

## اثر سوراخ کاری تیر در بهبود عملکرد اتصال صلب تیر فولادی به ستون CFT دارای سخت کننده های خارجی

حسین صادقی مقدم<sup>۱\*</sup>، نادر فنائی<sup>۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد عمران-سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- استادیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

### خلاصه

اتصال تیر فولادی به ستون CFT با سخت کننده های خارجی T شکل از نظر سادگی اجرا، عدم نیاز به برش ستون در محل اتصال و عدم مزاحمت برای بتن ریزی ستون بهتر از دیگر اتصالات مشابه می باشد. در این اتصال نیروی بال تیر توسط المان های افقی و قائم سخت کننده به جان ستون CFT منتقل می شود. در این مقاله برای جلوگیری از تمرکز تنش در محل جوش های شیاری که موجب گسیختگی در لبه المان افقی سخت کننده و همچنین لبه اتصال المان قائم به گوشه گرد مقطع ستون HSS می شود، از روش سوراخ کاری بال تیر استفاده شده است که نسبت به روش مورد استفاده در تیرهای RBS (برشکاری با دستگاه CNC) از نظر اجرایی ساده تر می باشد. در این تحقیق جزئیات مختلف سوراخ کاری مانند تعداد، قطر و فاصله سوراخ ها مورد مطالعه قرار گرفته است و از روش تحلیل اجزاء محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS برای مدل سازی استفاده شده است. نتایج تحلیلی به دست آمده نشان می دهد که سوراخ کاری بال تیر موجب کاهش تمرکز تنش در محل جوش سخت کننده ها و همچنین محل اتصال تیر به ستون شده، شکل پذیری را افزایش داده و احتمال گسیختگی ترد در این اتصال را کاهش می دهد.

**کلمات کلیدی:** اتصال خمشی، ستون مرکب CFT، سخت کننده T شکل، سوراخ کاری تیر، مقطع کاهش یافته

### ۱. مقدمه

ترکیب دو مصالح فولاد و بتن منجر به ساخت سیستمی مؤثرتر از هر یک از آنها می شود. سیستم مرکب بتنی-فولادی امروزه در ستون ها، تیرها و دال های با دهانه های متوسط و بزرگ در ساختمان ها و همچنین در پایه و تیر پل ها استفاده می شوند. ستون های مرکب علاوه بر مزایای سازه ای دارای مزایای اجرایی مانند سرعت ساخت بالا نیز می باشند. در سیستم قاب خمشی این سازه ها، به علت وجود بتن درون مقطع ستون، ورق پیوستگی در اتصالات را نمی توان مانند سازه های فلزی متداول اجرا نمود. از طرفی ناحیه اتصال تیر به ستون در قاب های خمشی، مهم ترین بخش سازه را تشکیل می دهد که رفتار آن مستقیماً در رفتار کل سازه تأثیرگذار است.

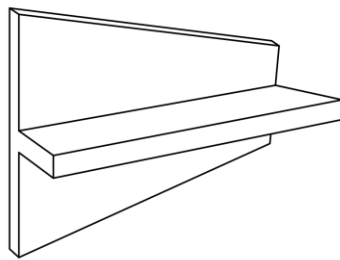
\* Hossein Sadeghi Moghadam  
Email: hsadeghi@mail.kntu.ac.ir

۷ و ۸ بهمن ماه ۹۵، تهران، ایران

آلوستاز و اشنایدر در تحقیقات خود نشان دادند که امکان استفاده از اتصال با جوش مستقیم تیر به ستون CFT در قاب های خمشی امکان پذیر نیست. زیرا اعوجاج جداره ستون می تواند مانع از استفاده از ظرفیت خمش پلاستیک تیر شود و همچنین باعث تنش ها و کرنش های بسیار بزرگ در جوش و بال ستون می شود [۱].

تاکنون جزئیات مختلفی برای اتصال تیر فولادی به ستون CFT بدون استفاده از ورق پیوستگی ارائه شده است. لی و همکارانش (۲۰۰۹) و شیت و همکارانش (۲۰۱۳) اتصال پیچی با صفحه انتهایی و بولت های عبوری از درون ستون را مورد بررسی قرار دادند [۲،۳]. میر قادری و همکارانش (۲۰۱۰، ۲۰۱۲) اتصال با ورق میان گذر قائم از ستون را پیشنهاد کرده و همچنین با مطالعه آزمایشگاهی و تحلیلی نشان دادند این اتصال می تواند به دوران بیش از ۶٪ دست یابد [۴،۵]. کین و همکارانش (۲۰۱۴) اتصالات با دیافراگم داخلی و خارجی را مطالعه نمودند [۶]. اتصالات با دیافراگم داخلی با وجود رفتار و شکل پذیری مناسبی که دارند، به علت مزاحمت برای عبور بتن در ستون های CFT کمتر مورد توجه قرار گرفته اند.

به دلیل عدم مزاحمت برای عبور بتن، سادگی اجرایی و رفتار مناسبی که اتصالات با دیافراگم خارجی و سخت کننده های خارجی دارند، در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته اند. در این مقاله نوعی از سخت کننده های خارجی به صورت T شکل مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱ این سخت کننده را نشان می دهد. این سخت کننده ها از دو جزء افقی و قائم تشکیل شده اند که وظیفه انتقال نیرو از تیر به ستون را دارا می باشند. در حقیقت عملکرد المان افقی به صورت برشی و عملکرد المان قائم به صورت کششی فشاری می باشد.



شکل ۱- سخت کننده T شکل

شانموگام و همکارانش (۱۹۹۱) به منظور مطالعه رفتار اتصالات تیر I شکل به ستون باکس توخالی با سخت کننده های خارجی T شکل و نبشی، ۷ نمونه تمام مقیاس را تحت اثر بارگذاری چرخه ای مورد آزمایش قرار دادند. رفتار اتصالات مناسب و حلقه های هیستریزیس پایدار گزارش شده است. در برخی از نمونه ها کماتش جان ستون مشاهده شده که خلاف قاعده تیر ضعیف-ستون قوی می باشد [۷]. تینگ و لی سخت کننده های خارجی مختلف را با نسبت های عرض تیر به عرض ستون متفاوت مورد بررسی قرار دادند. همچنین اثر طول المان افقی و ارتفاع المان قائم سخت کننده را مطالعه کردند [۸]. کنگ و همکارانش (۲۰۰۱) علاوه بر سخت کننده های T شکل، از المان های عبوری از ستون استفاده کردند و نشان دادند با وجود سخت کننده های T شکل، اثر پینچینگ از منحنی های هیستریزیس حذف شده و رفتار اتصال بهبود می یابد. همچنین تمرکز تنش در گوشه های گرد ستون با مقطع HSS مشاهده گردید که منجر به شکست ترد در این ناحیه شده است [۹].

شین و همکارانش (۲۰۰۴) به بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی اتصال تیر فولادی به ستون CFT با سخت کننده های T شکل پرداختند و مودهای گسیختگی را برای نمونه های مورد آزمایش تشریح نمودند. مقطع فولادی در این مطالعه به صورت چهار ورق جوش شده استفاده شده است. در این مطالعه تمرکز تنش در المان های سخت کننده گزارش شده است [۱۰]. کیم و همکارانش (۲۰۰۸) با استفاده از RBS کردن تیر، هدف کاهش تمرکز تنش در سخت کننده ها و گوشه های ستون HSS را دنبال نمودند [۱۱]. کنگ و همکارانش (۲۰۱۳) اثر مشخصات هندسی المان های قائم و افقی سخت کننده

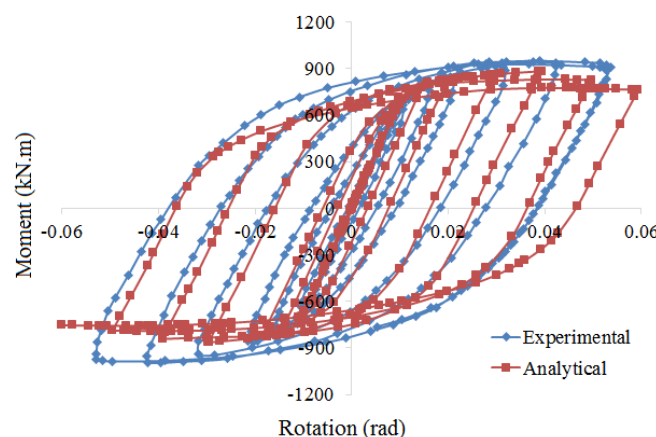
T شکل را مطالعه نموده و معادلات طراحی را بهبود بخشیدند. همچنین در این مطالعه به بررسی اثر ضخامت جداره فولادی ستون CFT پرداخته شده است [۱۲].

در این مطالعه اثر سوراخ کاری بر اتصال تیر فولادی به ستون CFT جهت کاهش تمرکز تنش در محل جوش های شیاری اتصال و دور کردن مفصل پلاستیک از ستون بررسی شده است. سوراخ کاری بال تیر از روش های کاهش مقطع تیر مانند RBS می باشد که نسبت به آن موجب گسترش و افزایش طول مفصل پلاستیک در تیر شده و منجر به استفاده بیشتر از ظرفیت تیر می گردد. در این مطالعه همچنین رفتار سخت کننده های خارجی T شکل تشریح شده و جزئیات مختلف سوراخ کاری تیر بر روی این اتصال بررسی شده است. نمودارهای کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) و شاخص گسیختگی RI نیز به منظور بررسی دقیق تر محل جوش های شیاری در مدل اجزاء محدود گزارش شده است.

## ۲. مدل سازی و صحت سنجی

به منظور بررسی اثر کاهش مقطع تیر با استفاده از سوراخ کاری در کاهش تنش ها در اتصال تیر فولادی به ستون CFT با سخت کننده های T شکل در این مطالعه از مدل سازی اجزاء محدود در نرم افزار ABAQUS ۶,۱۳ استفاده شده است. برای مدل سازی تیر، ستون و سخت کننده ها از المان های C3D8R و C3D20R استفاده شده است. المان های C3D20R در بخش های پیچیده تر مدل و برای دقت بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. همه المان های فولادی و بتنی به صورت Solid مدل شده اند. در نواحی نزدیک اتصال از مش بندی ریزتری نسبت به نواحی دورتر استفاده شده است. همچنین در تحلیل اجزاء محدود معیار تسلیم فون مایسز در نظر گرفته شده است.

تعریف رفتار سطح مشترک بین بتن و فولاد از اهمیت بالایی در این مدل سازی برخوردار است. بدین منظور در جهت نرمال از تماس سخت و در جهت مماسی از مدل اصطکاکی استفاده شده است. در این مطالعه از اندرکنش به صورت تماس و جدایش استفاده شده، به طوری که در قسمت بال فشاری، بتن مقاومت می کند و در قسمت بال کششی امکان جدایش بال مقطع فولادی ستون CFT از بتن وجود دارد. همچنین امکان نفوذ بتن و فولاد در یکدیگر وجود ندارد. در مدل سازی بتن از بتن آسیب دیده پلاستیک در نرم افزار استفاده شده است. این مدل برای شرایط بارگذاری چرخه ای مناسب می باشد.



شکل ۲- مقایسه منحنی هیستریزس تحلیلی و آزمایشگاهی نمونه TSD۱۲۰ شین و همکارانش (۲۰۰۸)

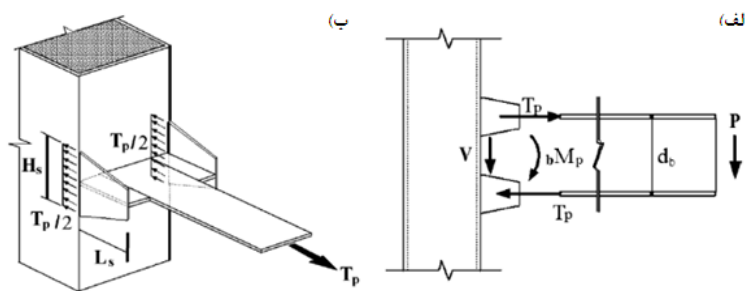
به منظور اطمینان از صحت نتایج تحلیل، مدل اجزاء محدود در این مطالعه با پاسخ چرخه ای اتصال نمونه TSD۱۲۰ که توسط شین و همکارانش (۲۰۰۸) آزمایش شده صحت سنجی گردیده است. شکل ۲ مقایسه منحنی هیستریزس نمونه

آزمایشگاهی و تحلیلی را نشان می دهد. مشخصات مصالح اندازه گیری شده و گزارش شده توسط شین و همکارانش برای صحت سنجی نمونه ها مورد استفاده قرار گرفته است. همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می شود تطابق خوبی بین نمونه تحلیلی و آزمایشگاهی وجود دارد.

### ۳. طراحی نمونه ها

در این مطالعه ابعاد تیر و ستون ثابت در نظر گرفته شده است. ضخامت و پهنای بال تیر به ترتیب ۱۵ و ۱۸۰ میلی متر است. ضخامت و ارتفاع جان نیز به ترتیب ۸ و ۳۰۰ میلی متر می باشد. ستون به صورت مقطع توخالی قوطی HSS مربعی می باشد که عرض و ضخامت مقطع آن به ترتیب ۳۰۰ و ۱۰ میلی متر است. طول تیر ۲/۵ متر و ارتفاع ستون ۳ متر در نظر گرفته شده است. اتصال بالا و پایین ستون به صورت مفصلی در نظر گرفته شده و از حرکت جانبی تیر توسط مهار جانبی در وسط تیر جلوگیری شده است. سخت کننده های خارجی T شکل برای انتقال نیرو از تیر به ستون و مرتفع کردن نیاز به ورق پیوستگی در نظر گرفته شده و بر اساس مطالعات انجام شده، طراحی شده است. ابعاد سخت کننده های T شکل در تمام نمونه ها ثابت می باشد. نمونه های TSDF نمونه های اتصال پیشنهادی است که در آن ها به جای استفاده از RBS برای کاهش مقطع تیر از دریل کردن بال تیر در محل مفصل پلاستیک استفاده شده است.

برای اتصالات با سخت کننده های T شکل فرضیات زیر در نظر گرفته شده اند. لنگر منتقل شده در اتصال باید برابر با ظرفیت لنگر پلاستیک تیر باشد و این لنگر توسط یک جفت نیروی  $T_p$  در بال های تیر تحمل می شود. بنابراین یک نیروی  $\frac{T_p}{2}$  به یک سخت کننده T شکل اعمال می شود و باید با یک سخت کننده افقی و قائم تحمل گردد. نیروی برشی اتصال نیز می تواند توسط جوش جان و با روش طراحی معمولی تحمل شود. شکل ۳ این مکانیسم انتقال نیرو در اتصال را نشان می دهد.



شکل ۳- مکانیسم انتقال نیرو در سخت کننده های T شکل

در روش طراحی لی و همکارانش [۱۳] ظرفیت برش صفحه گسیختگی  $\frac{T_p}{2}$  به عنوان یک مجموع از ظرفیت برش جان سخت کننده و ظرفیت برش دیواره ستون فرض شده است، بدین معنی که طول و ارتفاع سخت کننده پارامترهای طراحی وابسته می باشند. بنابراین، ارتفاع سخت کننده قائم با استفاده از نیروی به دست آمده از تفریق ظرفیت برش سخت کننده افقی از نیروی  $\frac{T_p}{2}$  به دست می آید. با این حال، مطالعات دیگر [۱۴] نشان داد که نیروی  $\frac{T_p}{2}$  به صورت متوالی توسط سخت کننده قائم و افقی تحمل می گردد. بدین منظور معیار طراحی ساده برای اتصالات با سخت کننده T پیشنهاد شده است.

$$T_p = \frac{M_{pb}}{d_b} \quad (1)$$

$$Mode - I : \frac{T_p}{2} = P_1 = t_h \cdot L_s \cdot 0.6 F_{yh} \quad (2)$$

$$Mode - II : \frac{T_p}{2} = P_2 = t_v \cdot H_s \cdot F_{yv} \quad (3)$$

$$Mode - III : T_p = P_3 = t_f \cdot B_f \cdot F_{yf} \quad (4)$$

در این معادلات  $t_h$ ،  $t_v$  و  $t_f$  به ترتیب ضخامت المان افقی و ضخامت المان قائم سخت کننده T شکل و ضخامت بال تیر می باشند.  $L_s$  طول المان افقی سخت کننده،  $H_s$  ارتفاع المان قائم سخت کننده و  $F_{yh}$ ،  $F_{yv}$  و  $F_{yf}$  به ترتیب مقاومت تسلیم المان افقی و قائم سخت کننده و مقاومت تسلیم بال تیر می باشند. اگر نسبت مقاومت سخت کننده افقی به مقاومت بال تیر کمتر از ۱۰۰٪ باشد، مقاومت سخت کننده برای تحمل در برابر مقاومت تیر کافی نخواهد بود که ممکن است منجر به گسیختگی مود ۱ (گسیختگی در المان افقی سخت کننده) شود. البته اگر این نسبت خیلی بزرگتر از ۱۰۰٪ باشد، گسیختگی ناگهانی ناشی از تمرکز تنش در جوش ممکن است رخ دهد. همچنین آزمایشی که توسط مون و همکارانش [۱۴] انجام شده نشان داده است که گسیختگی جوش بین سخت کننده افقی و بال تیر منجر به گسیختگی اتصال می شود.

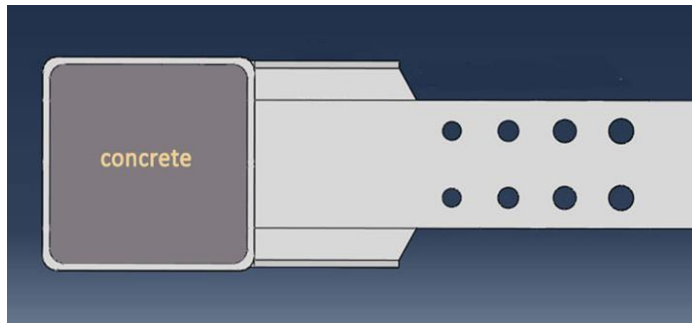
جدول ۱- مشخصات سخت کننده های خارجی (میلی متر)

سخت کننده	طول	عرض / ارتفاع	ضخامت
قائم	۲۳۰	۱۶۰	۱۰
افقی	۲۳۰	۴۵	۱۵

بر اساس معادلات (۱) تا (۴)، سخت کننده های افقی و قائم طراحی شده اند. مشخصات سخت کننده ها در جدول ۱ قابل مشاهده است. همچنین در حالت کلی نیز برای طراحی اتصال، کنترل های آیین نامه ای مانند کنترل قاعده تیر ضعیف- ستون قوی و کنترل چشمه اتصال انجام شده است. در محل اتصال بال تیر به سخت کننده افقی نیز از تغییر مقطع تدریجی استفاده شده است و بدین منظور سخت کننده افقی و قائم به صورت دوزنقه ای در نظر گرفته شده است.

#### ۴. سوراخ کاری بال تیر

پس از زلزله نورث ریج دو راهکار برای دستیابی به سطوح بالای شکل پذیری و عملکرد قابل اطمینان اتصال پیشنهاد گردید که عبارتند از تقویت اتصال و ضعیف کردن مقطع تیر نسبت به اتصال که در واقع هدف اصلی در هر دو روش، جلوگیری از تشکیل مفصل پلاستیک در بر ستون می باشد. با تقویت اتصال نسبت به سطح مقطع تیر، هدف دور کردن مفصل پلاستیک و کرنش های غیر الاستیک از بر ستون و انتقال آن ها به درون تیر دنبال می شود اما این عمل، مستلزم هزینه بیشتر در اتصال و جوشکاری بیشتر می باشد. از طرفی افزایش مقاومت اتصال نیازمند طراحی چشمه اتصال قوی تر می گردد.



شکل ۴- سوراخ کاری بر روی بال های تیر با سخت کننده T شکل

وتر و همکارانش [۱۵] سوراخ کاری تیر با قطر متغیر را مطالعه نمودند و نشان دادند که افزایش قطر سوراخ ها با دور شدن از اتصال بسیار مؤثر می باشد. فنائی و همکارانش نیز در مطالعات خود [۱۶، ۱۷] نیز پیکربندی های مختلف سوراخ کاری در بال تیر را مطالعه کردند. مطالعات انجام شده نشان داده است که سوراخ کاری بال تیر می تواند عملکرد لرزه ای اتصال را بهبود دهد. شکل ۴ پیکربندی کلی سوراخ ها در یکی از نمونه های تحلیلی این مطالعه را نشان می دهد.

جدول ۲- مشخصات نمونه های تحلیلی (ابعاد به میلی متر)

نمونه	تعداد سوراخ	قطر کوچکترین سوراخ ( $D_{min}$ )	قطر بزرگترین سوراخ ( $D_{max}$ )	فاصله اولین و آخرین سوراخ ( $b$ )	فاصله مرکز به مرکز سوراخ ها ( $L_d$ )	$\frac{D_{min}}{b_f}$	$\frac{D_{max}}{b_f}$	$\frac{L_d}{d_b}$
TSDF-۱	۳	۱۸	۲۷	۲۱۰	۱۰۵	۰/۱	۰/۱۵	۰/۳۲
TSDF-۲	۳	۲۷	۳۶	۲۱۰	۱۰۵	۰/۱۵	۰/۲	۰/۳۲
TSDF-۳	۳	۳۳	۴۲	۲۱۰	۱۰۵	۰/۱۸	۰/۲۳	۰/۳۲
TSDF-۴	۴	۱۸	۲۷	۲۱۰	۷۰	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲۱
TSDF-۵	۴	۲۷	۳۶	۲۱۰	۷۰	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۱
TSDF-۶	۴	۳۳	۴۲	۲۱۰	۷۰	۰/۱۸	۰/۲۳	۰/۲۱
TSDF-۷	۳	۱۸	۲۷	۲۴۰	۱۲۰	۰/۱	۰/۱۵	۰/۳۶
TSDF-۸	۳	۲۷	۳۶	۲۴۰	۱۲۰	۰/۱۵	۰/۲	۰/۳۶
TSDF-۹	۳	۳۳	۴۲	۲۴۰	۱۲۰	۰/۱۸	۰/۲۳	۰/۳۶
TSDF-۱۰	۴	۱۸	۲۷	۲۴۰	۸۰	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲۴
TSDF-۱۱	۴	۲۷	۳۶	۲۴۰	۸۰	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۴
TSDF-۱۲	۴	۳۳	۴۲	۲۴۰	۸۰	۰/۱۸	۰/۲۳	۰/۲۴
TSDF-۱۳	۳	۱۸	۲۷	۲۷۰	۱۳۵	۰/۱	۰/۱۵	۰/۴۱
TSDF-۱۴	۳	۲۷	۳۶	۲۷۰	۱۳۵	۰/۱۵	۰/۲	۰/۴۱
TSDF-۱۵	۳	۳۳	۴۲	۲۷۰	۱۳۵	۰/۱۸	۰/۲۳	۰/۴۱
TSDF-۱۶	۴	۱۸	۲۷	۲۷۰	۹۰	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲۸
TSDF-۱۷	۴	۲۷	۳۶	۲۷۰	۹۰	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۸
TSDF-۱۸	۴	۳۳	۴۲	۲۷۰	۹۰	۰/۱۸	۰/۲۳	۰/۲۸

در این مطالعه به منظور کاهش تمرکز تنش در محل جوش های شیارهای اتصال سخت کننده به تیر و ستون و همچنین دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون از روش سوراخ کاری بال تیر استفاده شده است. در این مطالعه، ۱۹ نمونه انتخاب شده که نمونه TSF بدون سوراخ کاری می باشد. مشخصات ۱۸ نمونه دیگر در جدول ۲ قابل مشاهده می باشد. در این نمونه ها متغیرهای اندازه سوراخ ها، تعداد سوراخ ها و فاصله سوراخ ها مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس مطالعات انجام شده [۱۵] به منظور بسط مفصل پلاستیک، سوراخ ها باید به گونه ای طرح شوند تا همزمان به لنگر پلاستیک در مقطع برسند. برای این منظور از معادله ۵ استفاده شده است:

$$\frac{M_1}{Z_1} = \frac{M_2}{Z_2} = \frac{M_3}{Z_3} = \frac{M_i}{Z_i} \quad (5)$$

در این رابطه  $M_i$  ها و  $Z_i$  ها به ترتیب لنگر خمشی و مدول مقطع پلاستیک در محل سوراخ  $i$  م روی بال تیر هستند. بر اساس رابطه ۵ و سعی و خطا، قطر سوراخ ها برای نمونه های تحلیلی به دست آمده است. جدول ۳ قطر سوراخ ها برای هر نمونه را نشان می دهد.

جدول ۳- مشخصات سوراخ کاری تیر در نمونه های تحلیلی

نمونه ها	قطر سوراخ ها (mm)
TSDF-۱، TSDF-۷، TSDF-۱۳	۱۸-۲۳-۲۷
TSDF-۲، TSDF-۸، TSDF-۱۴	۲۷-۳۱-۳۶
TSDF-۳، TSDF-۹، TSDF-۱۵	۳۳-۳۸-۴۲
TSDF-۴، TSDF-۱۰، TSDF-۱۶	۱۸-۲۲-۲۵-۲۷
TSDF-۵، TSDF-۱۱، TSDF-۱۷	۲۷-۳۰-۳۳-۳۶
TSDF-۶، TSDF-۱۲، TSDF-۱۸	۳۳-۳۶-۳۹-۴۲

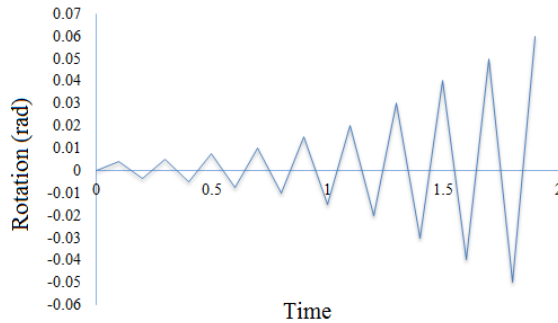
## ۵. مشخصات مصالح و بارگذاری

در مدل سازی نمونه ها رفتار غیرخطی مصالح و المان ها در نظر گرفته شده است. در مدل سازی فولاد سخت شدگی سینماتیکی در نظر گرفته شده است. قانون سخت شدگی ایزوتروپیک برای تحلیل های بار افزون و قانون سخت شدگی سینماتیکی برای تحلیل های چرخه ای استفاده می شود تا اثر باوشینگر در نظر گرفته شود.

جدول ۴- مشخصات مصالح بر اساس آزمون کشش

	ضخامت (mm)	نوع فولاد مصرفی	Fy (MPa)	Fu (MPa)	Elongation (%)
جان تیر	۸	ST۳۷	۳۰۳	۳۸۲	۳۱
بال تیر و سخت کننده افقی	۱۵	ST۳۷	۲۴۴	۳۸۴	۳۵
سخت کننده قائم	۱۰	ST۳۷	۲۹۵	۴۱۵	۳۳
جداره ستون CFT	۱۰	ST۵۲	۴۶۹	۵۴۹	۲۵

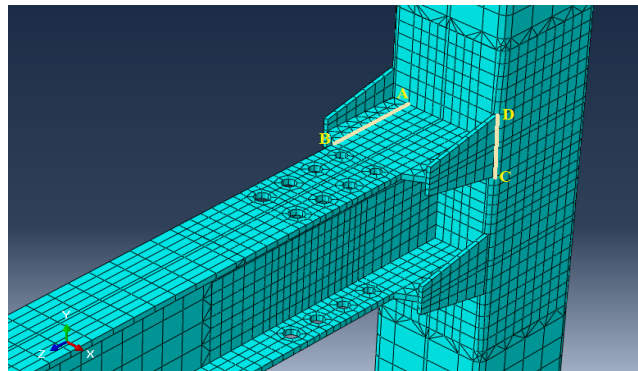
پروتکل بارگذاری مورداستفاده در این تحلیل در شکل ۵ قابل مشاهده می باشد. بارگذاری به صورت چرخه ای و بر اساس شرایط و پروتکل SAC اعمال شده است. مشخصات مصالح به کاررفته در تحلیل در جدول ۴ خلاصه شده است. با توجه به این که این مقاله بخشی از یک برنامه آزمایشگاهی می باشد، مشخصات مصالح بر اساس آزمون کشش ورق های فولادی مورداستفاده برای ساخت نمونه های آزمایشگاهی به دست آمده است.



شکل ۵- بارگذاری چرخه ای استفاده شده در تحلیل بر اساس پروتکل SAC

## ۶. نتایج تحلیل اجزاء محدود

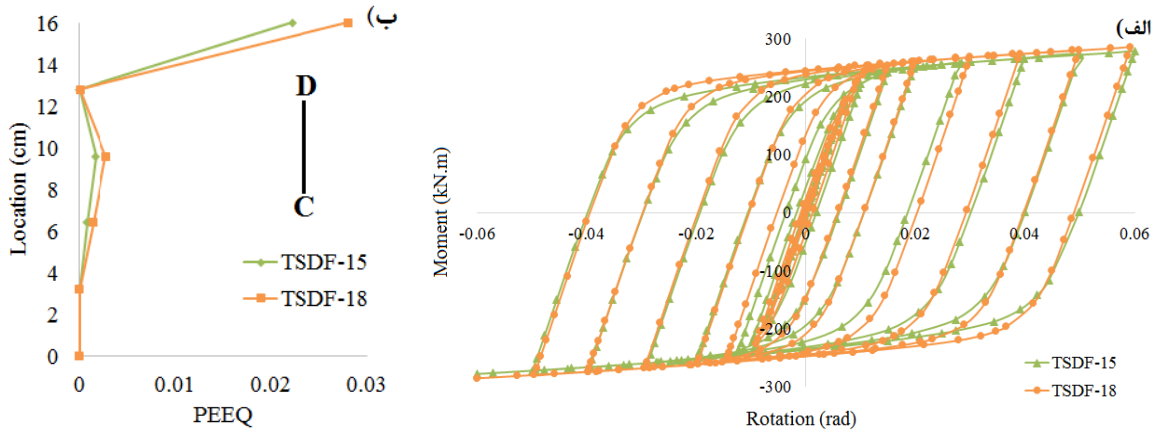
نمونه های TSDF-۱ تا TSDF-۱۸ و نیز نمونه TSF در این مطالعه، با استفاده از تحلیل اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفته است. حلقه های هیستریزیس تمامی نمونه ها پایدار بوده و رفتار مناسبی را نشان می دهد. به منظور بررسی تأثیر سوراخ کاری بر تمرکز تنش، میزان کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) و تنش فون مایسز در محل جوش شیاری المان افقی سخت کننده به تیر و همچنین محل اتصال المان قائم سخت کننده به ستون، خطوط AB و CD مورداستفاده قرار گرفته است. این خطوط بر روی اتصال و در شکل ۶ مشخص شده است.



شکل ۶- خطوط AB و CD (محل جوش های شیاری سخت کننده به تیر و ستون)

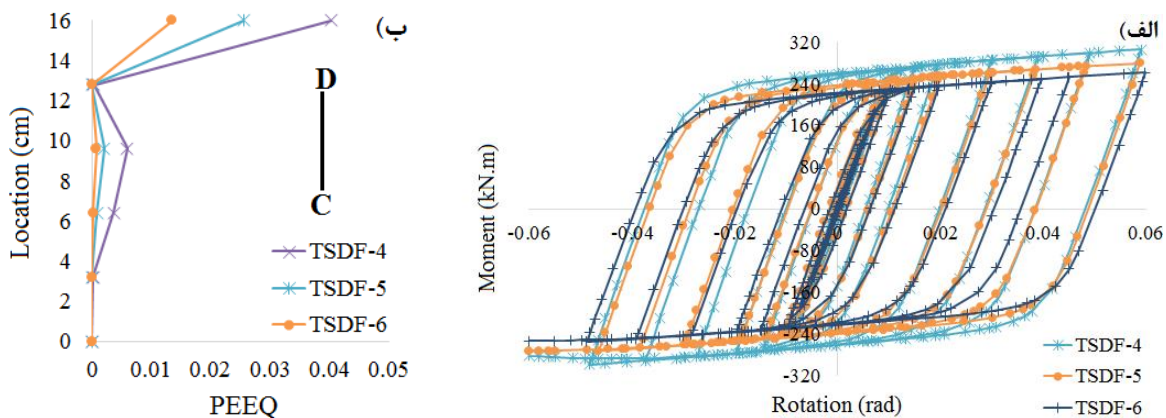
تعداد سوراخ ها در نمونه ها، ۳ و ۴ سوراخ در نظر گرفته شده است. در حالت کلی، ظرفیت لنگر در نمونه های با ۴ سوراخ کاهش بیشتری نسبت به نمونه های با ۳ سوراخ داشته است. اما در نمونه های TSDF-۱۷ و TSDF-۱۸ با ۴ سوراخ ظرفیت لنگر بیشتر از نمونه های مشابه TSDF-۱۴ و TSDF-۱۵ با ۳ سوراخ می باشد. با افزایش تعداد سوراخ ها، کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در محل جوش های شیاری سخت کننده به تیر و ستون کاهش می یابد. اما در نمونه های TSDF-۱۷ و TSDF-۱۸ با ۴ سوراخ، نسبت به نمونه های مشابه TSDF-۱۴ و TSDF-۱۵ با ۳ سوراخ مقدار PEEQ افزایش یافته است. شکل ۷ مقایسه بین نمونه های TSDF-۱۵ و TSDF-۱۸ را نشان می دهد.





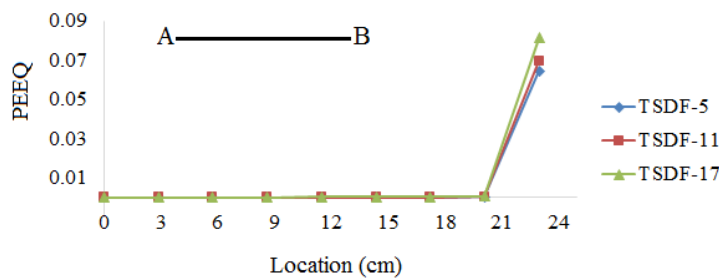
شکل ۷- اثر تعداد سوراخ‌های بال تیر الف) نمودار هیستریزیس نمونه‌های TSDF-۱۵ و TSDF-۱۸ ب) نمودار کرنش پلاستیک معادل در محل اتصال المان قائم سخت‌کننده به ستون

در این مطالعه قطر سوراخ‌ها به صورت متغیر بوده و در تمام نمونه‌ها، قطر سوراخ‌ها با دور شدن از ستون افزایش می‌یابد. به علت این‌که با دور شدن از ستون، میزان لنگر کاهش می‌یابد، در این مطالعه به منظور دور کردن مفصل پلاستیک از ستون و افزایش طول مفصل پلاستیک و استفاده بیشتر از ظرفیت تیر، قطر سوراخ‌ها با دور شدن از ستون افزایش می‌یابد، به طوری که نسبت لنگر به اساس مقطع پلاستیک در مقطع گذرنده از مرکز سوراخ‌ها با هم برابر گردد. این یکسان‌سازی با چند سعی و خطا در رابطه ۵ محقق می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت  $\frac{D_{max}}{b_f}$ ، ظرفیت لنگر تیر کاهش می‌یابد اما از طرف دیگر میزان کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) و تنش فون مایسز در محل جوش‌های شیاری سخت‌کننده به تیر و ستون، کاهش می‌یابد. شکل ۸ مقایسه بین سه نمونه تحلیلی با قطر سوراخ‌های متفاوت را نشان می‌دهد.



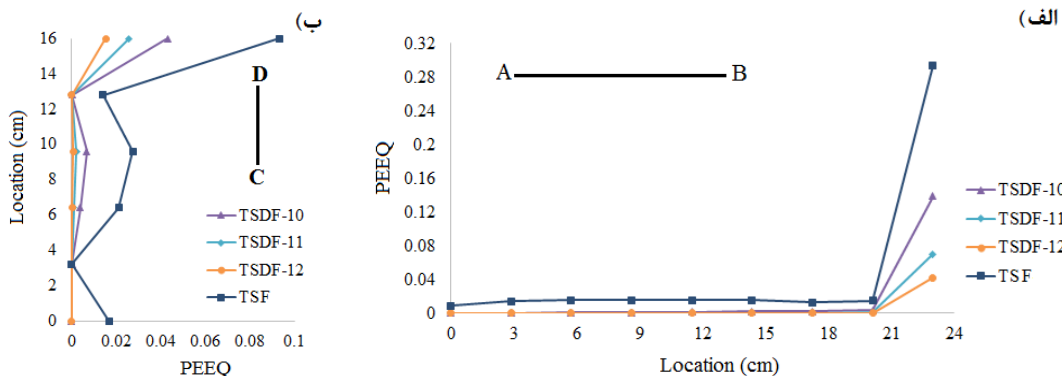
شکل ۸- اثر قطر سوراخ‌های بال تیر الف) نمودار هیستریزیس نمونه‌های TSDF-۴، TSDF-۵ و TSDF-۶ ب) نمودار کرنش پلاستیک معادل در محل اتصال المان قائم سخت‌کننده به ستون

در حالت کلی، تغییرات نسبت  $\frac{L_d}{d_b}$  در رفتار کلی اتصال و منحنی هیستریزس تأثیر قابل توجهی ندارد. مقدار PEEQ در محل جوش های شیاری سخت کننده به تیر و ستون، با افزایش نسبت  $\frac{L_d}{d_b}$ ، افزایش می یابد. باین حال، در نمونه های TSDF-۱۷ و TSDF-۱۸ با فاصله سوراخ بزرگتر نسبت به نمونه های TSDF-۱۴ و TSDF-۱۵ تغییر رفتاری مشاهده گردید که در بخش ۴-۱ شرح داده شد. شکل ۹ مقایسه بین سه نمونه تحلیلی بافاصله سوراخ های متفاوت را نشان می دهد. همان گونه که در شکل ۹ مشاهده می شود، مقدار PEEQ از بر ستون یعنی نقطه A تا فاصله حدود ۲۰ سانتی متر، ناچیز بوده و پس از آن و در مجاورت محل تغییر مقطع بال تیر مقدار قابل توجهی را نشان می دهد و در نقطه B به بیشترین مقدار خود می رسد.



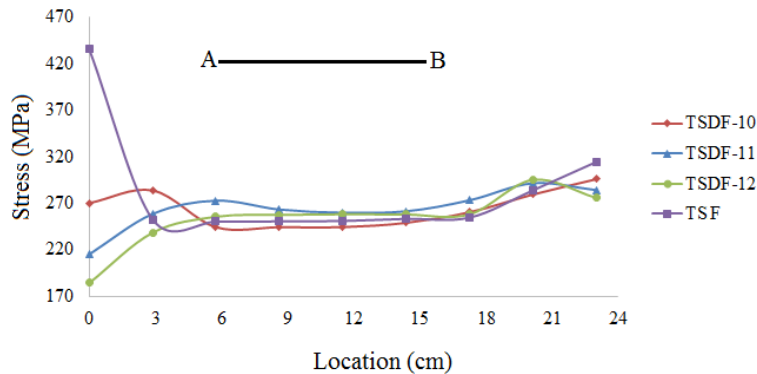
شکل ۹- نمودار مقادیر PEEQ در محل جوش شیاری المان افقی سخت کننده به تیر (خط AB)

شکل ۱۰ نمودارهای میزان کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در محل اتصال سخت کننده به تیر و ستون را برای نمونه های TSDF-۱۰، TSDF-۱۱، TSDF-۱۲، TSF و نشان می دهد. نمونه TSF بدون سوراخ کاری انتخاب شده و سخت کننده ها در این نمونه، مشابه سخت کننده ها در سایر نمونه ها می باشد. همان گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می شود مقادیر PEEQ در محل جوش شیاری المان افقی و قائم سخت کننده به تیر و ستون، کاهش قابل ملاحظه ای داشته است. این حال، مقدار PEEQ در نقطه B نسبت به سایر نقاط بیشتر می باشد. همچنین با توجه به شکل ۱۰ با افزایش نسبت  $\frac{D_{max}}{b_f}$ ، مقدار PEEQ در محل اتصال سخت کننده به تیر و ستون کاهش می یابد.

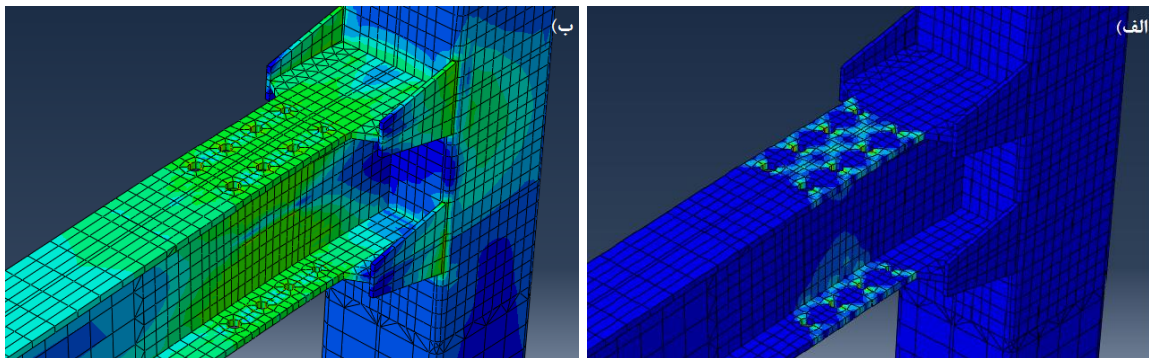


شکل ۱۰- کرنش پلاستیک معادل الف) محل اتصال المان افقی سخت کننده به تیر ب) محل اتصال المان قائم به ستون

شکل ۱۱ نمودار تنش فون مایسز در محل اتصال المان افقی سخت کننده به بال تیر برای نمونه های ۱۰-TSDF، ۱۱-TSDF، ۱۲-TSDF و TSF را نشان می دهد. همان گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، سوراخ کاری بال تیر باعث یکنواخت تر شدن تنش در محل جوش شیاری المان افقی سخت کننده به بال تیر می شود. همچنین سوراخ کاری در بال تیر، تنش را در بر ستون، به میزان قابل توجهی کاهش می دهد. شکل ۱۲ نیز توزیع تنش و کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) را در نمونه ۱۰-TSDF نشان می دهد.

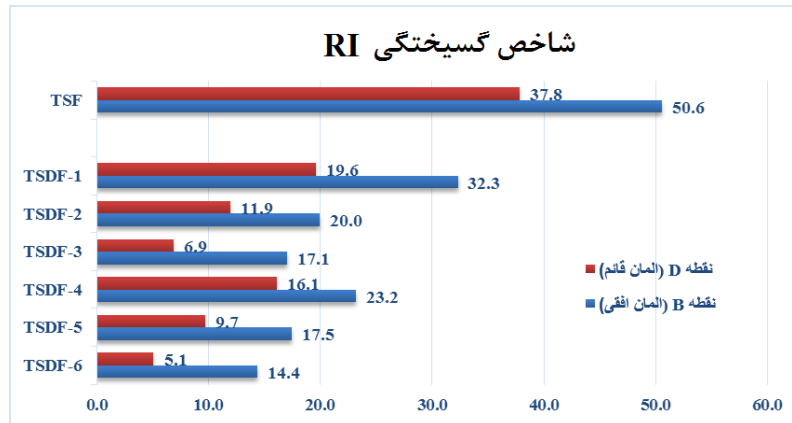


شکل ۱۱- تنش فون مایسز در محل اتصال المان افقی سخت کننده به بال تیر



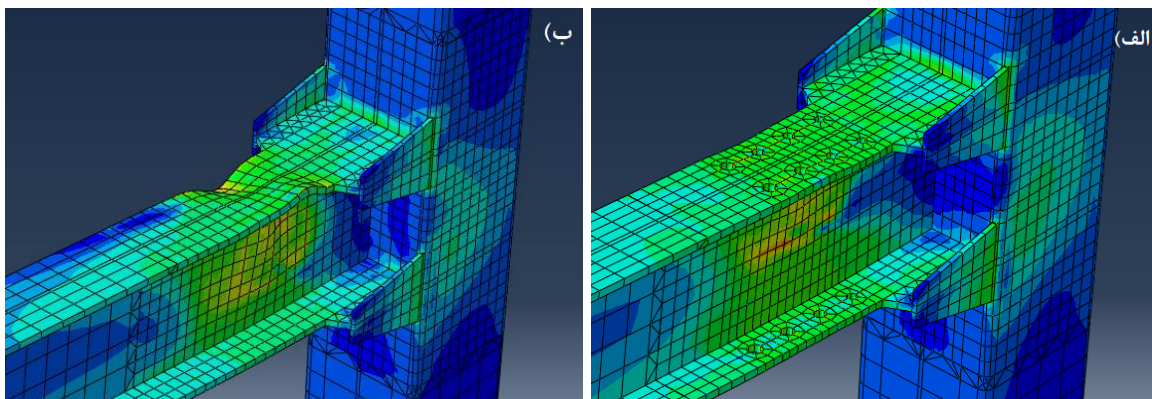
شکل ۱۲- نمونه ۱۰-TSDF در دوران ۰/۰۵ رادیان الف) توزیع کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) ب) توزیع تنش فون مایسز

تحلیل اجزاء محدود نشان داد که نقاط B و D مشخص شده در شکل ۶ تمرکز تنش بالایی داشته و نقاط احتمالی شروع ترک می باشند. به منظور بررسی دقیق تر تمرکز تنش نقاط B و D در لبه المان افقی و قائم سخت کننده، شاخص گسیختگی RI در این نقاط مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۳ مقادیر شاخص گسیختگی برای نمونه های ۱-TSDF تا ۶-TSDF و همچنین نمونه TSF که بدون سوراخ کاری می باشد را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می گردد شاخص گسیختگی در این نقاط با استفاده از سوراخ کاری در برخی از نمونه ها بیش از ۵۰٪ کاهش یافته است. بنابراین احتمال گسیختگی ترد و وقوع ترک در محل جوش های شیاری سخت کننده به تیر و ستون کاهش می یابد. با این حال، با توجه به این که با افزایش قطر سوراخ ظرفیت لنگر کاهش می یابد، نمونه های ۲-TSDF و ۵-TSDF عملکرد کلی مناسب تری دارند.



شکل ۱۳- شاخص گسیختگی در لبه المان افقی و قائم سخت کننده T شکل

نتایج تحلیل و مقایسه نمونه‌های سوراخ کاری شده با نمونه بدون سوراخ کاری، نشان می‌دهد که ایجاد سوراخ کاری با طراحی مناسب می‌تواند باعث به تأخیر افتادن کمانش موضعی در بال تیر شده و در نتیجه منجر به استفاده بیشتری از ظرفیت پلاستیک تیر گردد. شکل ۱۴ مقایسه بین نمونه ۱۰-TSDF و TSF را در چرخش اتصال ۰/۰۶ رادیان نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- توزیع تنش و تغییر شکل بال در دوران ۰/۰۶ رادیان (الف) نمونه ۱۰-TSDF (ب) نمونه TSF

## ۷. نتیجه گیری

در این مطالعه تأثیر سوراخ کاری بال تیر بر کاهش تمرکز تنش در لبه اتصال المان افقی و قائم سخت کننده T شکل به تیر و ستون مورد بررسی قرار گرفت. تمرکز تنش به خصوص در محل تغییر مقطع بال تیر یکی از مشکلات اتصالات با سخت کننده های T شکل می باشد. نتایج تحلیل نشان می دهد که مقادیر شاخص گسیختگی RI در نقاط با بیشترین تمرکز تنش در تحلیل اجزاء محدود، برای برخی از نمونه ها بیش از ۵۰٪ کاهش یافته است. بر اساس نتایج تحلیل، مقدار کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در محل جوش های شیاری سخت کننده به تیر و ستون، با افزایش نسبت  $\frac{L_d}{d_b}$ ، افزایش می یابد. اما تغییرات نسبت  $\frac{L_d}{d_b}$  در رفتار کلی اتصال و منحنی هیستریزس تأثیر قابل توجهی ندارد. در این مطالعه محدوده ۰/۲۱ تا ۰/۴۱ برای این نسبت مورد بررسی قرار گرفته است.

مقایسه نسبت های مختلف  $\frac{D_{min}}{b_f}$  در نمونه ها نشان می دهد که با کاهش نسبت  $\frac{D_{min}}{b_f}$  احتمال گسیختگی ترد در محل تغییر مقطع بال تیر افزایش می یابد. بنابراین پیشنهاد می شود مقدار حداقلی در طراحی سوراخ کاری با قطر متغیر برای این نسبت در نظر گرفته شود. این مقدار حداقل با توجه به نتایج این مطالعه مقدار ۰/۱۲ پیشنهاد می گردد. نتایج نمودارهای مقادیر کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در محل اتصال سخت کننده به تیر و ستون، به همراه نمودارهای هیستریزس نشان می دهد که در حالت کلی با افزایش قطر سوراخها تمرکز تنش در محل جوش های شیاری سخت کننده T شکل کاهش یافته، اما ظرفیت لنگر تیر کاهش می یابد. بنابراین با توجه به نتایج پیشنهاد می شود حداکثر نسبت  $\frac{D_{max}}{b_f}$  به مقدار ۰/۲ محدود گردد.

با استفاده از سوراخ کاری بال تیر در اتصال با سخت کننده های T شکل، می توان تنش و کرنش پلاستیک در محل جوش های شیاری المان های افقی و قائم سخت کننده به تیر و ستون را کاهش داده و به شیوه مؤثری از گسیختگی مود ۱ و ۲ در سخت کننده های T شکل جلوگیری نمود. همچنین با استفاده از سوراخ های با قطر متغیر و طراحی مناسب می توان طول مفصل پلاستیک را افزایش داد. این افزایش طول مفصل پلاستیک باعث به تأخیر افتادن کمانش موضعی در اتصال گردیده و می تواند منجر به استفاده بیشتری از ظرفیت پلاستیک تیر گردد.

## ۸. مراجع

1. Alostaz Y. M., Shneider P., (1998). "Connections to Concrete-Filled Steel Tubes" Eleventh World Conference on Earthquake Engineering". Paper No. 748.
2. Li X., Xiao Y., Wu Y.T., (2009). "Seismic behavior of exterior connections with steel beams bolted to CFT columns". Journal of Constructional Steel Research, No. 65, pp. 1438-1446.
3. Sheet I.S., Gunasekaran U., MacRae G.A., (2013). "Experimental investigation of CFT column to steel beam connections under cyclic loading". Journal of Constructional Steel Research, No. 86, pp. 167-182.
4. Mirghaderi S.R., Torabian Sh., Keshavarzi F., (2010). "I-beam to box column connection by a vertical plate passing through the column". Engineering Structures, No. 32, pp. 2034-2048.
5. Torabian Sh., Mirghaderi S.R., Keshavarzi F., (2012). "Moment-connection between I-beam and built-up square column by a diagonal through plate", Journal of Constructional Steel Research, No. 70, pp. 385-401.
6. Qin Y., Chen Z., Yang Q., Shang K., (2014). "Experimental seismic behavior of through-diaphragm connections to concrete-filled rectangular steel tubular columns". Journal of Constructional Steel Research, No. 93, pp. 32-43.
7. Shanmugam N.E., Ting L.C., Lee S.L., (1991). "Behavior of I-beam to box-column connections stiffened externally and subjected to fluctuating loads". Journal of Construction Steel Research, 20(2), pp. 129-248.
8. Ting L.C., Shanmugam N.E., Lee S.L., (1991). "Box-column to I-beam connections with external stiffeners". Journal of Constructional Steel Research, 18(3), pp. 209-26.

9. Kang C.H., Shin K.J., Oh Y.S., Moon T.S., (2001). "Hysteresis behavior of CFT column to H-beam connections with external T stiffener and penetrate elements". Engineering Structures, No. 23, pp. 1194-1201.
10. Shin K.J., Kim Y.J., Oh Y.S., Moon T.S., (2004). "Behavior of welded CFT column to H-beam connections with external stiffeners. Engineering Structures". No. 26, pp. 1877-1887.
11. Kim Y.J., Shin K.J., Kim W.J., (2008). "Effect of Stiffener Details on Behavior of CFT Column to Beam Connections". Steel Structures, No. 64, pp. 119-133.
12. Kang C.H., Kim Y.J., Shin K.J., Oh Y.S., (2013). "Experimental Investigation of Composite Moment Connections with External Stiffeners". Advances in Structural Engineering, Vol. 16, No. 10, pp. 1683-1700.
13. Lee S.L., Ting L.C., Shanmugam N.E., (1993). "Use of external T-stiffeners in box-column to I-beam connections. Journal of Construction Steel Research, 26(2-3), pp. 77-98.
14. Moon T.S., Oh Y.S., Shin K.J., Kang C.H., (2001). "Hysteresis behavior of CFT column to H-beam connections with external T-stiffeners and penetrated elements". Engineering Structure, 23(9), pp. 1194-1201.
15. Vetr M.G., Miri M., Haddad A., (2012). "Seismic Behavior of a New Reduced Beam Section Connection by Drilled Holes Arrangement (RBS\_DHA) on the Beam Flanges through Experimental Studies". 15 WCEE, LISBOA.
16. Fanaie N., Kazerani S., Soroushnia S., (2015). "Numerical studying of Slotted Web Drilled Flange moment frame Connection". Numerical Methods in Civil Engineering, Vol 1, No. 3, pp. 15-22.
17. Kazerani S., Fanaie N., Soroushnia S., (2014). "Seismic behavior of drilled beam section in moment connections". Numerical Methods in Civil Engineering, Vol 1, No. 2, pp. 21-28.