

## مطالعه تحلیلی اتصال خمشی تضعیف شده در مقطع تیر توسط جان لوله‌ای

ابوذر صالح، عضو هیأت‌علمی گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تفرش، تفرش، ایران  
 سید مهدی زهرائی\*، عضو هیأت‌علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران  
 سید رسول میرقادری، عضو هیأت‌علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران  
 \*mzahrai@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۲/۰۳ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۴/۰۸/۱۸

### چکیده

تضعیف عمدی مقطع تیر در نزدیکی محل اتصال به ستون یک راه حل کاربردی برای ایجاد شکل‌پذیری و توانایی مقاومت در برابر تغییر شکلهای بزرگ چرخه‌ای در اتصالات قاب خمشی است. با این روش، مفصل پلاستیک در مقطع تضعیف شده تشکیل می‌گردد و این کاهش موضعی، تقاضای وارده بر روی اجزاء اتصال و احتمال آسیب‌پذیری آن را کاهش می‌دهد. بر همین اساس در طرح حاضر اتصال نوین خمشی تیر به ستون با مقطع کاهش یافته توسط جان آکاردئونی لوله‌ای شکل (TW-RBS: Tubular Web RBS connection) که با برش در جان پیوسته تیر در محل مورد نظر و جایگزینی یک لوله در جان بدست می‌آید، مورد مطالعه تحلیلی قرار می‌گیرد. نتایج تحلیلی نشان می‌دهد که استفاده از مقطع تضعیف شده با جان آکاردئونی لوله‌ای، با حذف اثر جان تیر در مقاومت خمشی مقطع، منجر به ایجاد فیوز شکل‌پذیر 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 بطوریکه سهم باقیمانده جان لوله‌ای 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 لوله‌ای 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 کماتش های موضعی و کلی حاصل از برش از دیگر نکات مورد طرح است. نتایج تحلیلی بیان می‌کند 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 RBS20% برابری می‌نماید. همچنین این اتصال بر حسب سائز تیر مصرفی منجر به کاهش مقاومت خمشی مقطع در محل مفصل پلاستیک بین ۲۲ تا ۲۸٪ می‌گردد که بینابین نتایج حاصل از اتصال RBS20% و اتصال RBS50% است.

**کلید واژگان:** اتصال قاب خمشی فولادی، مقطع کاهش یافته، جان آکاردئونی لوله ای، بررسی تحلیلی رفتار اتصال

## ۱- مقدمه

تجربیات صورت گرفته طی زلزله‌ها تأثیرگذاری مانند زلزله نرثریج و کوبه باعث شد که بحث رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی مورد چالش جدی در سطح بین‌المللی قرار گیرد. ایجاد تنش‌های بزرگ متمرکز در نواحی جوشی بال و جان اتصال و آسیب‌پذیری اتصال در تقاضاهای شکل‌پذیری زیاد بعنوان دو عامل بحرانی خرابی مطرح گردید. یک راه طبیعی برای حل این موضوع، کاهش تقاضای شکل‌پذیری 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 آسیب‌پذیری اجزاء اتصال و جوشهای نفوذی نیز کاهش پیدا کند.

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

۱- اتصالات RBS: ایده اتصال RBS یا به اصطلاح اتصال استخوان سگ<sup>۱</sup>، توسط یک شرکت اروپایی بنام آرید<sup>۲</sup> 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. کمیته SAC [۲] 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 مستند سازی شده بودند را ارائه کرده است. در این زمینه تحقیقات گسترده‌ای در داخل و خارج کشور تاکنون صورت گرفته است که اتصال RBS را بعنوان یک اتصال شناخته شده متداول نموده است.

۲- اتصال با کاهش مقطع در جان تیر: در نشریه FEMA350 [۲] نوع جدیدی از اتصال کاهش یافته مطرح شده است که در آن کاهش تقاضای وجه ستون از طریق ایجاد سوراخهای دایره‌ای بزرگی در جان تیر و در نزدیکی اتصال فراهم می‌گردد. سایز سوراخ به اندازه‌ای است که جاری شدگی جان در طول دهانه اتفاق می‌افتد و ناحیه اتصال در محدوده ارتجاعی باقی می‌ماند. پراسادا راثو و ساتیش کومار [۳] 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. گینگشان یانگ و نایانگ [۴]، طرح 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: میر قادری و همکاران [۵] در مطالعه ای، 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 موج دار 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 ویلیکیسون و همکاران [۱] 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.

۵- اتصال قطعات کمانی شکل در بال تیر: صالح و همکاران [۱] در یک مطالعه عددی، ایده اتصال تضعیف شده با بکارگیری قطعات کمانی شکل در بال تیر که با ایجاد برش در بال و بخشی از جان تیر و با بکارگیری قطعات کمانی شکل بعنوان بال تیر در این قسمت بدست می‌آید در دو حالت، استفاده از کمان دوبل (DAFS) و استفاده از کمان معکوس (AFS) مورد بررسی عددی قرار دادند. نتایج عددی بدست آمده نشان داد که اتصال با کمان معکوس در بال تیر تا ۴٪ تغییر مکان نسبی در تیر را، بدون کاهش مقاومت خمشی در وجه اتصال و همچنین تغییر مکان ماندگار در بال تیر تجربه می‌نماید. و از نقطه نظر مقاومت خمشی الاستیک و معیار سختی تیر نیز با مدل RBS برابری می‌نماید. همچنین استفاده از ایده بکارگیری کمان معکوس در بال تیر، بدلیل کاهش ارتفاع جان و محدود شدگی جان با ورق‌های کمانی شکل با ضخامت بیشتر، منجر به کاهش احتمال ایجاد ناپایداری جانبی پیچشی تیر و همچنین حساسیت جان تیر به کمانشهای موضعی جان و بال می‌گردد، که می‌تواند بعنوان گزینه مناسب در تیرهای عمیق مطرح گردد.

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.

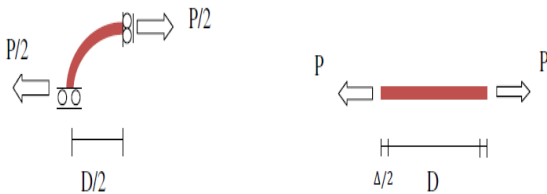
## ۲- چگونگی رفتار تیرهای با جان موج دار

رفتار خمشی تیرهای با جان موج دار، تفاوت قابل ملاحظه‌ای با رفتار خمشی تیرهای با جان صاف دارد. این اختلاف رفتاری، از تفاوت

### ۳- ارزیابی ساز و کار جان آکاردئونی لوله ای

#### ۳-۱- سختی جان آکاردئونی لوله ای

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  $\Delta$  در جهت نیرو، فرض نمود. با توجه به تقارن می‌توان از ربع دایره جهت زیر سازه کل دایره استفاده نمود. 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 ابتدایی  $\frac{PD}{2\pi}$  و برای تکیه گاه میانی برابر  $\frac{PD}{2} - \frac{PD}{2\pi}$  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.



شکل ۳: معرفی پارامترها و شرایط مرزی، ورق مستقیم (شکل راست)- ربع دایره جهت مدل لوله (شکل چپ)

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

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

$$(4)$$

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

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  $I_c = \frac{t_c^3}{12}$  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.

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

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

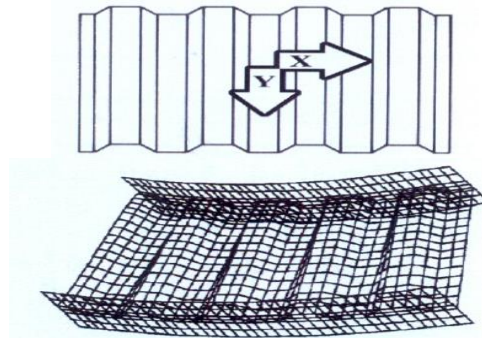
$$N(s) = \frac{P \sin\theta}{2} \quad (7)$$

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

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

ماهیت میان ورق صاف و ورق موجدار ناشی می‌شود. ورق صاف در حالت تنش مسطح 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 موج دار سختی درون صفحه‌ای در جهت  $x$  و  $y$  از اختلاف زیادی برخوردار است.

در جهت  $x$  به سبب تبدیل رفتار درون صفحه‌ای به رفتار برون صفحه‌ای، سختی به شدت کاهش می‌یابد. این سختی اندک در ورقهای موج دار 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 -

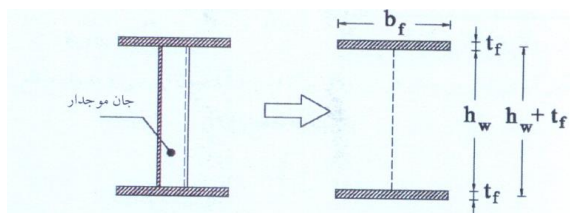


شکل ۱: ورق موج دار

ظرفیت جاری شدن بالهای تیر تعیین گردد و از اثر جان صرفنظر گردد. در این حالت برش بطور عمده توسط جان موج دار تحمل می‌گردد. تحقیقات نشان داده‌اند که، هیچ گونه اندرکنشی بین رفتار خمشی و رفتار برشی تیرهای با جان موج دار وجود ندارد (الگالی و همکاران [۸ و ۷]). لذا برای مقاصد طراحی لنگر پلاستیک تیر با جان موج دار از رابطه (۱) استفاده می‌شود:

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

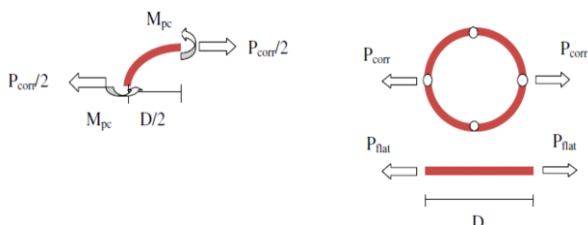
در  $b_f$  و  $t_f$  به ترتیب عرض و ضخامت بال تیر،  $h_w$  عمق جان و  $F_y$  تنش حد جاری شدن بال تیر می‌باشد.



شکل ۲: مشخصات تیر با جان موج دار

### 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 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 تئارن 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.



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

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

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

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

برای ارزیابی تأثیر خاصیت آکاردئونی جان لوله‌ای بر روی مقاومت و مقایسه مقاومت جان لوله‌ای به جان صاف، ضریب کاهش مقاومت (Strength Degradation Factor) (SDF) را می‌توان به ترتیب زیر محاسبه نمود:

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

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 تأثیر گذار قابل بررسی می‌باشد. شکل ۶ مقدار SDF برای مقادیر مختلف  $D/t_f$  و  $t_c/t_f$  نمایش 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 تأثیر 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

$$\frac{1}{2} P \cdot \Delta = \left[ \int \frac{\left(\frac{Pr \sin \theta}{2} - \frac{Pr}{\pi}\right)^2}{2Et_c^3} r d\theta + \int \frac{\left(\frac{P \cos \theta}{2}\right)^2}{2Et_c} r d\theta + \int 1.2 \frac{\left(\frac{P \cos \theta}{2}\right)^2}{2.6Et_c} r d\theta \right] \quad (9)$$

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

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

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

$$K_{corr} = \frac{Et_c^3}{\left(\frac{3\pi - \frac{3}{\pi}}{8}\right)D^3 + \left(\frac{\pi}{8} + 0.39\pi\right)Dt_c^2} = \frac{Et_c^3}{0.223D^3 + 1.618Dt_c^2} \quad (11)$$

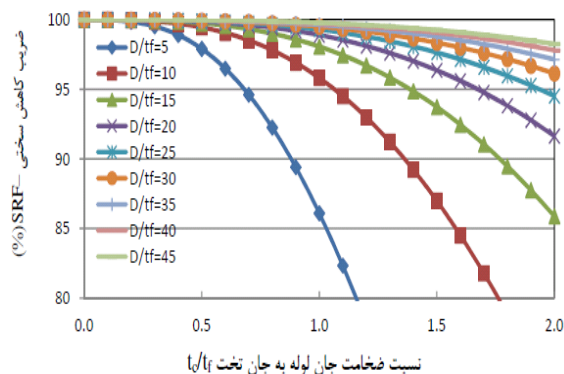
بمنظور مقایسه سختی محوری ورق آکاردئونی جان لوله‌ای با ورق صاف، مشابه آنچه که در ورق آکاردئونی عمل گردید نواری تخت از ورق صاف جان به ارتفاع واحد، طولی مساوی قطر لوله و ضخامت  $t_f$  در نظر گرفته می‌شود. سختی محوری نوار انتخابی با در نظر گرفتن نیروی مساوی  $P$  در دو انتهای نوار به صورت زیر بدست می‌آید.

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

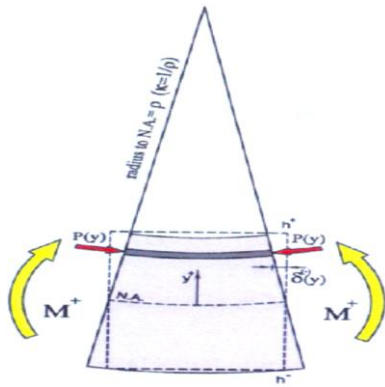
برای مقایسه سختی جان لوله‌ای و جان صاف، ضریبی تحت عنوان ضریب کاهش سختی (Stiffness Reduction Factor) (SRF) بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$SRF = 1 - \frac{K_{corr}}{K_{flat}} = 1 - \frac{\left(\frac{t_c}{t_f}\right)^3}{0.223\left(\frac{D}{t_f}\right)^2 + 1.618\left(\frac{t_c}{t_f}\right)^2} \quad (13)$$

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 تأثیر 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 تأثیر گذار می‌توان به SRF مناسب رسید.



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



شکل ۷: معرفی پارامترهای اساسی در خمش تیر

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

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

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 موج دار 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 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:

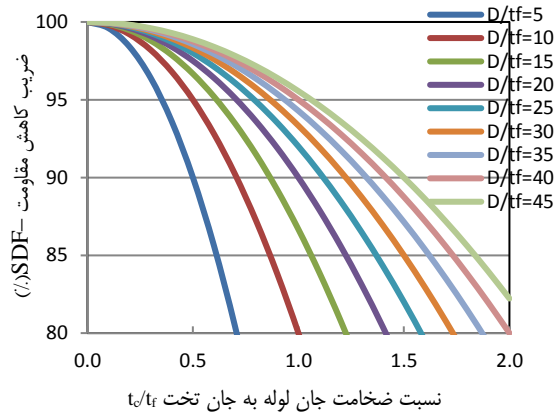
$$M = \frac{Ph^2}{4} = Z_{web}F_y \quad (24)$$

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

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 (۲۶) قابل محاسبه است:

سهم جان در سختی و مقاومت خمشی درست است و نمی‌توان آن را به کاهش سختی و مقاومت کل تیر نسبت داد.



شکل ۶: مقدار SDF برای مقادیر مختلف  $D/t_f$  و  $t_w/t_f$

#### ۴- بررسی رفتار تیر با مقطع کاهش یافته 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:

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

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

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

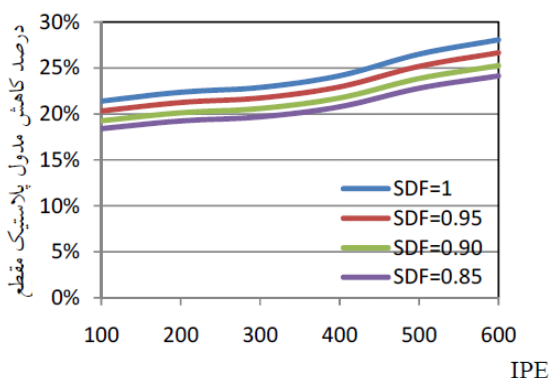
در رابطه (۱۸)،  $k$  سختی محوری مقطع است که می‌تواند با  $k_{corr}$  یا  $k_{flat}$  جایگزین شود و  $\delta(y)$  تغییر مکان ایجاد شده به علت انحنای ثابت  $\kappa$  در طول ناحیه مفصل پلاستیک تیر می‌باشد. با فرض خمش الاستیک تیر و جایگزین کردن رابطه ۱۸ در رابطه ۱۹، مقدار  $M$  به صورت زیر بدست خواهد آمد:

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

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

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:

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



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

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.

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.

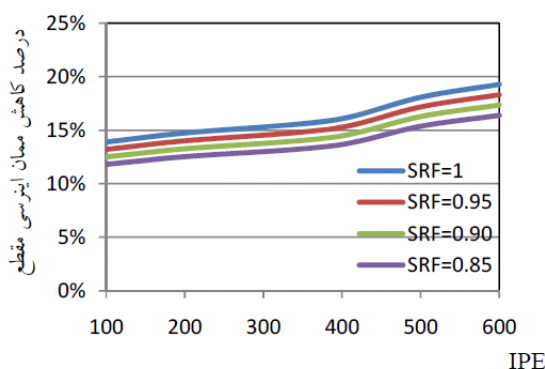
$$I_{TW-RBS} = I_{flange} + (1 - SRF)I_{web}^{flat} \quad (26)$$

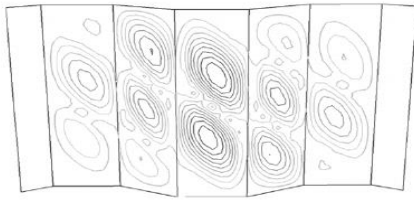
$$Z_{TW-RBS} = Z_{flange} + (1 - SDF)Z_{web}^{flat} \quad (27)$$

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

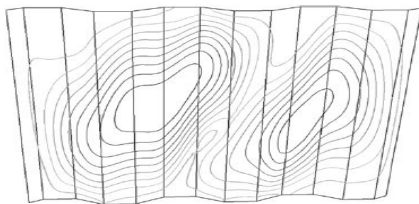
کاهش کمتر ممان اینرسی تیر در اتصال TW-RBS و همچنین کارایی بیشتر این اتصال در تیرهای عمیق باعث می‌گردد که این اتصال گزینه مناسبی برای قابهای خمشی در ساختمانهای بلند باشد. زیرا که معیار تغییر شکل در ساختمانهای بلند بعنوان یک معیار اساسی طراحی منظور می‌گردد و کاهش کمتر ممان اینرسی در این اتصال باعث می‌گردد 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 SRF و SDF، بر حسب درصد، نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد میزان تأثیر پارامترهای مؤثر 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 تأثیر بر درصد کاهش مدول پلاستیک مقطع بین ۳ الی ۴٪ در مقاطع مختلف می‌باشد.





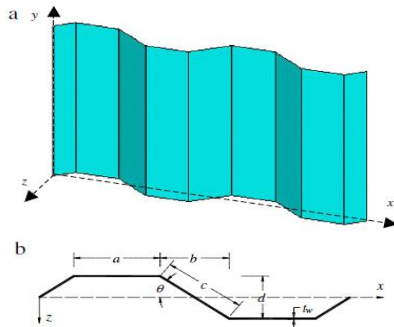
الف-کمانش موضعی ورقهای موج دار



ب- کمانش کلی ورقهای موج دار

شکل ۱۰: نمایش مود کمانشی موضعی و کلی در ورقهای موج دار (الدیب [۹])

کمانش کلی ورقهای موجدار نیز بر اساس روابط پایداری بصورت زیر قابل محاسبه است (الدیب [۹]).



شکل ۱۱: مشخصات هندسی ورقهای موج دار دوزنقه‌ای (الدیب [۹])

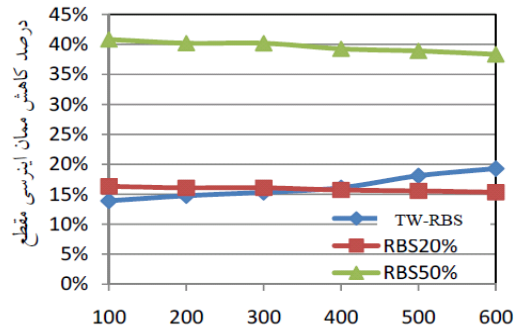
$$\tau_{cr,G}^e = k_G \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{h_w}\right)^2 \quad (30)$$

در رابطه (۳۰)، E مدول الاستیک یانگ،  $\nu$  ضریب پواسون،  $h_w$  ارتفاع ورق موجدار و  $t_w$  ضخامت جان ورق موجدار است.  $k_G$  ضریب کمانش کلی برشی است که بصورت زیر تعریف می‌گردد (الدیب [۹]).

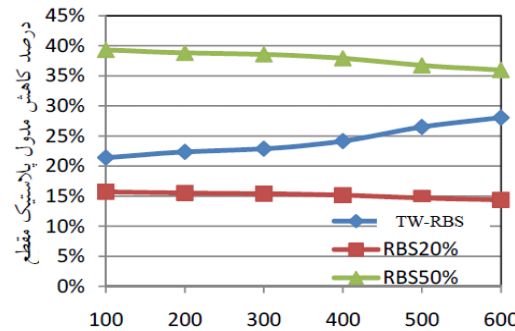
$$k_G = \frac{36\beta}{\pi^2 \sqrt{\eta}} \left[ 2 \left( \left(\frac{d}{t_w}\right)^2 + 1 \right) (1 - \nu^2) \right]^{3/4} \quad (31)$$

$\beta$  در رابطه (۳۱) برابر ۱ و  $1/9$  به ترتیب برای تکیه گاه ساده و گیردار لبه های ورق موجدار،  $\eta$  ضریب کاهش طول که از رابطه  $(a+b)/(a+c)$  محاسبه می‌گردد، d عمق ورق موج دار و  $\nu$  ضریب پواسون است که در اینجا  $0.3$  لحاظ می‌گردد.

از رابطه مقاومت کمانشی برشی اندرکنشی بیان شده توسط الدیب [۱۰] که با نتایج چهل آزمون حاصل از ورقهای دوزنقه‌ای انجام



IPE



IPE

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

#### ۲-۴- رفتار برشی اتصال

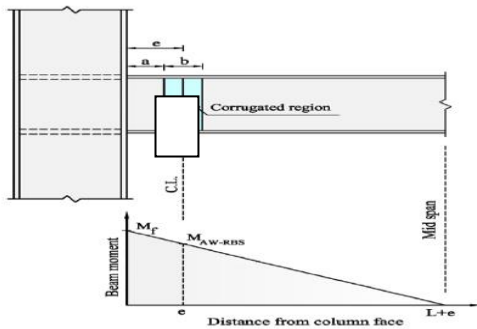
در ورقهای موجدار، کمانش برشی توسط مود کمانشی اندرکنشی که از اندرکنش مودهای کمانش موضعی و کلی حاصل می‌گردد، کنترل می‌شود. مود کمانش موضعی، مربوط به کمانش زیر صفحه‌های ورق موج دار می‌باشد. زیر صفحه‌ها به نقاط محدود بین نقاط خم شده از ورق اطلاق می‌گردد. مود کمانش کلی، مربوط به کمانش مجموعه‌ای از زیر صفحات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

بر اساس تئوری پایداری سازه‌ها، مقدار تنش حد کمانش موضعی و کلی جانهای موج دار قابل محاسبه است. از آنجا که زیر صفحه‌ها محدود به خطوط قائم خم شده و بالهای تیر می‌باشند، تنش برشی کمانشی الاستیک آن می‌تواند از رابطه (۲۸) محاسبه گردد [۹].

$$\tau_{cr,l}^e = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{h_0}\right)^2 \quad (28)$$

در رابطه (۲۸)، E مدول الاستیک یانگ،  $\nu$  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 کمانش موضعی برشی است که بصورت زیر تعریف می‌گردد (الدیب [۹]).

$$k_l = 5.34 + 4 \left(\frac{w}{h_0}\right)^2 \quad (29)$$



شکل ۱۳: توزیع لنگر در اتصال

حداکثر لنگر مورد انتظار ایجاد شده در مرکز ناحیه کاهش یافته تیر (MTW-RBS) نیز بر اساس ضوابط لرزه‌ای به ترتیب زیر تعیین می‌گردد:

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

ZTW-RBS 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.

$$\alpha = \frac{M_f}{Z_b R_y F_y} = \frac{M_{TW-RBS} \frac{(L+e)}{L}}{Z_b R_y F_y} = \quad (35)$$

$$\frac{1.1R_y Z_{TW-RBS} F_y \frac{(L+e)}{L}}{Z_b R_y F_y} = \frac{1.1Z_{TW-RBS} (L+e)}{Z_b L}$$

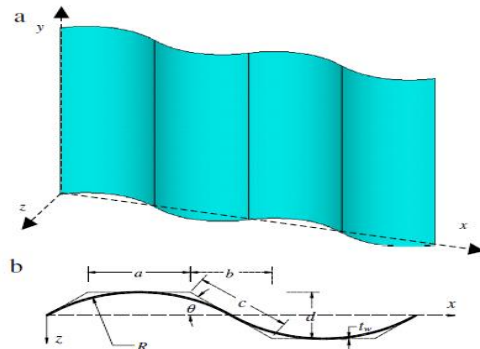
در رابطه (۳۵)،  $Z_b$  مدول پلاستیک تیر در مقطع کاهش نیافته، در وجه ستون می‌باشد. به منظور کاهش تقاضا و کاهش احتمال شکست در جوش اتصال تیر به وجه ستون، مقدار  $\alpha$  باید از ۱/۰ کمتر باشد. این مقدار در طراحی اتصالات متداول تیر کاهش یافته در حدود ۰/۹ توصیه می‌گردد (انگلهارد و همکاران [۱۳]). لذا با توجه 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

در این مطالعه یک مدل جدید از اتصال با مقطع کاهش یافته با برش در جان پیوسته تیر و قرار گرفتن یک لوله بجای آن مورد ارزیابی تحلیلی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از جان اکاردتونی لوله‌ای شکل بدلیل کاهش مقاومت خمشی در اثر حذف جان باعث ایجاد مفصل پلاستیک در مقطع کاهش یافته می‌گردد بطوریکه 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 کمناش 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 اکاردتونی لوله‌ای شکل در جان تیر آهن نسبت به سایر

شده توسط همیلتون [۱۱] سازگاری مناسبی دارد می‌توان برای ورقهای موج‌دار نامتعارف مثل کمان نیز استفاده نمود (الدیب [۱۰]).

در رابطه (۳۲)،  $n$  برای کمناش موضعی برابر ۴ و برای کمناش کلی برابر ۱/۵ در نظر گرفته می‌شود. همچنین مقدار مینیمم مقاومت کمناشی برشی موضعی و کلی است. جهت استفاده از این رابطه کمناشی اندرکنشی می‌بایست مشخصات معادل شده ورق کمناشی شکل، مطابق شکل ۱۲ را در روابط در نظر گرفت.



شکل ۱۲: مشخصات هندسی ورقهای موج‌دار کمناشی

شکل [۱۰]

لذا با توجه به روابط فوق می‌توان مقاومت برشی کمناشی 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 [۱۲] 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<sub>i</sub>) را می‌توان از تصویر کردن حداکثر لنگر مورد انتظار ایجاد شده در مرکز ناحیه کاهش یافته تیر (MTW-RBS) به ترتیب زیر بدست آورد:

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

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.



Seismic performance of the Accordion-Web RBS connection, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 66, 2010, pp 277-288.

[6]- Wilkinson S., Hurdman G., Crouther A., A moment resisting connection for earthquake resisting structure, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, 2006, pp 295-302.

[7]- Elgaaly M., Seshadri A., Hamilton R., Bending strength of steel beams with corrugated webs, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 123(6), 1997, pp 772-782.

[8]- Elgaaly M., Hamilton R., A. Seshadri., Shear strength of beams with corrugated webs, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 122(4), 1997, pp 390-398.

[9]- Eldib. M.E., Buckling analysis of beams with corrugated webs, 5<sup>th</sup> international conference on civil and architecture eng., In: *Proceeding of 5<sup>th</sup> ICCAE Conf.* 2004.

[10]- Eldib. M.E., Shear buckling strength and design of curved corrugated steel webs for ridges, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, 2009, pp 2129\_2139.

[11]- Hamilton. R.W., Behavior of welded girder with corrugated webs, Ph.D. thesis, Maine University of Maine, 1993.

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

[13]- Engelhardt M., Winneberger T., Zekany A., Potyraj T., Experimental investigation of Dogbone moment connections, *Eng J AISC*, 1998, pp 128-39.

اتصالات با مقطع کاهش یافته از جمله RBS از نکته نظر پایداری برتر نشان می دهد.

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 تأثیر 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 شکل‌پذیر، 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 می نماید. همچنین این اتصال پیشنهادی منجر به کاهش مقاومت خمشی مقطع در محل مفصل پلاستیک بین ۲۲ تا ۲۸٪ می گردد 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. لذا با توجه به موارد مطرح شده اتصال با جان اکاردیونی لوله‌ای شکل می‌تواند بعنوان یک اتصال تضعیف شده کاربردی مورد توجه قرار گیرد.

#### ۷-مراجع:

[۱]- صالح، ا، زهرائی، م، میرقادری، ر، مطالعه رفتار لرزه ای قابهای خمشی فولادی ویژه با استفاده از فیوز کماتی شکل دویل و معکوس در بال تیر، نشریه مهندسی سازه دانشگاه آزاد مراغه، سال یازدهم، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۳.

[2]- FEMA-350, Seismic design criteria for new moment-resisting steel frame construction, Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2000.

[3]- Prasada Rao D.V., Satish Kumar S.R., RHS beam-to-column connection with web opening—parametric study and design guidelines, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.62, 2006, pp 747-756.

[4]- Yang Q., Yang Na, Aseismic behaviors of steel moment resisting frames with opening in beam web. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, No. 6, 2009, pp 1323-1336.

[5]- Mirghaderi S.R., Torabian S., Imanpour A.,

## Analytical Study on Reduce Beam Section Connection by Tubular Accordion Web

Aboozar Saleh

Assistant Professor, Department of civil Engineering, Technical Faculty of Tehran University, Tehran, Iran

Seyyed Mehdi Zahrai

Professor, Center of Excellence for Engineering and Management of Civil Infrastructures, School of Civil Engineering, the University of Tehran

Seyyed Rasool Mirghaderi

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Technical Faculty of Tehran University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

The basic strategy of reduce the ductility demand and related concentrated tensions at moment resistance connections is reduce the section of the beam at connected region to column. By this method plastic hinge done at the reduced cross section and this local reduction decreases the demand of the components of connection. On this basis, in present study a new beam-to-column moment connection with reduced beam section using Tubular Accordion Web that called TAW-RBS is studied analytically. The results show that TAW-RBS create a ductile fuse away from beam-to-column connection components, through removing web from beam flexural capacity. Reduction of beam flexural capacity 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 with square of the thickness of tube and inversely related with 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 of 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 :** Steel Moment Frames connection, Reduce Beam Section, Tubular-Accordion Web section, Analytical Study