده است که از جمله آن‌ها اتصال RBS با جان لوله‌ای است که عملکرد مطلوبی تحت شرایط بارگذاری مختلف در مطالعات گذشته از خود نشان داده است. از همین رو در این مطالعه به ارزیابی تحلیلی و عددی این اتصال تحت بار لرزه‌ای پرداخته شده است. در این راستا ابتدا به معادلات تحلیلی مرتبط با خصوصیات سازه‌ای و وضعیت پایداری تیر تضعیف شده با جان لوله‌ای اشاره شده و سپس بر اساس این روابط فرآیند طراحی اتصال RBS با جان لوله‌ای دارای تهیه و ارائه می‌شود. در گام بعد یک مدل عددی از اتصال RBS با جان لوله‌ای ساخته شده و تحت بار چرخه‌ای به روش المان محدود در نرم‌افزار ABAQUS تحلیل می‌شود. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که مطابق ضوابط آیین‌نامه‌های معتبر بین‌المللی، اتصال پیشنهادی شرایط لازم را جهت به‌کارگیری در قاب‌های خمشی ویژه ساختمانی داراست.

کلمات کلیدی: اتصال RBS با جان لوله‌ای، تیر با مقطع تضعیف شده، رفتار لرزه‌ای، مفصل پلاستیک، مدل‌سازی به روش المان محدود.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2024.468455.3469	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/jsce.2024.468455.3469		۱۴۰۴/۰۳/۳۱	۱۴۰۳/۰۷/۰۲	۱۴۰۳/۰۷/۰۲	۱۴۰۳/۰۳/۰۷	۱۴۰۳/۰۲/۰۶
				*نویسنده مسئول:		
				سید رسول میرقادری		
				mmirghaderi@ut.ac.ir		پست الکترونیکی:

<sup>1</sup> Reduced beam section

## ۱- مقدمه

سیستم قاب خمشی فولادی به عنوان یک سیستم باربر جانبی متداول و شناخته شده، کاربرد گسترده‌ای در ساختمان‌های فولادی دارد. از طرفی در مناطق لرزه‌خیز، بارگذاری جانبی ناشی از زلزله تأثیر قابل ملاحظه و مشهودی در طراحی اجزاء مختلف قاب‌های خمشی فولادی دارد. پس از وقوع زلزله نورتریج<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۴، مطالعات گسترده‌ای بر روی سازه‌های فولادی و اتصالات به کار رفته در آن‌ها انجام گرفت که منجر به اصلاح فلسفه طراحی لرزه‌ای این سازه‌ها و ابداع شیوه‌های نوین جهت اتصال اجزاء مختلف در آن‌ها، گردید. به این ترتیب یک سیستم سازه‌ای می‌بایست علاوه بر دارا بودن مقاومت کافی برای تحمل بار جانبی ناشی از زلزله، از شکل پذیری مناسب به منظور جذب انرژی نیز برخوردار باشد [۱]. در تیرها، مفاصل پلاستیک به عنوان محل کلیدی برای جذب انرژی، تأمین کننده رفتار شکل‌پذیر در آن‌ها بوده و از این رو به جهت پرهیز از ایجاد شکست ترد و فراهم آوردن این رفتار شکل‌پذیر در تیرها لازم است تا از تشکیل مفصل پلاستیک در محل اتصال تیر به ستون جلوگیری شود [۲].

یکی از شیوه‌های رایج و اقتصادی اتصال تیر به ستون که منجر به شکل‌گیری مفصل پلاستیک در فاصله مشخصی از ستون می‌گردد، استفاده از اتصال تیرهای با سطح مقطع کاهش یافته<sup>۳</sup> (RBS) است. در این روش که نخستین بار توسط پلامیر<sup>۴</sup> مطرح گشت، معمولاً از مقدار عرض بال در نزدیکی محل اتصال تیر به ستون کاسته شده و در نتیجه مفصل پلاستیک از ناحیه اتصال تیر به ستون به محل تضعیف شده هدایت می‌گردد [۳]. پس از این ابداع، مطالعات گسترده‌ای به بررسی کارایی اتصالات RBS پرداخته و هر یک به مزایای ویژه‌ای از عملکرد این اتصال اشاره نموده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به افزایش شکل‌پذیری سازه، جلوگیری از ایجاد شکست ناگهانی، جلوگیری از ایجاد خرابی پیش‌رونده در سازه، کاهش مصرف فولاد و مصالح جوش، سهولت در برقراری شرط ستون قوی و تیر ضعیف، جزئیات اجرایی نسبتاً ساده و ... اشاره کرد [۴-۱۱].

از معایب اساسی اتصالات RBS متعارف عبارت است از: امکان ایجاد ناپایداری جانبی حول محور ضعیف، کاهش سختی جانبی و در نتیجه افزایش تغییر شکل جانبی سازه، امکان ایجاد شکست ترد و یا کمانش موضعی جان در ناحیه تضعیف شده از تیر و امکان ایجاد کمانش پیشگی جانبی. در راستای برطرف نمودن معایب مذکور، روش‌های نوینی به منظور تضعیف مقطع تیر در محدوده اتصالات پیشنهاد شده که در یک دسته‌بندی کلی می‌توان این شیوه‌ها را در چهار گروه مجزا تقسیم‌بندی کرد [۱۳]: الف) کاهش عمق مقطع تیر در محدوده مفصل پلاستیک [۱۴]، ب) سوراخ نمودن جان تیر در محدوده مفصل پلاستیک [۱۵]، ج) سوراخ کردن بال تیر در محدوده مفصل پلاستیک [۱۶] و د) اتصال با جان آکاردئونی<sup>۵</sup> [۱۷]. لازم به ذکر است که از میان دسته‌های مذکور، اتصال مورد بررسی در این مقاله در دسته چهارم قرار گرفته و از این رو در ادامه به مرور گزیده‌ای از پژوهش‌های انجام شده پیرامون این نوع اتصال و ویژگی‌های آن پرداخته شده است.

در سال ۲۰۰۶، سبحان [۱۷-۱۸] در پژوهشی جامع کاربرد ورق‌های فولادی موج‌دار<sup>۶</sup> را در بهبود عملکرد لرزه‌ای تیرهای تضعیف شده و ستون‌های جدار نازک مورد بررسی قرار داد. در بخش اول از این پژوهش کارایی لرزه‌ای اتصال با تیرهای دارای جان موج‌دار با هندسه‌های گوناگون از طریق ساخت یک مدل عددی به روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن ارائه شد. گفتنی است که در این بررسی اتصال موردنظر تحت بارگذاری چرخه‌ای تا ۰/۰۴ رادیان جابه‌جایی نسبی طبقه، قرار گرفته است. میرقادری و همکاران [۱۹-۲۱] در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰، به معرفی اتصال تیر با مقطع کاهش یافته بان جان آکاردئونی<sup>۷</sup> پرداخته و به منظور بررسی و ارزیابی عملکرد لرزه‌ای آن، مجموعه‌ای از مطالعات آزمایشگاهی و عددی را انجام دادند. در این اتصال در واقع قسمتی از جان بریده شده و سپس دو پروفیل نبشی شکل فولادی به صورت رو در رو در بخش بریده شده جایگزین می‌گردد. به این ترتیب اولاً تیر در محل جایگزین‌سازی نبشی‌ها به لحاظ خمشی تضعیف شده و لذا مفصل پلاستیک به این محدوده منتقل می‌شود و ثانیاً در اثر این جایگزین‌سازی، تیر از سختی جانبی و مقاومت برشی کافی در محل مفصل پلاستیک برخوردار است. در بررسی‌های آزمایشگاهی نیز پدیده کمانش موضعی و کمانش

<sup>2</sup> Northridge

<sup>3</sup> Reduced beam section connection

<sup>4</sup> Plumier

<sup>5</sup> Connection with accordion web

<sup>6</sup> steel corrugated sheets

<sup>7</sup> Accordion Web RBS

جانبی-پیچشی در هیچ یک از نمونه‌ها مشاهده نشد، با این حال به علت ایجاد پدیدهٔ تمرکز تنش، در یال‌های نبشی‌های ترک‌هایی پدیدار گشت.

در ادامهٔ روند تحقیقات انجام گرفته بر روی اتصالات تضعیف شده با ورق‌های فولادی موج‌دار و به‌منظور رفع چالش ناشی از تمرکز تنش که در مقاطع نبشی شکل به وقوع می‌پیوست، در سال ۲۰۱۶ صالح و همکاران [۲۲-۲۳] اتصال RBS جان با مقطع لوله‌ای<sup>۸</sup> را پیشنهاد کرده و به بررسی تجربی آن از طریق اعمال بار چرخه‌ای پرداختند. جزئیات این اتصال مشابه اتصال ارائه شده در مرجع [۲۱] است با این تفاوت که در عوض دو پروفیل نبشی رو در رو، از یک مقطع لوله در جان تیر استفاده شده است. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعات آزمایشگاهی، نمونه‌های دارای این نوع از اتصال می‌توانند شکل‌پذیری به میزان بیش از ۶٪ دررفت را بدون از دست دادن مقدار قابل توجهی از مقاومت خمشی، فراهم نموده و ضمناً در قیاس با سایر جان‌های آکاردئونی از شرایط بهتری از نظر خستگی ناشی از سیکل‌های با دامنهٔ پایین<sup>۹</sup> برخوردارند. با استفاده از نتایج به دست آمده در این مطالعهٔ تجربی، زهرایی و همکاران [۲۴-۲۵] در سال ۲۰۱۷، به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای اتصال RBS جان با مقطع لوله‌ای و مقایسهٔ آن با اتصال RBS با جان آکاردئونی که در مرجع [۲۱] مورد بررسی قرار گرفته است، پرداختند.

از تازه‌ترین مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به پژوهش زهرایی و همکاران [۲۶] در سال ۲۰۱۷ اشاره کرد. در این تحقیق ضمن معرفی اتصال RBS با جان دو لوله‌ای<sup>۱۰</sup>، نمونه‌هایی از این نوع اتصال را به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند، در این مطالعه مشخص شد که میزان جذب انرژی این نوع اتصال در قیاس با جان دارای یک لوله به مراتب بیشتر بوده و در آن طول مفصل پلاستیک تیر نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۱۹، ایمان‌پور و همکاران [۲۷] نیز در پژوهشی مشابه، ضمن معرفی اتصال RBS دو سلوله با جان آکاردئونی<sup>۱۱</sup>، به مطالعهٔ آزمایشگاهی و عددی این نوع اتصال پرداخته و با استفاده از نتایج حاصل از آن، داده‌ها و ضوابطی را برای طراحی لرزه‌ای این نوع اتصال ارائه نمودند. همچنین منصوری و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۲۱ به‌منظور بهبود عملکرد اتصالات تضعیف شده با ورق‌های فولادی موج‌دار که در پژوهش‌های قبلی مورد اشاره قرار گرفته بود، دو اتصال جدید از این نوع را معرفی و مطالعات عددی گسترده‌ای بر روی آن‌ها انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که در طی فرآیند بارگذاری چرخه‌ای، اتصالات پیشنهادی در قیاس با سایر اتصالات RBS با جان آکاردئونی، ماکزیمم کرنش پلاستیک معادل کمتری را تجربه می‌کند.

مجموعاً با توجه به تحقیقات انجام گرفته بر روی تیرهای موج‌دار و انواع اتصالات RBS با جان آکاردئونی، می‌توان به‌طور خلاصه به مزایای زیر در خصوص آن‌ها اشاره کرد [۲۹-۳۸]:

- مقاومت خمشی این تیرها در بخش موج‌دار اندک بوده و لذا منجر به هدایت مفصل پلاستیک از محدودهٔ اتصال تیر به ستون به بخش موج‌دار می‌گردد.
- تیرهای ساخته‌شده با جان موج‌دار تحت بارهای چرخه‌ای، دیرتر دچار خستگی می‌شوند همچنین مقاومت کمانشی تیرهای موج‌دار در قیاس با تیرهای صاف<sup>۱۲</sup> با همان ضخامت به مراتب بیشتر است.
- حساسیت کمتر تیرهای موج‌دار نسبت به پدیدهٔ کمانش باعث می‌گردد که حساسیت تیر نسبت به نقص‌های هندسی پدید آمده در حین ساخت کاهش یابد.
- در صورت استفاده از این نوع تیرها در سازه، پایداری جانبی-پیچشی بیشتری فراهم می‌گردد.
- به دلیل خاصیت آکاردئونی تیرهای موج‌دار، می‌توان از جان موج‌دار با ضخامت کمتری در قیاس با تیرهای دارای جان صاف استفاده کرد.

<sup>8</sup> tubular web RBS connections

<sup>9</sup> Low-cycle fatigue

<sup>10</sup> Two pipes web RBS connections

<sup>11</sup> double-cell accordion-web RBS connection

<sup>12</sup> flat

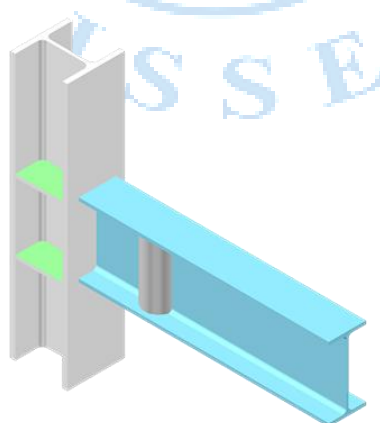
گفتنی است که از جمع‌بندی پژوهش‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که اتصالات RBS با جان لوله‌ای ضمن برخورداری از عملکرد مناسب در برابر بارهای لرزه‌ای، دارای جزئیات اجرایی نسبتاً ساده‌ای نیز هستند که استفاده از آن‌ها را در فرآیند ساخت ساختمان‌های فولادی میسر می‌سازد. با این وجود مطالعات انجام گرفته حول اتصالات RBS با جان لوله‌ای دارای دو خلأ اساسی است. اولاً مطالعات تحلیلی و عددی گسترده و جامعی در خصوص عملکرد لرزه‌ای این نوع اتصالات صورت نگرفته و ثانیاً کلیه تحقیقات انجام شده در این زمینه محدود به مطالعه این اتصال به صورت منفرد و مجزای از سازه بوده و اثر استفاده از آن در یک قاب خمشی بر روی رفتار کل سازه مورد بررسی واقع نشده است. از همین رو به منظور پر کردن خلأهای مزبور، پژوهش حاضر با اهداف کلی زیر رفتار لرزه‌ای اتصالات RBS با جان لوله‌ای را مورد بررسی قرار داده است.

- ارائه روابط تحلیلی مرتبط با رفتار و خصوصیات سازه‌ای اتصال RBS با جان لوله‌ای و انجام مطالعه پارامتری بر روی برخی از پارامترهای کلیدی و ارائه روابطی به منظور طراحی اتصال (بخش دوم مقاله: معرفی اتصال و بررسی تحلیلی آن)
  - انجام مطالعه عددی به جهت مطالعه دقیق‌تر رفتار لرزه‌ای اتصال RBS با جان لوله‌ای و مقایسه آن با اتصال RBS با جان آکاردئونی [۲۱] با استفاده از شاخص شکست<sup>۱۳</sup> (RI) (بخش سوم مقاله: مدل‌سازی عددی)
  - مطالعه اثر استفاده از این اتصال بر عملکرد قاب خمشی از طریق بررسی تأثیر آن بر مؤلفه‌های ماتریس سختی و بیشینه دررفت طبقات به کمک انجام یک مطالعه موردی (بخش چهارم مقاله: اثر استفاده از اتصال RBS با جان لوله‌ای بر رفتار قاب خمشی)
- نهایتاً با توجه به داده‌ها و نتایج به دست آمده در بخش‌های فوق، در قسمت پایانی این مقاله، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری‌های لازم بیان می‌گردد.

## ۲- معرفی اتصال و بررسی تحلیلی آن

### ۲-۱- خصوصیات سازه‌ای اتصال RBS با جان لوله‌ای

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، در اتصال RBS با جان لوله‌ای، بخشی از جان تیر در نزدیکی اتصال تیر به ستون بریده شده و به جای آن یک پروفیل فولادی لوله‌ای شکل با ابعاد مشخص قرار می‌گیرد (شکل ۱). به این ترتیب مقطع تیر در محل جایگزین‌سازی لوله از منظر خمشی تضعیف شده و در نتیجه مفصل پلاستیک از محدوده اتصال تیر به ستون به این محل منتقل می‌شود.



شکل ۱: نمایش شماتیک اتصال RBS با جان لوله‌ای.

<sup>13</sup> rupture index

گفتنی است که با موج‌دار نمودن جان تیر سختی درون صفحه‌ای در راستای طول تیر به شدت کاهش یافته و تحت اثر بار محوری اندک، دچار تغییرشکلی می‌شود که به جمع و باز شدن آکاردئون شبیه است و از این رو به این رفتار جان تیر، اثر آکاردئونی<sup>۱۴</sup> می‌گویند. لازم به ذکر است که در سایر جهات از مقدار سختی صفحه کاسته نمی‌شود.

اکنون به منظور ارزیابی میزان کاهش سختی محوری و محاسبه مقدار کاهش ظرفیت بار محوری جان تیر، یک نوار دایره‌ای شکل از لوله را در نظر گرفته و با استفاده از روش‌های انرژی، سختی ( $K_p$ ) و ظرفیت محوری ( $P_c$ ) تیری که در بخشی از جان آن لوله‌ای به قطر ( $D$ ) و ضخامت ( $t_p$ ) قرار گرفته است، استخراج می‌گردد.

$$K_{\text{pipe}} = \frac{t_p^3 E}{0.223D^3 + 1.618Dt_p^2} \quad (۱)$$

$$P_c = \frac{2t_p^2 F_{yp}}{D} \quad (۲)$$

در رابطه فوق  $F_{yp}$  نماینده تنش تسلیم فولاد مورد استفاده در لوله است. در مقابل سختی ( $K_f$ ) و ظرفیت محوری ( $P_f$ ) ورق صاف و به عمق واحد به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$K_{\text{flat}} = \frac{P}{\Delta} = \frac{EA_f}{D} = \frac{Et_f}{D} \quad (۳)$$

$$P_f = A_f F_{yf} = t_f F_{yf} \quad (۴)$$

در رابطه بالا  $F_{yf}$  تنش تسلیم فولاد مورد استفاده در ورق جان است. با فرض برابری  $F_{yp}$  و  $F_{yf}$ ، ضریب کاهش سختی ۱۵ (SRF) و ضریب کاهش مقاومت ۱۶ (SDF) عبارت است از:

$$\text{SRF} = 1 - \frac{\left(\frac{t_p}{t_f}\right)^3}{0.223\left(\frac{D}{t_f}\right)^2 + 1.618\left(\frac{t_p}{t_f}\right)^2} \quad (۵)$$

$$\text{SDF} = 1 - \frac{2\left(\frac{t_p}{t_f}\right)^2}{\left(\frac{D}{t_f}\right)} \quad (۶)$$

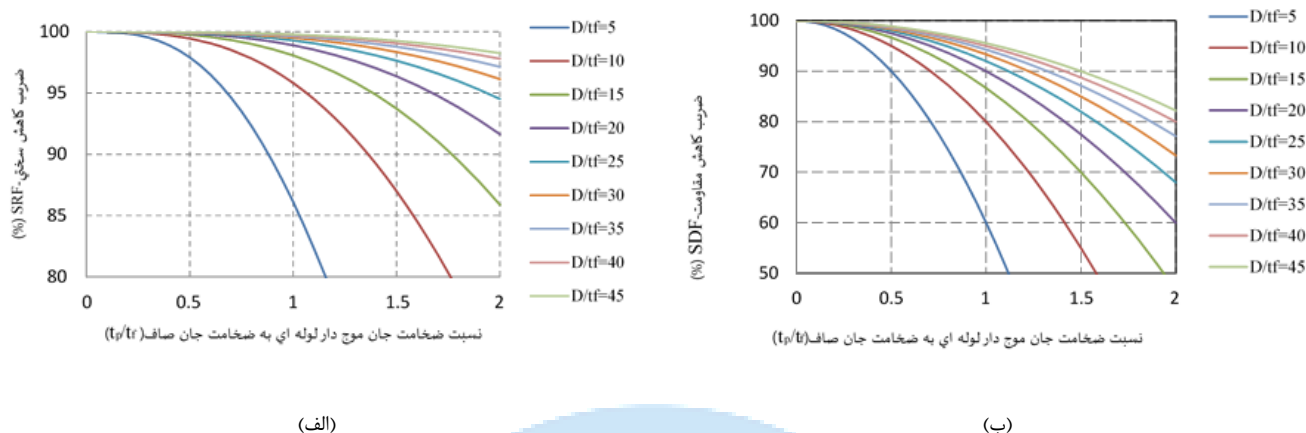
در شکل ۲، منحنی تغییرات SRF و SDF برای مقادیر مختلف از نسبت‌های  $t_p/t_f$  و  $D/t_f$  نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر SRF و SDF، با افزایش نسبت  $t_p/t_f$  کاهش و با افزایش نسبت  $D/t_f$  افزایش می‌یابند. همچنین جمع‌بندی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در  $t_p/t_f$  کوچک‌تر از یک و  $D/t_f$  بزرگ‌تر از ۱۰، مقدار SRF از ۹۵٪ بزرگ‌تر و کاهش سختی کاملاً مشهود و قابل توجه است و

<sup>14</sup> Accordion effect

<sup>15</sup> Stiffness Reduction Factor

<sup>16</sup> Strength Degradation Factor

همچنین در  $t_p/t_f$  کوچک تر از یک و همچنین  $D/t_f$  بزرگ تر از ۱۵، مقدار  $SDF$  فراتر از ۹۰٪ بوده و لذا کاهش مقاومت محوری جان چشمگیر است.



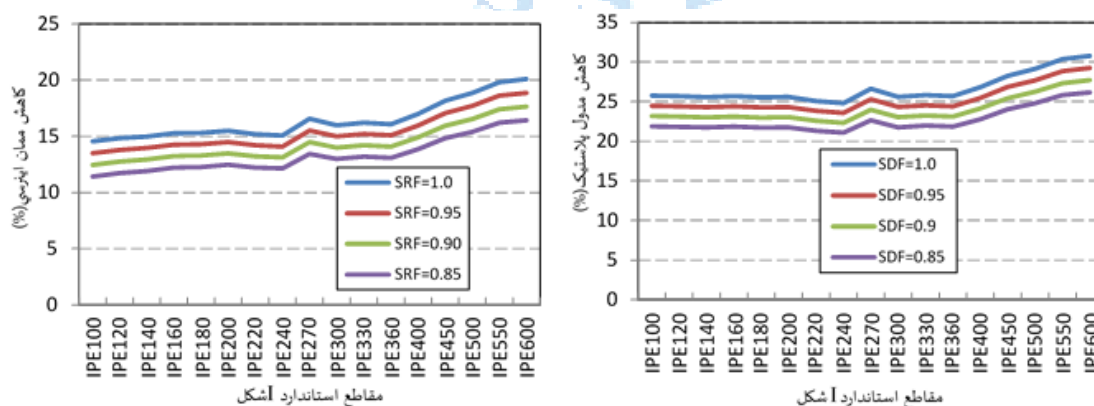
شکل ۲: نمایش تغییرات مقادیر  $SDF$  و  $SRF$  در ازای تغییر نسبت های  $t_p/t_f$  و  $D/t_f$

ضمناً مقادیر ممان اینرسی و مدول پلاستیک برای مقاطع I-شکل با جان تضعیف شده با لوله به ترتیب از روابط (۷) و (۸) تبعیت می کنند:

$$I_{RBS}^{Pipe} = I_{Flange} + (1 - SRF) I_{Web}^{flat} \quad (7)$$

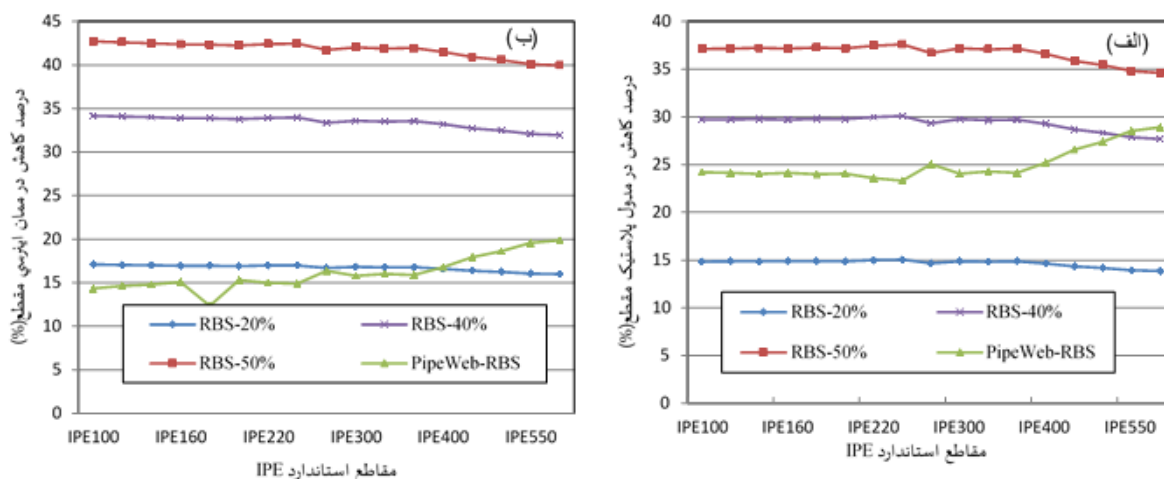
$$Z_{RBS}^{Pipe} = Z_{Flange} + (1 - SDF) Z_{Web}^{flat} \quad (8)$$

در روابط فوق،  $I_{RBS}^{Pipe}$  و  $Z_{RBS}^{Pipe}$  نماینده ممان اینرسی و مدول پلاستیک تیر تضعیف شده،  $I_{Flange}$  و  $Z_{Flange}$  نماینده ممان اینرسی و مدول پلاستیک بال و  $I_{Web}^{flat}$  و  $Z_{Web}^{flat}$  به ترتیب نماینده ممان اینرسی و مدول پلاستیک ورق جان است. در شکل ۳ میزان کاهش ممان اینرسی و مدول پلاستیک مقطع برای طیفی از مقاطع استاندارد I شکل به ازای  $SDF$  و  $SRF$  های متفاوتی نشان داده است. همان طور که ملاحظه می گردد میزان تأثیر این دو پارامتر بر درصد کاهش ممانی اینرسی، بین ۳٪ تا ۴٪ و میزان این تأثیر بر درصد کاهش مدول پلاستیک مقطع بین ۶٪ تا ۷٪ در مقاطع است.



شکل ۳: درصد کاهش ممان اینرسی و مدول پلاستیک مقاطع مختلف I-شکل.

به منظور مقایسه کارایی اتصال RBS با جان لوله‌ای با اتصال RBS متعارف، در شکل ۴ مقایسه‌ای میان درصد کاهش در ممان اینرسی و مدول پلاستیک برای این دو نوع اتصال انجام گرفته است. گفتنی است که در این مقایسه، سه مقدار ۲۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ برای ضریب کاهش عرض بال در اتصال RBS متعارف در نظر گرفته شده و ضمناً نسبت‌های  $t_p/t_f$  و  $D/t_p$  به ترتیب برابر ۰/۷ و ۱۵ لحاظ شده است.



شکل ۴: مقایسه درصد کاهش ممان اینرسی و مدول پلاستیک مقاطع مختلف I-شکل با اتصال RBS متعارف و اتصال RBS با جان لوله‌ای.

با توجه به نتایج حاصل، به طور کلی اتصال RBS با جان لوله‌ای در تیرهای عمیق اثرات قابل ملاحظه‌تری بر درصد کاهش ممان اینرسی و مدول پلاستیک مقطع دارد و ضمناً ممان اینرسی تیر را به میزان کمتری در مقایسه مدول پلاستیک مقطع کاهش می‌دهد. این در حالی است که تقریباً در کلیه نتایج به دست آمده از اتصال RBS متعارف، درصد کاهش ممان اینرسی تیر از درصد کاهش مدول پلاستیک تیر بیشتر است. کاهش کمتر ممان اینرسی در اتصال RBS با جان لوله‌ای و همچنین کارایی بیشتر این اتصال در تیرهای عمیق، استفاده از این نوع اتصال را در سازه‌های بلند توجیه‌پذیر می‌کند.

### ۳- تحلیل پایداری اتصال و فرآیند طراحی آن

گفتنی است که جهت ارزیابی وضعیت پایداری جان تیر در اتصال RBS با جان لوله‌ای، به علت استفاده از ورق موج‌دار و اثرات ناشی از رفتار آکاردئونی این ناحیه، نمی‌توان از ضوابط متداول آیین‌نامه‌ها در این مورد استفاده کرد. در واقع طبق تحقیقات انجام گرفته توسط الدیب<sup>۱۷</sup> [۳۹] پایداری این بخش از اندرکنش کمانش محلی<sup>۱۸</sup> و موضعی<sup>۱۹</sup> تعیین می‌گردد. بر اساس نتایج این مطالعه، تنش برشی متناظر با کمانش محلی<sup>۲۰</sup>  $(\tau_{cr,L}^e)$  و کلی<sup>۲۱</sup>  $(\tau_{cr,G}^e)$  در محدوده الاستیک از روابط (۹) و (۱۰) تبعیت می‌کند.

$$\tau_{cr,L}^e = k_L \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_w}{w} \right)^2 \quad (9)$$

$$\tau_{cr,G}^e = k_G \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_w}{h_w} \right)^2 \quad (10)$$

<sup>17</sup> Eldib

<sup>18</sup> Local buckling

<sup>19</sup> General buckling

<sup>20</sup> Elastic local buckling shear stress

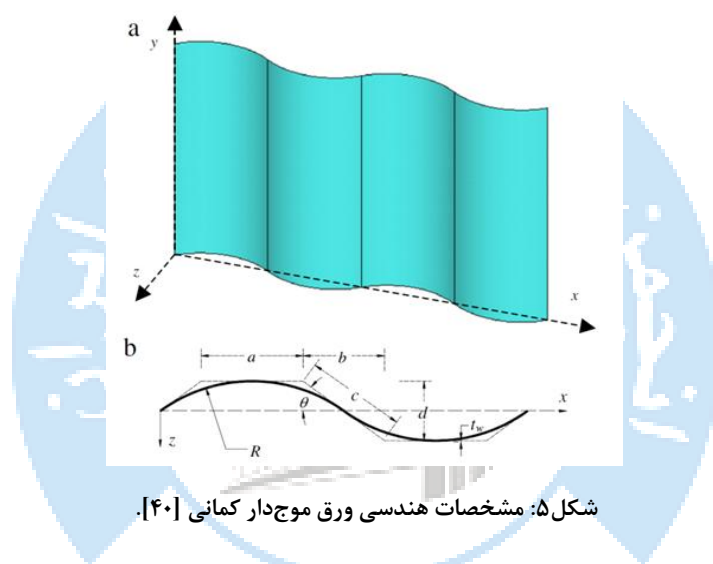
<sup>21</sup> Elastic global buckling shear stress

در روابط فوق  $E$  مدول یانگ،  $\nu$  ضریب پواسون،  $w$  ماکزیمم عرض افقی ( $a$ ) و عرض قطری ( $c$ ) ورق‌های موج‌دار با توجه به شکل ۵،  $t_w$  ضخامت ورق موج‌دار،  $k_L$  ضریب کمانش موضعی برشی و  $k_G$  ضریب کمانش کلی برشی است که به صورت زیر قابل محاسبه‌اند [۴۱].

$$k_L = 5.34 + 4 \left( \frac{w}{h_w} \right)^2 \quad (11)$$

$$k_G = \frac{36\beta}{\pi^2 \sqrt{\eta}} \left[ 2 \left( (d/t_w)^2 + 1 \right) (1 - \nu^2) \right]^{3/4} \quad (12)$$

گفتنی است که در رابطه (۱۲)،  $\beta$  برابر ۱ و  $1/9$  به ترتیب برای تکیه‌گاه ساده و گیردار و  $\eta$  ضریب کاهش طول است که از رابطه  $(a+b)/(a+c)$  حاصل می‌گردد. لازم به یادآوری است که پارامترهای  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۵: مشخصات هندسی ورق موج‌دار کمانی [۴۰].

اکنون برای در نظر گرفتن اندرکنش کمانش موضعی و محلی، طبق پژوهش ال‌دیب [۳۹] رابطه مقاومت کمانش برشی اندرکنشی عبارت است از:

$$\left( \frac{1}{\tau_{cr,L}} \right)^n = \left( \frac{1}{\tau_{cr,G}^e} \right)^n + \left( \frac{1}{\tau_y} \right)^n \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)،  $\tau_{cr,L}$  و  $\tau_{cr,G}^e$  به ترتیب نماینده کمینه مقاومت برشی موضعی و کلی است. ضمناً برای حاصل شدن تخمین مناسبی از حد پایین برای کمانش اندرکنشی ورق‌های موج‌دار، مقدار  $n$  برابر  $1/5$  و  $\tau_y$  برابر  $\frac{F_y}{\sqrt{3}}$  در نظر گرفته می‌شود که در آن  $F_y$  تنش تسلیم جان تیر است.

با استفاده از رابطه (۱۳) می‌توان مقدار حداکثر ظرفیت تنش برشی اسمی جان موج‌دار ( $\tau_n^{\max}$ ) را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\tau_n^{\max} = \frac{\tau_y}{\sqrt[3]{4}} \quad (14)$$

با اتکا به روابط تحلیلی مزبور که وضعیت پایداری جان تیر تضعیف شده با لوله را نشان می دهند و با الگوگیری از فرآیند طراحی اتصالات در آیین نامه AISC [۴۲]، می توان ضوابط و روند طراحی اتصال RBS با جان لوله ای را مطابق روندنمای<sup>۲۲</sup> نمایش داده شده در شکل ۶ بیان نمود.



<sup>22</sup> flowchart

شکل ۶: نمایش روندنمای طراحی اتصال RBS با جان لوله‌ای [۲۲ و ۴۱].

## ۴- مدل سازی عددی

### ۴-۱- مشخصات و مفروضات مدل و صحت سنجی آن

همان طور که پیش تر در بخش مقدمه نیز اشاره شد، در این پژوهش به منظور مطالعه رفتار لرزه‌ای اتصال RBS با جان لوله‌ای، یک مدل عددی ایجاد شده و به روش المان محدود تحت بارگذاری چرخه‌ای تحلیل می‌گردد. در این تحقیق یک گره میانی از قاب که از یک ستون قوطی<sup>۲۳</sup> شکل و دو تیر I-شکل که به کمک اتصال RBS با جان لوله‌ای به ستون متصل گشته‌اند، به صورت عددی شبیه‌سازی می‌گردد. گفتنی است که با فرض اندک بودن بار ثقلی وارده بر روی تیرها، نقاط عطف تیر و ستون (محل‌های بدون لنگر خمشی) در وسط آن‌ها شکل گرفته و از همین رو شرایط مرزی مفصلی و غلتکی در این نقاط به مدل مطابق شکل ۷ تخصیص داده شده و در بخش فوقانی ستون نیز تغییر مکان چرخه‌ای یا یک طرفه وارد می‌شود. ضمناً حرکت خارج از صفحه بال‌های فوقانی و تحتانی تیر در فاصله‌های ۴۵ سانتی‌متری و ۱۳۵ سانتی‌متری از وجه ستون در هر دو سمت مهار گردیده است.

لازم به ذکر است که طراحی کلیه اجزاء مدل بر اساس فرآیند پیشنهاد شده در روندنمای نمایش داده شده در شکل ۶ صورت گرفته است. به این ترتیب در مدل ساخته شده فاصله میان تکیه‌گاه مفصلی فوقانی تا تکیه‌گاه مفصلی تحتانی ستون ۲۱۵۰ میلی‌متر و فاصله بین تکیه‌گاه‌های مفصلی تیرها ۳۲۹۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین برای ستون از پروفیل BOX 200×160×10، برای تیرها از پروفیل IPE180 و برای لوله از پروفیلی با قطر ۷۶/۱ میلی‌متر و ضخامت ۳/۶ میلی‌متر که در فاصله ۱۰/۴۵ میلی‌متری از بر ستون در جان تیرها تعبیه شده، استفاده شده است. گفتنی است که مشخصات هندسی مقطع تیر و ستون به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ نمایش داده شده است.

مصالح به کار رفته در این مدل همگی از نوع A36 با مشخصاتی مشابه آن چه که در پژوهش میرقادی و همکاران [۲۱] به آن اشاره گشته، بوده که جزئیات مشخصات آن‌ها در جدول ۳ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که مدول الاستیسیته فولاد (E) برابر  $2.03 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  و ضریب پواسون فولاد (ν) نیز ۰/۳ در نظر گرفته شده است. همچنین برای مدل سازی رفتار فولاد از منحنی سه-خطی مطابق شکل ۸ استفاده گشته است. ضمناً کلیه تنش‌ها و کرنش‌های در نظر گرفته شده در مدل از نوع واقعی (لگاریتمی) بوده که به کمک روابط (۱۵) و (۱۶) از مقادیر تنش‌ها و کرنش‌های مهندسی قابل تعیین است.

$$\varepsilon_{True} = Ln(1 + \varepsilon_{Eng}) \quad (15)$$

$$\sigma_{True} = \sigma_{Eng} (1 + \varepsilon_{Eng}) \quad (16)$$

جدول ۱: مشخصات هندسی مقطع تیر

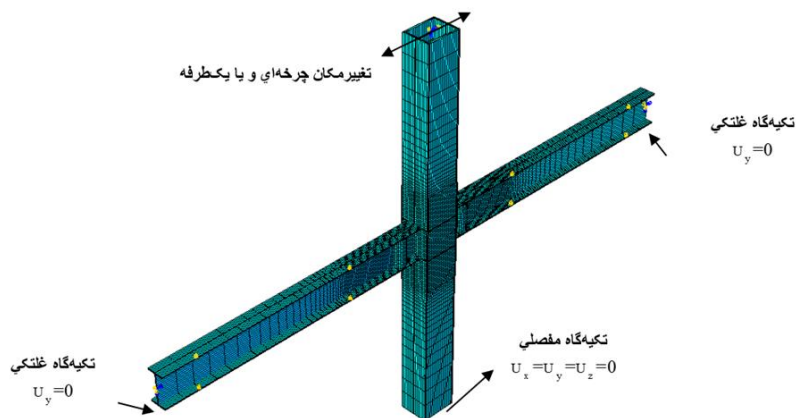
مقطع	عمق تیر	عرض بال	ضخامت جان	ضخامت بال	مساحت	مدول پلاستیک	شعاع ژیراسیون
	$d_b$	$b_f$	$t_w$	$t_f$	$A_b$	$Z_b^{\max}$	$r_y$
	$(m \times 10^{-2})$	$(m \times 10^{-2})$	$(m \times 10^{-2})$	$(m \times 10^{-2})$	$(m^2 \times 10^{-4})$	$(m^3 \times 10^{-6})$	$(m \times 10^{-3})$
IPE180	18	9.1	0.53	0.8	23.9	166	2.05

جدول ۲: مشخصات هندسی مقطع ستون

مقطع	عمق ستون $d_c$ ( $m \times 10^{-3}$ )	عرض بال $b_f$ ( $m \times 10^{-3}$ )	ضخامت جان $t_w$ ( $m \times 10^{-3}$ )	ضخامت بال $t_f$ ( $m \times 10^{-3}$ )	مساحت $A_b$ ( $m^2 \times 10^{-4}$ )	مدول پلاستیک $Z_b^{\max}$ ( $m^3 \times 10^{-6}$ )	شعاع ژیراسیون $r_y$ ( $m \times 10^{-3}$ )
Box200×160×10	18	14	1.0	1.0	64	428	7.40

جدول ۳: مشخصات مصالح اجزاء نمونه‌های آزمایش شده [۲۱].

عضو	مشخصات	تنش حد جاری- شدگی	تنش حد نهایی	ازدیاد طول نسبی
		$F_y$	$F_u$	e
		kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	%
بال تیر	IPE180	3165	4463	27
جان تیر	IPE180	3910	4958	25
جان و بال ستون	Plate	2530	3700	41
جان ستون در چشمه اتصال	Plate	2442	3740	30
لوله به‌کار رفته در جان	TUBO D76.1	4060	4490	18

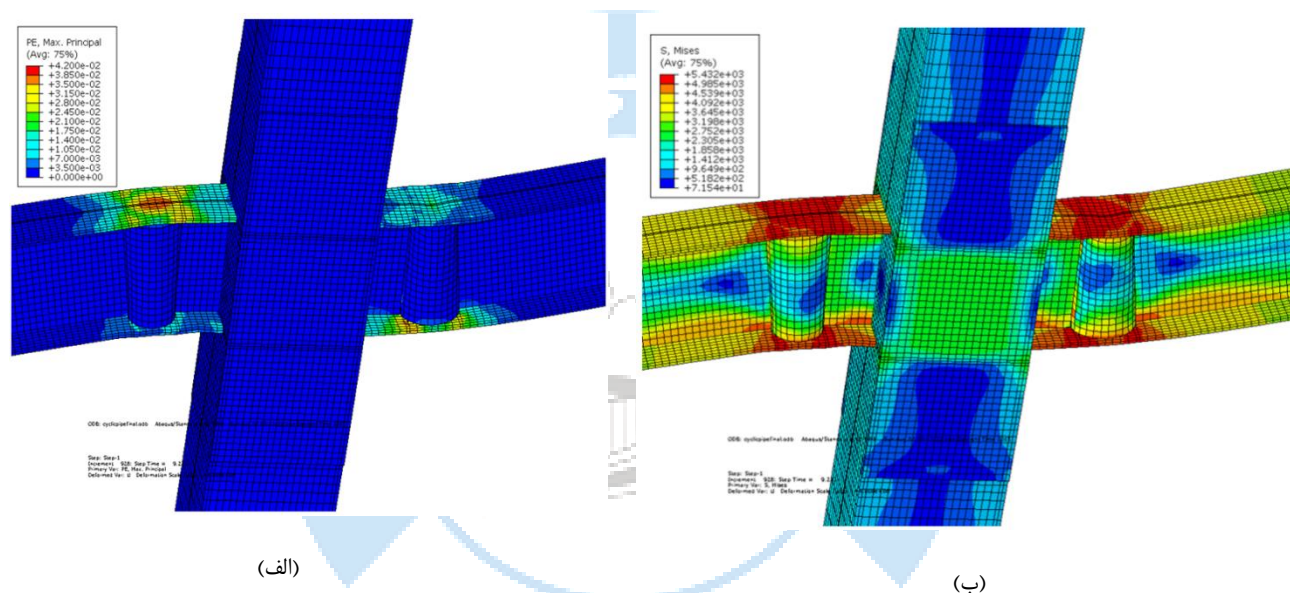


شکل ۷: نمایش مدل سه‌بعدی.



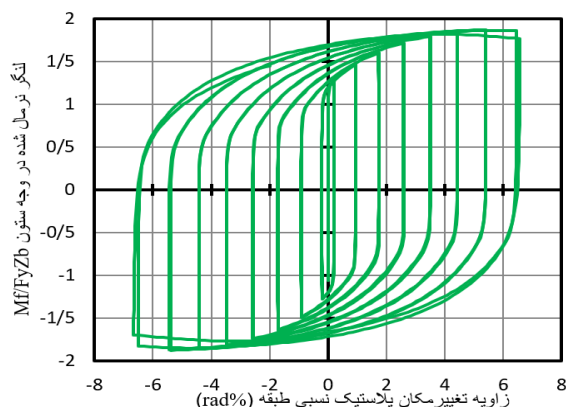
## ۲-۴- نتایج مدل سازی عددی

در این بخش به نتایج حاصل از مدل سازی عددی اتصال تحت بار چرخه‌ای اشاره می‌شود. در شکل ۱۱، توزیع ماکزیمم کرنش پلاستیک و تنش فون مایرز متناظر با دررفت ۰/۰۶ ارائه شده است. با مشاهده هر دو کانتور، به خوبی مشخص است که در محل تضعیف شده با لوله تمرکز کرنش و تنش صورت گرفته و با فاصله گرفتن از این محل، این مقادیر کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در نزدیکی محل اتصال تیر به ستون سطح مقادیر تنش و کرنش اندک است و از این رو می‌توان نتیجه گرفت که در این اتصال مفصل پلاستیک از نزدیکی وجه ستون به بخش تضعیف شده منتقل و به این ترتیب از وقوع شکست ترد اجتناب شده است. ضمناً از بررسی کانتور ماکزیمم کرنش پلاستیک (شکل ۱۱-الف) می‌توان نتیجه گرفت که تنها در بخش تضعیف شده از جان، مصالح وارد ناحیه پلاستیک شده و در باقی قسمت‌ها رفتار مصالح کماکان ارتجاعی است. لازم به ذکر است با توجه به شکل ۱۱-ب، توزیع تنش در جان در ناحیه موج‌دار از مقادیر تنش کم‌تری نسبت به بال تیر برخوردار بوده و ضمناً ناحیه چشمه اتصال نیز در آستانه جاری‌شدگی قرار گرفته است.



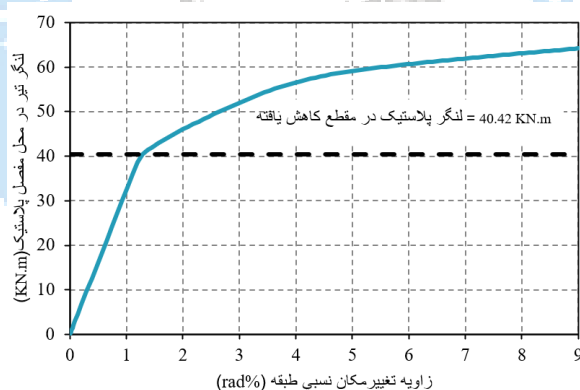
شکل ۱۱: نمایش کانتور الف) ماکزیمم کرنش پلاستیک و ب) تنش فون مایرز در دررفت ۰/۰۶.

در شکل ۱۲ نمودار لنگر خمشی در وجه ستون در برابر زاویه تغییر مکان پلاستیک نسبی برای اتصال مورد بررسی ترسیم شده است. گفتنی است که در این نمودار، مقادیر لنگر خمشی از طریق تقسیم بر مقدار ظرفیت خمشی اسمی تیر نرمال سازی شده است. همچنین زاویه تغییر مکان پلاستیک نسبی از کسر زاویه تغییر مکان نسبی از کل زاویه تغییر مکان نسبی طبقه حاصل شده است. از بررسی شکل ۱۲ نتیجه می‌شود که این اتصال قابلیت تحمل حداقل ۰/۰۶ رادیان زاویه تغییر مکان پلاستیک نسبی طبقه را داراست و ضمناً در زاویه تغییر مکان پلاستیک نسبی طبقه ۰/۰۳ رادیان حداکثر ۲۰٪ از تقاضای لنگر خمشی در وجه ستون کاهش یافته است و در نتیجه این اتصال مطابق آیین‌نامه AISC1997 [۴۲] و آیین‌نامه FEMA350 [۴۳] می‌تواند در قاب خمشی ویژه مورد استفاده قرار گیرد.



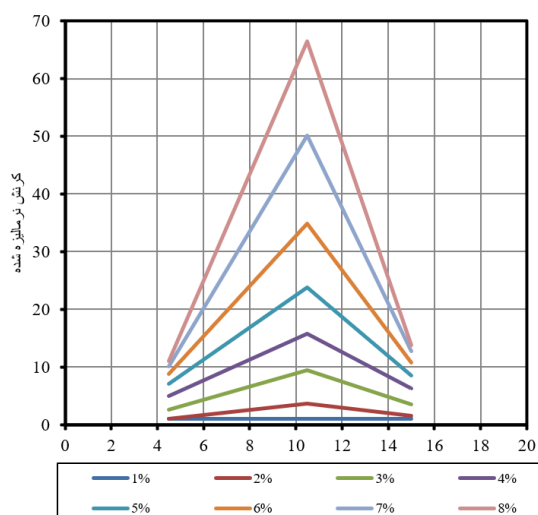
شکل ۱۲: نمودار لنگر نرمال شده در وجه ستون در برابر زاویه تغییر مکان پلاستیک نسبی طبقه.

در شکل ۱۳ مقدار لنگر در محل مفصل پلاستیک در برابر دریافت طبقه ترسیم شده است. با توجه به نمودار پوش لنگر در شکل ۱۳، مقدار لنگر در محل مفصل پلاستیک که متناظر با شروع ناحیه غیرخطی است، برابر  $40/42$  کیلونیوتن متر برآورد شده است. همچنین مقدار ظرفیت پلاستیک واقعی مقطع بدون تضعیف تیر، برابر با  $55/6$  کیلونیوتن متر است، پس می‌توان نتیجه گرفت که نسبت ظرفیت خمشی تیر تضعیف شده به ظرفیت خمشی تیر برابر  $0/733$  خواهد بود. لازم به ذکر است که طبق روابط تحلیلی ارائه شده در این پژوهش، نسبت مدول پلاستیک ناحیه تضعیف شده به مدول پلاستیک ناحیه تضعیف نشده برابر  $0/775$  است. نزدیکی این دو مقدار به خوبی نشان می‌دهد که فرضیات به کار رفته در روابط تحلیلی این مطالعه از اعتبار مناسبی برخوردار است.



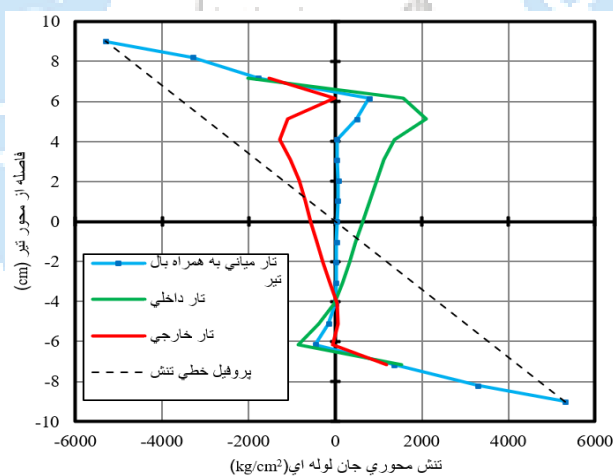
شکل ۱۳: نمودار تغییرات لنگر در محل مفصل پلاستیک در برابر دریافت طبقه.

با استفاده از نتایج حاصل از مدل عددی، در شکل ۱۴ پوش کرنش محوری نرمالیزه شده بال فوقانی تیر در دریافت‌های مختلف طبقه ترسیم شده است. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که کرنش بال تیر در محدوده تضعیف شده تیر از نقاط قبل و بعد خود بزرگ‌تر است که این موضوع فرض ایجاد مفصل پلاستیک در محل دارای جان لوله‌ای را تأیید می‌نماید.



شکل ۱۴: پوش کرنش نرمالیزه شده در محدود تضعیف شده و اطراف آن در ازای دررفت‌های مختلف از طبقه.

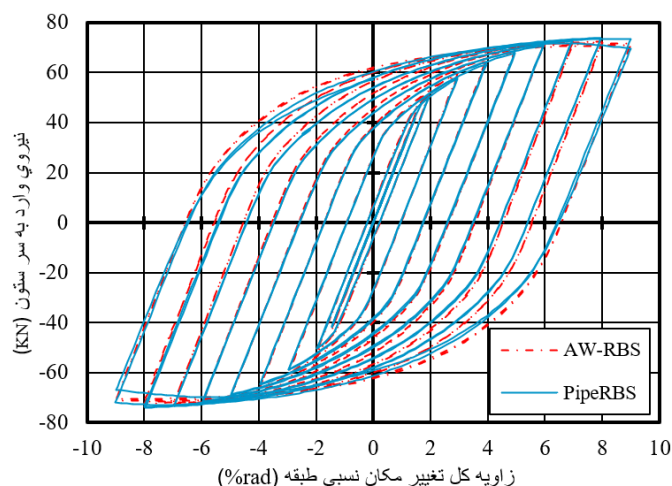
در شکل ۱۵، نمودار تنش محوری جان و بال تیر در ناحیه موج‌دار شده توسط لوله و در ارتفاع تیر، در دررفت ۰/۰۶ رادیان ارائه گردیده است. از مشاهده نتایج این شکل می‌توان نتیجه گرفت که در تار میانی جان موج‌دار تحت لنگر خمشی، هیچ‌گونه تنش محوری ایجاد نمی‌شود اما به دلیل بازشدگی و جمع‌شدگی جان تیر، عملاً تنش‌های کششی و فشاری در وجوه داخلی و خارجی ورق ایجاد می‌شود که مؤید رفتار آکاردئونی جان تیر تحت لنگر خمشی است.



شکل ۱۵: مقایسه تنش در وجوه داخلی و خارجی و تار میانی در ناحیه تضعیف شده با لوله و در دررفت ۰/۰۶ رادیان.

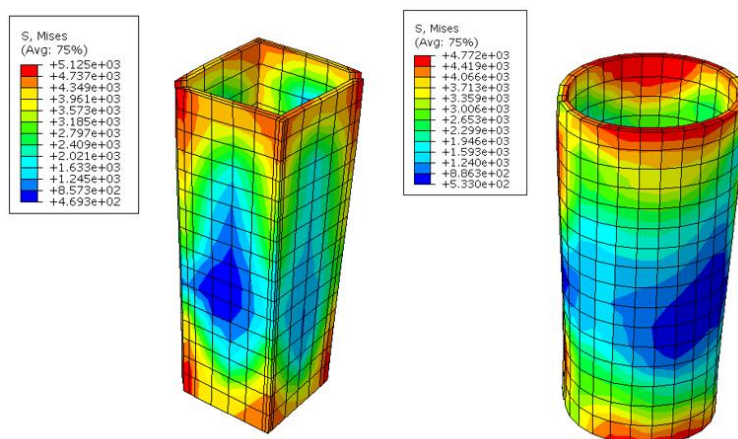
### ۳-۴- مقایسه اتصال RBS با جان لوله‌ای و جان آکاردئونی

در این بخش ابتدا به منظور مقایسه عملکرد لرزه‌ای اتصال RBS با جان لوله‌ای و جان آکاردئونی، در شکل ۱۶ نمودار نیروی وارده بر سر ستون در برابر دررفت طبقه برای هر دو اتصال مزبور تحت بار چرخه‌ای ارائه شده است. گفتنی است که نتایج مربوط به اتصال RBS با جان آکاردئونی در این نمودار، برگرفته از داده‌های ارائه شده در پژوهش میرقادری و همکاران [۲۱] حاصل از بررسی نمونه AW-RBS است. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد، منحنی‌های چرخه‌ای به دست آمده برای هر دو اتصال اختلاف چندانی با یکدیگر نداشته و لذا اتصال پیشنهادی همچون اتصال AW-RBS از عملکرد لرزه‌ای پایدار و قابل اطمینانی برخوردار است. البته در مقادیر بزرگ از دررفت طبقه (بزرگ‌تر از ۰/۰۶ رادیان)، اختلاف اندکی میان رفتار دو اتصال مشاهده می‌شود که در واقع می‌تواند ناشی از افت مقاومت در اتصال AW-RBS به علت رخ دادن پدیده کمانش موضعی باشد.



شکل ۱۶: نمودار چرخه‌های نیروی وارده بر سر ستون در برابر دررفت طبقه برای اتصالات PipeRBS و AW-RBS.

در شکل ۱۷ مقایسه‌ای بین توزیع تنش فون مایز در لوله به کار رفته در اتصال RBS با جان لوله‌ای و نبشی‌های به کار رفته در اتصال RBS با جان آکاردئونی که توسط میرقادی و همکاران [۲۱] مورد بررسی قرار گرفته است، در دررفت ۰/۰۶ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار تنش در گوشه‌های لبه‌های فوقانی و تحتانی نبشی‌ها به مراتب بیشتر از مقدار تنش در لبه‌های لوله است که در واقع ناشی از ایجاد پدیده تمرکز تنش در اتصال RBS با جان آکاردئونی بوده و با مشاهدات آزمایشگاهی مطالعه میرقادی و همکاران [۲۱] بر روی این اتصالات همخوانی دارد.



شکل ۱۷: مقایسه توزیع تنش فون مایز میان پروفیل لوله و قوطی در دررفت ۰/۰۶.

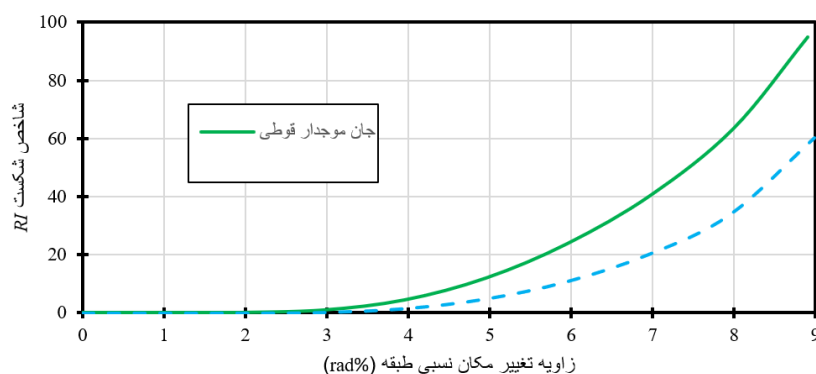
در ادامه پتانسیل شکست در اتصال RBS با جان لوله‌ای و اتصال RBS با جان آکاردئونی مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که میزان پتانسیل شکست شکل‌پذیر در نواحی مختلف یک عضو، به مقدار ماکزیمم شاخص شکست بستگی دارد. شاخص شکست (RI) با استفاده از تنش‌ها و کرنش‌های حاصل از تحلیل سازه تحت بارگذاری یک‌طرفه از طریق رابطه (۱۷) قابل محاسبه است [۴۴].

$$RI = \alpha \frac{PEEQ/\varepsilon_y}{\varepsilon_f} = \frac{PEEQ/\varepsilon_y}{e^{1.5 \frac{p}{q}}} \quad (17)$$

در رابطه فوق،  $\alpha$  مقدار ثابت مصالح، PEEQ برابر با نسبت کرنش پلاستیک معادل به کرنش تسلیم،  $\varepsilon_f$  کرنش شکست شکل‌پذیر و مقادیر  $p$  و  $q$  به ترتیب نماینده تنش هیدرواستاتیک و تنش فون مایز است. از این رو به منظور دستیابی به شاخص شکست RI

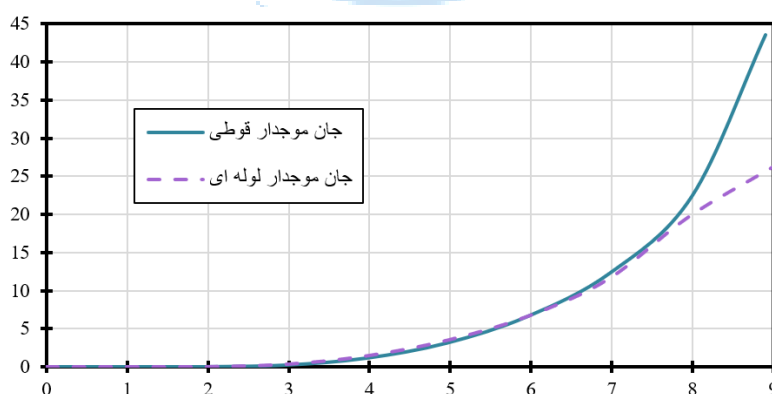
لازم است تا مقادیر کرنش پلاستیک معادل (PEEQ)، تنش هیدرواستاتیک (p) و تنش ون میسر (q) برای نواحی بحرانی از طریق مدل سازی عددی محاسبه شود.

در شکل ۱۸ مقادیر شاخص شکست برای پروفیل قوطی و لوله به کار رفته در جان تیر در وجه فوقانی متصل شده به بال در ازای مقادیر مختلف از دریفیت طبقه نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود اتصال RBS با جان لوله ای RI کمتری در ازای تمام مقادیر دریفیت نسبت به اتصال RBS با جان آکاردئونی با مقطع قوطی شکل دارد که علت آن کمتر بودن کرنش های پلاستیک و در نتیجه کمتر بودن شاخص PEEQ در پروفیل لوله است. کمتر بودن شاخص شکست RI در جان لوله ای نسبت به جان قوطی، نشان دهنده کمتر بودن پتانسیل شکست در اتصال RBS با جان لوله ای نسبت به اتصال RBS با جان آکاردئونی است. همچنین با افزایش مقدار دریفیت طبقه، میزان اختلاف شاخص شکست در جان قوطی نسبت به جان لوله ای افزایش می یابد که این موضوع نشانگر پتانسیل شکست بیش تر در ازای مقادیر بالاتر از دریفیت طبقه است.



شکل ۱۸: مقایسه مقادیر  $RI$  برای پروفیل قوطی و لوله در وجه فوقانی متصل به بال در ازای مقادیر مختلف از دریفیت.

در شکل ۱۹ نیز مقادیر شاخص شکست برای پروفیل قوطی و لوله به کار رفته در جان تیر در عمق جان در ازای مقادیر مختلف از دریفیت طبقه نمایش داده شده است. ملاحظه می شود که RI نظیر جان موجدار قوطی و جان موجدار لوله ای در این ناحیه تا دریفیت ۰/۰۷ رادیان برابر بوده و در نتیجه پتانسیل شکست تا این مقدار از تغییر مکان نسبی در این دو نوع پروفیل تقریباً مساوی است اما با افزایش دریفیت طبقه از ۰/۰۷ رادیان به بالا، مقدار RI در پروفیل قوطی، با شیب بیش تری حرکت کرده و پتانسیل شکست در آن بیش تر می گردد.



شکل ۱۹: مقایسه مقادیر  $RI$  برای پروفیل قوطی و لوله در عمق جان در ازای مقادیر مختلف از دریفیت.

## ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار و عملکرد لرزه‌ای اتصال RBS با جان لوله‌ای به‌طور جامع مورد بررسی قرار گرفت. در گام نخست از این مطالعه، ضمن معرفی ساختار این اتصال، روابط تحلیلی حاکم بر خصوصیات سازه‌ای تیر تضعیف شده با پروفیل لوله ارائه شد و بر روی برخی از متغیرهای اساسی این روابط مطالعه پارامتری انجام گرفت و اثر تغییرات آن‌ها بر عملکرد اتصال مورد بررسی واقع شد. در گام بعد روابطی تحلیلی به‌منظور ارزیابی پایداری تیر تضعیف شده ارائه گشت و سپس بر مبنای همین روابط و با الگوگیری از ضوابط طراحی اتصالات در این‌نامه‌های معتبر بین‌المللی، فرآیند طراحی اتصال RBS با جان لوله‌ای تهیه و تدوین شد. در بخش بعد به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر عملکرد لرزه‌ای اتصال RBS با جان لوله‌ای، بخشی از یک قاب خمشی متشکل از یک ستون و دو تیر متصل به آن، به روش المان محدود آنالیز شد. نتایج حاصل شده به‌طور خلاصه به شرح ذیل می‌باشد:

- (۱) در اثر استفاده از لوله در جان تیر، به علت رفتار آکاردئونی ورق جان، مفصل پلاستیک از محدوده اتصال تیر به ستون به محل به‌کارگیری لوله در جان منتقل می‌گردد
- (۲) اتصال پیشنهادی شرایط لازم را جهت به‌کارگیری در قاب‌های خمشی ویژه بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌های AISC1997 و FEMA350 داراست.
- (۳) با توجه به داده‌های حاصل از مدل‌سازی عددی انجام شده و نتایج مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام گرفته بر روی اتصال RBS با جان آکاردئونی (قوطی شکل)، بر اساس شاخص شکست مشاهده شد که پروفیل لوله به‌کار رفته در جان تیر تضعیف شده پتانسیل شکست کمتری را در نواحی مختلف خود نسبت به پروفیل قوطی، خصوصاً در مقادیر دررفت بالا، تجربه می‌کند و از این رو پایداری اتصال RBS با جان لوله‌ای از اتصال RBS با جان آکاردئونی در برابر بارهای جانبی همچون بار لرزه‌ای، بیشتر است که علت آن ناشی از شکل‌گیری پدیده تمرکز تنش در مقطع قوطی شکل است.
- (۴) علیرغم مطالعه جامعی که در این پژوهش بر روی رفتار لرزه‌ای اتصال RBS با جان لوله‌ای و اثرات ناشی از استفاده آن بر عملکرد قاب خمشی انجام گرفت، با این حال هنوز هم خلاءهای مهمی در این حوزه یافت می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به بررسی اثر حضور دال طبقه بر رفتار و عملکرد اتصالات RBS اشاره کرد که لازم است در پژوهش‌های آتی مورد مطالعه قرار گیرد.

## مراجع

- [1] Venture, S. J. (2000). State of the art report on systems performance of steel moment frames subject to earthquake ground shaking. FEMA 355C
- [2] Mansouri, I., Rafiei, J. (2017). The Effect of Reduced Section of RBS Connection on the Intact Section. Modares Civil Engineering journal, 16(20), 53-64.
- [3] Plumier, A. (1997). The dogbone-Back to the future. AISC Engineering Journal, 34(2), 61-67
- [4] Engelhardt, M. D. (1999). Experimental Investigation of dogbone moment connections. Engineering Journal, 35(4), 128-139
- [5] Moore, K. S., Malley, J. O., & Engelhardt, M. D. (1999). Design of reduced beam section (RBS) moment frame connections. Los Angeles: Steel Committee of California.

- [6] Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2000). FEMA 355D State of the Art Report on Connection Performance FEMA.
- [7] Shen, J., Kitjasateanphun, T., & Srivanich, W. (2000). Seismic performance of steel moment frames with reduced beam sections. *Engineering Structures*, 22(8), 968-983
- [8] Kitjasateanphun, T., Shen, J., Srivanich, W., & Hao, H. (2001). Inelastic analysis of steel frames with reduced beam sections. *The Structural Design of Tall Buildings*, 10(4), 231-244..
- [9] Iwankiw, N. (2004). Seismic design enhancements and the reduced beam section detail for steel moment frames. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 9(2), 87-92.
- [10] Jin, J., & El-Tawil, S. (2005). Seismic performance of steel frames with reduced beam section connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 61(4), 453-471.
- [11] Kim, K. D., & Engelhardt, M. D. (2007). Nonprismatic beam element for beams with RBS connections in steel moment frames. *Journal of Structural Engineering*, 133(2), 176-184.
- [12] Pachoumis, D. T., Galoussis, E. G., Kalfas, C. N., & Christitsas, A. D. (2009). Reduced beam section moment connections subjected to cyclic loading: Experimental analysis and FEM simulation. *Engineering Structures*, 31(1), 216-223.
- [13] Saleh, A., Mirghaderi, S. R., & Zahrai, S. M. (2016). Cyclic testing of tubular web RBS connections in deep beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 117, 214-226.
- [14] Wilkinson, S., Hurdman, G., & Crowther, A. (2006). A moment resisting connection for earthquake resistant structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(3), 295-302.
- [15] Venture, S. J., & Guidelines Development Committee. (2000). Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings (Vol. 350). Washington, DC, USA: Federal Emergency Management Agency.
- [16] Grigorian, C. E., Yang, T. S., & Popov, E. P. (1993). Slotted bolted connection energy dissipators. *Earthquake Spectra*, 9(3), 491-504.
- [17] Sobhan, M. S. (2006). On the application of the steel corrugated sheets for the improving the seismic behavior of the structures, M.Sc. Thesis, Tehran university.
- [18] Mirghaderi, S. R., Sobhan, M. S. (2008). Introduction and study of seismic performance of thin-walled hollow steel column fabricated of corrugated plates. *University College of Engineering*, 42(4).
- [19] Mirghaderi, R., Sobhan, S., & Torabian, S. (2008). Reducing beam section by corrugated webs for developing a connection of specially moment resisting frame. In *Structures Congress 2008: Crossing Borders* (pp. 1-10).

- [20] Mirghaderi, S. R., Torabian, S., & Imanpour, A. (2009). Experimental and numerical investigation of a new reduced beam section moment connection. In *Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas* (pp. 897-902). CRC Press.
- [21] Mirghaderi, S. R., Torabian, S., & Imanpour, A. (2010). Seismic performance of the Accordion-Web RBS connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 66(2), 277-288.
- [22] Saleh, A., Mirghaderi, S. R., & Zahrai, S. M. (2016). Cyclic testing of tubular web RBS connections in deep beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 117, 214-226.
- [23] Saleh, A., Zahrai, S. M., & Mirghaderi, S. R. (2016). Experimental study on innovative tubular web RBS connections in steel MRFs with typical shallow beams. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 57(5), 785-808.
- [24] Zahrai, S. M., Mirghader, S. R., & Saleh, A. (2017). Tubular web RBS connection to improve seismic behavior of moment resisting steel frames. *Scientia Iranica*, 24(6), 2726-2740.
- [25] Zahrai, S. M., Mirghaderi, S. R., & Saleh, A. (2017). Tubular Web Reduced Beam Section (TW-RBS) connection, a numerical and experimental study and result comparison. *Steel and Composite Structures*, 23(5), 571-583.
- [26] Zahrai, S. M., Mirghaderi, S. R., & Saleh, A. (2017). Increasing plastic hinge length using two pipes in a proposed web reduced beam section, an experimental and numerical study. *Steel and Composite Structures*, 23(4), 421-433.
- [27] Imanpour, A., Torabian, S., & Mirghaderi, S. R. (2019). Seismic design of the double-cell accordion-web reduced beam section connection. *Engineering Structures*, 191, 23-38.
- [28] Mansouri, A., Shakiba, M. R., & Fereshtehpour, E. (2021). Two novel corrugated web reduced beam section connections for steel moment frames. *Journal of Building Engineering*, 43, 103187.
- [29] Elgaaly, M., & Dagher, H. (1990). Beams and girders with corrugated webs. *Proceedings, SSRC Annual Technical Session, Bethlehem, PA*, 37-53.
- [30] Hamilton, R. W. (1993). Behavior of welded girders with corrugated webs. Ph.D. thesis The University of Maine., USA.
- [31] Elgaaly, M., Hamilton, R. W., & Seshadri, A. (1996). Shear strength of beams with corrugated webs. *Journal of Structural Engineering*, 122(4), 390-398.

- [32] Luo, R., & Edlund, B. (1996). Shear capacity of plate girders with trapezoidally corrugated webs. *Thin-walled structures*, 26(1), 19-44.
- [33] Elgaaly, M., Seshadri, A., & Hamilton, R. W. (1997). Bending strength of steel beams with corrugated webs. *Journal of Structural Engineering*, 123(6), 772-782.
- [34] Elgaaly, M., & Seshadri, A. (1997). Girders with corrugated webs under partial compressive edge loading. *Journal of Structural Engineering*, 123(6), 783-791.
- [35] Chan, C. L., Khalid, Y. A., Sahari, B. B., & Hamouda, A. M. S. (2002). Finite element analysis of corrugated web beams under bending. *Journal of constructional steel research*, 58(11), 1391-1406.
- [36] Khalid, Y. A., Chan, C. L., Sahari, B. B., & Hamouda, A. M. S. (2004). Bending behaviour of corrugated web beams. *Journal of materials processing technology*, 150(3), 242-254.
- [37] Ibrahim, S. A., El-Dakhkhni, W. W., & Elgaaly, M. (2006). Behavior of bridge girders with corrugated webs under monotonic and cyclic loading. *Engineering Structures*, 28(14), 1941-1955.
- [38] Mirghaderi, R., & Torabian, S. (2006). Behavior and application of corrugated steel plate shear walls. *Journal of faculty of engineering*.
- [39] Eldib, M. H. (2009). Shear buckling strength and design of curved corrugated steel webs for bridges. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(12), 2129-2139.
- [40] El Metwally, A. S. (1998). Prestressed composite girders with corrugated steel webs. University of Calgary.
- [41] Ekhveh, E. (2015). Numerical evaluation of the seismic behavior of the tubular RBS connection. M.Sc. Thesis. Tehran University.
- [42] American Institute of Steel Construction. (1997). Seismic provisions for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction.
- [43] Venture, S. J., & Guidelines Development Committee. (2000). Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings (Vol. 350). Washington, DC, USA: Federal Emergency Management Agency.
- [44] Ricles, J. M., Zhang, X., Lu, L. W., & Fisher, J. (2004). Development of seismic guidelines for deep-column steel moment connections. Rep. No. 04, 13.
- [45] Chambers, J. J., Almudhafar, S., & Stenger, F. (2003). Effect of reduced beam section frame elements on stiffness of moment frames. *Journal of Structural Engineering*, 129(3), 383-393.