



# اتصال صلب تیر I به ستون قوطی بدون ورق پیوستگی داخلی

## برای اجرا به روش ستون درختی

محمد رضا صدیقیان کاشانی<sup>۱</sup>، علی اکبر آقا کوچک<sup>۲</sup>

(دریافت ۹۰/۴/۱۵، پذیرش ۹۱/۸/۱۲)

### چکیده

در صنعت ساخت سازه‌های فولادی ایران به سبب در دسترس نبودن نیمرخ‌های کارخانه‌ای بزرگ بال‌پهن، از مقاطع ساخته شده قوطی شکل برای عضو ستون، استفاده زیادی می‌شود. اما نحوه اتصال تیر به آن و ایجاد یک اتصال صلب بخصوص تعبیه ورق پیوستگی در مقطع قوطی با دشواری مواجه است. در این مقاله با ارائه یک هندسه جدید اتصال بر مبنای روش ساخت ستون درختی، بدون نیاز به ورق پیوستگی، اجرای اتصال صلب تیر I به ستون قوطی امکان پذیر می‌شود. برای بررسی عملکرد لرزه‌ای اتصال پیشنهادی از مدل‌سازی اجزای محدود استفاده شده و زیرسازه صلیبی شکل از اتصال تحت بارگذاری یکنوا و چرخه‌ای بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، اتصال پیشنهادی ضوابط صلبیت، مقاومت خمشی و شکل‌پذیری را که مورد توجه آئین نامه لرزه‌ای AISC است، برآورده می‌کند. اتصال تا پایان چرخه‌ای با زاویه انحراف طبقه ۴٪ بدون افت مقاومت بیش از حد، بارگذاری را تحمل می‌کند. در این تحلیل، کرنش معادل پلاستیک به عنوان معیاری برای کنترل آغاز شکست در اتصال، محاسبه و کنترل می‌شود.

### کلمات کلیدی

اتصال صلب، ستون قوطی شکل، مدل سازی اجزای محدود، کرنش معادل پلاستیک

## I\_Beam to Box\_Column Rigid Connection without Internal Continuity Plate For Column-Tree Construction

Mohammad Reza Seddighian Kashani, Ali Akbar Aghakouchak

### ABSTRACT

In construction of steel structure in IRAN, as large wide flange I shaped sections are not available, box shaped columns are widely used. However connection of I beam to box shaped column and inserting the continuity plate inside box section to make a rigid connection is difficult in practice. In this paper a new geometry suitable for Column-Tree construction is introduced in which a rigid connection may be obtained without using internal continuity plate. For evaluation seismic performance of the connection, finite element modeling is used and a cross shaped substructure is analyzed subjected to monotonic and cyclic loading. The results show proposed connection meets the rigidity, ductility and strength criteria of AISC standard. This connection tolerates the cyclic loading up to 4% drift angle without significant loss of strength. In this analysis equivalent plastic strain criterion is used to monitor fracture initiation in critical regions of the connection

### Key Word

Rigid Connection, Box\_Column, Finite Element Method, Equivalent Plastic Strain

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه تربیت مدرس، [mr.seddighian@gmail.com](mailto:mr.seddighian@gmail.com) (نویسنده مسئول)

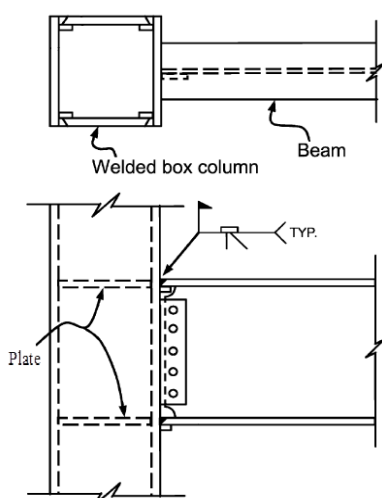
۲. استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، [a\\_gha@modares.ac.ir](mailto:a_gha@modares.ac.ir)



جان موج دار (AW-RBS) [۸] توسط میرقادری و همکاران، از جمله تحقیقات با حضور ورق پیوستگی داخلی است. در اتصال AW-RBS با بکارگیری ورق موج دار بجای جان صاف تیر، ناحیه کاهش یافته در نزدیکی بر ستون ایجاد می شود تا مفصل پلاستیک در این محل تشکیل گردد. در مورد اتصالات پیشنهادی بدون ورق پیوستگی داخلی می توان به اتصال "ورق یقه ای با پشت بند مایل" توسط Murty و Goswami [۹] و اتصال "ورق میان گذر" [۱۰] توسط میرقادری و همکاران اشاره کرد. در اتصال "ورق میان گذر" ورق پیوستگی در داخل ستون حذف شده و در عوض ورقی قائم از میان بال های ستون عبور داده می شود و تیر بدون تماس با ستون به ورق میان گذر جوش می شود.

## ۲- معرفی سیستم ستون درختی

برای اجرای قاب خمشی می توان دو نوع روند ساخت را برشمرد. یک نوع اجرای کارگاهی و دیگری ساخت در کارخانه که اصطلاحاً سیستم ستون درختی نامیده می شود. ستون درختی مطابق شکل (۳) متشکل از ستون و تیرهای ریشه است که در محل هر طبقه به ستون با اتصال مربوطه در کارخانه در طولی حدود ۱ تا ۳ طبقه ساخته می شود. از آنجا که اتصال و جوشها همگی در کارخانه و در موقعیتی مناسب اجرا شده و به سهولت قابل کنترل و آزمایش هستند، کیفیت ارتقا می یابد.



شکل (۱): اتصال سنتی تیر به ستون قوطی (IBBC)

ستون قوطی شکل که با جوشکاری ۴ ورق ساخته می شود، برای استفاده در قاب های خمشی در مناطق با خطر لرزه ای مناسب می باشد. علل کارایی سازه ای این نوع مقطع عبارت است از سختی خمشی زیاد حول کلیه محورها، مقاومت بالای محوری به سبب دارا بودن شعاع ژیراسیون بالا، مقاومت خمشی مناسب در هر دو جهت، شکل پذیری کافی این مقطع در صورت رعایت نسبت عرض به ضخامت و مقاومت پیچشی مناسب که نیاز به مهارهای جانبی ستون را کاهش می دهد [۱۰ و ۱۱]. با وجود کارایی بالای مقطع قوطی شکل به عنوان ستون، برقراری اتصال خمشی مناسب تیر I به ستون قوطی (IBBC) <sup>۱</sup> چالش برانگیز است. برای سال ها استفاده از ورق پیوستگی داخلی کارآمدترین روش جهت تقویت گره اتصال IBBC بود [۳]. با این وجود تعبیه ورق پیوستگی داخلی، فرایند مشکل و پرهزینه ای دارد.

شکل (۱) اتصال سنتی IBBC را نشان می دهد. در این اتصال بال تیر مستقیماً به ستون جوش می شد و جان تیر با ورق به ستون متصل می شد. زلزله ۱۹۹۵ کوبه ژاپن آسیب های عمده ای به این اتصالات وارد ساخت [۴]. مهمترین ضعف این اتصال سنتی، تقاضای کرنش پلاستیک زیاد در لبه جوش شده بال تیر به ستون است که سبب می شود طی تعداد اندکی چرخه بارگذاری، اتصال دچار گسیختگی ترد در محل مذکور گردد. در شکل (۲) این مد گسیختگی نشان داده شده است. پارگی از زیر بال به سبب وجود سوراخ دسترسی جوش (WAH) <sup>۲</sup> یکی دیگر از مشکلات رایج بود. برای بهبود عملکرد لرزه ای اتصال IBBC راهکارهایی بر مبنای تقویت اتصال با و یا بدون استفاده از ورق پیوستگی ارائه شده است. اتصال "تیر با بال پهن شده بدون WAH" [۵] و اتصال "پشت بند تقویتی" [۶] توسط Chen و همکاران. اتصال "ماهیچه افقی" [۷] توسط تاناکا و اتصال "تیر کاهش یافته توسط

<sup>1</sup> I Beam to Box Column

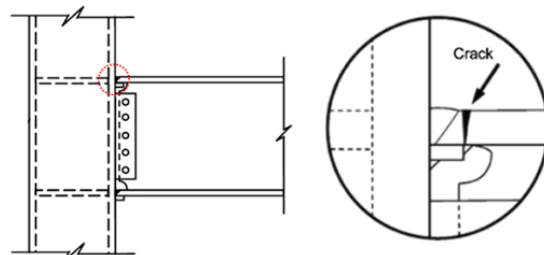
<sup>2</sup> Weld Access Hole

شده و سپس به روش اجزای محدود مدل می‌شود و تحت بارگذاری قرار می‌گیرد. به منظور اعتبارسنجی و مقایسه، یک نمونه اتصال "تیر با بال پهن شده بدون WAH" نیز مدل و ارزیابی می‌شود. سپس با مقایسه این دو اتصال و با داشتن مقدار بحرانی کرنش معادل پلاستیک برای ناحیه جوش شده بال تیر به ستون و ضوابط AISC [۱۲]، عملکرد لرزه‌ای اتصال پیشنهادی بررسی می‌شود. برای مدلسازی اجزای محدود و تحلیل‌های غیرخطی از نرم افزار Abaqus 6.10 استفاده می‌شود.

#### ۴- اعتبار سنجی مدل اجزای محدود

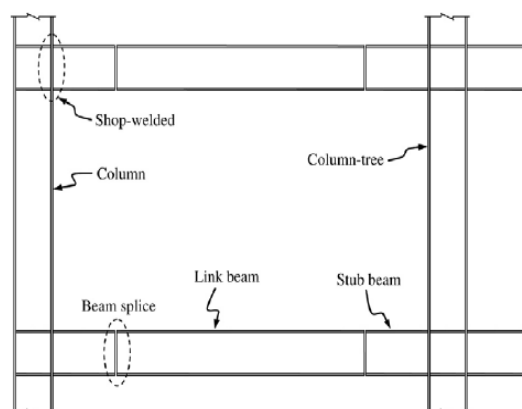
به منظور تایید اعتبار مدلسازی اجزای محدود، ابتدا نمونه آزمایش تمام مقیاس Chen روی اتصال "تیر با بال پهن شده بدون WAH" [۵] به صورت اجزای محدود با استفاده از المان S4R (المان پوسته با ۴ گره و انتگرال کاهش یافته) [۱۳] شبیه‌سازی می‌شود. شکل (۴) هندسه اتصال و ابعاد تیر و ستون را نشان می‌دهد. فولاد استفاده شده در آزمایش A572 Gr50 است. برپایش آزمایش (Test setup) مطابق شکل (۵) می‌باشد. جهت اعمال بارگذاری چرخه‌ای از تاریخچه استاندارد بارگذاری SAC [۱۴] مطابق جدول (۱) استفاده شده است. همان طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، در آزمایشگاه این اتصال تا چرخه‌ای با زاویه انحراف طبقه ۵٪ بارگذاری را تحمل کرده است.

در مدل عددی، مشابه فرضیات Chen [۵]، رفتار فولاد به صورت دو خطی با سخت شدگی کرنشی ۴٪ و سخت شوندگی سینماتیکی براساس معیار تسلیم فون میسز منظور شده است. شکل (۷) مدل اجزای محدود اتصال را نشان می‌دهد. در مدل اجزای محدود جوش به صورت مستقل مدل نشده است، بلکه درجات آزادی دو بخش جوش شده در نرم افزار به هم بسته شده است. در شکل (۸) نمودار نیروی سر تیر در برابر جابجایی آن، برای آزمایش Chen [۵] و مدل عددی تحقیق حاضر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود تطابق قابل قبولی بین آن دو وجود دارد



شکل (۲): گسیختگی ترد در اتصال ستی IBBc

پس از برپایی ستون درختی در کارگاه، بخش میانی تیر در حد فاصل دو تیر ریشه، به آنها وصله می‌شود. این اتصال دوم که اتصال پیوند خوانده می‌شود، به دلیل اینکه تقاضای لنگر در محل آن کم است، بحرانی نمی‌باشد. گزینه‌های مختلفی برای اتصال پیوند وجود دارد [۱۱]. اجرای پیچی اتصال پیوند به سبب اینکه سرعت اجرا را بالا می‌برد، گزینه مناسبی است. با توجه به اینکه محل تشکیل مفصل پلاستیک بین ۰/۵ تا ۱/۵ برابر عمق تیر است، در طراحی ستون درختی باید توجه کرد طول تیر ریشه بیشتر از مقدار فوق باشد.

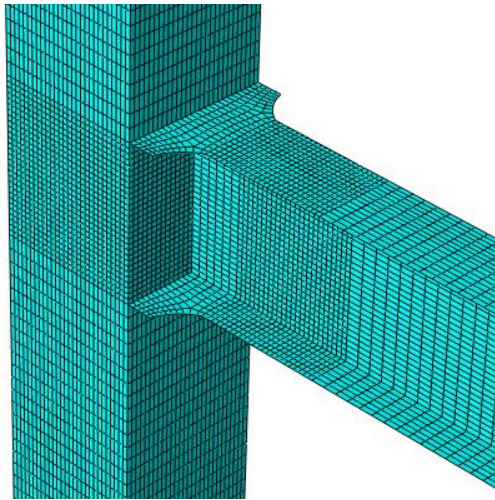


شکل (۳): قاب خمشی به روش اجرای ستون درختی

#### ۳- روش و هدف تحقیق

همان طور که قبلاً بیان شد در اتصالات IBBc، لبه جوش شده بال تیر به ستون، ناحیه بحرانی برای آغاز گسیختگی است. در این تحقیق برای داشتن معیاری برای آستانه گسیختگی، مقدار کرنش معادل پلاستیک مورد توجه قرار می‌گیرد. بدین منظور در بخش ابتدایی تحقیق بر اساس نتایج آزمایش محققین در مورد این نوع اتصالات، مقدار بحرانی کرنش معادل پلاستیک در ناحیه مذکور بدست می‌آید. در بخش بعدی، جزئیات اتصال پیشنهادی معرفی

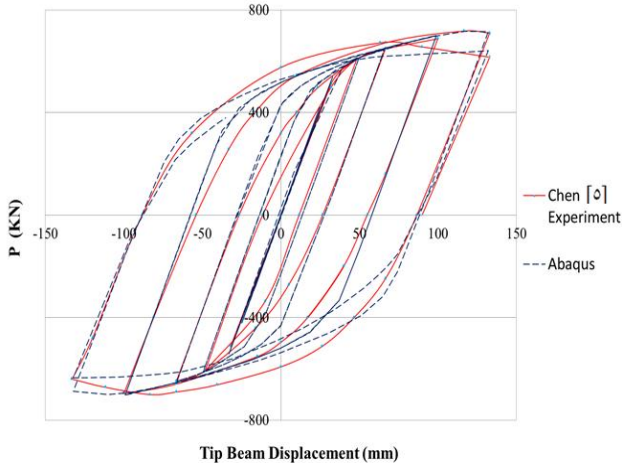
لذا استفاده مناسب از روش اجزای محدود برای تحلیل رفتار چرخه‌ای این اتصالات تایید می‌شود.



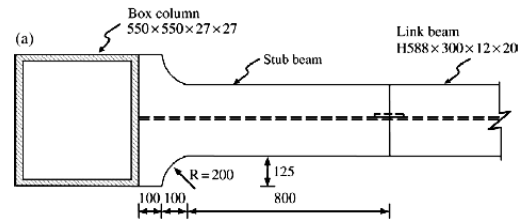
شکل (۷): مدل اجزای محدود اتصال

۵- یافتن کرنش معادل پلاستیک بحرانی برای لبه جوش شده تیر به ستون

Chen و همکاران [۶] یک نمونه اتصال سنتی IBBC بدون عریض نمودن بال را نیز مورد تحلیل اجزای محدود و همچنین آزمایش تمام مقیاس قرار دادند. این نمونه پس از اعمال بارگذاری، در چرخه‌ای با زاویه انحراف  $2/3\%$  رادیان در انتهای لبه جوش شده بال تیر به ستون دچار ترک شد. در تحقیق حاضر این اتصال نیز در نرم افزار Abaqus با المان S4R بازسازی شده است. اشکال (۹) و (۱۰) مدل بازسازی شده و مدل اجزای محدود Chen را نشان می‌دهد. پس از تایید اعتبار نتایج مدل بازسازی شده در مقایسه Chen، مقدار PEEQ در لبه تیر در زاویه

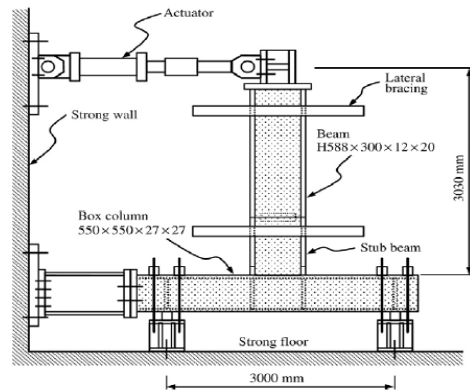


شکل (۸): نمودار چرخه ای نیرو - جابجایی برای دو آزمایش



شکل (۴): مدل اتصال "تیر با بال پهن شده

بدون WAH" [۵]

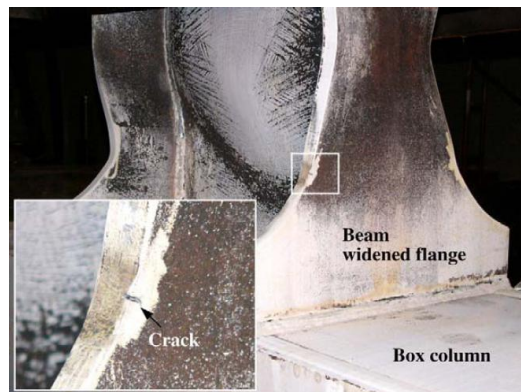


شکل (۵): test setup یکطرفه Chen [۵]

جدول (۱): تاریخچه بارگذاری استاندارد SAC [۱۴]

Load step #	Peak eformation $\theta$	Number of cycle, n
1	0.00375	6
2	0.005	6
3	0.0075	6
4	0.01	4
5	0.015	2
6	0.02	2
7	0.03	2

Continue with increments in  $\theta$  of 0.01 and perform two cycles at each step



شکل (۶): اتصال "بال پهن شده بدون WAH" در چرخه

ای با زاویه انحراف طبقه  $5/5\%$  [۵]



انحراف ۲/۳٪ قرائت شده و مقدار نرمال شده آن به عنوان آستانه گسیختگی در این نوع اتصال در نظر گرفته می‌شود. PEEQ پارامتری در نرم افزار Abaqus [۱۳] برای کرنش معادل پلاستیک است. کرنش معادل پلاستیک مقداری اسکالر از همه مولفه های کرنش پلاستیک در نقطه‌ای خاص است. تعریف ریاضی آن به صورت زیر می باشد.

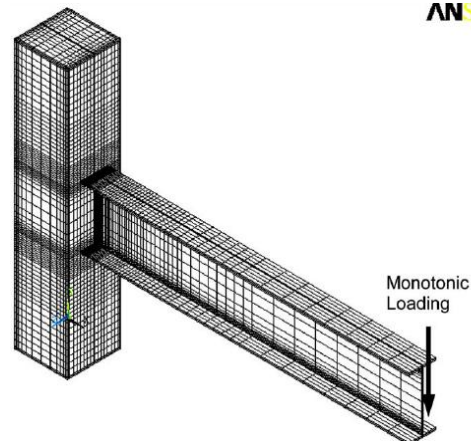
$$\varepsilon^{-p} = \int_0^t \dot{\varepsilon}^{-p} dt \quad (1)$$

$$\varepsilon^{-p} = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p} \quad (2)$$

برای ارزیابی رفتار غیر خطی موضعی، استفاده کرنش معادل پلاستیک نرمال شده در بین محققین متداول است.

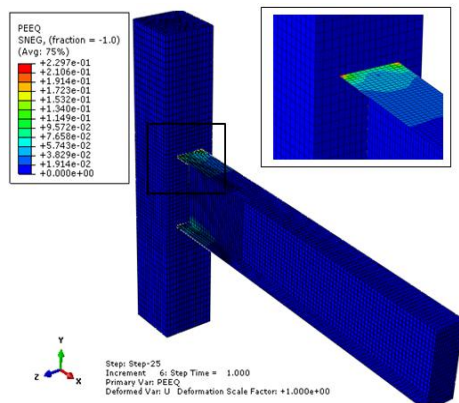
[۱۵ و ۱۶]

ANSYS

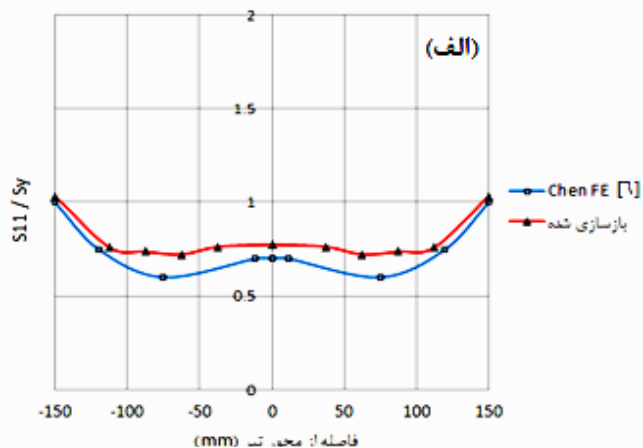
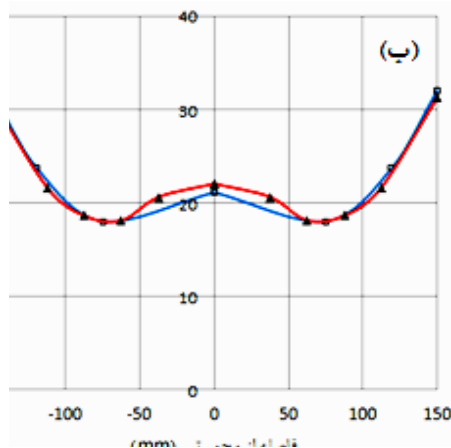


شکل (۹): مدل اجزای محدود Chen [۶]

۵-۱- اعتبار سنجی مدل بازسازی شده به منظور اعتبارسنجی، نتایج مدل بازسازی شده با مدل اجزای محدود Chen [۶] تحت بارگذاری یکنوا مقایسه می‌شود. شکل (۱۱الف) مقدار تنش طولی نرمال شده در زاویه انحراف طبقه ۰/۵٪ رادیان و شکل (۱۱ب) شاخص PEEQ در زاویه انحراف طبقه ۰/۴٪ رادیان برای دو مدل در امتداد اتصال بال تیر به ستون را نشان می‌دهد. شاخص PEEQ حاصل تقسیم کرنش معادل پلاستیک بر کرنش تسلیم است. مشاهده می شود تطابق خوبی بین هر دو مدل بخصوص در انتهای بال وجود دارد. شایان ذکر است معمولا زاویه انحراف طبقه ۰/۵٪ و ۰/۴٪ به ترتیب برای بررسی رفتار خطی و غیر خطی اتصال انتخاب می شوند.



شکل (۱۰): مدل بازسازی شده در نرم افزار Abaqus



شکل (۱۱): اعتبار سنجی مدل بازسازی شده، (الف) تنش طولی نرمال ، (ب) کرنش معادل پلاستیک نرمال

در آزمایش انجام شده توسط Chen [۶] اتصال مورد مطالعه تحت بارگذاری در چرخه‌ای با زاویه انحراف طبقه ۲/۳٪ در انتهای اتصال بال تیر به وجه ستون دچار رخداد ترک خوردگی شده است. با توجه به این اطلاعات مقدار PEEQ در همین محل در مدل بازسازی شده قرائت می‌شود که برابر ۰/۲۳ است و با تقسیم آن بر  $\epsilon_y = 0.00198$  شاخص PEEQ برابر ۱۱۶ بدست می‌آید. استفاده از مقدار شاخص PEEQ به سبب آنکه مستقل از کرنش تسلیم فولاد است، از PEEQ برای مقایسه مناسب‌تر است.

### ۶- اتصال پیشنهادی

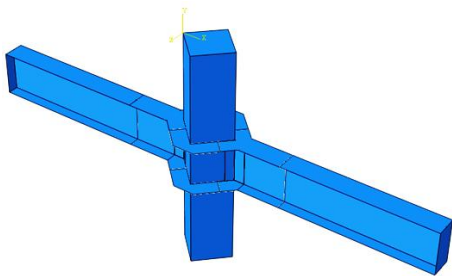
در هندسه اتصالات متداول IBBC، همواره کشش و فشار بال‌های تیر به بال ستون منتقل می‌شود. اما ستون قوطی شکل به سبب توخالی بودن خود دارای بالی است که در خارج از صفحه سختی و مقاومت کمی دارد پس اساساً در این رویکرد نیاز به ورق پیوستگی داخلی است. برای دست یافتن به اتصال IBBC بدون استفاده از ورق پیوستگی، می‌باید هندسه‌ای تدارک دید که نیروی بال‌های تیر مستقیماً به بال ستون وارد نیاید. شکل (۱۲) اتصال پیشنهادی را نشان می‌دهد.

#### ۶-۱- رفتار مقطع قوطی چرخیده در پلان

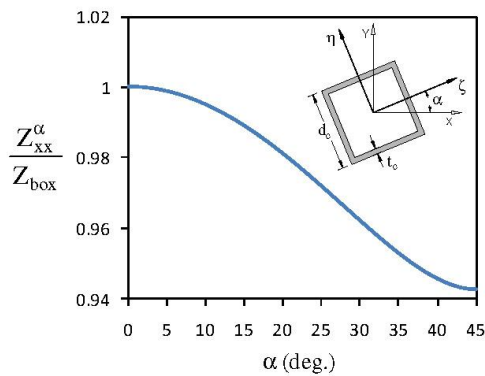
استفاده از مقاطع قوطی شکل مربعی برای ستون‌ها با هر زاویه محلی در طراحی سازه، تاثیری در تعیین کفایت مقطع نخواهد داشت. زیرا مقطع قوطی شکل مربعی حول هر محوری رفتار تقریباً یکسانی دارد. میرقادری و ترابیان [۱۶] این موضوع را با بررسی سه پارامتر سختی خمشی، مقاومت و شکل پذیری مقطع حول محورهای مختلف، نشان دادند.

سختی خمشی ستون قوطی شکل مربعی، حول همه محورها یکسان است. مقاومت خمشی ستون قوطی متناسب با مدول پلاستیک مقطع (Z) است. در شکل (۱۳)  $Z_{xx}^{\alpha}$  مدول پلاستیک مقطع چرخانیده شده و  $Z_{box}$  مدول

پلاستیک در حالت  $\alpha = 0$  است. مشاهده می‌شود افت مدول پلاستیک و به تبع آن مقاومت خمشی در حالات مختلف کمتر از ۶٪ و قابل صرف نظر است. با بررسی نمودارهای لنگر-دوران مقطع قوطی شکل که شکل‌پذیری مقطع را نشان می‌دهند، مشاهده می‌شود برای زوایای مختلف قرارگیری مقطع، در حالت عدم وجود بار محوری اختلافی در حدود ۶٪ دارند و در سطوح بارهای محوری مساوی ۴/۰ ظرفیت جاری شدگی مقطع، برهم منطبق می‌گردند [۱۶].



شکل (۱۲): هندسه اتصال پیشنهادی



شکل (۱۳) مدول پلاستیک برای زوایای مختلف [۱۶]

#### ۶-۲- جزئیات اتصال

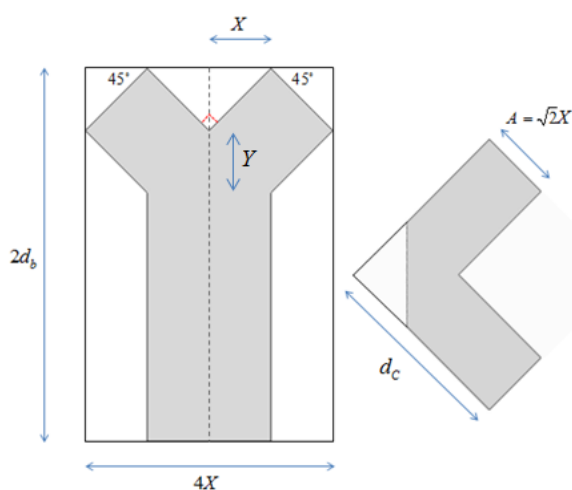
همانطور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است در هندسه پیشنهادی ستون به اندازه ۴۵° در پلان چرخیده و تیر بجای اتصال به بال نرم ستون، به گوشه ستون به همراه ورق‌های یقه‌ای متصل می‌شود. همچنین جان تیر توسط ورق خم شده ۱۳۵° به صورت تمام عمق به جان ستون متصل می‌شود. در این اتصال ورق پیوستگی داخلی، حذف شده و در عوض از ورق یقه‌ای استفاده شده است. در این روش لازم است تیر ریشه مطابق شکل (۱۴) از ورق ساخته شده سپس بال‌های تیر با جوش نفوذی کامل بدون

تیر ریشه را مطابق شکل (۱۴) می‌توان از برش دو ورق فولادی و اتصال آن به ورق سوم به عنوان جان، ساخت. با توجه آنچه در ساخت ستون درختی عنوان شد، طول ورق را می‌توان ۲ برابر عمق تیر گرفت. با فرض  $Y$  برابر  $X$  مشاهده می‌شود فقط با انتخاب پارامتر مجهول  $X$  می‌توان ابعاد ورق را بدست آورد.

پس از ساخت تیر ریشه می‌توان ورق های یقه‌ای را آماده کرد.

#### ۷- بررسی عملکرد اتصال

۷-۱- معرفی نمونه ها

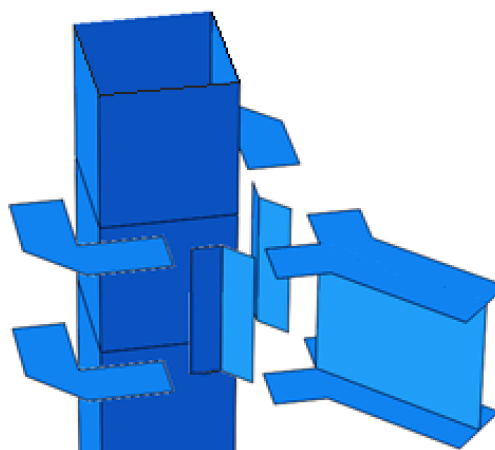


شکل (۱۴) : جزئیات اتصال

WI یک زیرسازه صلیبی شکل از اتصال "تیر بال پهن شده بدون WAH" عنوان شده در بخش ۴ است. نمونه PI مدل صلیبی شکل از اتصال پیشنهادی می‌باشد در تیر و ستون از شبکه‌ای با بُعد ۵ سانتیمتر و در ناحیه چشمه و ناحیه پلاستیک شونده تیر از شبکه ریزتری با بُعد ۲ سانتیمتر بهره گرفته شده است. همچنین با ایجاد بی‌نظمی محدود در شبکه المان در برخی نقاط، امکان وقوع مدهای کماتش جان و بال تیر طی تحلیل فراهم می‌شود.

تعبیه سوراخ دسترسی جوش در جان، به ستون متصل شوند. برای جلوگیری از وجود شکاف در زیر بال تیر که معمولاً موضع ضعف است، می‌باید مقداری از جان تیز زیر بال به ستون جوش شود. ورق خم شده  $135^\circ$  در حد فاصل جان تیر و ستون قرار گرفته و در تمامی لبه‌ها، جوش می‌شوند. ورق های یقه‌ای که ضخامتی برابر با بال تیر دارند، به جان ستون و بال تیر با جوش نفوذی متصل می‌گردند.

ورق یقه‌ای یک مثلث قائمه متساوی الساقین است که یک مثلث متناسب با ابعاد تیر ریشه از وتر آن بریده و راس آن پِخ  $45^\circ$  زده می‌شود. (شکل (۱۴))

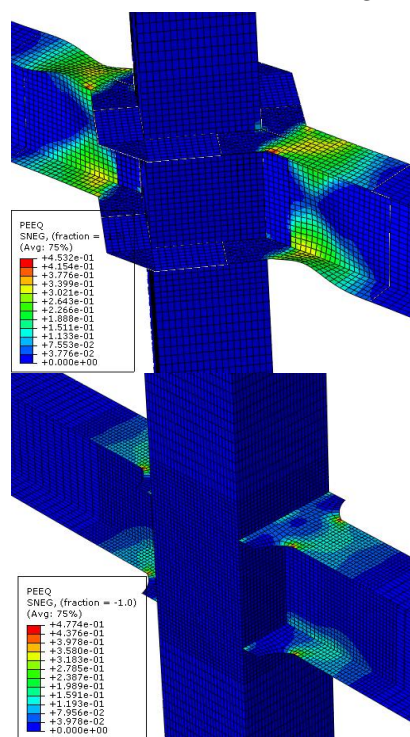


برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای، زیرسازه صلیبی شکل اتصال از طریق مدلسازی اجزای محدود ساخته و تحت بارگذاری چرخه‌ای با کنترل جابجایی قرار می‌گیرد. شکل (۱۵) زیرسازه، شرایط مرزی و مهارهای جانبی آن را نشان می‌دهد. زیرسازه صلیبی شکل، معرف اتصال داخلی در یک قاب خمشی است. با توجه به مشخصات انتخاب شده، اتصال پیشنهادی با اتصال "تیر بال پهن شده بدون WAH" قابل مقایسه است. مشخصات هندسی اتصالات در جدول (۲) آمده است. مشخصات مصالح، نوع المان و روش مدلسازی مطابق فرضیات بخش ۴ می‌باشد. نمونه

جدول (۲): مشخصات هندسی نمونه ها

ورق خم شده ۱۳۵ درجه		تیر ریشه			تیر				ستون		نمونه
ورق مجاور ستون mm	ورق مجاور تیر mm	یقه‌ای A mm	Y mm	X mm	$t_{bf}$ mm	$t_{bw}$ mm	$b_{bf}$ mm	$d_b$ mm	$t_c$ mm	$d_c$ mm	
۵۸۸×۱۲۰×۱۰	۵۸۸×۱۵۰×۱۰	۲۱۲	۱۵۰	۱۵۰	۲۰	۱۲	۳۰۰	۵۸۸	۲۷	۵۵۰	P1
-	-	-	-	-	۲۰	۱۲	۳۰۰	۵۸۸	۲۷	۵۵۰	W1

خمشی ویژه محسوب می شود. در جدول (۳) می توان کرنش معادل پلاستیک نرمال را در نواحی جوش تیر به ستون و جوش بال تیر به ورق یقه‌ای (اتصال پیشنهادی) در پایان چرخه‌ای با زاویه انحراف طبقه ۴٪ برای دو نمونه مشاهده کرد. مطابق جدول (۳) در اتصال پیشنهادی شاخص PEEQ در نواحی جوش شده از مقدار بحرانی ۱۱۶ (محاسبه شده در بخش ۵) کمتر است. اما نمونه W1 شرایط بحرانی دارد.



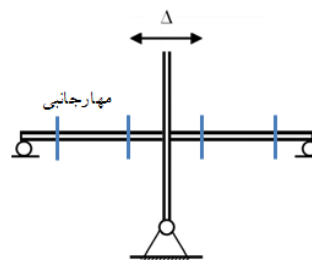
شکل (۱۶): تغییر شکل و نواحی با کرنش پلاستیک

زیاد در پایان بارگذاری چرخه ای

با زاویه انحراف طبقه ۴٪

۲-۷- رفتار چرخه‌ای اتصالات

شکل (۱۶) تغییر شکل و نواحی دارای کرنش پلاستیک زیاد را در پایان چرخه با زاویه انحراف ۴٪ برای دو نمونه P1 و W1 نشان می دهد. مشاهده می شود در هر دو نمونه عمل پلاستیک شدن در تیر و دور از بر ستون و ناحیه چشمه اتصال اتفاق افتاده است. علت این رفتار مناسب در نمونه W1 یکی وجود ورق پیوستگی در ستون و دیگری عریض شدن تیر در محل اتصال به ستون است. برای این هندسه اگر هر کدام از این دو عامل حذف شود، چنین رفتار مطلوبی وجود نخواهد داشت. در اتصال



شکل (۱۵): زیرسازه دو طرفه (صلیبی شکل)

اتصال و شرایط مرزی

پیشنهادی P1 با آنکه عامل اول یعنی سخت کننده داخلی حذف شده است اما اتصال در گوشه ستون یعنی محل برخورد وجوه ستون که در صفحه خود سختی قابل توجهی دارند، برقرار شده و در این محل ادوات تقویتی نیز بکار رفته است.

مطابق ضوابط لرزه‌ای AISC [۱۲] اتصالی که تحت آزمایش چرخه‌ای تا پایان چرخه‌ای با زاویه انحراف طبقه ۴٪، ظرفیت خمشی آن در پایان چرخه بیش از ۸۰٪ ظرفیت خمشی تیر باشد، به عنوان اتصال مناسب در قاب

جدول (۳): شاخص PEEQ در نواحی جوش شده

نمونه	امتداد جوش بال تیر به ستون		امتداد جوش بال تیر به ورق‌های خارجی
	وسط	لبه‌ها	
W1	۱۱۱/۱	۱۵۱/۵	-
P1	۵۵/۶	۰/۰	۰/۰

۷-۳- ظرفیت چرخشی و مقاومت اتصال

شکل (۱۷) رفتار چرخه‌ای لنگر کل-زاویه انحراف طبقه را برای اتصالات نشان می‌دهد. لنگر کل برابر نیروی اعمالی به سر ستون ضرب در ارتفاع ستون است که برابر مجموع دو لنگر راست و چپ اعمالی به اتصال می‌باشد. معیار قطع بارگذاری رخداد کرنش معادل پلاستیک بحرانی در نواحی جوش شده و یا افت بیش از ۲۰٪ در مقاومت خمشی در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود در نمونه W1 به سبب رخداد کرنش پلاستیک بحرانی بارگذاری متوقف شده است اما اتصال پیشنهادی این گونه نبوده و در نتیجه ظرفیت چرخشی بیشتری دارد. اتصال پیشنهادی در اثر وقوع مدهای کمانشی دچار افت مقاومت می‌شود. اما با وجود این افت، در پایان چرخه‌ای با زاویه انحراف طبقه ۴٪، لنگر کل مقاوم از ظرفیت خمشی تیر بیشتر است. در شکل (۱۷) منظور از  $M_{pr}$  لنگر مفصل پلاستیک محتمل است و برابر  $1.1R_y Z_b F_y$  در نظر گرفته می‌شود. مطابق AISC [۱۲]،  $R_y$  برای اعضای ورقی با فولاد A572 Gr50 برابر ۱/۱ می‌باشد.  $Z_b$  مدول پلاستیک تیر در ناحیه مفصل پلاستیک است. مشاهده می‌شود برای هر دو نمونه، لنگر کل اتصال از مجموع لنگر مفاصل پلاستیک تیرهای طرفین بیشتر می‌باشد. بنابراین هر دو اتصال کاملاً مقاوم اند. علت این موضوع عریض تر بودن تیر در بر ستون می‌باشد.

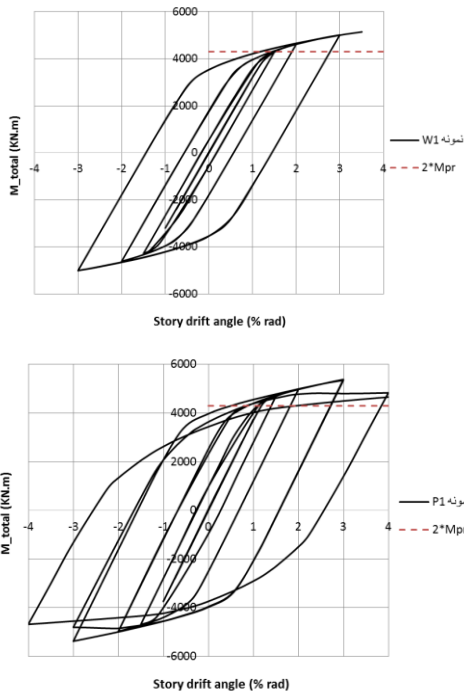
۷-۴- صلبیت اتصال

در شکل (۱۸) نمودار لنگر بر ستون بر حسب زاویه دوران نسبی تیر و ستون برای نمونه W1 و P1 رسم شده است. شیب این نمودار به عنوان صلبیت اتصال در نظر گرفته می‌شود. مشاهده می‌شود هر دو اتصال صلبیتی بیش از حد

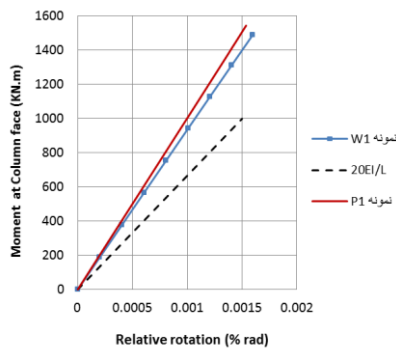
20EI/L (حداقل مقدار برای اتصال صلب در آیین نامه AISC [۱۲]) دارند. E، I و L به ترتیب مدول الاستیسیته، ممان اینرسی و طول تیر می‌باشد.

۷-۵- رفتار چشمه اتصال

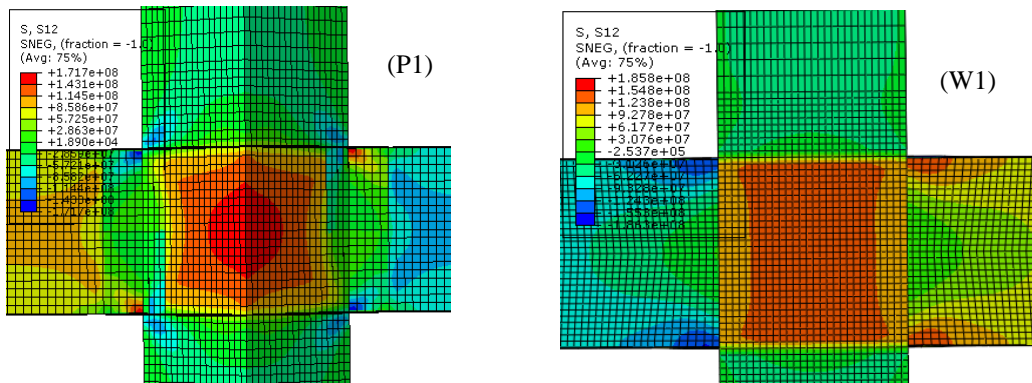
چشمه اتصال (panel zone) در اتصال پیشنهادی بخش آکاردئونی ستون در حد فاصل ورق‌های یقه‌ای می‌باشد. در حالی که در اتصالات متداول IBBC، جان ستون با اجزای مرزی ورق پیوستگی داخلی به عنوان چشمه اتصال عمل می‌کند. وضعیت چشمه اتصال نمونه W1 و P1 تحت بارگذاری یکنوا تا زاویه انحراف طبقه ۱٪ (رفتار خطی) و ۴٪ (رفتار غیرخطی) مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل (۱۹) در دو نمونه، تنش برشی در ناحیه وسط



شکل (۱۷): نمودار چرخه‌ای لنگر کل - زاویه انحراف طبقه



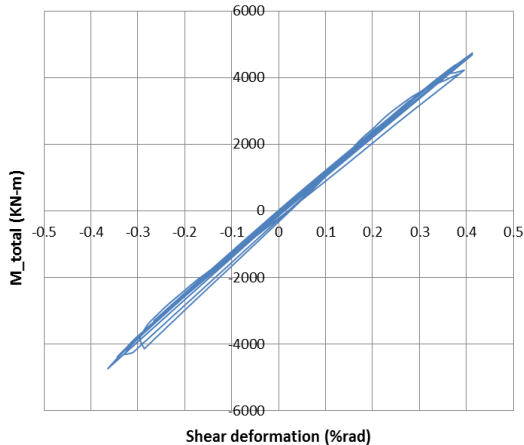
شکل (۱۸): صلبیت خمشی دو نمونه



شکل (۱۹) : وضعیت تنش دو نمونه در زاویه انحراف طبقه ۱٪

جدول (۴): مقایسه چشمه اتصال برای دو نمونه

نمونه	زاویه انحراف طبقه ۱٪		زاویه انحراف طبقه ۴٪	
	تنش برشی	نسبت تنش	تنش برشی	نسبت تنش
W1	۱۴۹ mpa	۰/۶۵	۲۳۳ mpa	۱/۰۱۷
P1	۱۵۸ mpa	۰/۶۸	۲۲۹ mpa	۰/۰۰۰۲۴



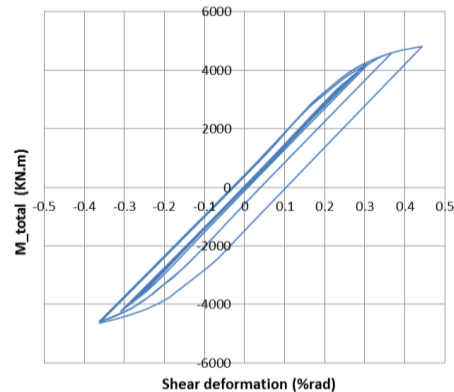
شکل (۲۱) : رفتار چرخه‌ای چشمه اتصال نمونه P1

مقایسه دو منحنی نشان می‌دهد، چشمه اتصال نمونه P1 عملکرد مناسبی داشته است. زیرا رفتار آن تقریباً خطی بوده و تغییر شکل برشی آن کمی کمتر از W1 می‌باشد.

#### نتیجه گیری

گسیختگی ترد در محل اتصال بال تیر I به وجه ستون قوطی مانع از دست یافتن تیر به حداکثر ظرفیت خمشی خود می‌شود و عملکرد لرزه‌ای قاب خمشی را به خطر می‌اندازد. برای جلوگیری از این امر، عریض نمودن بال تیر و تعبیه ورق پیوستگی داخلی ضروری است. در این تحقیق یک هندسه جدید اتصال IBBC بدون ورق پیوستگی داخلی بر اساس ساخت ستون درختی، ارائه شده

چشمه بیشینه است. در جدول (۴) این نتایج بیشینه ثبت شده است. نتایج نشان می‌دهد چشمه اتصال دو نمونه P1 و W1 وضعیت تقریباً یکسانی دارند. در ناحیه غیر خطی چشمه اتصال دو نمونه به اندازه اندکی پلاستیک شده‌اند. لذا به سبب اندک بودن کرنش معادل پلاستیک، ترکی در جوش میانی چشمه اتصال نمونه P1 رخ نخواهد داد. شکل (۲۰) و (۲۱) منحنی‌های چرخه‌ای لنگر کل چشمه اتصال در برابر تغییر شکل برشی آن حاصل از آزمایش چرخه‌ای تا زاویه انحراف طبقه ۴٪ رادیان به ترتیب برای نمونه W1 و P1 نشان می‌دهد. قابل ذکر است منظور از لنگر کل چشمه در زیرسازه صلیبی شکل، مجموع لنگرهای طرفین چشمه اتصال می‌باشد.



شکل (۲۰) : رفتار چرخه‌ای چشمه اتصال نمونه W1



- 9- Rupen Goswami, C. V. R. Murty, "Externally Reinforced Welded I-Beam-to-Box-Column Seismic Connection", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 136, No. 1, January 1, 2010.
- 10-Seyed Rasoul Mirghaderi, Shahabeddin Torabian, Farhad Keshavarzi, "I-beam to box-column connection by a vertical plate passing through the column", *Engineering Structures*(2010),doi:10.1016/j.engstruct.2010.03.002,
- 11-Astaneh-Asl A. "Seismic design of steel column-tree moment-resisting frames". *Steel tips*, Structural Steel Educational Council. 1997. pp. 40.
- 12-AISC, American Institute of Steel Construction, *Seismic Provision for Structural Steel Building*, Chicago, Illinois, March 9, 2005
- 13-Abaqus User Manual. Abaqus, Inc. 2010.
- 14-Federal Emergency Management Agency.2000. Recommended seismic design criteria for new steel moment frame building. Report No. FEMA-350.
- 15-Lu LW, Ricles JM, Mao C, Fisher JW, "Critical issues in achieving ductile behaviour of welded moment connections", *Journal of Constructional Steel Research* 2000;55(1-3):325-41,
- ۱۶- ترابیان، شهاب الدین؛ میرقادری، سید رسول. "بهبود جزئیات لرزه‌ای و روش ساخت اتصال تیر به ستون قوطی شکل"، رساله دکتری مهندسی عمران-زلزله، دانشگاه تهران، ۱۳۸۹

است. برای بررسی رخداد گسیختگی ترد در اتصال از معیار شاخص PEEQ استفاده شده است. نتایج تحلیل غیر خطی اجزای محدود نشان داد که اتصال تحت آزمایش چرخه‌ای، بارگذاری تا پایان چرخه با زاویه انحراف طبقه ۴٪ را تحمل نموده و ظرفیت خمشی آن در پایان چرخه، بیش از ظرفیت خمشی تیر می باشد. ضمناً این اتصال دارای صلبیت کافی است. بنابراین با توجه به ضوابط لرزه‌ای AISC [۱۲]، این اتصال، صلب، مقاوم و با ظرفیت چرخشی مناسب می باشد. ناحیه چشمه در اتصال پیشنهادی با آنکه هندسه خاصی دارد اما از لحاظ وضعیت تنش مشابه چشمه‌های معمول عمل نموده است. همچنین منحنی لنگر کل چشمه در برابر تغییر شکل برشی آن، خطی می باشد. لذا به نظر می رسد اتصال پیشنهادی عملکرد لرزه‌ای مطلوبی داشته و قابل اجرا در قاب خمشی ویژه می باشد. برای اثبات نهایی، لازم است آزمایش‌های تمام مقیاس بر روی این نوع اتصال انجام شود.

#### مراجع

- 1-Sherman DR. Designing with structural tubing. *Eng J*, AISC 1996;33(3):101\_9.
- 2-FEMA-355D. State of the art report on connection performance. Washington (DC): Federal Emergency Management Agency; 2000.
- 3-Shanmugam, N. E., Ting, L. C., and Lee, S. L. 1993. "Static behavior of i-beam to box-column connections with external stiffeners." *Struct Eng.*, 71(15), 269-275.
- 4-Nakashima M, Inoue K, Tada M. "Classification of damage to steel buildings observed in the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake". *Engineering Structures* 1998;20(4-6):271-81.
- 5-Cheng-Chih Chen, Chun-Chou Lin, Chieh-Hsiang Lin, 2006, "Ductile Moment Connection Used in Steel Column-Tree Moment-Resisting Frames", *Journal of Construction Steel Research* 62, 793-801
- 6-Cheng-Chih Chen, Chun-Chou Lin, Chia-Liang Tsai, 2004, "Evaluation of reinforced connections between steel beams and box columns", *Engineering Structures* 26, 1889-1904.
- 7-Tanaka N. "Evaluation of maximum strength and optimum haunch length of steel beam-end with horizontal haunch", *Eng Struct* 2003;25:229-39.
- 8-Seyed Rasoul Mirghaderi, Shahabeddin Torabian, Ali Imanpour, "Seismic performance of the Accordion-Web RBS connection", *Journal of Constructional Steel Research* 66 (2010) 277-288,