



کد مقاله: ۱-۱۲۰

## بررسی عملکرد اتصال صلب تیر به ستون دویل در سه حالت استفاده از

### ورق پوششی، ورق کناری و سخت کننده ورق میانی

شاپور طاحونی<sup>۱</sup>، سروش امیری<sup>۲</sup>

۱- عضو هیأت علمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، [stahouni@aut.ac.ir](mailto:stahouni@aut.ac.ir)

۲- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی بوشهر

### چکیده

در این مقاله ستونی مرکب از دو نیمرخ IPE200 با ورق پوششی و تیری متشکل از تیر آهن IPE270 منظور شده، اتصال آنها طراحی و توسط برنامه ANSYS مدل سازی می شود. سپس منحنی هیستریزس تحت بارگذاری استاندارد AISC برای اتصال صلب تیر به ستون دویل در حالت های اتصال با ورق پوششی، اتصال با سخت کننده ورق میانی و اتصال با ورق کناری رسم گردیده و به منظور بررسی رفتار غیر خطی سیستم اتصال صلب تیر به ستون دویل با استفاده از موارد نامبرده شده یک مدل سه بعدی به روش اجزا محدود تحت اثر بارگذاری AISC مورد تحلیل قرار گرفته می شود. نتایج بدست آمده از تحلیل های انجام شده نشان می دهند که اتصال تیر به ستون دویل با استفاده از حالت های یاد شده دارای مقاومت و شکل پذیری مناسب بوده و می توان از آن برای مناطق با لرزه خیزی زیاد استفاده نمود.

**کلمات کلیدی:** ستون دویل، اتصال صلب، ورق کناری، اجزاء محدود، منحنی هیستریزس

### ۱- مقدمه

وقوع زلزله های نورتریج (۱۹۹۴) در آمریکا و کوبه (۱۹۹۵) در ژاپن نشان داد که علی رقم آنچه انتظار می رفت طیف وسیعی از اتصالات تیرهای I شکل به ستون های بال پهن و یا قوطی دچار شکست ترد شدند و این در حالی بود که این اتصالات توسط اکثر آیین نامه های رایج به عنوان اتصالات شکل پذیر معرفی شده بودند. استفاده از تیرهای I شکل و ستون های دویل در سازه های فولادی در ایران بسیار متداول بوده که نقطه ضعف اساسی این سازه ها اتصالات آنها می باشد. عدم وجود نیمرخ مناسب چه به علت بزرگ بودن نیروهای طراحی و چه به علت عدم تولید نیمرخ های متنوع توسط کارخانه های فولاد سازی، طراحان را مجبور به استفاده از نیمرخ های ساخته شده (ترکیبی) می نماید. در این مقاله عملکرد اتصالات صلب تیرهای I شکل به ستون های دویل با روش های ذیل مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

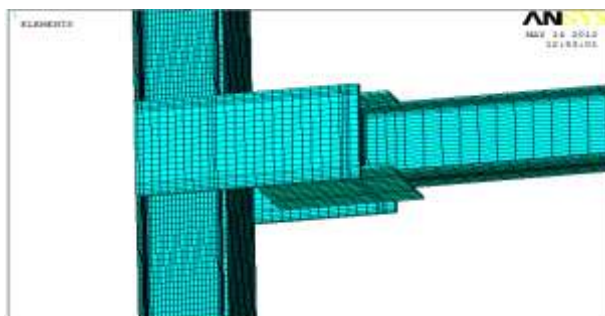
۱- اتصال صلب تیر به ستون دویل با ورق پوششی (شکل ۱)

۲- اتصال صلب تیر به ستون دویل با سخت کننده ورق میانی (شکل ۱)

۳- اتصال صلب تیر به ستون دویل با استفاده از ورق کناری (شکل ۲)



شکل ۱: سمت راست اتصال صلب تیر به ستون دابل فقط با ورق پوششی و سمت چپ اتصال صلب تیر به ستون دابل با سخت کننده ورق میانی



شکل ۲: اتصال صلب تیر به ستون دابل با استفاده از ورق کناری

در این مقاله یک مدل سه بعدی به روش اجزا محدود [۲] تحت اثر بارگذاری AISC [۱۱] به منظور بررسی رفتار غیرخطی سیستم اتصال تیر به ستون دابل با استفاده از موارد نامبرده شده مورد تحلیل قرار گرفته می شود. نتایج بدست آمده از تحلیل های انجام شده نشان می دهند که اتصال تیر به ستون دابل با استفاده از حالت های یاد شده دارای رفتار مناسب تری بوده و می توان از آنها برای لرزه خیزی زیاد استفاده نمود.

### ۲- ضوابط طبقه بندی اتصالات

آیین نامه های مختلف از جمله آیین نامه AISC [۵]، گزارش FEMA350 [۱۱] و FEMA351 [۱۲] ضوابط مختلفی را جهت طبقه بندی اتصالات مطرح کرده اند. با توجه به مشکلات موجود در اتصالات مورد بررسی در زلزله های مزبور، روش های اصلاحی متنوعی توسط محققین پیشنهاد شده است. مشخصات برخی از این اتصالات جدید در FEMA350 [۱۱] و روش های اصلاح اتصالات در FEMA351 [۱۲] به تفصیل آورده شده است.

### ۳- طبقه بندی قاب های خمشی و شرایط پذیرش اتصال

قاب های خمشی طبق آیین نامه لرزه ای AISC [۵] به سه دسته قاب خمشی ویژه، متوسط و معمولی طبقه بندی می شود. برای استفاده از اتصال در هر یک از قاب های خمشی ابتدا باید شرایط مورد نیاز اتصال با توجه به نوع قاب بررسی شود. در قاب های خمشی ویژه به علت مستلزم بودن شکل پذیری زیاد، آیین نامه لرزه ای AISC [۵] ملزم کرده که اتصال می بایست زاویه دررفت  $0/04$  رادیان را تحمل نماید که  $0/01$  رادیان از این زاویه چرخش الاستیک و بقیه چرخش غیرالاستیک می باشد. در مورد قاب خمشی متوسط اتصال می بایست زاویه دررفت  $0/02$  رادیان را تحمل

نموده بطوری که ۰/۰۱ رادیان از این زاویه چرخش الاستیک و بقیه چرخش غیرالاستیک می باشد. قاب خمشی معمولی می بایست قادر به تحمل زاویه دریفت ۰/۰۱ رادیان باشد که کل این زاویه چرخش الاستیک می باشد.

#### ۴- تاریخچه مطالعات پژوهشی انجام شده

در داخل کشور مطالعاتی در خصوص اتصال گیردار تیر به ستون دویل با استفاده از صفحات کناری در دانشگاه امیرکبیر صورت گرفته است [۸] و [۹]. در سیستم مذکور که برای اتصال تیرهای I شکل به ستون های دویل I پیشنهاد شده است، اتصال جوش نفوذی انتهای تیر به ستون بطور کامل حذف شده و بجای آن از صفحات کناری تمام عمق برای انتقال ممان و نیروی برشی از انتهای تیر به ستون استفاده می گردد. فلسفه به کار رفته در روش ابداعی فوق الذکر انتقال ممان از انتهای تیر به ستون در سال ۱۹۷۴ [۷] Blais و سپس در سال ۱۹۷۶ توسط Girous و Picard [۴] برای ستون های قوطی بکار گرفته شد. استفاده از صفحات کناری برای اتصال تیرهای I شکل به ستون های بال پهن تحت اثر بارهای تک جهتی و سیکلی توسط دیلمی و اشرف [۸] بررسی شد. کاربرد این روش در سال ۲۰۰۴ توسط دیلمی و شیراوند [۹] برای ستون های دویل با روش اجزا محدود مورد بررسی قرار گرفت و نتایج خوبی بدست آمد.

#### ۵- بررسی رفتار چرخه ای اتصال صلب تیر به ستون دویل با استفاده از تحلیل اجزای محدود

برای بیان رفتار لرزه ای اتصالات، باید آنها را تحت بارهای چرخه ای مطالعه نمود. برای رسم این منحنی ها، اتصال تحت چند بارگذاری رفت و برگشتی قوی قرار گرفته و نمودار لنگر در مقابل دوران نسبی اتصال رسم می گردد. نمودارهای چرخه ای در ابتدای بارگذاری که دامنه ی تغییر شکل کوچک است، مبین رفتار انعطاف پذیر بوده و شیب نمودار آنها کاسته می گردد. اتصالی که بتواند در رفتار چرخه ای، صلبیت اولیه خود را در چند رفت و برگشت قوی حفظ نماید، به عنوان اتصال کارآمد شناخته می شود. روش اجزای محدود به دلیل دقت قابل قبول در پیش بینی رفتار اتصال یک ابزار قوی برای حل عددی بوده که، امکان تحلیل محدود و وسیعی از مسایل مهندسی را در اختیار ما قرار می دهد بر همین اساس در این تحقیق نیز از روش اجزای محدود جهت مطالعه رفتار اتصال ها، استفاده شده و با توجه به اینکه نرم افزار ANSYS [۲] قابلیت تحلیل غیرخطی و محاسبه تغییر شکل های بزرگ را دارا می باشد، از این نرم افزار جهت مطالعه و بررسی مدل ها استفاده شده است. بررسی نتایج نشان می دهد استفاده از اتصالات صلب به دلیل رفتار غیرخطی و افزودن شکل پذیری مناسب به قاب، عملکرد سازه را به لحاظ استهلاک انرژی و کاهش نیروهای تحمیل شده به سازه بهبود بخشیده و در زمین لرزه های شدید قاب های با اتصالات صلب عملکرد مناسب تری نسبت به سایر قاب های به همراه خواهد داشت.

#### ۶- مشکلات موجود در اتصال تیر I شکل به ورق پوششی ستون های دویل

در یک اتصال خمشی خصوصاً زمانی که عرض بال تیر کمتر از عرض بال ستون قوطی می باشد، گیرداری اتصال به نحو قابل ملاحظه ای در اثر تغییر شکل بال ستون کاهش می یابد. White و Fang (۱۹۶۶) [۱۳] نشان دادند که دیواره ستون های قوطی بسیار شکل پذیر می باشد بطوریکه در اثر انتقال نیرو از تیر به ستون دچار تغییر شکل قابل ملاحظه ای خواهند شد. همچنین Dube (۱۹۷۲) [۱۰] نشان داد که تغییر شکل دیواره های

ستون قوطی شکل باعث کاهش چشمگیر ظرفیت باربری محوری ستون خواهد شد و مشکل مشابهی که در اتصالات تیر به ستون دابل نیز وجود دارد این است که در اینگونه ستون‌ها ورق اتصال دو نیمرخ تنها در دو لبه طولی خود با استفاده از جوش گوشه به بال دو نیمرخ متصل می‌شود. بنابراین این ورق اتصال از گیرداری مناسبی برخوردار نبوده و تحت اثر نیروی وارد از بال تیر دچار تغییر شکل، پیچیدگی و یا کمانش خواهد شد. تحقیقات انجام شده پس از زلزله نورث‌ریج و کوبه نشان دهنده این بود که شایع ترین نوع گسیختگی در اتصالات تیر به ستون ها، جاری شدن چشمه اتصال و شکست ترد زود هنگام در ناحیه اتصال مستقیم بال تیر (یا صفحه انتقال نیرو) بوسیله جوش نفوذی به بال ستون بال پهن و یا دیواره ستون قوطی بوده است. اتصال مستقیم بال تیر به بال ستون (یا به روق اتصال در ستون های ترکیبی دابل) سبب تمرکز شدید تنش سه محوره در ناحیه اتصال شده و عملاً محل تشکیل مفصل پلاستیک را از تیر به درون ستون انتقال می‌دهد. این وضعیت باعث کاهش بسیار زیاد ظرفیت شکل‌پذیری اتصال می‌شود. همچنین تمرکز تنش‌ها در جوش نفوذی تیر به بال ستون و یا ورق اتصال در ستون‌های ترکیبی باعث ترد-شکنی در اتصال خواهد شد.

#### ۷- مدل‌سازی برای بررسی رفتار اتصال (استفاده از روش اجزا محدود)

برای مدل کردن اتصال، پیچیدگی‌های زیادی وجود دارد و با توجه به این که اتصال به عنوان یک جزء سازه بررسی می‌شود، باید اندرکنش سایر اجزای سازه نیز با آن منظور شود؛ [۱] چرا که اگر اتصال بدون اعمال شرایط سازگاری با سایر قسمت‌های سازه، تیر، ستون و ... بررسی شود، نمی‌توان مدعی شد که اتصال مدل شده، رفتار کاملاً مشابهی با اتصال واقعی داشته باشد. شایان ذکر است که مطالعات انجام شده، مطالعات عددی بوده و برای بررسی دقیق‌تر اتصالات، مطالعات آزمایشگاهی نیز مفید خواهد بود.

#### ۸- روش تحلیل و نرم افزار مورد استفاده

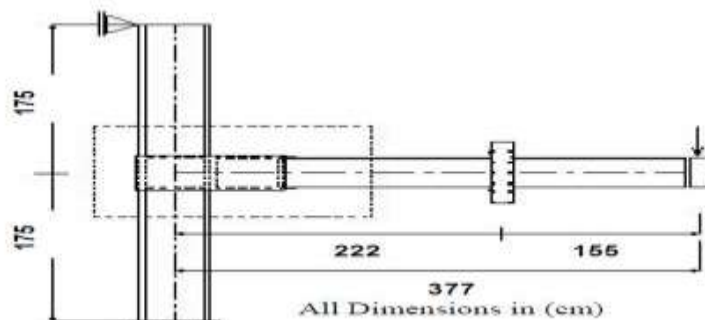
برای بررسی رفتار اتصالات، بر اساس روش اجزای محدود [۲] عمل شده است و نرم افزار مورد استفاده برای مدل سازی و بررسی آن‌ها، نرم افزار ANSYS می‌باشد. این نرم افزار، یکی از کامل‌ترین و دقیق‌ترین نرم افزارهای اجزای محدود بوده، ولی با توجه به گسترده بودن دامنه‌ی استفاده از این نرم افزار، باید این مدل‌ها با دقت زیاد ساخته شوند و ممکن است در نظر نگرفتن هر جزئی از مدل، موجب ارائه نتایج کاملاً اشتباه و یا عدم همگرایی جواب در حل غیر خطی شود.

#### ۹- روش اجزا محدود بکار رفته شده برای مدل‌ها

در تحلیل های انجام شده، مقاطع IPE طبق جدول اشتال، برای تیرها و ستون‌های دابل در نظر گرفته شده است. فاصله مرکز به مرکز دو نیمرخ در ستون دابل، طوری انتخاب شده تا ممان اینرسی حول محور قوی و ضعیف اختلاف زیادی با هم نداشته باشند. در انتخاب تیر و ستون برای مطالعه رفتار یک اتصال بایست شرط ستون قوی-تیر ضعیف حتما رعایت شود زیرا در صورت ضعیف بودن ستون نسبت به تیر، مفصل پلاستیک بجای تیر در ستون تشکیل می‌شود که این امر باعث ایجاد ضعف در رفتار غیرخطی سازه خواهد شد. [۸]

## ۱۰- تعیین هندسه کلی مدل

با توجه به دستور العمل‌های موجود در SAC 97 [۹] و همچنین آیین‌نامه لرزه‌ای سازه‌های فولادی AISC [۵] برای بررسی رفتار اتصال تیر به ستون دوپل، از مدل میان قاب یک طرفه در مقیاس واقعی استفاده شده و سعی بر این بوده که حتی المقدور ابعاد مدل‌های اجزا محدود انتخاب شده، با ابعاد واقعی سازه‌ها و مدل‌های آزمایشگاهی هماهنگ باشند. بدین منظور از ابعاد کلی مدل بکار برده شده توسط UANG [۹] که بر روی اتصال صفحه کناری در سال ۱۹۹۴ آزمایش‌هایی انجام داده و در آرشیو مدل‌های آزمایشگاهی SAC موجود می‌باشد، استفاده شده است. (شکل ۳)

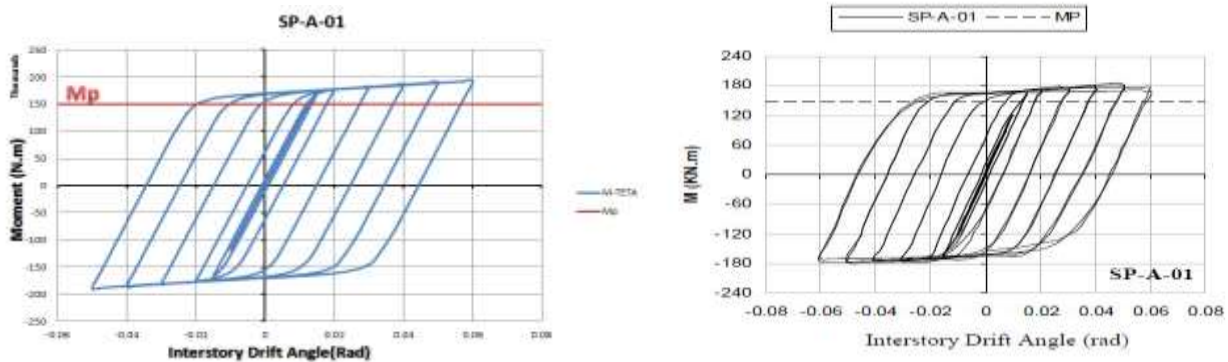


شکل ۳: مدل بکار برده شده توسط UANG

همانطور که در (شکل ۳) نشان داده شده، طول ستون از محور تا محور تکیه‌گاه‌ها برابر ۳۵۰ سانتی‌متر و طول تیر از محور بارگذاری تا مرکز ستون برابر ۳۷۷ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین فاصله محور تکیه‌گاه جانبی که دارای عرض ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد، از محور بارگذاری برابر ۱۵۵ سانتی‌متر می‌باشد. این فاصله با توجه به ضوابط آیین‌نامه AISC LRFD [۳] طوری انتخاب شده است تا در محدوده تیرهای مورد مطالعه (ارتفاع ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر) هیچگونه کمانش جانبی - پیچشی اتفاق نیفتد و تیر بتواند به تمام ظرفیت پلاستیک خود برسد.

## ۱۱- تدقیق (Verification)

مطابق کارهای پژوهشی که با نرم افزارهای اجزا محدود انجام می‌شود، می‌بایست مدل سازی و نتایج با یک نمونه آزمایشگاهی و یا حتی مدل اجزا محدود دیگری در منبعی مشخص، مورد تدقیق قرار گیرد که در این مقاله مدل سازی با مدل اجزا محدود موجود در مقاله اردشیر دیلمی و محمودرضا شیراوند [۹] مورد تدقیق قرار گرفت. منحنی هیستریزیس مدل SP-A-01 از مقاله اردشیر دیلمی و محمودرضا شیراوند [۹] در (شکل ۴) منحنی هیستریزیس مدل مذکور که توسط نرم افزار انسیس مجدد طراحی و مورد بارگذاری قرار گرفته نمایش داده شده و مشاهده می‌گردد که ممان خمشی پلاستیک بدست آمده در نمونه طراحی شده مطابق با ممان خمشی پلاستیک مدل SP-A-01 می‌باشد.



شکل ۴: نمودار سمت راست منحنی هیستریزس مدل SP-A-01 مربوط به مقاله شیراوند و نمودار سمت چپ منحنی مجددا طراحی شده توسط انیس جهت

تدقیق داده ها

### ۱-۱۲ اتصال صلب تیر به ستون دوپل با استفاده از ورق کناری

پروفیل ستون 2IPE200، پروفیل تیر IPE270، فاصله اکس به اکس ستون ها ۲۰ سانتی متر، ورق پوششی اتصال 2IPE بصورت سرتاسری در طول ستون با ابعاد ۱۰\*۲۵۰ میلیتر، ابعاد ورق کناری ۱۵\*۳۵۰\*۵۵۰ میلیتر، ورق روی تیر ۳۰۰\*۳۰۰\*۱۰ میلیتر (این ورق بطور مستقیم به ستون متصل نمی شود و از ستون فاصله دارد)، صفحه های برشی این ورق به ضخامت ۱۰ میلیتر (در دو سمت ستون، در راستای بال های تیر، به اندازه ابعاد داخلی ستون بوده و به ستون جوش شده است) ورق پیوستگی به ضخامت ۱۰ میلیتر و به فاصله ۲۵۰ میلیتری از بر ستون و بصورت عمودی در جان تیر قرار می گیرد. (شکل ۵)



شکل ۵: نما روبرو و کنار اتصال صلب تیر به ستون دوپل با ورق کناری

### ۲-۱۲ اتصال صلب تیر به ستون دوپل با سخت کننده میانی

پروفیل ستون 2IPE200، پروفیل تیر IPE270، فاصله اکس به اکس ستون ها ۲۰ سانتی متر، ورق پوششی اتصال 2IPE بصورت سرتاسری در طول ستون با ابعاد ۱۰\*۲۵۰ میلیتر (به جز در جایی که ورق میانی قرار دارد)، ابعاد ورق میانی در محل اتصال تیر به ستون، دو ورق به ابعاد ۲۵۰\*۵۰۰\*۲۰ میلیتر بصورت ورق پوششی بر روی ستون قرار گرفته و ورق سوم به ابعاد ۲۰۰\*۵۰۰\*۲۰ میلیتر بصورت عمودی بر این دو صفحه قرار می گیرد. ورق بالای تیر به صورت کله گاوی بوده و ورق زیر تیر به ابعاد ۲۰۰\*۴۰۰\*۲۰ میلیتر، صفحه های برشی این ورق به

ضخامت ۱۰ میلی‌متر (در دو سمت ستون، در راستای بال‌های تیر، به اندازه ابعاد داخلی ستون بوده و به ستون جوش شده است). نوع جوش در محل اتصال ورق‌ها به ستون از جوش نفوذی و در محل اتصال ورق‌ها به تیر از جوش گوشه استفاده شده است. (شکل ۶)



شکل ۶: نما بالا و کنار اتصال صلب تیر به ستون دویل با ورق میانی

### ۳-۱۲ حالت اتصال صلب تیر به ستون دویل با ورق پوششی

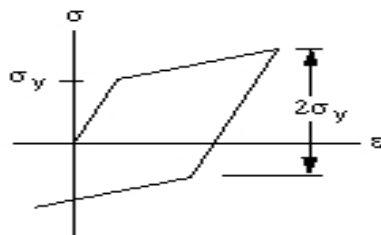
پروفیل ستون 2IPE200، پروفیل تیر IPE270، فاصله اکس به اکس ستون‌ها ۲۰ سانتی‌متر، ورق پوششی اتصال 2IPE بصورت سرتاسری در طول ستون با ابعاد ۱۰\*۲۵۰ میلی‌متر، ورق بالای تیر به صورت کله گاوی، ورق زیر تیر به ابعاد ۲۰۰\*۴۰۰\*۲۰ میلی‌متر، صفحه‌های برشی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر (این ورق در دو سمت ستون، در راستای بال‌های تیر، به اندازه ابعاد داخلی ستون بوده و به ستون جوش شده است). نوع جوش در محل اتصال ورق‌ها به ستون از جوش نفوذی و در محل اتصال ورق‌ها به تیر از جوش گوشه استفاده شده است. (شکل ۷)



شکل ۷: نمای کنار اتصال صلب تیر به ستون دویل با ورق پوششی

### ۱۳- تعیین رفتار مصالح

فولاد ساختمانی که در ایران برای تولید نیم‌رخ‌های IPE و ورق‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد معمولاً از نوع فولاد ST-37 در استاندارد اروپایی می‌باشد، لذا مصالح فولادی مدل‌های تحت مطالعه از نوع فولاد ST-37 در نظر گرفته شده است. با توجه به این که این نوع فولاد دارای رفتاری الاستوپلاستیک همراه با سخت شوندگی کرنشی بوده بر همین اساس برای مدل کردن رفتار آن از یک مدل دو خطی مطابق (شکل ۸) استفاده می‌شود.



شکل ۸: نمودار نشان دهنده ناحیه الاستیک و ناحیه سخت شونده کرنشی

در این مدل ناحیه الاستیک با یک خط و ناحیه سخت شونده کرنشی نیز با خط دیگری مدل می‌شود. همچنین برای سادگی، از ناحیه تسلیم بعلت کوچک بودن آن در مقایسه با ناحیه سخت شونده کرنشی صرف نظر می‌شود. ضریب الاستیسیته فولاد در این مدل برابر با شیب خط اول مدل رفتار مصالح و به مقدار  $210 \text{ GPa}$  می‌باشد. تنش تسلیم فولاد برابر  $240 \text{ MPa}$  و شیب خط دوم مدل رفتار مصالح نیز برابر  $0.75 \text{ GPa}$  در نظر گرفته شده است. با توجه به جابجایی سطح تسلیم بدون تغییر حجم در اثر افزایش کرنش پلاستیک در فولاد (اثر بوشینگر) از قانون سخت شونده کرنشی جنبشی استفاده شده و همچنین معیار تسلیم فون میسز برای فولاد لحاظ گردیده است.

#### ۱۴- المان مورد استفاده در مدل‌سازی و مش بندی

در اتصالات مدل شده، اجزای اصلی مورد استفاده عبارتند از تیرها، ستون‌ها و صفحات تقویتی که برای هر یک باید المان مناسب انتخاب شده و شرایط تکیه گاهی از جمله مواردی است که در تعیین نوع المان تاثیر گذار می‌باشد. در مدل‌های این مقاله از المان سالیید ۴۵ استفاده شده که از این نوع المان برای مدل کردن سه بعدی سازه‌های سه بعدی استفاده می‌شود. المان مذکور متشکل از ۸ گره و هر گره ۳ درجه آزادی داشته که شامل تغییر مکان در جهت  $x$ ،  $y$  و  $z$  است. [۶] این المان، توانایی مدل کردن پلاستیک شدن ماده، خزش، تورم، تغییر مکان بزرگ سازه و کرنش بزرگ را دارد. ابعاد شبکه‌های مش بندی می‌بایست متناسب با دقت مورد نیاز تعیین گردد. در مدل‌هایی مثل اتصال مورد مطالعه، تغییرات تنش در ناحیه اتصال خیلی بیشتر از نواحی دورتر در تیر و ستون بوده و به همین خاطر در ناحیه اتصال از مش بندی ریزتر استفاده شده است.

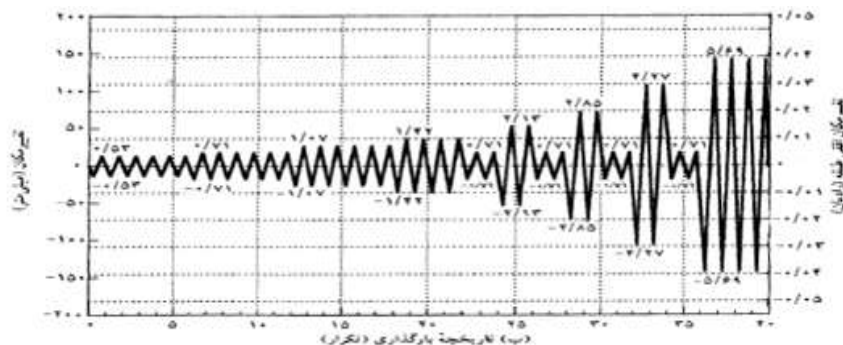
#### ۱۵- شرایط مرزی

شرایط مرزی برای همه مدل‌ها یکسان می‌باشد. در جات آزادی گره‌های پای ستون به طور کامل در سه جهت مقید شده اند و گره‌های بالای ستون نیز در دو جهت عمود بر محور ستون مقید شده‌اند، اما در جهت محور ستون آزادند. بدین ترتیب در بالای ستون، به ستون اجازه داده می‌شود که در جهت قائم آزادانه حرکت کند. همچنین برای مدل کردن شرایط تکیه‌گاه جانبی، از حرکت جانبی گره‌های بال بالایی و پایینی تیر که در فاصله  $12/5$  و  $167/5$  سانتی متری از انتهای آزاد تیر قرار گرفته‌اند، جلوگیری شده است.



## ۱۶- بارگذاری و تحلیل

اعمال بار به صورت جابجایی بر نوک تیر، در وسط صفحه بارگذاری و در جهت قائم صورت گرفته است. به بیان دیگر تحلیل به صورت کنترل جابجایی انجام شده است. بارگذاری بر روی نمونه‌ها بصورت بارگذاری تناوبی (سیکلی) و بر طبق ضوابط SAC97 [۹] انجام گرفته است. این روش بارگذاری سیکلی توسط FEMA350 [۱۱] و آیین‌نامه لرزه‌ای سازه‌های فولادی AISC [۵] پیشنهاد شده است. (شکل ۹)



شکل ۹: بارگذاری تناوبی

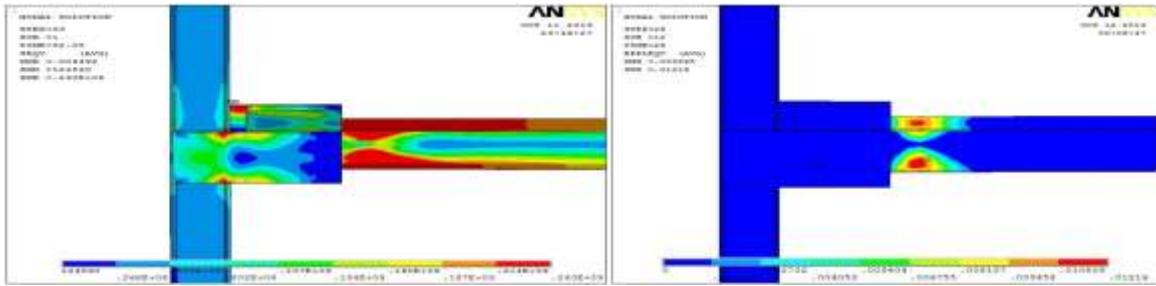
با توجه به اینکه بارگذاری به صورت تغییر مکان به نوک تیر اعمال شده، لازم است منحنی سیکلیک بارگذاری بر حسب تغییر مکان برای مدل‌های مورد مطالعه بدست آید. فاصله مرکز ستون تا مرکز نقطه اعمال بار برابر ۳۷۷ سانتی‌متر بوده و منحنی بارگذاری سیکلی بر حسب تغییر مکانی که بر مدل‌ها اعمال شده است مطابق شکل ۹ خواهد بود. تغییر مکان اعمال شده بصورت سیکلی تا زاویه چرخش ۰/۰۶ رادیان در نظر گرفته شده که مطابق FEMA350 [۱۱] کمترین حد مورد نیاز برای حفظ پایداری قاب‌های خمشی ویژه (SMF) می‌باشد. با توجه به الگوی انجام شده بر روی مدل‌های مورد مطالعه، بعلت وارد شدن تیر به ناحیه پلاستیک تحت بارگذاری سیکلی و همچنین تسریع کماتش محلی بال و جان تیر در اثر ورود به ناحیه غیر خطی و اثرات ناشی از بارگذاری و بار برداری متوالی، تحلیل غیرخطی لازم به نظر می‌رسد. لذا برای مطالعه رفتار اتصال پیشنهادی و انطباق هر چه بیشتر نتایج با واقعیت، تمامی تحلیل‌ها بصورت غیرخطی و با در نظر گرفتن اثرات ناشی از رفتار غیرخطی مادی و هندسی انجام شده است.

## ۱۷- توزیع تنش و کرنش

چگونگی توزیع تنش فون میسز در سیستم اتصال تیر به ستون دویل برای سیکل آخر بارگذاری برای مدل‌ها مورد بررسی و نمایش داده شده است. با توجه به کانتورهای تنش، مشاهده می‌شود که محل مفصل پلاستیک از ناحیه اتصال به درون تیر منتقل شده است. این بدان معناست که در این نوع اتصال دیگر بابت شکست ترد ناگهانی، نگرانی وجود ندارد. یادآوری می‌شود که در اتصالات موسوم به اتصالات خمشی قبل از نورتریج، به دلیل تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه اتصال، اتصالات در اثر زلزله دچار آسیب شدند.

### ۱۷-۱ توزیع تنش فون میسز و کرنش پلاستیک اتصال صلب تیر به ستون دویل با ورق کناری

توزیع تنش فون میسز و کرنش پلاستیک در اتصال صلب تیر به ستون دویل با ورق کناری در (شکل ۱۰) نمایش داده شده است.

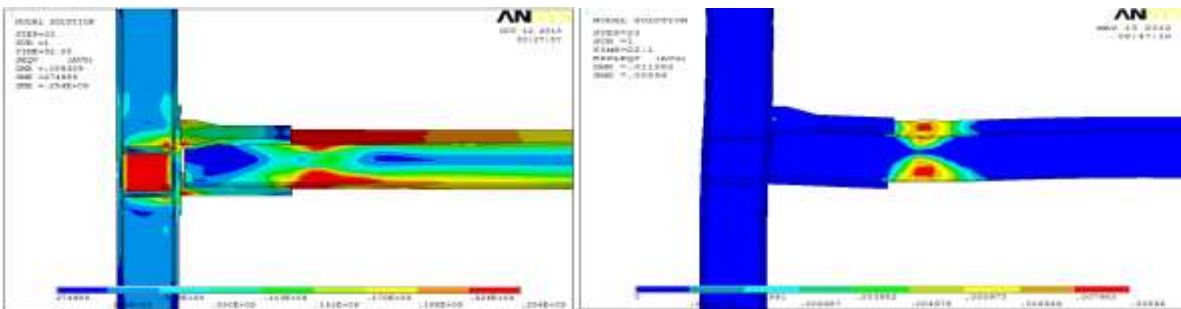


شکل ۱۰: تصویر سمت راست توزیع تنش فون میسز و تصویر سمت چپ کرنش پلاستیک در اتصال صلب تیر به ستون دوبل با ورق کناری

با وجود دو صفحه کناری تمام عمق، دیگر مشکلی در ناحیه اتصال وجود نداشته و چهار ورق (دو صفحه کناری به همراه دو صفحه جان ستون)، تمام ظرفیت خمشی تیر را، بدون تسلیم شدن انتقال می دهد. در تصاویر بالا به خوبی دیده می شود که تنش ها در چشمه اتصال در حدود پایین باقی مانده است. با توجه به نتایج نشان داده شده، مشاهده می شود که تنش بر روی ورق اتصال دو ستون (ورق پوشش) در حدود بسیار پایین قرار دارد. جدایی بین انتهای تیر و ستون سبب شده که هیچگونه باربری بصورت مستقیم به ورق پوشش وارد نشود. بنابراین مشکل ضعف این ورق در مقابل تغییر شکل، کشش و کمانش که در اتصال مستقیم بال تیر به آن بوجود می آید در اینجا وجود ندارد. با توجه به تصویر سمت چپ شکل ۱۰ می توان دید که تیر در ناحیه بعد از انتهای اتصال در اثر بارگذاری سیکلی، دچار کمانش موضعی می شود. کمانش موضعی پدید آمده شامل کمانش موضعی در بال و جان تیر بوده که با توجه به وقوع چنین کمانشی، افت قابل ملاحظه ای در میزان ظرفیت شکل پذیری و مقاومت اتصال بوجود نخواهد آمد.

## ۱۷-۲ توزیع تنش فون میسز و کرنش پلاستیک اتصال صلب تیر به ستون دوبل با ورق میانی

توزیع تنش فون میسز و کرنش پلاستیک در اتصال صلب تیر به ستون دوبل با ورق میانی در (شکل ۱۱) نمایش داده شده است.

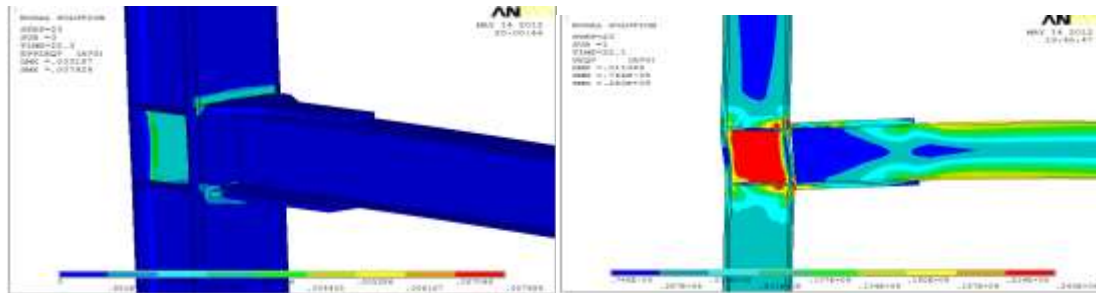


شکل ۱۱: تصویر سمت راست توزیع تنش فون میسز و تصویر سمت چپ کرنش پلاستیک در اتصال تیر به ستون دوبل با سخت کننده ورق میانی

با توجه به تصویر سمت چپ (شکل ۱۱) می توان دید که تیر در ناحیه بعد از انتهای اتصال در اثر بارگذاری سیکلی، دچار کمانش موضعی می شود. کمانش موضعی پدید آمده شامل کمانش موضعی در بال و جان تیر می باشد. با توجه به وقوع چنین کمانشی، افت قابل ملاحظه ای در میزان ظرفیت شکل پذیری و مقاومت اتصال بوجود نخواهد آمد.

## ۱۷-۳ توزیع تنش فون میسز و کرنش اتصال صلب تیر به ستون دویل با ورق پوششی

در تصویر سمت راست (شکل ۱۲) توزیع تنش فون میسز و در تصویر سمت چپ کرنش پلاستیک اتصال صلب تیر به ستون دویل با ورق پوششی نشان داده شده است، در این اتصال مشخص شده است که تمرکز تنش در محل اتصال رخ می‌دهد.



شکل ۱۲: تصویر سمت راست توزیع تنش فون میسز و تصویر سمت چپ کرنش پلاستیک اتصال تیر به ستون دویل با ورق پوششی

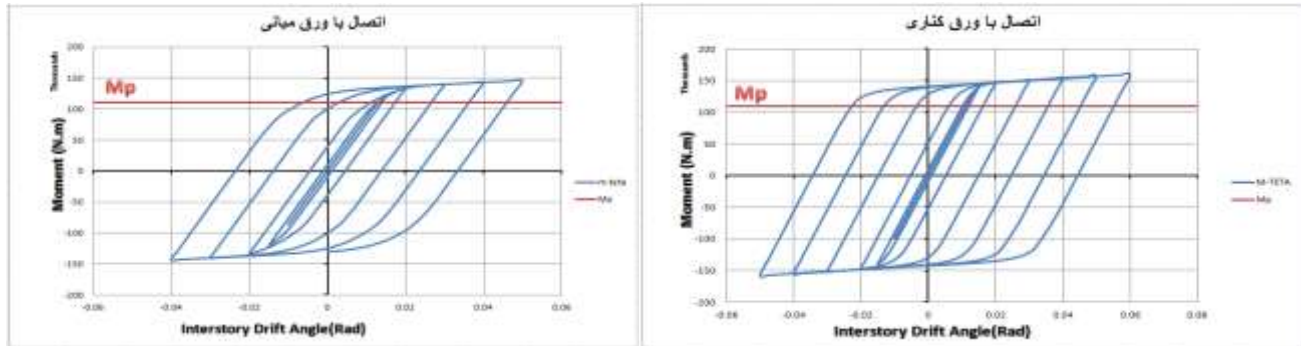
## ۱۸- منحنی های هیستریزیس ممان-دوران

منحنی های نیرو-تغییر مکان و ممان-دوران، منحنی های هستند که می‌توان از آنها اطلاعات خوبی درباره عملکرد اتصال به دست آورد و با توجه به آنها انواع مختلف اتصالات را طبقه‌بندی و با توجه به این منحنی می‌توان ورود تیر به ناحیه غیرخطی و رفتار سیکلی را بررسی کرد. مقادیر در نظر گرفته شده در ترسیم این نمودارها بر اساس دستور العمل SAC97 [۲۰] بوده و با توجه به این دستور العمل، در منحنی های نیرو-تغییر مکان، نیروی وارد شده به انتهای تیر در مقابل تغییر مکان انتهای تیر ترسیم شده است. همچنین در منحنی های ممان-دوران، ممان در محور ستون ناشی از نیروی وارد بر انتهای تیر در مقابل زاویه دوران که برابر مقدار تغییر مکان انتهای تیر تقسیم بر طول تیر می‌باشد، ترسیم شده‌اند. با توجه به منحنی های ممان-دوران رسم شده می‌توان دید که تیر به خوبی وارد ناحیه غیرخطی می‌شود و مجموعه بارگذاری شده، رفتار سیکلی مناسب را از خود نشان می‌دهد. در هنگام بارگذاری، در اتصالات مورد مطالعه هیچ‌گونه شکستی مشاهده نشد و همانطور که از منحنی های ممان دوران و تصاویر توزیع تنش و کرنش پیداست، این اتصالات رفتار شکل پذیری از خود نشان می‌دهند. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده دیده می‌شود که اتصال مورد مطالعه در تمامی مدلها به ظرفیت چرخشی بیشتر از ۰/۰۴ رادیان (حداقل معیار شکل پذیری برای قاب های مقاوم خمشی ویژه) می‌رسد که نشان از شکل پذیری بسیار خوب این اتصالات می‌باشد.

در منحنی های هیستریزیس رسم شده می‌توان دید که پس از روند افزایشی مقاومت اتصال، یک افت مقاومتی بوجود می‌آید. این کاهش مقاومت در اثر بروز کماتش در بال و جان تیر گسترش پیدا می‌کند. این کاهش مقاومت، به حدی نیست که برای اتصال مشکل ساز شود، زیرا همانطور که در منحنی های ممان-دوران همه مدل ها دیده می‌شود، مقاومت خمشی بدست آمده تا مراحل آخر بارگذاری، از میزان ظرفیت خمشی پلاستیک تیر ( $M_p$ ) که با خط قرمز نشان داده شده است، بیشتر است. در تمامی مدلها تا رسیدن به زاویه چرخش ۰/۰۴ رادیان، افت قابل ملاحظه ای بوجود نمی‌آید و مقاومت اتصال بیشتر از ظرفیت خمشی پلاستیک تیر می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که اتصالات مورد مطالعه از ظرفیت مقاومت خمشی مناسبی برخوردار می‌باشند.

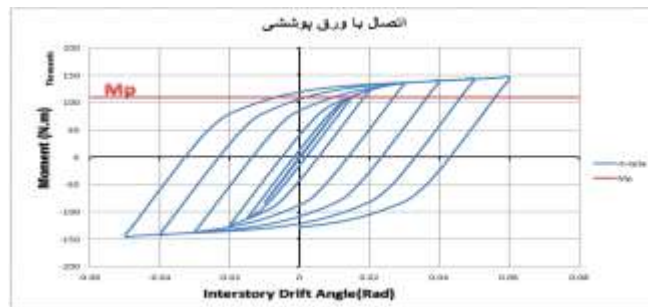
## ۱۹- منحنی هیستریزیس ممان-دوران اتصال های مورد مطالعه

در شکل های ۱۳ و ۱۴ منحنی هیستریزیس ممان-دوران اتصالات مورد مطالعه مشاهده می شود. مقاومت خمشی بدست آمده تا مراحل آخر بارگذاری، از میزان ظرفیت خمشی پلاستیک تیر ( $M_p$ ) که با خط قرمز نشان داده شده، بیشتر بوده و در تمامی مدل ها تا رسیدن به زاویه چرخش ۰/۰۴ رادیان، افت قابل ملاحظه ای بوجود نمی آید و مقاومت اتصال بیشتر از ظرفیت خمشی پلاستیک تیر می باشد.



شکل ۱۳: تصویر سمت راست منحنی هیستریزیس ممان-دوران اتصال صلب تیر به ستون دابل با ورق کناری و تصویر سمت چپ منحنی هیستریزیس ممان-دوران

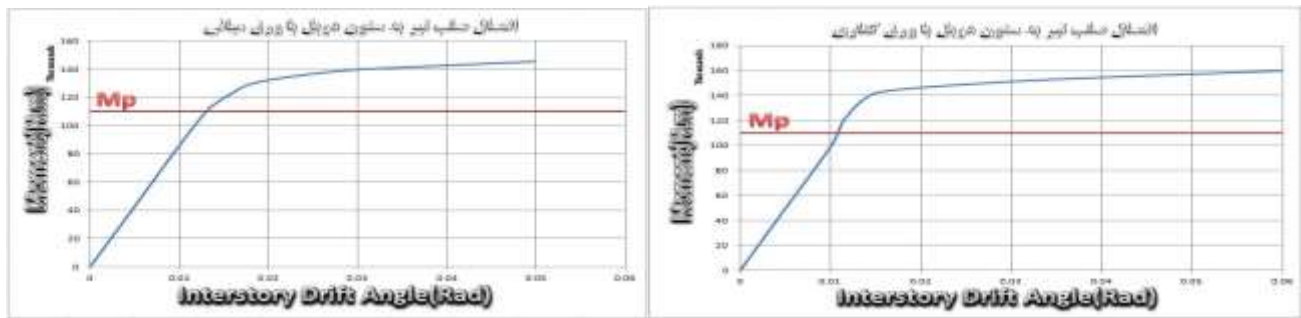
اتصال صلب تیر به ستون دابل با ورق میانی



شکل ۱۴: منحنی هیستریزیس ممان-دوران اتصال صلب تیر به ستون دابل با ورق پوششی

## ۲۰- پوش منحنی های هیستریزیس ممان- دوران

با استفاده از منحنی های هیستریزیس بدست آمده تحت بارگذاری سیکلی، پوش منحنی هیستریزیس ممان-دوران بدست می آید. (شکل ۱۵ و ۱۶)

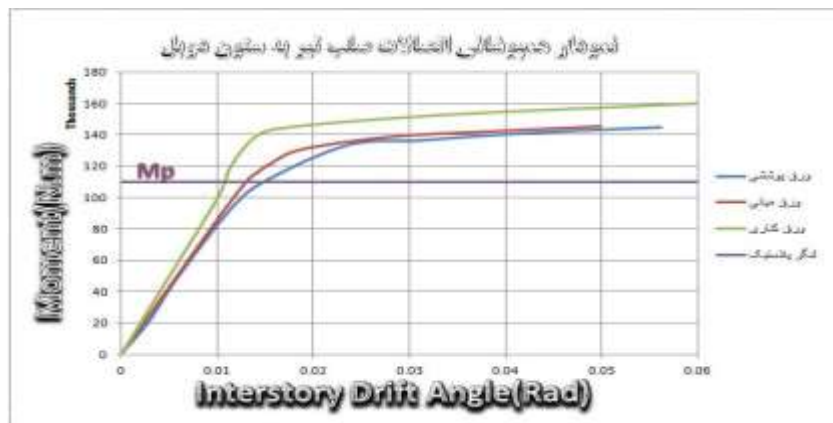


شکل ۱۵: پوش منحنی هیستریزس ممان-دوران اتصال صلب تیر به ستون دوتایی با سخت کننده ورق میانی و ورق کناری



شکل ۱۶: پوش منحنی هیستریزس ممان-دوران اتصال تیر به ستون دوتایی با ورق پوششی

در (شکل ۱۷) نمودار مقایسه‌ای ممان-دوران اتصال‌های مورد مطالعه به نمایش درآمده است.



شکل ۱۷: نمودار مقایسه‌ای پوش منحنی‌های هیستریزس ممان-دوران اتصال‌های مورد مطالعه

## ۲۱- نتیجه گیری

۱) مقاومت خمشی بدست آمده برای مدل‌های مورد مطالعه بالاتر از ظرفیت خمشی پلاستیک تیر می باشد، بنابراین اتصال‌های استفاده شده از مقاومت بسیار خوبی برخوردار است و باعث تشکیل مفصل پلاستیک در تیر متصل به خود می‌شود. تشکیل مفصل پلاستیک در مقطع تیر از

انتقال تغییر شکل‌ها به ستون جلوگیری می‌کند، بنابراین نوع مقطع ستون تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار پلاستیک اتصال نداشته و تنها باعث افزایش سختی اتصال در ناحیه الاستیک می‌شود.

۲) هر چه مقطع تیر و یا ستون استفاده شده بزرگتر شود، مقاومت خمشی اتصال بیشتر شده و این در صورتی است که شروع افت در مقاومت اتصال زودتر و در زوایای کوچکی چرخش اتفاق خواهد افتاد. هر چه ارتفاع تیر بیشتر شود، امکان وقوع کمانش در تیر و خصوصاً کمانش در جان تیر افزایش و با بروز کمانش، مقاومت اتصال به تدریج افت خواهد کرد.

۳) سیستم اتصال تیر به ستون دویل با استفاده از صفحات کناری قادر است تمام ظرفیت خمشی پلاستیک تیر را به ستون انتقال داده و باعث تشکیل مفصل پلاستیک در درون تیر می‌شود.

۴) با توجه به تشکیل مفصل پلاستیک در درون تیر، اتصال تیر به ستون دویل با استفاده از حالت های صفحات کناری و ورق میانی، ظرفیت چرخشی مناسبی را از خود نشان می‌دهد، به طوری که بدون کاهش شدید مقاومت به زاویه های چرخش  $0/04$  رادیان و بالاتر می‌رسد. بنابراین این اتصال ها، یک اتصال کاملاً شکل پذیر بوده و قابلیت استفاده در قابهای مقاوم خمشی ویژه (SMF) را دارا می‌باشد.

۵) در حالت اتصال تیر به ستون دویل با ورق پوششی، تنش قابل ملاحظه‌ای در مراحل انتهایی بارگذاری در چشمه اتصال بوجود آمده و این در صورتی است که چنین تنشی در چشمه اتصال مدل های با ورق کناری و سخت کننده ورق میانی مشاهده نمی‌شود و این امر یکی از نقاط قوت این سیستم‌های اتصال برای ستون‌های دویل است که به راحتی ظرفیت خمشی تیر را انتقال می‌دهد.

۶) در حالت اتصال تیر به ستون دویل با صفحه کناری نیروی کششی بال بوسیله ورق پوششی متصل به آن، به صفحات کناری و از آنجا به بال‌های ستون منتقل می‌شود. در این حالت نیروی کششی بال تیر به ورق پوشش ستون دویل وارد نمی‌شود و ضعف تغییر شکل زیاد و کمانش ورق پوشش ستون دویل بر اثر کشش مستقیم، خود به خود از بین می‌رود.

## فهرست منابع فارسی

- [۱]- ایرانی فریدون، (۱۳۸۶)، *طراحی ارتجاعی و خمیری سازه های فولادی*، انتشارات دانشگاه فردوسی
- [۲]- جاهد مطلق حمیدرضا، (۱۳۸۷)، *اجزاء محدود*، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران
- [۳]- دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، (۱۳۸۷)، *مبحث دهم طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی*، انتشارات دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان
- [۴]- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، (۱۳۸۵)، *آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش سوم*، کمیته دابوی بازنگری آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله
- [۵]- موسسه سازه های فولادی آمریکا، (۱۳۸۶)، *آیین نامه طراحی سازه های فولادی AISC 2005*، مجتبی اصل حمدالله نیا، نشر علم عمران
- [۶]- وثوقی فر حمیدرضا، (۱۳۸۸)، *مقاوم سازی لرزه ای اتصالات*، انتشارات دانشگاه قم

## فهرست منابع غیر فارسی

- [۷].Blais, R., *Joints Soudes Pour Profiles Tubulaires*, MSc Thesis, Civil Engineering Department, Laval University, Quebec, 1974.
- [۸].Deylami, A. and Ashraf, R., *Moment Resisting Connection with Sideplate*, 9th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 2003, Bali.
- [۹].Deylami, A. and Shiravand, M.R., *Moment Connection of Steel Built-up Column Using Side Plates*, 4th International Conference on Steel Structure, Shanghai, China, 2005
- [۱۰].Dube, A., *Influence des Deformation Locales sur la Stabilité Elastique de Poteaux Tubulaires*, MSc Thesis, Civil Engineering Department, Laval University, Quebec, 1972.

[11].Federal Emergency Management Agency, FEMA-350: *Recommended Seismic Design Criteria for New Welded Steel Moment Frame Buildings*, SAC Joint Venture, Sacramento, California, 2000.

[12].Federal Emergency Management Agency, FEMA-351: *Recommended Seismic Evaluation and Upgrade Criteria for Existing Welded Steel Moment Frame Buildings*, SAC Joint Venture, Sacramento, California, 2000.

[13].White,R.N and Fang,P.J , *Farming Connection for Square Structural Tubing* , *ASCE Proceedings* ,Journal of Structural Div.92(ST2),1966,PP.175-194