



مطالعه تحلیلی کاربرد جان لوله‌ای برای کاهش مقاومت خمشی مقطع در ناحیه پلاستیک تیر در قاب خمشی فولادی

سید مهدی زهرائی^۱، ابوذری صالح^۲، سید رسول میرقادر^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۷/۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱)

چکیده

از ویژگی‌های مهم قاب‌های خمشی، رفتار شکل پذیر و قابلیت جذب و استهلاک انرژی القایی، ناشی از زلزله است. زلزله‌های نرتریج (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵) نگرانی‌هایی را بابت روش و جزئیات طراحی در اتصالات بر اساس گسیختگی ترد غیر قابل انتظار در اتصالات تیر به ستون سیستم قاب خمشی فولادی فراهم نمود، به طوریکه ایجاد شکل پذیری و توانایی مقاومت در برابر تغییرشکل‌های بزرگ چرخه‌ای پلاستیک مورد اهمیت قرار گرفت و استانداردهای طراحی با فرض ایجاد ناحیه مستهلک کننده انرژی، بر روی تیر و در نزدیکی محل اتصال تیر به ستون همراه گردید. بر همین اساس در طرح حاضر اتصال نوین خمشی تیر به ستون با مقطع کاهش ظرفیت خمشی یافته توسط جان آکاردئونی لوله‌ای شکل (TW-RBS: Tubular Web RBS connection) که با جایگزینی یک لوله در جان تیر در محل مورد نظر جهت مفصل پلاستیک بدست می‌آید، مورد مطالعه تحلیلی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مقطع تضعیف شده با جان آکاردئونی لوله‌ای شکل، با حذف جان تیر در مقاومت خمشی مقطع، منجر به ایجاد فیوز شکل پذیر دور از اجزاء اتصال تیر به ستون می‌گردد. میزان کاهش ظرفیت خمشی تیر در محل مفصل پلاستیک بر اساس مشخصات ابعادی تیر و لوله مصرفی قابل محاسبه است طوریکه سهم باقیمانده جان لوله ای در مقاومت خمشی مقطع با توان دو ضخامت لوله رابطه مستقیم و با ضخامت جان صاف تیر و همچنین قطر لوله رابطه معکوس خواهد داشت. تعیین محل بهینه قرارگیری جان لوله ای نیز با توجه به طول تیر و نسبت مدول پلاستیک تیر در محل مفصل پلاستیک به مقطع کل قابل ارزیابی است. همچنین نحوه کنترل برش در جان لوله‌ای با توجه به کماتش‌های موضعی و کلی حاصل از برش از دیگر نکات مورد طرح است. نتایج نشان داد که بکارگیری لوله در جان تیر، کاهش سختی خمشی مقطع در محل مفصل پلاستیک را در حدود ۱۴ الی ۱۹٪ درصد به همراه دارد که این میزان کاهش در سختی خمشی با اتصال RBS با ۲۰٪ کاهش عرض بال برابری می‌نماید. همچنین این اتصال برحسب عمق تیر مصرفی منجر به کاهش مقاومت خمشی مقطع در محل مفصل پلاستیک بین ۲۲ تا ۲۸٪ می‌گردد که بین نتایج حاصل از اتصال RBS با ۲۰٪ و ۵۰٪ کاهش عرض بال است.

کلمات کلیدی

اتصال گیردار، قاب خمشی فولادی، تیر با مقطع کاهش یافته، جان لوله‌ای شکل، بررسی تحلیلی

Analytical Study of Using Pipe Web to Reduce Flexural Strength at Beam Plastic Zone of Steel Moment Resisting Frames

S.M. Zahrai, A. Saleh, S. R. Mirghaderi

ABSTRACT

Unexpected brittle failures in steel rigid frame connections by concentrated tensions on the welded area and connection vulnerability in high ductility demands as occurred during the Northridge (1994) and Kobe (1995), have challenged ductility properties and ability to absorb seismic energy in this type of structural system. So in designing this type of structural system, creating ductility and ability to withstand cyclic large deformations is important. On this basis, in the present study a new beam-to-column moment connection with reduced beam section using Tubular Accordion Web called TAW-RBS is analytically studied. The results show that TAW-RBS creates a ductile fuse away from beam-to-column connection components, through removing web from beam flexural capacity. Reduction of beam flexural strength in the plastic hinge is calculated based on the dimensions of beam and tube. So bending strength of the remaining tubular web would be proportional to squared amount of the thickness of tube and inversely related to the thickness of flat web and the diameter of tube. The optimal location of the tubular web is determined due to the length of beam and the plastic modulus ratio at the plastic hinge to the total cross section. Also shear control at tubular web according to local and global shear buckling are other points discussed in this study. The results show that TAW-RBS reduces flexural stiffness about 14 to 19% in the plastic hinge locations that is equal with the RBS20%. Also the proposed connection, depending on the size of the beam, reduces bending strength between 22 to 28% in the plastic hinge location that is intermediate between RBS20% and RBS50%.

KEYWORDS

Rigid connection, Steel moment frames, Reduced beam section, Tubular Web section, Analytical study

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، Mzahrai@ut.ac.ir

۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد تفرش، Aboozar.Saleh@ut.ac.ir (نویسنده مسئول)

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، Rmirghaderi@ut.ac.ir



مستند سازی شده بودند را ارائه کرده است. در این زمینه تحقیقات گسترده‌ای در داخل و خارج کشور تا کنون صورت گرفته است که اتصال RBS را به عنوان یک اتصال شناخته شده متداول نموده است. Pachoumis و همکارانش [۱] رفتار چرخه ای اتصالات خمشی فولادی از نوع RBS را بصورت آزمایش و شبیه سازی با اجزا محدود، مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که جهت استفاده از اتصال RBS، در پروفیل‌های اروپایی نیاز به تغییر پارامترهای هندسی مقطع RBS است. Jones و همکارانش [۲] با انجام ۸ تست آزمایشگاهی، اثرات رفتار ناحیه چشمه اتصال، وجود دال بتنی و همچنین اثر مربوط به نوع اتصال جان را بررسی نمودند. این تحقیق نشان داد که وجود دال بتنی و افزایش کرنش‌های بال تحتانی تیر با مقطع کاهش یافته، موجب افزایش حساسیت بال تحتانی به کمناش جانبی و سایر مودهای زوال حساس به کرنش می‌گردد. Chao و Chen [۳] در تحقیقاتی اثرات وجود دال بتنی در اتصال خمشی با مقطع کاهش یافته را بررسی کردند. این بررسی نشان می‌دهد که نسبت ظرفیت لنگر مثبت به لنگر منفی در اثر حضور دال می‌تواند به ۱/۱۸ برسد. زوال‌های مشاهده شده در هر ۴ مورد آزمایش، در محل بال یا جوش بال تحتانی بودند. Jay Shen و همکارانش [۴] در تحقیقی با رویکرد عددی و با استفاده از نرم افزار ABAQUS به بررسی اتصال تیر با مقطع کاهش یافته به ستون عمیق پرداخته و اثرات وجود دال را نیز بررسی کرده‌اند. Zhang و Ricles [۵] در تحقیقی آزمایشگاهی بر روی ۶ نمونه تمام مقیاس صلیبی، ابعاد مختلف رفتاری اتصال شامل نوع اتصال تیر به ستون، مقطع ستون، اثر دال کف، مقاومت ناحیه چشمه اتصال و لاغری جان را مورد بررسی قرار داده‌اند. این بررسی‌ها نشان داد که کف مرکب بتنی بال فوقانی تیر را مقید نموده و موجب افزایش بار نهایی ایجاد شده در مفصل پلاستیک می‌شود که در روش‌های طراحی لحاظ نمی‌گردند. Ricles و همکارانش [۶] در یک گزارش تحقیقاتی تحلیلی-آزمایشگاهی، نشان دادند که در اتصالات RBS، چشمه

تجربیات صورت گرفته طی زلزله‌های تاثیر گذاری مانند زلزله نرثریج و کوبه باعث شد که بحث رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی مورد چالش جدی در سطح بین المللی قرار گیرد. ایجاد تنش‌های بزرگ متمرکز در نواحی جوشی بال و جان اتصال و آسیب پذیری اتصال در تقاضاهای شکل پذیری زیاد به عنوان دو عامل بحرانی خرابی مطرح گردید. یک راه طبیعی برای حل این موضوع، کاهش تقاضای شکل پذیری و تمرکز تنش در این نواحی اتصال می‌باشد. بدین ترتیب روش‌ها و ایده‌های متفاوتی برای کاهش تقاضا در محل اتصال تیر به ستون ارائه گردید که یک راهبرد اساسی آن تضعیف عمدی مقطع تیر متصل به ستون می‌باشد که با این روش، مفصل پلاستیک در مقطع تضعیف شده تشکیل و این کاهش موضعی باعث می‌گردد که تقاضای وارده بر روی اجزاء اتصال شامل ناحیه چشمه اتصال، ورق‌های پیوستگی و همچنین جوش‌های اتصال تیر به ستون کاهش یافته و در پی آن احتمال آسیب پذیری اجزاء اتصال و جوش‌های نفوذی نیز کاهش پیدا کند.

مطالعات صورت گرفته در خصوص تضعیف عمدی مقطع تیر را می‌توان به صورت زیر دسته بندی نمود:

۱- اتصالات RBS: ایده اتصال RBS یا به اصطلاح اتصال استخوان سگ، توسط یک شرکت اروپایی بنام Arbed در سال ۱۹۹۲ در آمریکا به ثبت رسید. انواع مختلفی از شکل هندسی ناحیه کاهش یافته در بال تیر، در این اتصال مورد بررسی و استفاده قرار گرفته است. در مطالعات اولیه مربوط به اتصال RBS، از برش ثابت یا دوزنقه‌ای استفاده گردید. نوع دیگری از برش بال که در آن انطباق مناسب‌تری میان نمودار لنگر تیر و مقاومت آن وجود دارد نیز تحت عنوان برش باریک شونده یا کاهشی ارائه شده است. علاوه بر این برش دایره‌ای در محل کاهش مقطع تیر نیز از مجموعه برش‌های رایج در اتصالات RBS محسوب می‌گردد. کمپته SAC (۲۰۰۰) نتایج مربوط به ۴۵ آزمایش بر روی اتصال RBS را که بعد از زلزله نرثریج بین سال‌های ۱۹۹۶ تا ۱۹۹۸ انجام شده و به خوبی



ایجاد حفره دایره‌ای شکل در مقطع جان را مورد بررسی قرار دادند و ضمن بررسی مدل عددی یک تیر ورق با فواصل مختلف بارگذاری ۲،۳،۴ و ۵ متری و با شعاع سوراخ دایره‌ای متفاوت، به بررسی آزمایشگاهی یک مدل دو طبقه با مقیاس کامل نیز پرداختند.

۳- اتصالات با جان آکاردئونی: Mirghaderi و همکارانش [۱۴] در مطالعه‌ای، اتصال خمشی تیر با مقطع کاهش یافته توسط جان موج دار با رویکرد آزمایشگاهی و تحلیلی مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه دو ورق L شکل بصورت متقارن نسبت به صفحه جان به عنوان ورق موج‌دار در نظر گرفته شده است که به جای جان حذف شده در اتصال اجرا می‌گردند. مقطع ایجاد شده Accordion Web RBS (AW-RBS) نامگذاری گردیده است. نتایج نمودار چرخه‌ای این اتصال بدون مشاهده کاهش مقاومت تا تغییر مکان نسبی ۸٪ ستون همراه بوده است.

۴- کاهش در ارتفاع جان تیر: سین Wilkinson و همکارانش [۱۵] در مطالعه‌ای به بررسی یک دیتیل جدید که با کاهش ارتفاع جان در نزدیکی محل اتصال تیر به ستون بدست آمده است، پرداخته‌اند. نتایج آزمایشگاهی ظرفیت چرخش پلاستیک بیش از ۵٪ را تأیید نمود.

در این مقاله، اتصال نوین تیر به ستون در قاب خمشی فولادی با مقطع کاهش یافته توسط جان آکاردئونی لوله‌ای شکل، مورد مطالعه تحلیلی قرار می‌گیرد. برای انجام مطالعه حاضر، ضمن بررسی ساز و کار رفتار تیر با جان آکاردئونی لوله‌ای شکل از نظر سختی و مقاومت برشی و خمشی اتصال به بررسی مکانیزم‌ها و عملکردهای سازه‌ای اتصال به صورت تحلیلی پرداخته می‌شود.

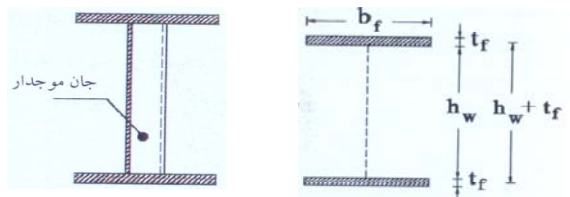
۲- بیان چگونگی رفتار تیرهای با جان موج‌دار

رفتار خمشی تیرهای با جان موج‌دار، تفاوت قابل ملاحظه‌ای با رفتار خمشی تیرهای با جان صاف دارد. این اختلاف رفتاری، از تفاوت ماهیت میان ورق صاف و ورق موج‌دار ناشی می‌شود. ورق صاف در حالت تنش مسطح

اتصال نقش مهمی در رفتار اتصال خواهد داشت و استفاده از چشمه اتصال متعادل در خصوص ارائه نمودند. Roeder [۷] با جمع بندی مطالعات کمیته SAC بر روی اتصال خمشی با مقطع تیر کاهش یافته، بیان نمود که گسترش تغییر شکل برشی ناحیه چشمه اتصال در اتصال RBS هم می‌تواند موجب افزایش تقاضای شکل پذیری بر روی جوش اتصال بال ستون و سوراخ دسترسی جوش گردد. Lee و همکارانش [۸] با انجام ۸ آزمایش تمام مقیاس، نشان دادند که چشمه اتصال قوی موجب می‌گردد که کل اتلاف انرژی در ناحیه کاهش یافته انجام گردد و بنابراین، این ناحیه دچار کمانش‌های موضعی و کمانش جانبی پیچشی قابل ملاحظه‌ای می‌شود که منجر به پیچش ستون خواهد شد و اتصال را از تامین شکل پذیری مورد نیاز باز می‌دارد. Moslehi Tabar و Deylami [۱۰] به بررسی عددی ناپایداری اتصال تیر RBS با تاکید بر اثر شکل پذیری پانل برشی ستون پرداخته‌اند. نتایج نشان داد صلب شدن پانل برشی، نه تنها پانل برشی را در محدوده الاستیک نگاه می‌دارد بلکه باعث ایجاد ناپایداری در رفتار چرخه ای تیر می‌گردد. Han و Moon [۱۰] توصیه نمودند که در نسبت دهانه به عمق کمتر از ۱۰ و همچنین در حالتی که مقاومت خمشی حاصل از بال‌های تیر از ۷۰ درصد کل مقاومت خمشی تیر کمتر است، از اتصال پیچی جان استفاده نگردد.

۲- اتصال با کاهش مقطع در جان تیر: در نشریه FEMA-350 [۱۱] نوع جدیدی از اتصال کاهش یافته مطرح شد که در آن کاهش تقاضای وجه ستون از طریق ایجاد سوراخ‌های دایره‌ای بزرگی در جان تیر و در نزدیکی اتصال فراهم می‌گردد. سائز سوراخ به اندازه‌ای است که جاری شدگی جان در طول دهانه اتفاق می‌افتد و ناحیه اتصال در محدوده ارتجاعی باقی می‌ماند. Prasad Rao و Satish Kumar [۱۲] به بررسی یک اتصال با جان برش خورده با عنوان Rectangular Hollow Sections (RHS) پرداخته‌اند. در این بررسی از اتصال تیر ناودانی به ستون ناودانی استفاده شده است. Yang و Yang [۱۳] طرح

در مقابل تنش‌های درون صفحه‌ای از نظر رفتاری ایزوتروپیک است و سختی درون صفحه‌ای در جهت x و y با یکدیگر برابر خواهند بود. در صورتیکه، در یک ورق موج‌دار سختی درون صفحه‌ای در جهت x و y از اختلاف زیادی برخوردار است (شکل (۱)).



شکل (۲): مشخصات تیر با جان موج‌دار

۳- ارزیابی ساز و کار جان آکاردئونی لوله‌ای

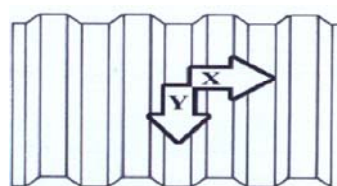
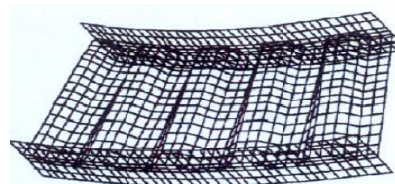
۳-۱- سختی جان آکاردئونی لوله‌ای

در صورتیکه یک نوار استوانه‌ای به موازات بال‌های تیر با عمق واحد از جان لوله‌ای در نظر گرفته شود، این نوار استوانه‌ای را می‌توان تحت اثر نیروی P و در پی آن تغییر مکان Δ در جهت نیرو، فرض نمود. با توجه به تقارن می‌توان از ربع دایره جهت زیر سازه کل دایره استفاده نمود (شکل (۳)). با روش سازگاری تغییر شکل برای ربع دایره مفروض نشان داده شده و با در نظر گرفتن یک لنگر واحد در یک تکیه گاه و استفاده از روابط سازگاری، میزان لنگر برای تکیه گاه ابتدائی $(PD)/(2\pi)$ و برای تکیه گاه میانی برابر $(PD)/2 - (PD)/(2\pi)$ محاسبه می‌گردد. با مساوی قراردادن کار نیروهای خارجی با انرژی کرنشی کل تحت نیروی وارد شده، مقدار تغییر مکان از روابط زیر قابل محاسبه است.

$$W_{ext} = U_{elastic} \quad (2)$$

$$W_{ext} = \frac{1}{2} P \Delta \quad (3)$$

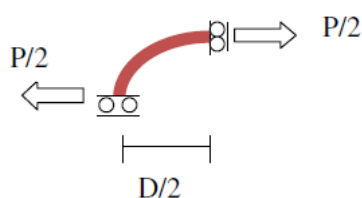
$$U_{elastic} = 4 \left[\int \frac{M^2(s)}{2EI_c} ds + \int \frac{N^2(s)}{2EA_c} ds + \int 1.2 \frac{V^2(s)}{2GA_c} ds \right] \quad (4)$$



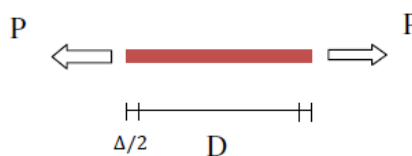
شکل (۱): ورق موج‌دار

در جهت x به سبب تبدیل رفتار درون صفحه‌ای به رفتار برون صفحه‌ای، سختی به شدت کاهش می‌یابد. این سختی اندک در ورق‌های موج‌دار موجب ایجاد تغییر شکلی تحت اثر بار می‌شود که به جمع و باز شدن آکاردئون شبیه است. از این نظر به این رفتار، رفتار آکاردئون گفته می‌شود. لذا در صورت استفاده از جان آکاردئونی در تیر، با توجه به عدم ایجاد کرنش در جان و در نتیجه مشارکت اندک جان موج‌دار در خمش، ظرفیت نهایی باربری خمشی تیر می‌تواند فقط بر اساس ظرفیت جاری شدن بال‌های تیر تعیین گردد و از اثر جان صرف‌نظر گردد. در این حالت برش بطور عمده توسط جان موج‌دار تحمل می‌گردد. تحقیقات نشان داده‌اند که، هیچ گونه اندرکنشی بین رفتار خمشی و رفتار برشی تیرهای با جان موج‌دار وجود ندارد [۱۶ و ۱۷] لذا برای مقاصد طراحی لنگر پلاستیک تیر با جان موج‌دار از رابطه (۱) استفاده می‌شود:

$$M_p = (b_f t_f F_y)(h_w + t_f) \quad (1)$$



(ب) ربع دایره جهت مدل لوله



الف) ورق مستقیم

شکل (۳): معرفی پارامترها و شرایط مرزی

بنابر این سختی ورق آکاردئونی جان لوله‌ای به ترتیب زیر بدست خواهد آمد:

$$K_{corr} = \frac{P}{\Delta} = \frac{1}{\frac{(3\pi - 24/\pi)r^3}{Et_c^3} + \frac{r\pi}{4Et_c} + \frac{0.78r\pi}{Et_c}} \quad (10)$$

که با ساده سازی و قرار دادن $r=D/2$ خواهیم داشت:

$$K_{corr} = \frac{Et_c^3}{\left(\frac{3}{8}\pi - \frac{3}{\pi}\right)D^3 + \left(\frac{\pi}{8} + 0.39\pi\right)Dt_c^2} \quad (11)$$

$$= \frac{Et_c^3}{0.223D^3 + 1.618Dt_c^2}$$

به منظور مقایسه سختی محوری ورق آکاردئونی جان لوله ای با ورق صاف، مشابه آنچه که در ورق آکاردئونی عمل گردید نواری تخت از ورق صاف جان به ارتفاع واحد، طولی مساوی قطر لوله و ضخامت t_f در نظر گرفته می‌شود. سختی محوری نوار انتخابی با در نظر گرفتن نیروی مساوی P در دو انتهای نوار به صورت زیر بدست می‌آید.

$$K_{flat} = \frac{P}{\Delta} = \frac{EA_f}{L_f} = \frac{Et_f}{D} \quad (12)$$

برای مقایسه سختی جان لوله‌ای و جان صاف، ضریبی تحت عنوان ضریب کاهش سختی (SRF) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SRF = 1 - \frac{K_{corr}}{K_{flat}} \quad (13)$$

$$= 1 - \frac{(t_c/t_f)^3}{0.223(D/t_f)^2 + 1.618(t_c/t_f)^2}$$

در رابطه (۴)، ترم اول مربوط به انرژی کرنشی خمشی، ترم دوم مربوط به انرژی کرنشی محوری و ترم آخر نیز مربوط به انرژی کرنشی برشی می‌باشد. با توجه به اینکه قطعه در نظر گرفته شده یک چهارم کل دایره است، مقدار انرژی حاصله در عدد ۴ ضرب شده است. همچنین در اینجا به دلیل انتخاب نواری واحد از لوله، $A_c=t_c$ و $I_c = t_c^3/12$ به ترتیب سطح مقطع و ممان اینرسی ورق جان به ارتفاع واحد، E مدول الاستیسته و t_c ضخامت ورق آکاردئونی جان لوله‌ای است. به منظور محاسبه انرژی کرنشی، مقدار لنگر، نیروی محوری و برشی در طول نوار انتخابی باید تعیین گردند که مقادیر آنها با در نظر گرفتن تعادل در روابط زیر ارائه شده است.

$$ds = r d\theta \quad (5)$$

$$M(s) = \frac{Pr \sin \theta}{2} - \frac{Pr}{\pi} \quad (6)$$

$$N(s) = \frac{P \sin \theta}{2} \quad (7)$$

$$V(s) = \frac{P \cos \theta}{2} \quad (8)$$

با مساوی قراردادن رابطه (۳) و (۴) خواهیم داشت:

$$\frac{1}{2} P \Delta = 4 \left[\int \frac{\left(\frac{Pr \sin \theta}{2} - \frac{Pr}{\pi}\right)^2}{2E \frac{t_c^3}{12}} r d\theta \right. \quad (9)$$

$$\left. + \int \frac{\left(\frac{P \sin \theta}{2}\right)^2}{2Et_c} r d\theta + \int 1.2 \frac{\left(\frac{P \cos \theta}{2}\right)^2}{\frac{E}{2.6} t_c} r d\theta \right]$$

واحد در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل (۵)، شرایط نهایی نوار استوانه‌ای تحت اثر نیروی P ، تشکیل چهار مفصل در نقاط انتهایی و نقاط وسطی مقطع دایره‌ای می‌باشد. با توجه به برقراری تقارن می‌توان یک چهارم آن را در نظر گرفت و دیاگرام آزاد نیروها را رسم نمود.

بر این اساس و با نوشتن معادله تعادل لنگر حول یکی از مفاصل پلاستیک، می‌توان نیروی P_{corr} را به ترتیب زیر بدست آورد.

$$P_{corr} = \frac{8M_{pc}}{D} = \frac{8 \frac{t_c^2}{4} F_y}{D} = \frac{2t_c^2 F_y}{D} \quad (14)$$

برای جان ورق صاف نیز با توجه به در نظر گرفتن ارتفاع واحد و برابری $A_f = t_f$ داریم:

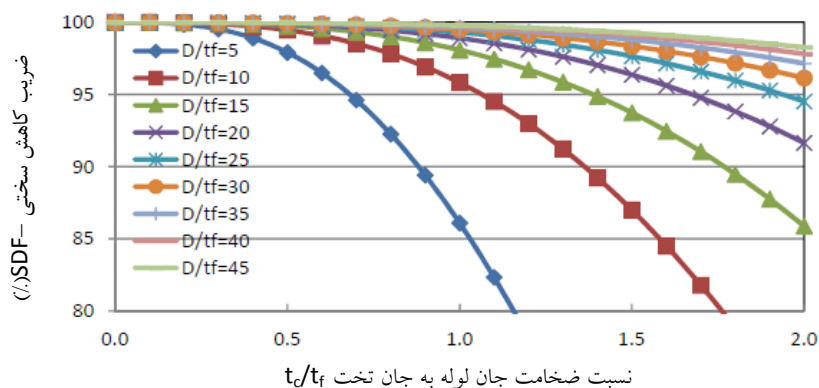
$$P_{falt} = A_f F_y = t_f F_y \quad (15)$$

بر اساس رابطه (۱۳) ضریب SRF، تابع نسبت قطر لوله به ضخامت جان ورق صاف و نسبت ضخامت لوله به ضخامت جان ورق صاف می‌باشد. با توجه به این رابطه تغییرات SRF، بر اساس تغییر پارامترهای تاثیر گذار قابل

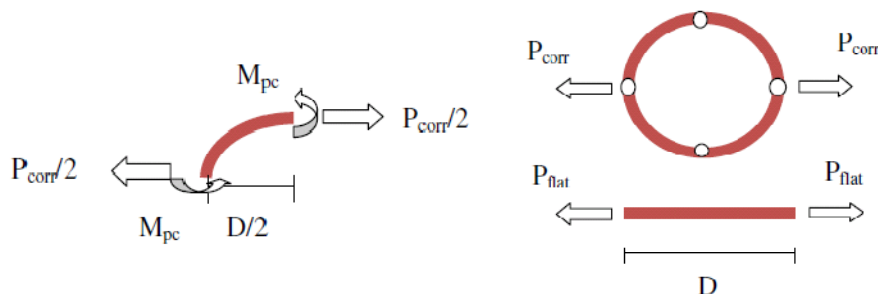
بررسی می‌باشد. در شکل (۴) مقدار SRF برای مقادیر مختلف D/t_f و t_c/t_f نمایش داده شده است. مقدار SRF با افزایش نسبت t_c/t_f کاهش و با افزایش نسبت D/t_f افزایش می‌یابد. بنابراین با انتخاب مقادیر تاثیر گذار می‌توان به SRF مناسب رسید.

۳-۲- مقاومت جان آکاردئونی لوله‌ای

با اتخاذ روشی مشابه با آنچه در مورد محاسبه سختی ناحیه جان لوله‌ای انجام شد، برای ارزیابی مقاومت محوری جان لوله‌ای در ناحیه کاهش یافته و مقایسه آن با مقاومت محوری جان صاف معادل، یک نوار استوانه‌ای با عمق



شکل (۴): مقدار SRF برای مقادیر مختلف D/t_f و t_c/t_f



شکل (۵): دیاگرام نیروی آزاد برای نوار استوانه‌ای و نوار صاف به عمق واحد

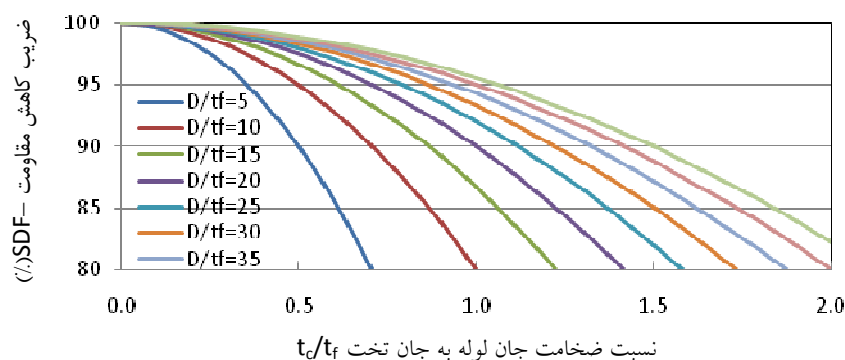
برای ارزیابی تاثیر خاصیت آکاردئونی جان لوله‌ای بر روی مقاومت و مقایسه مقاومت جان لوله‌ای به جان صاف، ضریب کاهش مقاومت را می‌توان به ترتیب زیر محاسبه نمود:

مقدار SDF با افزایش t_c/t_f و D/t_f کاهش داده شده است. مقدار SDF با افزایش نسبت t_c/t_f کاهش و با افزایش نسبت D/t_f افزایش می‌یابد. بنابراین با انتخاب مقادیر تاثیر گذار می‌توان به SDF مناسب رسید.

مقایسه شکل (۴) و (۶) نشان می‌دهد که در مقادیر مساوی نسبت جان لوله به جان ورق صاف و نسبت قطر لوله به قطر ورق صاف، مقدار کاهش در مقاومت محوری جان (SDF) از مقدار کاهش در سختی محوری جان (SRF) کمتر است و سختی جان سریع‌تر از مقاومت آن افت می‌نماید. لازم به ذکر است که این نتیجه گیری فقط در مورد سهم جان در سختی و مقاومت خمشی درست است و نمی‌توان آن را به کاهش سختی و مقاومت کل تیر نسبت داد.

$$SDF = 1 - \frac{P_{corr}}{P_{flat}} = 1 - \frac{2 \left(\frac{t_c}{t_f} \right)^2}{\left(\frac{D}{t_f} \right)} \quad (16)$$

بر اساس رابطه (۱۶)، SDF تابع نسبت قطر لوله به ضخامت جان ورق صاف و نسبت ضخامت لوله به ضخامت جان ورق صاف می‌باشد. با توجه به این رابطه تغییرات SDF بر اساس تغییر پارامترهای تاثیر گذار قابل بررسی می‌باشد. شکل (۶) مقدار SDF برای مقادیر مختلف



شکل (۶): مقدار SBA برای مقادیر مختلف D/t_f و t_c/t_f

در رابطه (۱۷)، $P(y)$ نیروی محوری در نوار واحد مقطع تیر و موازی محور خنثی تیر و در فاصله h از تار خنثی است که طبق رابطه (۱۸) تعریف می‌شود و h ارتفاع مقطع از تار خنثی می‌باشد.

$$P(y) = k\delta(y) \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، k سختی محوری مقطع است که می‌تواند با K_{corr} یا K_{flat} جایگزین شود و $\delta(y)$ تغییر مکان ایجاد شده به علت انحنای ثابت κ در طول ناحیه مفصل پلاستیک تیر می‌باشد. با فرض خمش الاستیک تیر و جایگزین کردن

۴- بررسی رفتار تیر با مقطع کاهش یافته توسط جان

لوله‌ای

۴-۱- رفتار خمشی اتصال

برای ارزیابی اثر آکاردئونی جان لوله‌ای بر ممان اینرسی و مدول پلاستیک تیر در طول ناحیه کاهش یافته، لازم است تا ممان اینرسی مقطع تیر با در نظر گرفتن کاهش سختی و مقاومت، در محدوده جان لوله‌ای محاسبه گردد. بدین منظور لنگر الاستیک مقطع تیر با توجه به شکل (۷) را می‌توان بصورت زیر بیان نمود:

$$M = \int_{-h}^{+h} P(y)y dy \quad (17)$$

حالت پلاستیک جان و همچنین فرض مقطع متقارن حول تار خنثی، لنگر پلاستیک مقطع به صورت رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود.

$$M = \frac{ph^2}{4} \quad (23)$$

در رابطه (۲۳)، p مقاومت محوری بوده و می‌تواند با P_{corr} یا P_{flat} جایگزین شود. چون مقدار لنگر پلاستیک مقطع جان برابر $Z_{web}F_y$ می‌باشد، بنابراین مدول پلاستیک سهم جان مقطع می‌تواند طبق روابط زیر محاسبه شود:

$$M = \frac{ph^2}{4} = Z_{web}F_y \quad (24)$$

$$Z_{web} = \frac{ph^2}{4F_y} \quad (25)$$

از آنجا که مدول پلاستیک محاسبه شده سهم جان به صورت مستقیم به مقاومت محوری داخل صفحه وابسته است، بنابراین نسبت مدول پلاستیک مقطع جان لوله‌ای به مدول پلاستیک مقطع جان صاف، همان نسبت P_{corr}/P_{flat} می‌باشد. به عبارت دیگر ضریب کاهش مدول پلاستیک مقطع سهم جان، برابر با SDF خواهد بود. بر اساس مطالب ذکر شده و همچنین مقادیر SRF و SDF، ممان اینرسی و مدول پلاستیک مقطع تیر I شکل در طول ناحیه لوله‌ای طبق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$I_{TW-RBS} = I_{flange} + (1 - SRF)I_{web}^{flat} \quad (26)$$

$$Z_{TW-RBS} = Z_{flange} + (1 - SDF)Z_{web}^{flat} \quad (27)$$

به طور کلی می‌توان گفت، اتصال TW-RBS ممان اینرسی تیر را به مقدار کمتری نسبت به مدول پلاستیک مقطع کاهش می‌دهد، زیرا که در این اتصالات مقدار کاهش در سختی محوری جان (SRF) از مقدار کاهش در مقاومت محوری جان (SDF) کمتر است. این در حالی است که تقریباً در اتصال RBS متداول، درصد کاهش ممان اینرسی تیر از درصد کاهش مدول پلاستیک تیر بیشتر است زیرا که

رابطه (۱۸) در رابطه (۱۹)، مقدار M به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$\delta(y) = \varepsilon(y)D = -\kappa y D \quad (19)$$

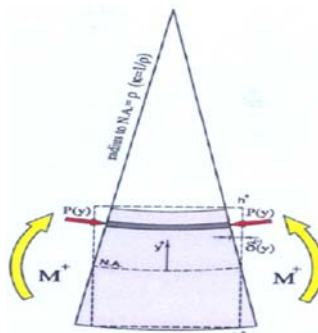
$$M = kD\kappa \int_{h^-}^{h^+} y^2 dy \quad (20)$$

برای مقطع متقارن حول تار خنثی با جایگزینی $h^+ = +h/2$ و $h^- = -h/2$ در رابطه (۲۰)، مقدار M به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$M = kD\kappa \frac{h^3}{12} \quad (21)$$

با مقایسه رابطه (۲۱) و معادله لنگر انحنای تیر، $M = \kappa EI$ ، ممان اینرسی مقطع می‌تواند به صورت تابعی از سختی محوری k به صورت زیر بیان گردد.

$$I_{web} = \frac{kDh^3}{12E} \quad (22)$$



شکل (۷): معرفی پارامترهای اساسی در خمش تیر

چون ممان اینرسی به صورت مستقیم با سختی محوری، در ارتباط است، بنابراین نسبت ممان اینرسی جان لوله‌ای به ممان اینرسی جان صاف، همان نسبت K_{corr}/K_{flat} می‌باشد. در نتیجه ضریب کاهش ممان اینرسی مقطع تیر برابر با ضریب کاهش سختی SRF خواهد بود.

با فرضیات مشابه، می‌توان لنگر پلاستیک مقطع تیر در ناحیه موج‌دار را به عنوان تابعی از مقاومت محوری P_{corr} یا P_{flat} نوشت. بر اساس رابطه (۱۶) و با فرض $p(y) = -p$ برای مقادیر منفی y و $p(y) = p$ برای مقادیر مثبت y در

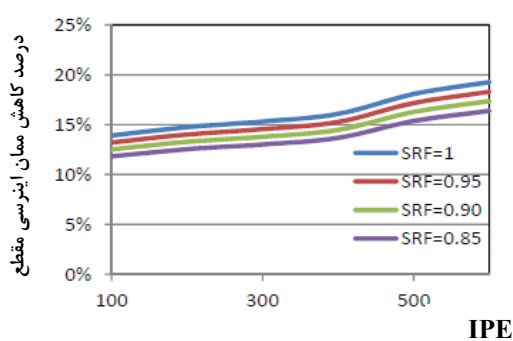
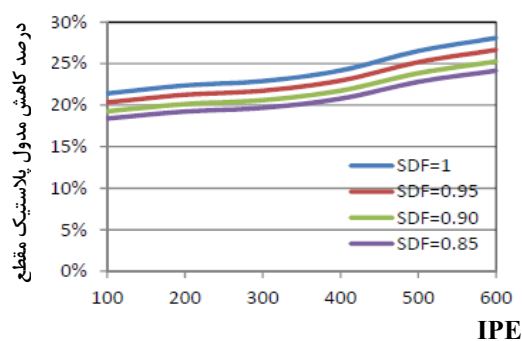
موثر لوله مانند نسبت ضخامت جان لوله‌ای به ضخامت جان تخت و نسبت قطر لوله به ضخامت لوله، بر در صد کاهش ممان اینرسی کل مقطع، بین ۲ تا ۳٪ و میزان این تاثیر بر درصد کاهش مدول پلاستیک مقطع بین ۳ الی ۴٪ در مقاطع مختلف می‌باشد.

در ادامه برای مقایسه بهتر و بررسی چگونگی میزان کاهش سختی و مقاومت در اتصال TW-RBS از مشخصات مقاطع RBS استفاده می‌نمائیم. طبق روابط آئین نامه میزان کاهش بال در مقاطع RBS در هر طرف بین ۰/۱ تا ۰/۲۵ عرض بال تیر می‌باشد که این میزان در مجموع ۲۰٪ تا ۵۰٪ عرض بال را شامل می‌گردد. در شکل (۹) میزان کاهش ممان اینرسی و مدول مقطع پلاستیک در دو اتصال RBS و TW-RBS محاسبه و رسم گردیده است.

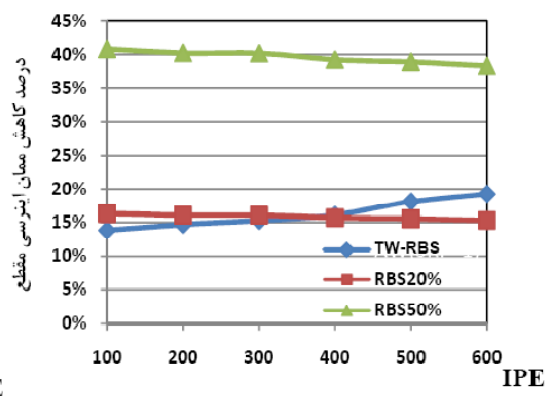
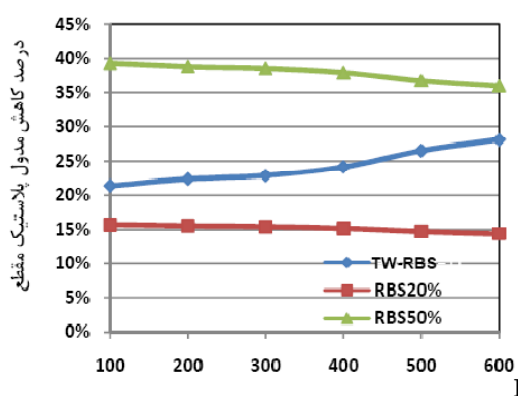
کاهش مقطع بال با ضریب h^2 در ممان اینرسی و با ضریب h در مدول مقطع پلاستیک اثر می‌گذارد.

کاهش کمتر ممان اینرسی تیر در اتصال TW-RBS و همچنین کارایی بیشتر این اتصال در تیرهای عمیق باعث می‌گردد که این اتصال گزینه مناسبی برای قابهای خمشی در ساختمان‌های بلند باشد. زیرا که معیار تغییر شکل در ساختمان‌های بلند به عنوان یک معیار اساسی طراحی منظور می‌گردد و کاهش کمتر ممان اینرسی در این اتصال باعث می‌گردد که ضمن فراهم شدن خواص اتصالات کاهش یافته، افزایش تغییر مکان جانبی سازه در اثر استفاده از اتصالات دارای مقطع کاهش یافته به حداقل برسد.

در شکل (۸) میزان کاهش ممان اینرسی و مدول مقطع پلاستیک تیر آهن IPE در سایزهای متفاوت و در مقادیر مختلف SDF و SRF ، بر حسب درصد، نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد میزان تاثیر پارامترهای



شکل (۸): درصد کاهش ممان اینرسی و مدول مقطع پلاستیک تیر در اتصال TW-RBS



شکل (۹): مقایسه درصد کاهش ممان اینرسی و مدول مقطع پلاستیک تیر در اتصال TW-RBS و RBS

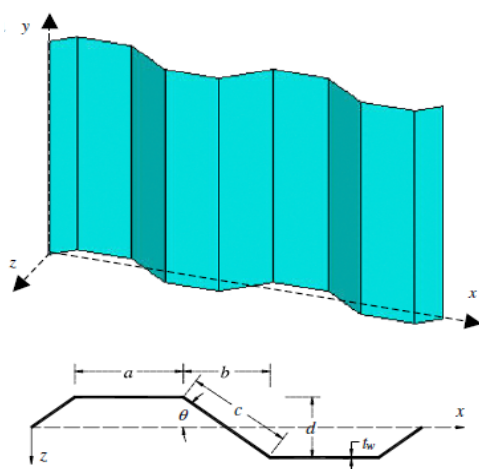
بر اساس تئوری پایداری سازه‌ها، مقدار تنش حد کماتش موضعی و کلی جان‌های موج‌دار قابل محاسبه است. از آنجا که زیر صفحه‌ها محدود به خطوط قائم خم شده و بالهای تیر می‌باشند، تنش برشی کماتشی الاستیک آن می‌تواند از رابطه (۲۸) محاسبه گردد [۱۸].

$$\tau_{cr,l}^e = k_1 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{\omega}\right)^2 \quad (28)$$

در رابطه (۲۸)، E مدول الاستیک یانگ، ν ضریب پواسون، w ماکزیمم مقدار عرض‌های افقی (a) و مورب (c) ورق‌های موج‌دار (شکل (۱۱)) و t_w ضخامت جان ورق موج‌دار است. همچنین k_L ضریب کماتش موضعی برشی است که بصورت زیر تعریف می‌گردد [۱۸].

$$k_l = 5.34 + 4\left(\frac{\omega}{h_w}\right)^2 \quad (29)$$

کوماتش کلی ورق‌های موج‌دار (شکل (۱۱)) نیز بر اساس روابط پایداری بصورت زیر قابل محاسبه است [۱۸].



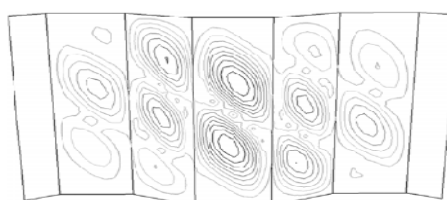
شکل (۱۱): مشخصات هندسی ورق‌های موج‌دار دوزنقه‌ای [۱۸]

$$\tau_{cr,l}^e = k_G \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{h_w}\right)^2 \quad (30)$$

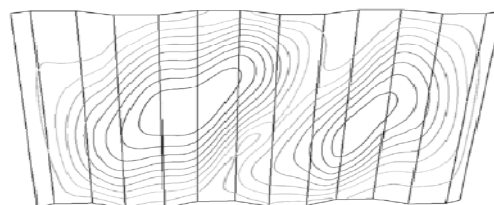
مقایسه نتایج ارائه شده در شکل فوق نشان می‌دهد که کاهش ممان اینرسی و سختی در اتصال TW-RBS در حد اتصال RBS با حدود ۲۰ درصد کاهش در عرض بال است و حتی اتصال RBS در برخی از سایزها، سختی بیشتری از خود نسبت به اتصال RBS نشان می‌دهد. همچنین کاهش مدول پلاستیک و مقاومت در سایزهای پایین اتصال TW-RBS نزدیک اتصالات RBS با حدود ۲۰ درصد کاهش در عرض بال و در سایزهای بالا نزدیک به اتصالات RBS با حدود ۵۰ درصد کاهش در عرض بال می‌باشد.

۴-۲- رفتار برشی اتصال

در ورق‌های موج‌دار، کماتش برشی توسط مود کماتشی اندرکنشی که از اندرکنش مودهای کماتش موضعی و کلی حاصل می‌گردد، کنترل می‌شود. مود کماتش موضعی، مربوط به کماتش زیر صفحه‌های ورق موج‌دار می‌باشد. زیر صفحه‌ها به نقاط محدود بین نقاط خم شده از ورق اطلاق می‌گردد. مود کماتش کلی، مربوط به کماتش مجموعه‌ای از زیر صفحات می‌گردد و در کل ناحیه موج دار گسترش خواهد یافت (شکل (۱۰)).



الف) کماتش موضعی ورق‌های موج‌دار



ب) کماتش کلی ورق‌های موج‌دار

شکل (۱۰): نمایش مود کماتشی موضعی و کلی در ورق‌های موج‌دار [۱۸]

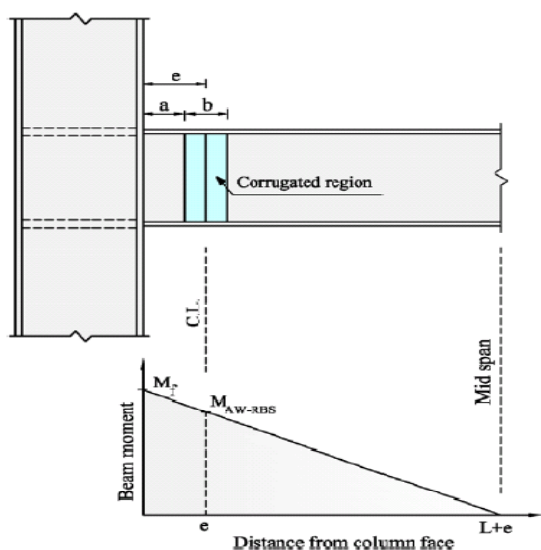
شکل (۱۲): مشخصات هندسی ورق‌های موج‌دار کمافی

شکل [۱۸]

لذا با توجه به روابط فوق می‌توان مقاومت برشی کمافی اندرکنشی را برای جان لوله‌ای شکل محاسبه نمود. کنترل برش تیر در محل مفصل پلاستیک در جان لوله‌ای و در خارج آن برای جان تخت تیر صورت می‌گیرد. در بخش دوم این مقاله محاسبات مربوط به کنترل برشی اتصال انجام گرفته است.

۵- تعیین محل مناسب مقطع کاهش یافته در اتصال TW-RBS

روش طراحی اتصال بر اساس ضوابط لرزه‌ای AISC [۲۰] می‌باشد. به منظور کاهش تقاضا و کاهش شکست در جوش اتصال تیر به وجه ستون و مصالح پیرامونی آن، حداکثر تقاضای لنگر در وجه ستون باید از مقاومت پلاستیک اسمی تیر در این نقطه کمتر باشد. بدین منظور بر اساس نمودار لنگر ارائه شده شکل (۱۳)، حداکثر لنگر ایجاد شده در وجه ستون (M_f) را می‌توان از تصویر کردن حداکثر لنگر مورد انتظار ایجاد شده در مرکز ناحیه کاهش یافته تیر (M_{TW-RBS}) به ترتیب زیر بدست آورد:



شکل (۱۳): توزیع لنگر در اتصال

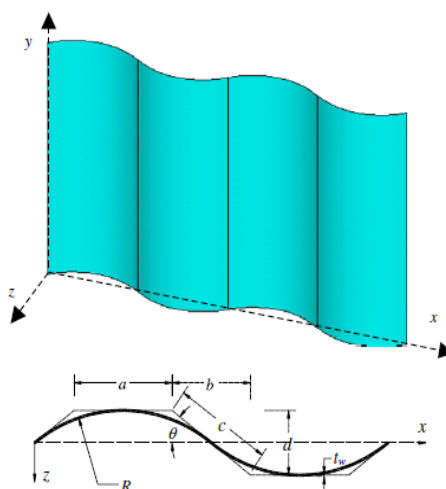
در رابطه (۳۰)، h_w ارتفاع ورق موج‌دار و t_w ضخامت جان ورق موج‌دار است. k_G ضریب کمافش کلی برشی است که بصورت زیر تعریف می‌گردد [۱۸].

$$k_G = \frac{36\beta}{\pi^2 \sqrt{\eta}} [2(d/t_w)^2 + 1] (1 - \nu^2)^{3/4} \quad (31)$$

در رابطه (۳۱) برای ۱ و $1/9$ به ترتیب برای تکیه گاه ساده و گیردار لبه‌های ورق موج‌دار، η ضریب کاهش طول که از رابطه $(a+b)/(a+c)$ محاسبه می‌گردد، d عمق ورق موج دار و ضریب پواسون در اینجا 0.3 لحاظ شده است. از رابطه مقاومت کمافی برشی اندرکنشی بیان شده توسط الدیب [۱۸] که با نتایج چهل آزمون حاصل از ورق‌های دوزنقه‌ای انجام شده توسط همیلتون [۱۹] سازگاری مناسبی دارد می‌توان برای ورق‌های موج‌دار نامتعارف مثل کمان نیز استفاده نمود [۱۸].

$$\left(\frac{1}{\tau_{cr,l}}\right)^n = \left(\frac{1}{\tau_{cr,B}}\right)^n + \left(\frac{1}{\tau_y}\right)^n \quad (32)$$

در رابطه (۳۲)، n برای کمافش موضعی برابر ۴ و برای کمافش کلی برابر $1/5$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین مقدار مینیمم مقاومت کمافی برشی موضعی و کلی است. جهت استفاده از این رابطه کمافی اندرکنشی می‌بایست مشخصات معادل شده ورق کمافی شکل، مطابق شکل (۱۲) را در روابط در نظر گرفت.



در این مطالعه یک مدل جدید از اتصال با مقطع کاهش یافته با برش در جان پیوسته تیر و قرار گرفتن یک لوله به جای آن مورد ارزیابی تحلیلی قرار گرفت. نتایج عددی بدست آمده نشان داد که استفاده از جان آکاردئونی لوله‌ای شکل بدلیل کاهش مقاومت خمشی در اثر حذف جان باعث ایجاد مفصل پلاستیک در مقطع کاهش یافته می‌گردد به طوریکه سایر اجزاء و اتصال تیر به ستون در امنیت نیرویی و تقاضای تغییر شکلی قرار گیرند. با توجه به اینکه استفاده از ورق‌های موج‌دار در جان تیر آهن باعث بهبود ناپایداری تیر در اثر کمزش پیچشی-جانبی می‌گردد و سختی زیاد خارج از صفحه این اتصال در محل مفصل پلاستیک و کاهش عرض آزاد بال تیر در این محل بدلیل محدود شدن به لوله، پارامترهای مرتبط با پایداری مفصل پلاستیک را بهبود می‌دهد، استفاده از جان آکاردئونی لوله‌ای شکل در جان تیر آهن نسبت به سایر اتصالات با مقطع کاهش یافته از جمله RBS از نکته نظر پایداری برتر نشان می‌دهد.

چگونگی کنترل برش در جان لوله‌ای و تعیین محل مفصل پلاستیک از دیگر نکات مطرحه در این اتصال می‌باشد که بصورت تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیلی نشان داد که پارامترهای تاثیر گذار در مقاومت و سختی اتصال، سایز تیر آهن، قطر و ضخامت لوله مصرفی می‌باشند که با کاهش در سایز تیر آهن و کاهش قطر لوله و افزایش ضخامت لوله، سختی و مقاومت خمشی در محل مفصل پلاستیک افت کمتری را شامل می‌شوند. بکارگیری لوله در جان تیر جهت ایجاد فیوز شکل پذیر، کاهش سختی خمشی مقطع در محل مفصل پلاستیک را در حدود ۱۴ الی ۱۹ درصد به همراه دارد که این میزان کاهش در سختی خمشی با اتصال RBS با ۲۰٪ کاهش در عرض بال تیر برابری می‌نماید. همچنین این اتصال پیشنهادی منجر به کاهش مقاومت خمشی مقطع در محل مفصل پلاستیک بین ۲۲ تا ۲۸٪ می‌گردد که بینابین نتایج حاصل از اتصال RBS با ۲۰٪ کاهش در عرض بال تیر و اتصال RBS با ۵۰٪ کاهش در عرض بال تیر است.

$$M_f = M_{TW-RBS} \frac{(L+e)}{L} \quad (33)$$

در رابطه (۳۳)، L فاصله میان مرکز ناحیه کاهش یافته تا نقطه عطف تیر می‌باشد. در صورتیکه بار ثقلی روی تیر مانند شرایط آزمایشگاهی نسبت به تقاضای لرزه‌ای، اندک فرض گردد، آنگاه نقطه عطف تیر دقیقاً در وسط تیر واقع می‌گردد و توزیع لنگر نیز خطی خواهد بود. حداکثر لنگر مورد انتظار ایجاد شده در مرکز ناحیه کاهش یافته تیر (M_{TW-RBS}) نیز بر اساس ضوابط لرزه‌ای به ترتیب زیر تعیین می‌گردد:

$$M_{TW-RBS} = 1.1 R_y Z_{TW-RBS} F_y \quad (34)$$

در رابطه (۳۴) بر اساس رابطه (۲۷) تعیین می‌گردد. نسبت حداکثر تقاضای لنگر در وجه ستون به مقاومت پلاستیک اسمی تیر در وجه ستون با استفاده از روابط (۳۳) و (۳۴) به شرح زیر قابل محاسبه خواهد بود.

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{M_f}{Z_b R_y F_y} = \frac{M_{TW-RBS} \frac{(L+e)}{L}}{Z_b R_y F_y} \\ &= \frac{1.1 R_y Z_{TW-RBS} F_y \frac{(L+e)}{L}}{Z_b R_y F_y} \\ &= \frac{1.1 Z_{TW-RBS} \frac{(L+e)}{L}}{Z_b L} \end{aligned} \quad (35)$$

در رابطه (۳۵)، Z_b مدول پلاستیک تیر در مقطع کاهش نیافته، در وجه ستون می‌باشد. به منظور کاهش تقاضا و کاهش احتمال شکست در جوش اتصال تیر به وجه ستون، مقدار α باید از ۱/۰ کمتر باشد. این مقدار در طراحی اتصالات متداول تیر کاهش یافته در حدود ۰/۹ توصیه می‌گردد [۲۱]. لذا با توجه به داشتن مدول پلاستیک مقاطع کاهش یافته و کاهش نیافته و همچنین طول تیر طره مورد بررسی $(L+e)$ می‌توان مقدار فاصله مناسب مرکز ناحیه کاهش یافته تا وجه ستون را بدست آورد.

۶- نتیجه گیری



[10] Han, S.W. and Moon H.H. (2009), "Design Equations for Moment Strength of RBS-B Connection", Journal of Construction Steel Research, Vol. 65, pp. 1087-1095.

[11] Federal Emergency Management Agency, FEMA350 (2000), "Seismic Design Criteria for New Moment-Resisting Steel Frame Construction", Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.

[12] Prasada Rao, D.V. and Satish Kumar, S.R. (2006), "RHS Beam-to-Column Connection with Web Opening-Parametric Study and Design Guidelines", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 62, pp. 747-756.

[13] Yang, Q. and Yang, Na. (2009), "A seismic Behaviors of Steel Moment Resisting Frames with Opening in Beam Web", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, No. 6, pp. 1323-1336.

[14] Mirghaderi, S.R., Torabian, S. and Imanpour, A. (2010), "Seismic Performance of the Accordion-Web RBS Connection", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 66, pp. 277-288.

[15] Wilkinson, S., Hurdman G., and Crouther, A. (2006), "A Moment Resisting Connection for Earthquake Resisting Structure", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 62, pp. 295-302.

[16] Elgaaly, M., Seshadri, A. and Hamilton, R. (1997), "Bending Strength of Steel Beams with Corrugated Webs", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 6, pp. 772-782.

[17] Elgaaly, M., Hamilton, R. and A. Seshadri. (1997), "Shear Strength of Beams with Corrugated Webs", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 4, pp. 390-398.

[18] Eldib, M.E. (2009), "Shear Buckling Strength and Design of Curved Corrugated Steel Webs for Ridges", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, pp. 2129-2139.

[19] Hamilton, R.W. (1993), "Behavior of Welded Girder with Corrugated Webs", Ph.D. thesis, Maine University of Maine.

[20] AISC, ANSI/AISC 341-05. (2010), "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings", American Institute of Steel Construction Inc., Chicago IL.

[21] Engelhardt, M., Winneberger, T., Zekany, A. and Potyraj T. (1998), "Experimental Investigation of Dogbone Moment Connections", Eng J AISC, pp. 128-39.

لذا با توجه به موارد مطرح شده اتصال با جان آکاردئونی لوله‌ای شکل می‌تواند به عنوان یک اتصال تضعیف شده کاربردی مورد توجه قرار گیرد.

۷- واژه‌نامه

Dogbone استخوان سگ
Stiffness Reduction Factor ضریب کاهش سختی (SRF)
Strength Degradation Factor ضریب کاهش مقاومت (SDF)

۸- مراجع

[1] Pachoumis, D.T., Galoussis E.G., Kalfas C.N. and Eftimiou, I.Z. (2010), "Cyclic Performance of Steel Moment-Resisting Connections with Reduced Beam Sections-Experimental Analysis and Finite Element Model Simulation", Engineering Structures, Vol. 32, No. 9, pp. 2683-2692.

[2] Jones, S.L., Fry, G.T. and Engelhardt, M.D. (2002), "Experimental Evaluation of Cyclically Loaded Reduced Beam Section Moment Connections", Journal of Structural Engineering, Vol. 128, No. 4, pp. 441-451.

[3] Chen S.J. and Chao Y.C. (2001), "Effect of Composite Action on Seismic Performance of Steel Moment Connections with Reduced Beam Sections", Journal of Construction Steel Research, Vol. 57, pp. 417-434.

[4] Jay Shen, J.H., Astaneh-Asl, A. and McCallen, D. (2002), "Use of Deep Columns in Special Steel Moment Frames", AISC, Steel Tips.

[5] Zhang, X. and Ricles, J.M. (2006), "Experimental Evaluation of Reduced Beam Section Connections to Deep Columns", Journal of Structural Engineering, Vol. 132, No. 3, pp. 346-357.

[6] Ricles J.M., Zhang X., Lu L.W. and Fisher J.W. (2004), "Development of Seismic Guidelines for Deep-Column Steel Moment Connections", ATLSS Report No 04-13.

[7] Roeder C.W. (2002), "Connection Performance for Seismic Design of Steel Moment Frames", Journal of Structural Engineering, Vol. 128, No. 4, pp. 517-525.

[8] Lee, C.H., Jeon, S.W., Kim, J.H. and Uang, C.M. (2005), "Effect of Panel Zone Strength and Beam Web Connection Method on Seismic Performance of Reduced Beam Section Steel Moment Connection", Journal of Structural Engineering, Vol. 131, No. 12, pp. 1854-65.

[9] Moslehi Tabar, A. and Deylami, A. (2005), "Instability of Beams with Reduced Beam Section Moment Connections Emphasizing the Effect of Column Panel Zone Ductility", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 61, No. 11, pp 1475-1491.