

## مطالعه رفتار اتصالات تیر به ستون قوطی شکل با استفاده از دیافراگم پیرامونی و بتن پرکننده داخلی

شاهرخ مالک\*<sup>۱</sup> و مرتضی حاجی فتحعلی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>استادیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۲</sup>دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۴/۷/۲۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۵/۱۲، تاریخ تصویب ۸۸/۸/۱۰)

### چکیده

تأمین ورق‌های پیوستگی<sup>۱</sup> اتصال در داخل ستون‌های قوطی شکل به نحوی که در آیین‌نامه ۲۸۰۰ و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان توصیه شده، از دیدگاه اجرایی و قابلیت اعتماد، اطمینان‌بخش به نظر نمی‌رسد. در این تحقیق با مدل‌سازی اجزاء محدود و تحلیل غیرخطی مادی و هندسی تحت تأثیر بارگذاری‌های تک‌آهنگ<sup>۲</sup> و رفت و برگشتی<sup>۳</sup>، به بررسی رفتار مدل‌های اتصالات تیر به ستون قوطی شکل با استفاده از ورق‌های مثلثی پیرامونی با یا بدون بتن پرکننده در داخل ستون و همچنین ورق‌های مثلثی پیرامونی توأم با کاهش عرض بال مقطع تیر به شکل شبه‌استخوانی در مقایسه با حالات استفاده از ورق پیوستگی داخل ستون پرداخته شده است. درباره نمونه‌های اتصال انتخاب شده با ابعاد متداول در سازه‌های ساختمانی متعارف، اتصالات دارای ورق مثلثی پیرامونی بدون یا با بتن داخل ستون، مقاومت و شکل‌پذیری قابل حصول تیر را تأمین و توانمندی قابل ملاحظه‌ای از نظر میزان انتقال لنگر بین تیر و ستون ارائه می‌دهند. در اتصالات تیرهای استخوانی منتهی به ورق‌های مثلثی پیرامونی، تمرکز تنش در محل اتصال تیر به ورق مثلثی کاهش و نسبت شکل‌پذیری ارتقا می‌یابد.

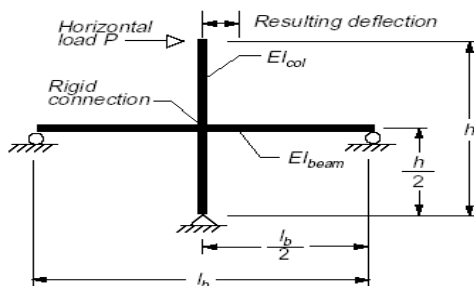
**واژه‌های کلیدی:** اتصالات تیر به ستون، رابطه لنگر-دوران اتصال، شکل‌پذیری، ورق پیوستگی، ورق پیرامونی، ستون قوطی شکل، تیراستخوانی

### مقدمه

گسترده و رفتار غیرخطی مصالح و کماتش صفحات در نظر گرفته شده است؛ ولی دامنه مطالعات، تحلیل شکست را براساس مفاهیم مکانیک شکست شامل نمی‌شود.

### روابط لنگر - دوران اتصال

درباره معیار محاسبه روابط لنگر - دوران اتصال بحث‌های گوناگونی مطرح شده است. دوران اتصال به طور معمول شامل ترکیبی از آثار زیر است:  
دوران نسبی تیر و ستون، چرخش اتصال و اعوجاج چشمه اتصال<sup>۴</sup>



شکل ۱: مدل پیشنهادی آزمایشگاهی اتصال مطابق مرجع [۱].

تأمین ورق‌های پیوستگی اتصال در داخل ستون‌های قوطی شکل به نحوی که در آیین‌نامه ۲۸۰۰ و همچنین در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران توصیه شده، جوش کاری از نوع گوشه یک ضلع ورق پیوستگی به وجه چهارم ستون، با توجه به زاویه محدود و نبود دید از داخل دشوار بوده و همچنین در این روش نیاز به برش کاری و جوش کاری ورق‌های وجه چهارم ستون نیز وجود دارد که از دیدگاه اجرایی و همچنین با توجه به موقعیت آن در حوالی اتصال، از نظر قابلیت اعتماد، مطلوب و اطمینان-بخش به نظر نمی‌رسد. در مطالعات حاضر، با توجه به دشواری‌ها و کاستی‌های ناشی از اجرای ورق پیوستگی در داخل ستون‌های قوطی شکل متشکل از ورق‌های جوش شده، نمونه‌هایی از اتصالات دارای ورق‌های مثلثی پیرامونی برای تأمین دیافراگم‌های محیطی جایگزین و ایفاکننده نقش ورق پیوستگی برای ستون و همچنین حالات ستون‌های قوطی شکل پرشده از بتن در مقایسه با حالاتی که ورق‌های پیوستگی در داخل ستون منظور شده باشند، بررسی شده است. لازم به یادآوری است که در مطالعات حاضر، آثار بروز پلاستیسیته

برای مدل‌سازی تماس بین دو سطح (به عنوان مثال در محل سطوح تماس نبشی اتصال به‌جان تیر و ستون و تماس بین بتن داخل ستون و ورق‌های فولادی جداره ستون) از اجزای محدود پیوند فقط فشاری بهره‌گیری شده که رفتار مادی آن خطی است.

مدل‌سازی بتن داخل ستون در بارگذاری تک‌آهنگ، با نوعی از اجزای محدود جامد انجام گرفته که قادر به ملحوظ داشتن خواص غیرخطی مادی و ترک‌خوردگی بتن داخل ستون است. حال آنکه برای مدل‌سازی بتن داخل ستون در بارگذاری رفت و برگشتی از نوع دیگری از اجزای محدود جامد با خواص غیرخطی مادی و هندسی استفاده شده است.

### نوع بارگذاری

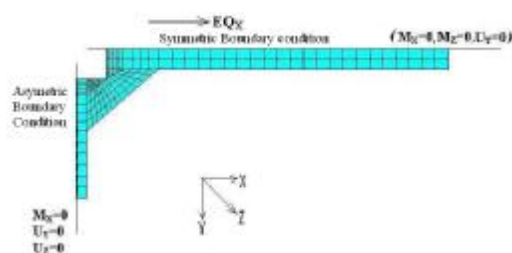
۱- بارگذاری تک‌آهنگ (منوتونیک)

۲- بارگذاری چرخه‌ای: رفت و برگشتی (سیکلک)

با بهره‌گیری از خواص تقارن مستقیم و معکوس، برای کاهش درجات آزادی مدل و در نتیجه کاهش نیاز به

تخصیص حافظه رایانه و زمان محاسبات عددی، تنها  $\frac{1}{4}$

اتصال برای تحلیل مدل‌سازی شده است. شرایط مرزی مدل در دو حالت متقارن و پاد متقارن در شکل (۳) نشان داده شده‌اند و این مدل تحت بار جانبی در راستای X ( $EQ_X$  در شکل ۳) قرار داده شده است.



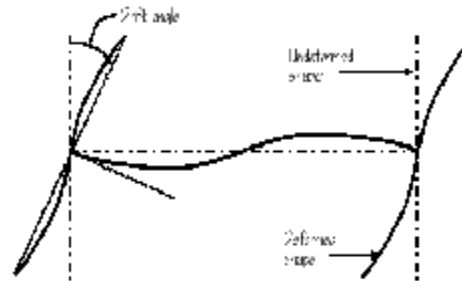
شکل ۳: مدل نمایشگر  $\frac{1}{4}$  اتصال با ورق مثلی در پلان.

### نمونه‌های مدل‌سازی شده اتصالات مورد مطالعه

#### مدل اول- اتصال تیر به ستون قوطی شکل بدون

#### تقویت و فاقد ورق پیوستگی داخل ستون

در این مدل هیچ‌گونه روش تقویتی به کار گرفته نشده است و برای مطالعه رفتار اتصال تیر به ستون قوطی شکل بدون ورق پیوستگی و همچنین مقایسه با سایر



شکل ۲: مدل دوران اتصال متناسب با دوران ستون و تیر مطابق الگوی معرفی شده در مراجع [۲] و [۴].

در دستورات عمل‌های مراجع [۱]، [۲]، [۳] و [۴] و مقالات متنوع دیگری که در آنها نمونه‌های آزمایش، تحت کنترل تغییر مکان جانبی ستون بررسی شده‌اند (شکل-های (۲) و (۳)، دوران نسبی تیر و ستون را به صورت اختلاف زاویه اولیه بین محورهای تیر و ستون با زاویه بین مماس بر منحنی تغییر شکل یافته تیر و خط متصل‌کننده نقاط عطف ستون، در نظر گرفته‌اند و به این روش معیاری برای مقایسه رفتار اتصالات به دست داده‌اند.

### مدل‌سازی و تحلیل

در مطالعات حاضر، از نرم‌افزار ANSYS برای تحلیل اجزای محدود مدل‌ها استفاده شده است [۵]. در تحلیل تک‌آهنگ اتصالات از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی با در نظر گرفتن اثر توأم رفتار غیرخطی مصالح و همچنین اثر تغییر مکان‌های قابل ملاحظه (بزرگ) استفاده شده است. تحلیل سیکلیک تحت کنترل تغییر مکان و با فرض رفتار مصالح سینماتیک و امکان بروز کمانش‌های موضعی انجام گرفته است. در مطالعات حاضر اثر ترک‌خوردگی بتن نیز در نظر گرفته شده است، ولی آنالیز شکست جوش به عمل نیامده است.

### اجزای محدود به کار گرفته شده در مدل‌های تحلیل

برای تحلیل غیرخطی توأم مادی و هندسی در مدل‌سازی ورق‌های فولادی تیر و ستون از اجزای محدود پوسته نازک بهره‌گیری شده است. برای مدل‌سازی جوش‌های گوشه (جوش نبشی اتصال به جان تیر و ستون) از اجزای محدود جامد که دارای قابلیت ارائه خواص غیرخطی مادی و هندسی دارند، استفاده شده است.

شیاری به کناره لبه‌های بال تیرها و به کنج ستون متصل شده‌اند (شکل‌های ۴ و ۵). بر اساس طراحی مبتنی بر فرض کاربرد اتصال در یک ساختمان متعارف، مقطع ستون قوطی شکل مربع مستطیلی، متشکل از ۴ ورق به ضخامت ۲۰ میلی‌متر به عرض ۴۰۰ میلی‌متر و مقطع تیر از نوع پروفیل IPE270 و ساق ورق‌های مثلثی شکل پیرامونی برابر با ۳۵۰ میلی‌متر و ضخامت آن‌ها برابر ۱۰ میلی‌متر انتخاب شده است. ورق‌های پیرامونی تیر به ستون قوطی‌شکل به صورت به کار گرفته شده در این مدل برای ایمن‌سازی، بهسازی و تقویت سازه‌های موجودی که در آنها اتصالات تیرها به ستون‌ها بدون ورق-های پیوستگی داخلی هستند نیز کاربرد گسترده‌ای خواهند داشت [۶].

#### مدل چهارم- اتصال تیر به ستون با بهره‌گیری از ورق‌های مثلثی پیرامونی بدون جوش این ورق‌ها به گوشه ستون‌ها

این مدل همانند مدل نمونه سوم است، با این تفاوت که جوش شیاری ورق‌های اتصال به ستون در محل کنج ستون برای کاهش تمرکز تنش در این مواضع حذف شده است.

#### مدل پنجم- اتصال تیر به ستون با بهره‌گیری از ورق‌های مثلثی پیرامونی به همراه بتن در داخل ستون

این مدل نیز همانند مدل سوم می‌باشد ولی در آن علاوه بر ورق‌های مثلثی پیرامونی، در داخل ستون نیز بتن جاداده شده است.

#### مدل ششم- اتصال تیر به ستون با بهره‌گیری از ورق مثلثی، بدون جوش کاری در گوشه ستون‌ها و همراه بابتن در داخل ستون

این مدل همانند مدل پنجم است، با این تفاوت که جوش‌های شیاری ورق‌های اتصال به ستون در محل کنج ستون حذف شده‌اند.

#### مدل هفتم- اتصال تیر به ستون با بهره‌گیری از ورق پیوستگی در داخل ستون

در این مدل ورق‌های مثلثی پیرامونی حذف شده و مطابق نمونه‌های اجرایی پیشنهادی مبحث دوم آیین-نامه ۲۸۰۰ [۷] و مبحث دهم مقررات ملی ساختمانی

مدل‌های مورد مطالعه بررسی شده است. تیر اصلی شامل پروفیل دبل IPE270 و تیر متعامد از پروفیل منفرد IPE270 در نظر گرفته شده‌اند. ستون جعبه‌ای با مقطع راست‌گوشه مربعی شکل متشکل از ورق‌هایی به بعد عرضی ۴۰۰ و ضخامت ۲۰ میلی‌متر اختیار شده است. طول تیر در مدل، معادل نصف دهانه تیر (در این جا ۲/۵ متر با توجه به طراحی تیر و ستون بر اساس دهانه‌های قاب اولیه مفروض) و طول کل ستون در فواصل نقاط عطف برابر با سه متر در نظر گرفته شده است. نبشی جان اتصال تیر به ستون از نوع L100\*100\*10 میلی‌متر اختیار شده که با جوش‌های گوشه به تیر و ستون متصل شده است. همچنین میان تار صفحات نبشی اتصال جان تیر و ستون از اجزای محدود پیوند با عملکرد فقط فشاری، بهره‌گیری شده است.

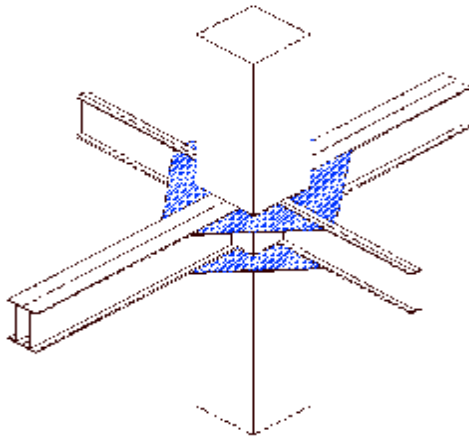
#### مدل دوم- اتصال تیر به ستون قوطی‌شکل در حالی که داخل ستون با بتن پر شده باشد

این مدل همانند مدل اول است و برای بررسی اثر حضور بتن در داخل ستون بدون ورق‌های پیوستگی، مدل‌سازی شده است. به دلیل امکان جدا شدن ورق جدار ستون از بتن داخل ستون در صورت اعمال کشش از ناحیه بال تیر به ورق ستون، در محل تماس بین ورق ستون و بتن، از اجزای محدود پیوند فقط فشاری استفاده شده است. در جهات متعامد، از خاصیت هم‌بندی همساز گرهی نرم‌افزار بهره‌گیری شده و بنابراین پیوستگی در جهات دیگر، کامل فرض شده است و از اثر احتمال جدا شدن ورق از بتن در امتداد متعامد بر تیر اصلی صرف‌نظر شده است. در بارگذاری تک‌آهنگ از جزء محدود جامد با قابلیت در نظر گرفتن اثر ترک‌خوردگی بتن استفاده شده است، ولی با توجه به غیرمسلح بودن و در عین حال محصور بودن بتن داخل ستون و ناچیز بودن اثر ترک‌خوردگی بتن، برای ممانعت از بروز ناپایداری عددی در تحلیل‌های تحت تأثیر سیکل‌های بارگذاری چرخه‌ای، از اجزای محدود جامد با قابلیت ارائه رفتار غیرخطی مصالح برای مدل‌سازی بتن بهره‌گیری شده است.

#### مدل سوم- اتصال تیر به ستون بدون ورق پیوستگی داخلی و با بهره‌گیری از ورق‌های مثلثی پیرامونی

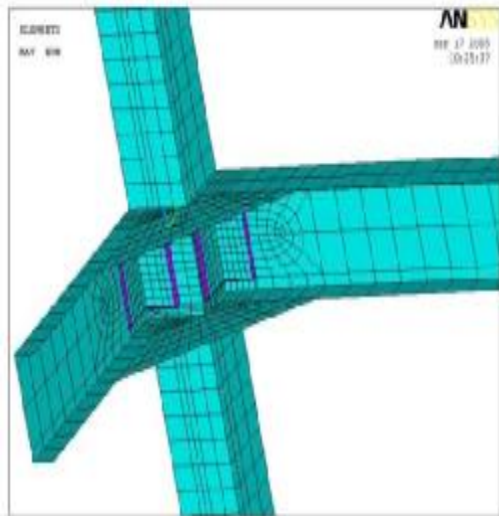
در این مدل، ورق‌های مثلثی شکل پیرامونی با جوش

مناسبی برای این هدف دست یافت. در این شکل ورق‌های مثلثی با سایه نشان داده شده‌اند.



شکل ۴: نمایش شماتیک ورق‌های تقویتی مثلثی پیرامونی ستون قوطی شکل (مدل شماره ۳).

در شکل (۵) نمونه‌ای از شبکه‌بندی مدل اجزای محدود اتصال دارای صفحات مثلثی پیرامونی نشان داده شده است.



شکل ۵: نمونه‌ای از شبکه‌بندی اجزای محدود مدل‌های اتصال (مدل ورق مثلثی پیرامونی با نبشی جان).

## انتخاب خواص مصالح

### مصالح فولادی و جوش

مشخصات مصالح فولادی تیرها و ستون‌ها و همچنین مصالح جوش به نحوی که در تحلیل تعریف شده است، در شکل‌های (۶ و ۷) ارائه شده‌اند.

ایران [۸ (b و a)]، از دو ورق پیوستگی در محاذات بال‌های تیر، در داخل ستون استفاده شده است. ضخامت ورق‌های پیوستگی مزبور ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. در اینجا فرض بر آن است که این اتصال به نحو مورد نظر در مراجع ذکر شده قابل اجرا بوده‌است.

### مدل هشتم - اتصال تیر به ستون قوطی شکل با بهره‌گیری از ورق پیوستگی داخلی همراه با بتن داخل ستون

این مدل همانند مدل هفتم است، با این تفاوت که در ناحیه اتصال، بتن در داخل ستون جا داده شده است. از نظر اجرایی، در این اتصال می‌توان ورق‌های پیوستگی بالایی را سوراخدار طراحی و اجرا کرد و بتن ریزدانه به نسبت روان را همراه با اندکی مواد معین منبسط شونده از سوراخ پهلوی ستون به محل اتصال تزریق کرد.

### مدل نهم - اتصال تیر به ستون با بهره‌گیری از ورق پیوستگی داخل ستون و منطقه تضعیف‌شده تیر به شکل استخوانی

این مدل همانند مدل هفتم است، با این تفاوت که در آن مواضع تضعیف‌شده، شبه‌استخوانی<sup>۷</sup> در بال‌های تیر در فاصله ۳۵۰ میلی‌متری از بر اتصال برای تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه کنترل‌شده شبه‌استخوانی پیش‌بینی شده‌اند.

### مدل دهم - اتصال تیر به ستون با بهره‌گیری از ورق‌های مثلثی پیرامونی به همراه منطقه تضعیف‌شده شبه استخوانی

این مدل همانند مدل سوم است، با این تفاوت که منطقه تضعیف‌شده شبه استخوانی در بال‌های تیر در فاصله ۳۵۰ میلی‌متری از بر اتصال (با شروع منطقه تضعیف‌شده به طور دقیق در محل انتهای ورق مثلثی شکل پیرامونی) برای کاهش تمرکز تنش در این موضع و تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه کنترل‌شده شبه استخوانی پیش‌بینی شده است. شکل (۴) تصویر شماتیک ورق‌های تقویتی مثلثی شکل پیرامونی اتصال مدل شماره ۳ را ارائه می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود، در این نوع اتصال لازم است تیرهای واقع در دو امتداد متعامد در محل اتصال دارای ارتفاع تقریباً یکسان باشند. در طرح‌های جدید با بهره‌گیری از تیر ورق‌های ساخته شده یا پروفیل‌های موجود دویل و منفرد، می‌توان به طراحی

## بررسی نتایج تحلیل و مدل‌سازی تحت تاثیر بارگذاری تک آهنگ

### مقایسه اتصالات از نظر مکان تشکیل مفصل پلاستیک و توزیع تنش فون مایسز

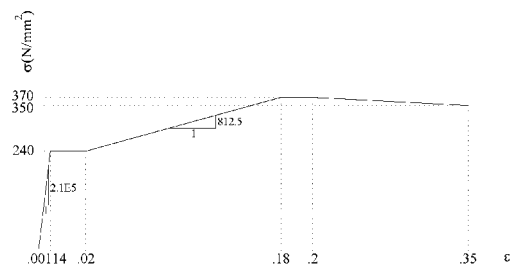
نتایج تحلیل مدل‌های اجزاء محدود اتصالات مذکور در فوق نشان‌دهنده آن است که در اتصالات متفاوت، مکان‌های تشکیل مفصل پلاستیک تیر با هم متفاوت بوده‌اند، ولی به طور کلی نتایج حاصله دال بر آن می‌باشند که در اتصالاتی که پهنای بال تیر آنها در اثر حضور ورق‌های مثلثی پیرامونی در نزدیکی اتصال افزایش یافته باشد، مفصل پلاستیک از بر ستون فاصله گرفته، به طور کامل در تیر تشکیل گردیده است. در مورد اتصالات تضعیف شده به صورت شبه‌استخوانی نیز مفصل پلاستیک در موضع کنترل‌شده در ناحیه تضعیف‌شده تشکیل می‌گردد.

### مدل اتصال تیر به ستون قوطی شکل فاقد ورق‌های پیوستگی (مدل ۱)

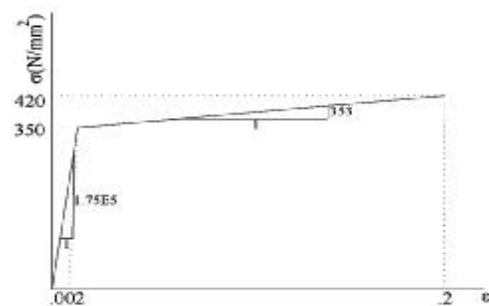
نتایج تحلیل این مدل نشان می‌دهد که کرنش‌های پلاستیک قابل ملاحظه در ستون و بال تیر در برستون بروز نموده و گسترش روند پلاستیسیته به داخل ستون صورت گرفته است. این امر ناشی از اعمال نیروهای کششی و فشاری از بال‌های بالایی و زیرین تیر به ورق ستون قوطی‌شکل بدون صفحه پیوستگی برای مهار این نیروها و ایجاد خمش در ورق ستون بوده است. در این تحلیل حداکثر تنش‌ها در داخل ستون اتفاق افتاده و تیر نسبت به ستون سطح تنشی کمتری دارد، بنابراین مواضع بحرانی از نظر بروز و گسترش کرنش پلاستیک اغلب در ستون مشاهده شده‌اند. از سوی دیگر، میزان لنگر قابل انتقال از طریق تیر به ستون، به دلیل تغییر شکل خمشی قابل ملاحظه ورق ستون از سایر مدل‌ها کوچک‌تر بوده و تغییر زاویه نسبی قابل‌اعتنایی بین محورهای تیر و ستون در مقایسه با زاویه اولیه قائمه، نشان داده شده است. این موضوع در مطالعات مرجع [۹ (a تا d)] مورد توجه ویژه قرار داده شده است.

### مدل دارای بتن در داخل ستون بدون ورق پیوستگی (مدل ۲)

با جادادن بتن داخل ستون در مدل دوم، کرنش پلاستیک در ستون کاهش یافته و روند گسترش



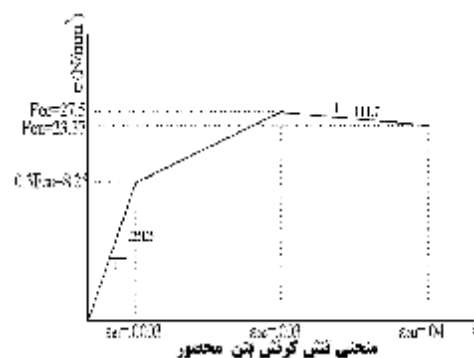
شکل ۶: منحنی ایده‌آل‌سازی شده تنش - کرنش فولاد  
[۹ (a تا d)].



شکل ۷: منحنی ایده‌آل‌سازی شده تنش - کرنش جوش [۱۰].

## مصالح بتنی

لازم به یادآوری است که بتن داخل ستون عذر عمل به بتن محصور شده<sup>۸</sup> تبدیل می‌شود؛ بنابراین در اینجا تلاش شده که این موضوع در انتخاب ضوابط و منحنی رفتاری تنش - کرنش بتن نیز متناسباً ملحوظ شود (شکل ۸).



شکل ۸: مشخصات مصالح بتنی مفروض  
(برای بتن محصور) [۱۱].

اصلاح مشخصه‌های بتن محصور شده و نمایش داده شده در شکل (۸) طبق توصیه‌های مراجع [۱۱-۱۳] انجام گرفته است.

نشدن طول جوش کافی بین ورق مثلثی و ستون، نشان-دهنده بروز کرنش‌های پلاستیک در بر اتصال و در بال تیر بوده است، در حالی که تشکیل مفصل پلاستیک نیز کامل نشده است. در این تحلیل تنش حداکثر در ستون اتفاق افتاده و تیر تنش کمتری نسبت به ستون نشان می‌دهد که این موضوع بر عملکرد نامطلوب این اتصال با توجه به ویژگی‌های هندسی و تأمین نشدن طول جوش کافی تیر به ستون، دلالت دارد؛ اگر چه در موضعی از اتصال، تمرکز تنش کاهش یافته است.

### مدل شامل ورق‌های مثلثی پیرامونی به همراه بتن داخل ستون (مدل ۵)

با جا دادن بتن داخل ستون قوطی‌شکل در این نوع اتصال، کرنش پلاستیک در مقایسه با نتایج تحلیل مدل ۳ تغییر چشم‌گیری نشان نداده است. حداکثر تنش حاصل از تحلیل این مدل در ورق مثلثی و تیر مشهود شده و ستون تنش‌های کوچک‌تری را در مقایسه با مدل شماره ۳ تجربه کرده است. نکته مهمی که از استفاده از بتن در داخل ستون استنتاج می‌شود، کاهش قابل ملاحظه مقادیر تنش و تغییر شکل ورق در ستون است.

### مدل شامل ورق‌های مثلثی بدون جوشکاری به گوشه‌های ستون به همراه بتن داخل ستون (مدل ۶)

تحلیل این مدل، حاکی از رفتاری همانند مدل مورد بحث در بند قبلی بوده است. در این نمونه، توزیع تنش به دلیل از بین رفتن پیوستگی ناحیه تحت کشش ورق ستون و بتن، نامتقارن است. بررسی تنش‌های حاصله نشان‌دهنده آن است که تنش حداکثر ستون در مقایسه با مدل شماره ۴، به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

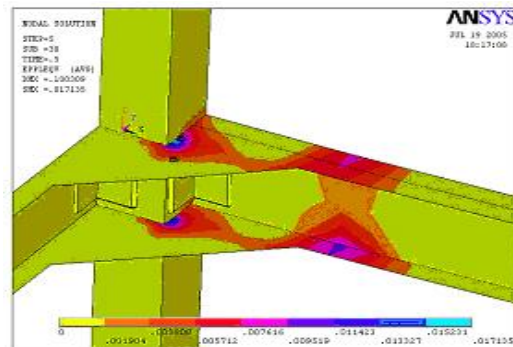
### مدل شامل ورق‌های پیوستگی داخل ستون (مدل ۷)

مدل شامل ورق‌های پیوستگی داخل ستون به طبع، عملکرد به مراتب مطلوب‌تری از مدل بدون ورق داخل ستون (مدل ۱) نشان داده است. این نمونه در زمره نمونه‌های استاندارد در آیین‌نامه ۲۸۰۰ و در مبحث دهم مقررات ملی ساختمانی ایران به شمار می‌آید که چنان که ذکر شد، نیل به نیت و رفتار مورد نظر و مورد نیاز، مستلزم اتصال ورق‌های پیوستگی داخلی به هر ۴ وجه ستون قوطی‌شکل است که با توجه به دشواری‌های

پلاستیسیته از ستون به داخل بال تیر انجام گرفته و در بال و جان تیر در کنج اتصال پیشروی کرده است. به دلیل ممانعت بتن از تغییر مکان ورق ستون به سمت داخل، میزان گیرداری اتصال در مقایسه با مدل اول افزایش یافته است.

### مدل‌های ورق مثلثی پیرامونی (مدل ۳)

در مدل ورق مثلثی پیرامونی، ابتدا ورق مثلثی در بر اتصال به حالت پلاستیک در آمده و با افزایش روند بارگذاری، پلاستیسیته در ورق پیشروی کرده، در انتهای ورق به تیر گسترش یافته و مفصل پلاستیک کامل در تیر تشکیل شده است و چنانکه انتظار می‌رفت، موقعیت مفصل پلاستیک به اندازه طول ورق مثلثی از برستون فاصله گرفته است (شکل ۹).



شکل ۹: تشکیل مفصل پلاستیک در فاصله‌ای مناسب از بر اتصال در همه مدل‌های دارای ورق مثلثی. در این مدل علائم بروز تمرکز تنش در ناحیه کنج ستون مشاهده می‌شود.

تنش حداکثر در داخل تیر و با فاصله‌ای مناسب از بر اتصال در محل تشکیل مفصل پلاستیک اتفاق افتاده است. این موضوع نشان‌دهنده اثر مطلوب تقویت اتصال مورد مطالعه از راه دیافراگم پیرامونی است که با توجه به فرم مثلثی شکل، سبب شده است که تشکیل مفصل پلاستیک در موقعیت مناسب و در فاصله‌ای برابر با بعد ورق مثلثی شکل از بر اتصال انجام گیرد و در نتیجه، تشکیل مفصل پلاستیک در تیر مقدم بر ستون و با حاشیه اطمینان مکفی تضمین شود.

### مدل‌های شامل ورق‌های مثلثی بدون جوشکاری آنها به گوشه‌های ستون (مدل ۴)

تحلیل مدل‌های شامل ورق‌های مثلثی بدون جوشکاری ورق به گوشه‌های ستون، به دلیل تأمین

## مقایسه مدل‌های نمونه اتصالات از دیدگاه سختی اولیه

ابتدا منحنی لنگر- دوران اتصالات حاصل از تحلیل‌های تک‌آهنگ را ترسیم کرده، سپس به کمک نظریه خط تیر سختی اتصال را بررسی می‌کنیم (شکل ۱۰). عوامل بارز منحنی خط تیر عبارتند از:

$$M_F = f_y S \quad (۲)$$

$$\theta_a = \frac{M_F}{2EI} \frac{L}{L} \quad (۳)$$

که در آن  $f_y$  تنش تسلیم فولاد،  $S$  مدول ارتجاعی مقطع تیر و  $EI$  صلبیت خمشی تیر است.

در فضای  $M - \theta$ ، خط تیر از نقاط با مختصات  $(0, M_F)$  و  $(\theta_a, 0)$  می‌گذرد. در روابط بالا، میزان قابلیت انتقال لنگر از راه اتصال به کمک کمیت  $(R)$  به شکل زیر بیان می‌شود:

$$R = \frac{M}{M_F} \times 100 \quad (۴)$$

در رابطه (۴)،  $M$  لنگر متناظر با نقطه تقاطع خط تیر با منحنی لنگر- دوران اتصال است. در اینجا  $(R)$  را شاخص میزان گیرداری اتصال می‌نامیم. با مراجعه به شکل (۱۰) و جدول (۱) ملاحظه می‌شود که در مورد نمونه‌های تحلیل- شده، مدل‌های دارای ورق مثلثی جوش شده به گوشه‌های ستون و همچنین مدل‌های دارای ورق پیوستگی داخل ستون بیشترین سختی را نشان داده‌اند و در عمل این دسته از مدل‌های تحلیل شده را در حیطه رفتار الاستیک خطی می‌توان در زمره اتصالات با عملکرد نزدیک به صلب به شمار آورد. بدیهی است شاخص میزان گیرداری چنین اتصالاتی در ترکیب با بتن درون ستون، افزایش خواهد یافت (جدول ۱). در ارتباط با سایر اتصالات مورد مطالعه، اگر چه اتصالات مزبور نیز قابلیت انتقال لنگر قابل ملاحظه و میزان گیرداری به نسبت قابل قبولی داشته‌اند، ولی با توجه به مقادیر کمیت  $(R)$  در جدول (۱) در زمره اتصالات پاره‌گیردار قلمداد می‌شوند. در باره اتصالات با ورق‌های مثلثی پیرامونی سختی قابل ملاحظه در منحنی لنگر- دوران اتصال شکل (۱۰) ناشی از آن است که بخش اعظم تنش‌ها در حوالی بر ستون در حیطه رژیم الاستیک باقی مانده‌اند. به عبارت دیگر، خواص هندسی اتصال، منجر به دور شدن اثرات پلاستیسیته از بر ستون و

اجرایی، حصول به این نیت مورد تردید است. در این مدل، نتایج تحلیل حاکی از آن است که کرنش پلاستیک ابتدا از محل بر اتصال و در بال تیر آغاز می‌شود و با افزایش بار، به جان تیر نیز نفوذ می‌کند.

## مدل شامل ورق‌های پیوستگی داخلی به همراه بتن داخل ستون (مدل ۸)

در این نمونه، کرنش پلاستیک در داخل تیر از کنج ستون شروع شده و در همان مکان گسترش پیدا کرده و به دنبال آن به جان تیر نفوذ کرده است. مقدار تنش حداکثر نیز در مقایسه با مدل شامل ورق پیوستگی بدون بتن داخلی به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته، ولی به دلیل ذکر شده در بند قبل توزیعی نامتقارن را نشان می‌دهد.

## مدل شامل ورق پیوستگی داخل ستون به همراه ناحیه تضعیف شده شبه استخوانی در تیر (مدل ۹)

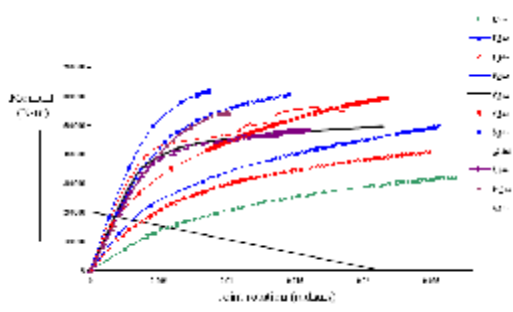
نتایج تحلیل این مدل نشانگر آن است که با ایجاد منطقه تضعیف شده شبه استخوانی در تیر، مفصل پلاستیک ابتدا در تیر، در بر اتصال و سپس در منطقه تضعیف شده، تشکیل شده است. چنانکه در ارتباط با نتایج تحلیل مدل شماره ۱۰ اشاره خواهد شد، نقیصه بروز پلاستیسیته در محل بر اتصال تیر به ستون، با استفاده از ورق‌های مثلثی پیرامونی به طور آشکارا بر طرف شده است، زیرا منطقه تضعیف شده در مدل شماره ۱۰ درست از انتهای ورق مثلثی پیرامونی آغاز و حضور ورق‌های مثلثی با افزایش نسبتاً قابل ملاحظه پهناى بال، تشکیل لولای پلاستیک کامل در بر ستون را منتفی می‌کند.

## مدل شامل ورق‌های مثلثی پیرامونی توأم با ناحیه تضعیف شده استخوانی در تیر (مدل ۱۰)

در مدل شامل ورق‌های مثلثی پیرامونی به همراه منطقه شبه استخوانی درست در انتهای ورق‌های مثلثی حاکی از ایجاد کرنش‌های پلاستیک محدود در بر ستون همراه با نفوذ پلاستیسیته در ورق مثلثی بال تیر و گسترش پلاستیسیته در همه بال و جان در منطقه تضعیف شده شبه استخوانی بوده است و در این ناحیه مفصل پلاستیک کامل در بال و جان تیر ایجاد شده است.

ادامه جدول ۱:	
مدل هشتم: اتصال دارای ورق پیوستگی سوراخدار داخل ستون و همراه با بتن پرکننده داخل ستون می-باشد.	۹۲/۷
مدل نهم: اتصال دارای ورقهای پیوستگی داخل ستون بوده و تیر شامل بالهای تضعیف شده به صورت استخوانی می باشد.	۹۰/۶
مدل دهم: اتصال دارای ورقهای مثلثی پیرامونی بوده و تیر شامل بالهای استخوانی می باشد. ناحیه استخوانی تیر از انتهای ورقهای مثلثی شروع گردیده است.	۹۰/۳

در جدول (۱) ملاحظه می شود که حضور اثر منطقه تضعیف شده شبیه استخوانی منجر به کاهش سختی و همچنین کاهش شاخص میزان گیرداری اتصال در مقایسه با اتصالات مشابه فاقد منطقه تضعیف شده، شده است. از سوی دیگر، حضور بتن در داخل ستون، شاخص میزان گیرداری اتصال  $R$  را حدود ۱۰ درصد در مدل بدون هیچگونه روش تقویتی افزایش داده است. همچنین مقایسه شاخص میزان گیرداری اتصالات مدل های سوم با پنجم، چهارم با ششم و هفتم با هشتم حاکی از افزایش  $R$  در حالات بهره گیری از بتن داخل ستون ها بوده است.



شکل ۱۰: منحنی لنگر- دوران اتصال در تمامی مدل های مورد مطالعه.

میزان تأثیر حضور بتن در تقویت اتصالات پاره گیردار مطالعه شده با عنوان مدل های اول و چهارم بر شاخص میزان گیرداری، ملموس تر از حالاتی بوده است که اتصالات بدون حضور بتن داخل ستون ها به خودی خود دارای شاخص  $R$  فراتر از ۹۰ درصد بوده اند.

### مقایسه از نظر شکل پذیری

به طور معمول در قاب های خمشی چنین انتظار می رود که بروز پلاستیسیته در نواحی دور از بر ستون و به

تشکیل مفاصل پلاستیک در تیر شده و همچنین تنش های فشاری و کششی بال تیرها، از بال های تیر در یک سمت ستون به بال های تیر در سمت مقابل ستون با الگوی روانی منتقل شده اند؛ به نحوی که در صورت نبود وقوع شکست ترد، انتظار می رود اتصال رفتار مطلوبی ارائه کند. به طوری که در جدول (۱) ملاحظه می شود، اتصال شامل ورق های مثلثی پیرامونی توأم با بهره گیری از بتن در داخل ستون، بیشترین مقدار شاخص  $R$  (حدود ۹۳/۴٪) و اتصال فاقد هر گونه روش تقویتی کمترین مقدار آن، به میزان ۷۲/۹٪، را در مجموعه اتصالات مورد مطالعه با مشخصات تشریح شده و مفروضات مدل سازی و تحلیل نشان داده اند. اتصال بدون ورق پیوستگی فولادی همراه با بتن در داخل ستون، با مقدار کمیت  $R = ۸۲/۵$ ٪ در چارچوب اتصالات پاره گیردار قابل طبقه بندی است، ولی بقیه نمونه های مدل سازی شده با ورق های مثلثی پیرامونی یا ورق های پیوستگی داخلی، با یا بدون بتن داخل ستون، با مقادیر  $R$  افزون تر از ۹۰ درصد را می توان در گروه اتصالات با رفتار تقریباً نزدیک به صلب طبقه بندی کرد. در این جا یادآوری می شود که با توجه به محدوده مشخصه های هندسی اتصالات مورد مطالعه، بیش از آنکه مقادیر  $R$  از نظر قدر مطلق پر اهمیت باشند، از دیدگاه مقایسه ای و تطبیقی در قیاس با یکدیگر قابل توجه هستند.

جدول ۱: شاخص های میزان گیرداری اتصالات مورد مطالعه.

مدل مورد مطالعه	شاخص میزان گیرداری (%) ( $R$ )
مدل اول: اتصال فاقد هرگونه روش تقویتی می باشد.	۷۲/۹
مدل دوم: اتصال صرفاً دارای بتن در داخل ستون می باشد.	۸۲/۵
مدل سوم: اتصال دارای ورق های مثلثی پیرامونی می باشد که دور تا دور ستون جوشکاری شده اند.	۹۱/۱
مدل چهارم: اتصال دارای ورق های مثلثی پیرامونی می باشد که به گوشه های ستون جوشکاری نشده اند.	۸۵/۱
مدل پنجم: اتصال دارای بتن در داخل ستون به همراه ورق های مثلثی پیرامونی می باشد.	۹۳/۴
مدل ششم: اتصال دارای بتن در داخل ستون، همراه با ورق های مثلثی پیرامونی است؛ ولی این ورق ها در گوشه ها به ستون جوشکاری نشده اند.	۹۰/۴
مدل هفتم: اتصال با ورق های پیوستگی داخل ستون، با فرض اجرایی بودن، مورد مطالعه قرار داده شده است.	۹۱/۶



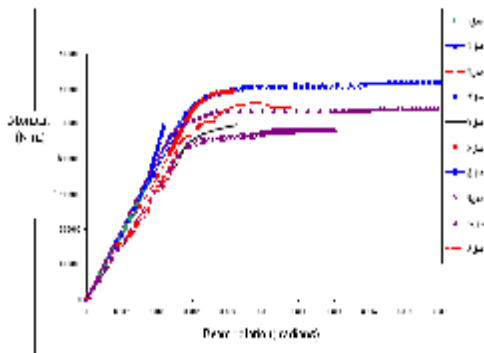
شکل تشکیل مفصل پلاستیک در تیر، مقدم بر ستون اتفاق افتد. با بررسی منحنی‌های لنگر-دوران تیر در مدل‌های مورد مطالعه (شکل ۱۱)، ملاحظه می‌شود که در مورد مدل‌هایی که نتایج تحلیل آنها حاکی از آن بوده است که در آنها مفصل پلاستیک به طور کامل در تیر تشکیل می‌شود، نسبت شکل‌پذیری افزون‌تری در مقایسه با سایر اتصالات، حاصل شده است. در صورتی که نسبت میزان دوران متناظر با بار حداکثر حاصل از تحلیل به دوران متناظر با نقطه مرتبط با حد حیطه رفتار ارتجاعی اتصال که در اینجا حدود ۷۵ درصد لنگر نهایی در منحنی لنگر-دوران در نظر گرفته شده، به عنوان نسبت شکل‌پذیری ( $\mu$ ) اختیار شود، جدول (۲) مقادیر حاصله را برای انواع مدل‌های مورد مطالعه ارائه می‌کند.

تضعیف شبه استخوانی تیر نشان داده است. این در حالی است که این اتصال نسبت شکل‌پذیری نسبتاً زیادی را در ناحیه اتصال نشان نداده است. همچنین مدل دهم که در آن ناحیه تضعیف‌شده استخوانی از انتهای ورق‌های مثلثی پیرامونی ستون آغاز می‌شود، نسبت شکل‌پذیری به میزان قابل ملاحظه‌ای بزرگ‌تر از اتصال نوع نهم ارائه کرده است. در مورد مدل‌های اول، دوم و چهارم، کمترین مقدار نسبت شکل‌پذیری مبتنی بر رفتار تیر مشاهده شده است که نتایج تحلیل این مدل‌ها حاکی از آن است که منحنی لنگر-دوران در این نمونه‌ها در حیطه رژیم الاستیک رفتاری تیر باقی مانده است.

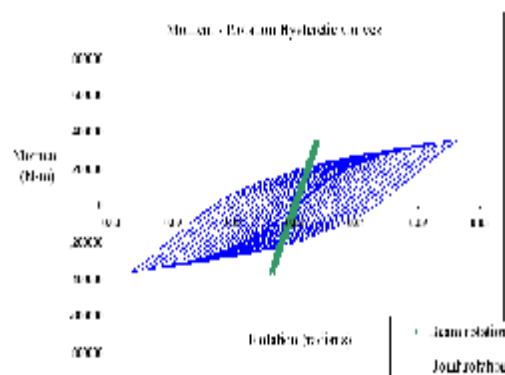
با توجه به جدول (۲) حضور منطقه تضعیف‌شده استخوانی منجر به افزایش نسبت شکل‌پذیری مبتنی بر رفتار تیر و کاهش نسبت شکل‌پذیری مبتنی بر رفتار اتصال شده است. همچنین با توجه به جدول (۲) بهره‌گیری از ورق‌های مثلثی پیرامونی، شکل‌پذیری مبتنی بر رفتار تیر را به نحو مطلوبی در مقایسه با اتصال دارای ورق پیوستگی داخل ستون ارتقا بخشیده است.

جدول ۲: مقایسه نسبت شکل‌پذیری محاسبه‌شده برای انواع اتصالات مورد مطالعه.

مدل	(مبتنی بر رفتار تیر)	(بر اساس رفتار اتصال)
مدل اول - بدون هیچ روش تقویتی	۱/۰۰	۱/۴۳
مدل دوم - بتن داخل ستون	۱/۰۰	۱/۷۱
مدل سوم - ورق مثلثی	۲/۵۲	۱/۹۷
مدل چهارم - ورق مثلثی بدون جوش گوشه‌ها	۱/۰۰	۱/۴۷
مدل پنجم - بتن داخل ستون به همراه ورق مثلثی	۳/۳۲	۱/۶۱
مدل ششم - بتن داخل ستون و ورق مثلثی بدون جوش گوشه‌ها	۱/۲۷	۱/۵۳
مدل هفتم - ورق داخل ستون	۱/۳۲	۳/۹۵
مدل هشتم - ورق پیوستگی و بتن داخل ستون	۱/۸۱	۳/۰۶
مدل نهم - ورق داخل ستون به همراه منطقه تضعیف‌شده شبه استخوانی	۲/۳۳	۲/۸۳
مدل دهم - ورق مثلثی به همراه منطقه تضعیف‌شده شبه استخوانی	۳/۶۸	۱/۵۰



شکل ۱۱: منحنی لنگر - دوران تیر در نمونه‌های مورد مطالعه.

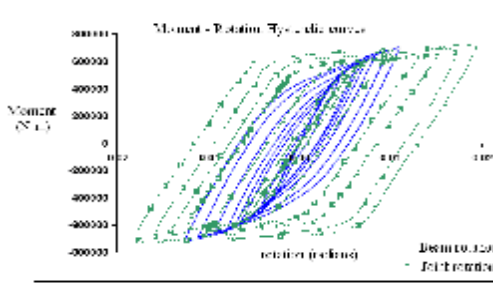


شکل ۱۲: مدل اول - اتصال تیر به ستون قوطی شکل بدون ورق پیوستگی.

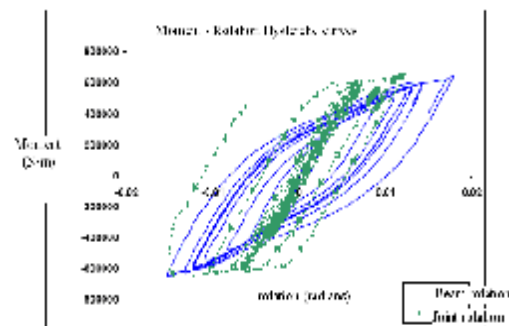
با توجه به جدول (۲) در بررسی مقایسه‌ای اتصالات مورد مطالعه، مدل پنجم - مدل دارای ورق مثلثی پیرامونی شامل بتن در داخل ستون - بزرگترین نسبت شکل‌پذیری مبتنی بر رفتار تیر را از بین مدل‌های بدون

**مقایسه رفتار هیستریزیس**

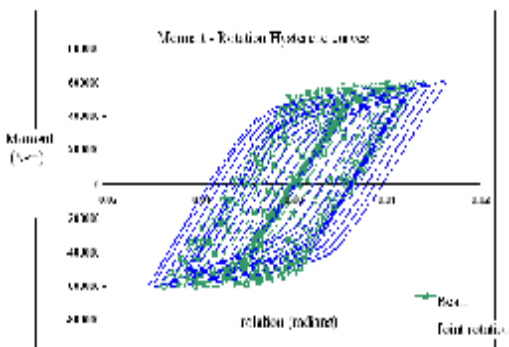
مجموعه منحنی‌های حاصل از تحلیل سیکلیک مدل‌های اجزای محدود اتصالات مورد مطالعه به صورت چرخه‌های هیستریک لنگر- دوران تیر و همچنین لنگر J دوران اتصال در شکل‌های (۱۲) تا (۲۱) ارائه شده‌اند.



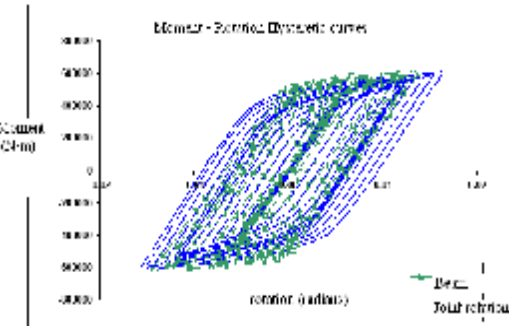
شکل ۱۶: مدل پنجم- اتصال شامل ورق‌های مثلی پیرامونی همراه با بتن پرکننده داخل ستون قوطی‌شکل.



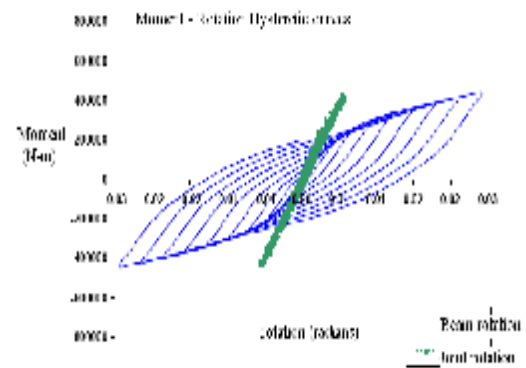
شکل ۱۷: مدل ششم- مدل شامل ورق‌های مثلی بدون جوشکاری ورق‌ها به گوشه ستون‌ها همراه با بتن در داخل ستون.



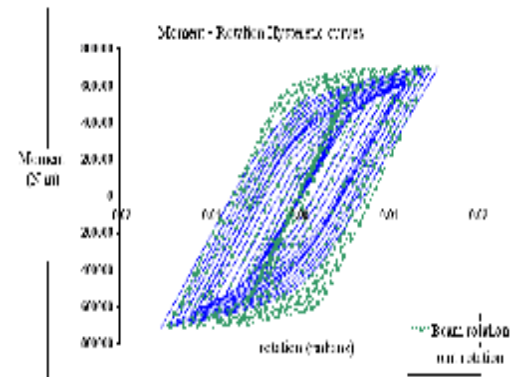
شکل ۱۸: مدل هفتم- اتصال دارای ورق پیوستگی در داخل ستون.



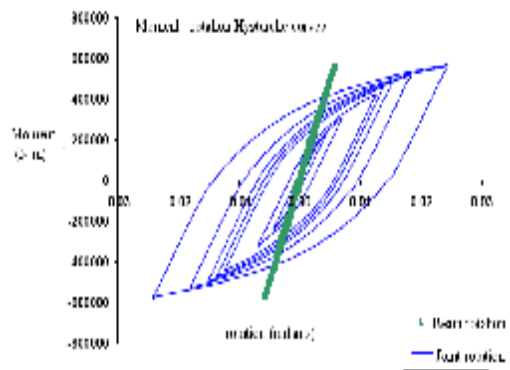
شکل ۱۹: مدل هشتم- مدل دارای ورق پیوستگی سوراخ‌دار در داخل ستون همراه با بتن پرکننده داخل ستون.



شکل ۱۳: مدل دوم- اتصال تیر به ستون قوطی‌شکل بدون ورق پیوستگی، ولی شامل بتن پرکننده داخل ستون.



شکل ۱۴: مدل سوم- مدل شامل ورق‌های مثلی پیرامونی ستون قوطی‌شکل.



شکل ۱۵: مدل چهارم- مدل شامل ورق‌های مثلی پیرامونی ستون قوطی‌شکل بدون جوشکاری ورق‌ها به گوشه ستون‌ها.

دوم و چهارم کوچکتر بوده و منحنی لنگر- دوران اتصال (شکل ۱۰) سختی بیشتری را بر اساس رفتار اتصال، در این نمونه‌ها نشان می‌دهند. بنابراین در این اتصالات اغلب رفتار الاستیک در موضع اتصال مسلط شده است. این تفاوت رفتاری در منحنی‌های نشان داده شده در شکل (۱۱) نیز منعکس شده‌اند.

### مقایسه از نظر میزان جذب انرژی و میرایی در اتصال

در شکل (۲۲)، الگوی محاسبه میرایی معادل اتصالات ارائه شده است. همچنین چرخه متناظر با تغییر مکان نسبی ستون به میزان سه درصد ارتفاع طبقه به عنوان تغییر مکان هدف از نتایج تحلیل در همه مدل‌ها استخراج شده است (شکل ۲۳). مساحت زیر این منحنی‌ها به عنوان شاخصی از دیدگاه میزان جذب انرژی اتصال و تیر در چرخه مزبور (متناظر با تغییر مکان هدف به میزان ذکر شده) به کار گرفته شده است. همچنین میرایی معادل اتصال  $\xi_{eq}^c$  و تیر  $\xi_{eq}^b$  بر اساس رابطه ۵ [۱۲] به صورت ارائه شده در جدول (۳) مقایسه شده است.

جدول ۳: مقایسه رفتار اتصالات مورد مطالعه از دیدگاه میزان جذب انرژی.

شماره نوع مدل اتصال (i)	مطالعه بر اساس رفتار اتصال		مطالعه مبتنی بر رفتار تیر	
	$\frac{E_{pc}(i)}{E_{pc}(v)}$ $\times 100$	$\frac{\xi_{eq}^c(i)}{\xi_{eq}^c(v)}$ $\times 100$	$\frac{E_{pb}(i)}{E_{pb}(v)}$ $\times 100$	$\frac{\xi_{eq}^b(i)}{\xi_{eq}^b(v)}$ $\times 100$
۱	۶۸	۶۹	۰	۰
۲	۷۴	۶۹	۲	۷
۳	۸۹	۸۱	۱۳۹	۱۲۸
۴	۱۲۲	۸۸	۲۲۰	۰
۵	۶۴	۸۱	۴	۱۳۸
۶	۸۰	۶۹	۱۲۵	۱۳۱
۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۸	۶۴	۱۱۳	۱۹۳	۱۲۴
۹	۷۴	۱۰۰	۱۲۴	۱۱۷
۱۰	۷۸	۷۸	۱۵۲	۱۲۴

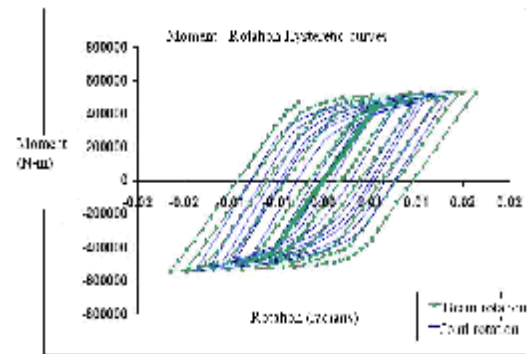
که در آن:

$$\xi_{eq}^c(i): \text{میرایی معادل اتصال نوع } (i), (i=1,2,\dots,10)$$

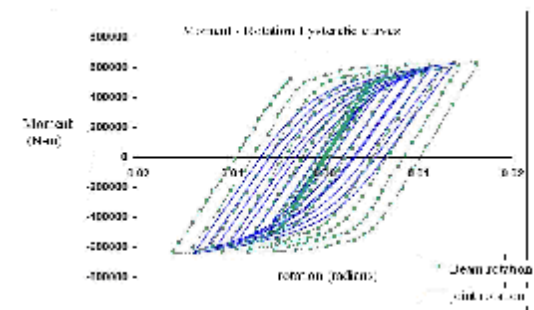
$$\xi_{eq}^c(v): \text{میرایی معادل اتصال نوع } (v)$$

$$\xi_{eq}^b(i): \text{میرایی معادل تیر در مدل نوع } (i)$$

$$\xi_{eq}^b(v): \text{میرایی معادل تیر در مدل نوع } (v)$$



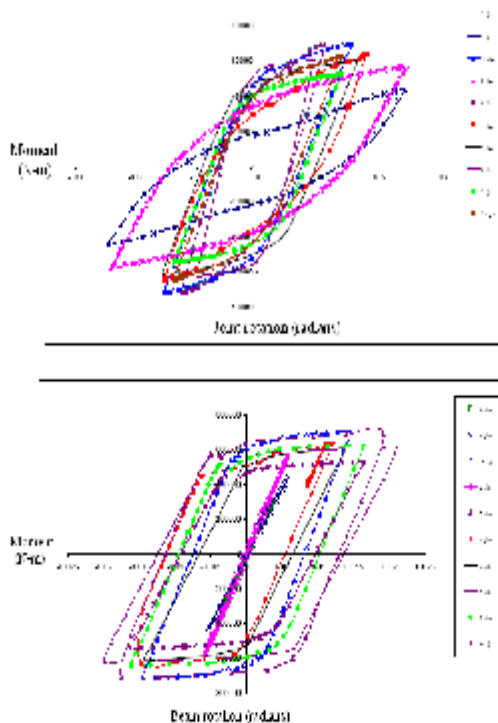
شکل ۲۰: مدل نهم- اتصال تیر شامل منطقه تضعیف‌شده شبه استخوانی به ستون دارای ورق پیوستگی داخلی.



شکل ۲۱: مدل دهم- اتصال دارای ورق‌های مثلثی پیرامونی ستون قوطی شکل که در آن تیر شامل منطقه تضعیف‌شده شبه استخوانی است.

ملاحظه می‌شود رفتار منحنی‌های هیستریزس لنگر- دوران تیر در شکل‌های (۱۲، ۱۳ و ۱۵)، مربوط به مدل‌های اول، دوم و چهارم در محدوده رژیم الاستیک بوده است. در این نمونه‌ها منحنی اختلاف دوران تیر و ستون، نشان-دهنده انعطاف‌پذیری بیشتر در بر اتصال و عدم تشکیل لولای پلاستیک، به طور واضح در تیر و در فاصله مناسبی از برستون، بوده است و همچنین این نمونه‌ها از سختی کوچک‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها بهره‌مند بوده‌اند (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). همان‌طور که در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود، شش منحنی از ده منحنی نمایش داده شده در این شکل رفتار با شکل‌پذیری قابل ملاحظه‌ای ناشی از دوران تیر را در اتصالات مورد مطالعه به نمایش گذاشته‌اند. این نمونه‌ها شامل مدل‌های دارای ورق مثلثی پیرامونی و مدل‌های دارای ورق پیوستگی در داخل ستون با یا بدون بتن داخلی هستند. در مورد مدل‌های دارای ورق مثلثی با جوش‌کاری در گوشه ستون و مدل دارای ورق پیوستگی داخل ستون، اختلاف زاویه دوران تیر و ستون تحت بارگذاری ثابت، در مقایسه با مدل‌های اول،

طریق رفتار ماوراءالاستیک تیر دارای قابلیت افزون تر و از نظر میزان جذب انرژی در موضع اتصال، مقدار کوچکتری را نشان داده است که هر دو اینها نشانگر رفتار مطلوب تر اتصال دارای ورق‌های مثلثی پیرامونی در مقایسه با اتصال دارای ورق پیوستگی درونی بوده است. در حالی که ورق پیوستگی درونی - به دلیل موارد مرتبط با فرایند ساخت - عدم قطعیت رفتاری از دیدگاه حصول به نیت مورد نظر را در بر دارد، ورق پیوستگی مثلثی پیرامونی مستلزم طراحی هم ارتفاع تیرها در دو امتداد متعامد اتصال است. البته باید یادآور شد که درباره ورق‌های درونی نیز اختلاف ارتفاع تیرهای متعامد اتصال منجر به عدم عملکرد مورد نظر ورق‌های پیوستگی خواهد شد.



شکل ۲۳: مقایسه آخرین چرخه منحنی رفتاری هیستریزیس (تغییر مکان نسبی ستون معادل حداکثر ۳٪ ارتفاع طبقه) در مدل‌های مورد مطالعه بر اساس رفتار اتصال و رفتار تیر.

#### مقایسه از نظر مقاومت نهایی اتصال

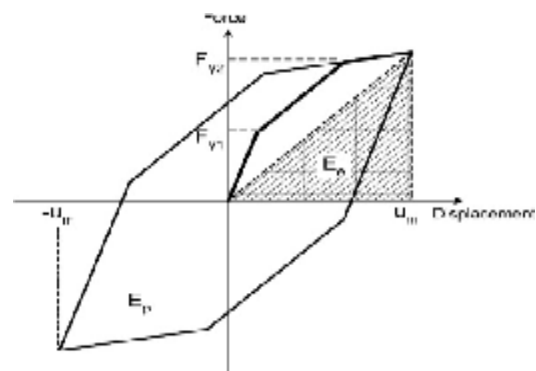
در جدول (۴) مقادیر لنگر حداکثر حاصل از تحلیل برای هر یک از اتصالات مورد مطالعه همراه با نسبت مقادیر لنگر مزبور به مقدار لنگر حداکثر به دست آمده از تحلیل مدل هفتم (اتصال مرجع) ارائه شده است.

$E_{pc}(i)$  میزان انرژی جذب شده مبتنی بر رفتار اتصال در سیکل متناظر با تغییر مکان هدف مطابق شکل ۲۳ در مدل نوع (i)،  
 $E_{pc}(T)$ : میزان انرژی جذب شده مبتنی بر رفتار اتصال در سیکل متناظر با تغییر مکان هدف مطابق شکل ۲۳ در مدل نوع (۷).  
 $E_{pb}(i)$ : میزان انرژی جذب شده مبتنی بر رفتار تیر در سیکل متناظر با تغییر مکان هدف مطابق شکل ۲۳،  
 $E_{pb}(T)$ : میزان انرژی جذب شده مبتنی بر رفتار تیر در سیکل متناظر با تغیی مکان هدف مطابق شکل ۲۳.

در این جدول با توجه به آنکه اتصال نوع ۷ از نظر ورق پیوستگی با توصیه‌های آئین‌نامه ۲۸۰۰ تطابق دارد، به عنوان معیار مقایسه<sup>۴</sup> در نظر گرفته شده و مقادیر میرایی و انرژی جذب شده در چرخه مورد بحث، در مقایسه با مقادیر متناظر محاسبه شده برای مدل هفتم ارائه شده‌اند.

$$\xi_{eq} = \frac{E_p}{4\pi E_{el}} \quad (5)$$

$E_p$ : انرژی مستهلک شده در سیکل آخر برابر با مساحت داخل منحنی آخرین چرخه کامل هیستریزیس (شکل ۲۳).  
 $E_{el}$ : انرژی کرنشی الاستیک متناظر با تغییر مکان هدف برابر با مساحت مثلث هاشور زده شده در شکل (۲۲).



شکل ۲۲: الگوی مناسب محاسبه میرایی معادل اتصالات [۱۲].

با توجه به جدول (۳) نتیجه می‌شود که در مجموعه اتصالات مورد مطالعه، نمونه‌های دارای ورق مثلثی پیرامونی، قابلیت جذب انرژی مطلوبی را ارائه می‌دهند که از راه بررسی منحنی‌های لنگر - دوران تیر قابل استنباط است. به طوری که ذکر شد، دلیل این موضوع قابلیت تشکیل مفصل پلاستیک در تیر با فاصله مناسب از برستون، به دلیل حضور ورق‌های پیرامونی مثلثی شکل است. بنابراین طی آخرین چرخه بارگذاری، اتصال نمونه دارای ورق‌های مثلثی پیرامونی در مقایسه با اتصال دارای ورق پیوستگی داخل ستون، از نظر میزان جذب انرژی از

جدول ۴: مقادیر مطلق مقاومت نهایی خمشی اتصالات مدل‌های مطالعه شده و مقادیر نسبی این کمیت نسبت به مدل شماره ۷.

شماره مدل اتصال (i)	نسبت لنگر حداکثر قابل تحمل اتصال نوع (i) به اتصال نوع (۷) × (۱۰۰) [M <sub>max(i)</sub> /M <sub>max(7)</sub> ] × ۱۰۰	لنگر حداکثر (نیوتن - متر) M <sub>max(i)</sub>
مدل ۱	۶۵	۳۲۰۵۰۱
مدل ۲	۸۲	۴۰۶۵۴۰
مدل ۳	۱۲۲	۶۰۵۷۱۰
مدل ۴	۱۰۰	۴۹۶۴۹۴
مدل ۵	۱۲۴	۶۱۷۶۰۹
مدل ۶	۱۲۰	۵۹۳۶۰۶
مدل ۷	۱۰۰	۴۹۶۱۴۲
مدل ۸	۱۱۴	۵۶۳۳۶۰
مدل ۹	۹۷	۴۸۳۰۰۲
مدل ۱۰	۱۰۹	۵۴۳۱۸۴

تعمیم یا گسترش دامنه‌ی درستی نتایج لازم است اتصالات متنوع‌تری با ابعاد متفاوت تیرها، ستون‌ها و ادوات اتصال، مورد مطالعه گسترده پارامتریک قرار داده شوند که از حوزه مطالعات حاضر که به نیت شناسایی رفتار اتصالات مورد مطالعه در مقایسه با یکدیگر و در حیطه محدودی از ابعاد متداول سانجام گرفته، خارج بوده است. بنابراین در بهره‌گیری از نتایج زیر توصیه می‌شود جانب احتیاط رعایت شود.

- اتصال با ورق مثلثی پیرامونی سختی و شاخص گیرداری قابل ملاحظه‌ای (در حدود ۹۱٪) ارائه کرده است و در صورت استفاده از بتن داخل ستون در چنین اتصالی، سختی و شاخص گیرداری اتصال به میزان نسبتاً اندکی افزایش یافته و به میزان ۹۳/۴ درصد می‌رسد که نشان‌دهنده رفتار نزدیک به رفتار صلب این نوع از اتصال بوده است که در طبقه‌بندی مرجع ۱ تحت عنوان اتصال صلب طبقه‌بندی می‌شود.

- ویژگی‌های هندسی اتصال دارای ورق مثلثی پیرامونی منجر به ایجاد قابلیت تشکیل مفصل پلاستیک در تیر و در موقعیت انتهایی ورق‌های اتصال با فاصله مکفی و کنترل‌شده از بر ستون شده است. همچنین استفاده از ورق مثلثی پیرامونی همراه با منطقه تضعیف‌شده استخوانی در تیر، منجر به دورتر شدن موقعیت مفصل پلاستیک تیر از بر ستون شده و لولای پلاستیک در تیر در فاصله‌ای مناسب و کنترل‌شده از بر ستون تشکیل شده است.

- در مدل دارای ورق‌های مثلثی پیرامونی، میزان جذب انرژی مبتنی بر رفتار تیر ۱۳۹ درصد اتصال دارای ورق پیوستگی داخلی بوده است که حاکی از قابلیت مطلوب ارضای ملزومات تیر ضعیف و ستون قوی در کاربرد آن در قاب‌های لنگرگیر (خمشی) بوده است. در عین حال انرژی جذب‌شده از طریق اتصال در مدل دارای ورق‌های مثلثی پیرامونی کوچک‌تر از انرژی نظیر برای اتصال دارای ورق پیوستگی داخلی محاسبه شده است که این موضوع نیز به کاهش احتمال بروز حالات خرابی متصور در بر ستون دلالت دارد.

- مقاومت نهایی اتصال مدل دارای ورق‌های مثلثی پیرامونی، از تهمه مدل‌های دیگر مطالعه‌شده بدون بتن داخل ستون فراتر بوده و از مدل دارای ورق پیوستگی داخل ستون به میزان ۲۲ درصد بیشتر بوده است. در

از میان مدل‌های مطالعه شده در مورد مدل‌های دارای ورق‌های مثلثی پیرامونی، بیشترین لنگر قابل تحمل در اتصال به دست آمده است و از سوی دیگر، مدلی که بدون ورق پیوستگی و بتن داخلی بوده است، کمترین لنگر قابل تحمل را نشان داده است. به طوری که از نتایج خلاصه شده در این جدول برای مدل‌های تحت بررسی استنتاج می‌شود، لنگر خمشی حداکثر اتصال دارای ورق‌های مثلثی پیرامونی، به میزان ۲۴ درصد از اتصال با ورق پیوستگی داخل ستون افزون‌تر بوده است. البته لازم به یادآوری است که میزان مصالح مصرفی در اتصال دارای ورق مثلثی پیرامونی در مدل‌های مطالعه شده اندکی بیش از مدل‌های دارای ورق داخل ستون بوده است. ولی باید به این نکته توجه کرد که نسبت این افزایش مصالح به کل مصالح مصرفی در مجموعه سازه بسیار ناچیز خواهد بود، در حالی که به شرحی که گذشت، مزایای قابل‌اعتنایی از دیدگاه رفتاری، قابلیت جذب انرژی و کنترل تشکیل لولای پلاستیک در تیر و همچنین ارتقاء مقاومت نهایی و قابلیت اجرای اتصال منطبق با ملزومات طراحی جزئیات، مشروط به توانمندی طراح در ارائه طرح مناسب تیرهای متعامد، از خود ارائه کرده است.

### نتیجه‌گیری

در حیطه مطالعات انجام شده و نمونه‌های بررسی‌شده، نتایجی به شرح زیر حاصل شده‌اند، بدیهی است برای

شبه‌استخوانی، به طور کامل در تیر قرار گرفته است.

- در مدل‌های مطالعه‌شده دارای ورق‌های مثلثی پیرامونی نسبت شکل‌پذیری محاسبه‌شده در تیر حدود ۱/۹ تا ۱/۲ برابر مدل‌های دارای ورق پیوستگی داخلی مورد بررسی بوده است.

- ورق مثلثی به همراه بتن داخل ستون و همراه با تضعیف شبه‌استخوانی بال‌های تیر، با توجه به رفتار مناسب حاصل از تحلیل‌های مدل‌های واقع‌گرایانه اجزای محدود مربوط به آن، می‌تواند به عنوان روش مناسبی برای طراحی جزئیات سازه‌های جدید، یا بهسازی و ترمیم و اصلاح رفتار اتصالات نیمه‌صلب رایج به کار رود و در مورد اتصالاتی که در آنها ورق پیوستگی داخل ستون تأمین نشده است، راهکار مناسبی برای بهسازی به‌شمار می‌رود. در این نوع اتصال، علاوه بر کنترل موضع تشکیل مفصل پلاستیک، تمرکز تنش نیز در محل انقطاع ورق پیرامونی به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

- لازم به یادآوری است که اتصال با ورق مثلثی پیرامونی مطالعه شده، ضمن حذف مسائل مرتبط با عدم قطعیت در نیل به کیفیت مطلوب جوش کاری ورق پیوستگی داخلی به وجه چهارم ستون و همچنین جوش کاری ورق به ورق ستون در وجه چهارم در فاصله نزدیک به اتصال، مقادیر سختی، مقاومت و شکل‌پذیری به میزان قابل ملاحظه‌ای افزون‌تر از سایر اتصالات مورد مطالعه را ارائه داده است.

- در استفاده از ورق‌های مثلثی شکل پیرامونی، تنها لازم است که در طراحی، ارتفاع بال‌های تیرها و یا تیر ورق‌های متعامد را در حدود یکسان در نظر گرفت. این موضوع در عمل برای طراحان با تجربه کار دشواری تلقی نمی‌شود و دارای مزایایی از دیدگاه معماری نیز هست. در بهسازی اتصالات موجود نیز اغلب یکی از بال‌های تیرهای متعامد هم‌رقوم بوده و در مورد بال‌های غیرهم‌رقوم نیز اغلب می‌توان با ارائه جزئیات اجرایی مناسب، طرح بهسازی را متناسب با ویژگی‌های هندسی اتصال، به گونه‌ای طراحی کرد که امکان بهره‌گیری از دیافراگم پیرامونی ستون در هر دو تراز بال‌های بالایی و زیرین تیرها فراهم شود.

- در این صورت دشواری‌های اجرایی و عدم دسترسی برای جوش کاری ورق داخلی حذف و از برش کاری و

حالت استفاده از بتن در داخل ستون‌ها، میزان اختلاف مقاومت بین دو نوع اتصال مزبور، هر گاه همراه با بتن داخلی در ستون‌ها به کار گرفته شوند، به ۲۴ درصد افزایش یافته است. این موضوع نیز از مزایای مقاومتی اتصالات دارای ورق پیرامونی مثلثی توأم با بتن داخل ستون به شمار می‌رود.

- طی تحلیل مدل‌های شامل ورق‌های مثلثی با یا بدون بتن داخل ستون‌ها، در همه مراحل بارگذاری تغییر شکل متزاید ناگهانی بروز نکرده و سیکل‌های بارگذاری و باربرداری به دلیل توزیع متعادل سختی همانند یکدیگر بوده و در باربرداری نیز تغییر شکل نامطلوب ناگهانی به وقوع نپیوسته است و در مجموع اتصال رفتار مطلوبی از خود نشان داده است.

- در حالت بهره‌گیری از بتن در داخل ستون، توزیع تنش در ارتفاع اتصال نامتقارن شده است که دلیل اصلی این موضوع امکان جدا شدن ورق ستون از بتن در موضع اتصال بال کششی تیر به ستون بوده که میزان اهمیت و تأثیر آن وابسته به ضخامت و ابعاد و در نتیجه سختی خمشی ورق ستون خواهد بود. حضور بتن به افزایش سختی ستون و اتصال و کاهش تغییر زاویه نسبی بین تیر و ستون انجامیده است. از طرف دیگر، با کاهش سطح تنش در ستون، مواضع بروز پلاستیسیته از ورق جان ستون به سمت تیر انتقال یافته‌اند و ویژگی‌های هندسی به نحو بارزی در جهت ارضای فلسفه تیر ضعیف و ستون قوی تأثیرگذار بوده‌اند. همچنین لازم به یادآوری است که حضور بتن در داخل ستون سبب سخت شدن ستون در خارج از ناحیه اتصال نیز شده است. در ارتباط با مطالعات تفصیلی‌تر در مورد اثر حضور بتن داخل ستون در اتصالات تیر به ستون و در اتصالات اعضای لوله‌ای سازه‌های دریایی به ترتیب به مراجع [۱۳] و [۱۴] مراجعه کرد.

- در اتصالات متفاوت مطالعه‌شده، مواضع تشکیل مفاصل پلاستیک نیز با یکدیگر متفاوت بوده‌اند؛ ولی از یک قاعده کلی پیروی کرده‌اند. در اتصالاتی که پهنای بال تیر آنها، در نزدیکی اتصال افزایش یافته یا به وسیله ورق‌های مثلثی این افزایش حاصل شده است، موضع تشکیل مفصل پلاستیک تیر متناسب با آن از بر ستون فاصله گرفته و در اتصالات دارای ورق‌های مثلثی و همچنین ورق‌های مثلثی با تضعیف بال تیر به شکل

تیرهای متعامد در حدودی که نیاز به تجدید نظر در طراحی را ایجاب کنند، مشاهده نشد.

### تقدیر و تشکر

مطالعات گزارش شده در این مقاله در چارچوب یک طرح پژوهشی نوع ششم در پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران و همچنین بخشی از یک طرح وسیع پژوهشی- کاربردی در مورد اتصالات سازه‌های فولادی، بر اساس ایده‌های ارائه شده توسط نگارنده اول، با پشتیبانی گروه تخصصی سازه، کار گروه زلزله و لغزش لایه‌های زمین و کمیته ملی کاهش اثرات بلایای طبیعی زیر نظر معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران به عمل آمده است که مساعدت‌های انجام گرفته شایسته قدردانی است. همچنین لازم است از خانم‌ها مهندس شرمین امین‌نژاد و فرزانه رحمانی که در تایپ و صفحه‌بندی مقاله قبول زحمت فرموده‌اند، تشکر به عمل آید.

جوش کاری ورق ستون در نزدیکی اتصال- معمولاً با قابلیت دسترسی اندک- که می‌تواند به دلیل کیفیت نازل جوش کاری ورق پیوستگی داخلی به وجه چهارم ستون و همچنین جوش کاری ورق به ورق ستون در وجه چهارم در فاصله نزدیک به اتصال نگران‌کننده باشد، کاسته می‌شود و انتظار می‌رود ورق پیرامونی با جوش پیرامونی احتمال شکست جوش ستون جعبه‌ای متشکل از ورق‌های جوش شده را نیز به میزان قابل اعتنایی کاهش دهد. به نظر می‌رسد از مزایای دیگر ورق‌های اتصال پیرامونی، کاهش احتمال شکست جوش مستقیم تیر به ستون یا ورق‌های فوقانی و تحتانی اتصال تیر به ستون باشد که البته اثبات این امر نیاز به مطالعات بیشتر خواهد داشت.

- در تحلیل‌های غیرخطی مدل‌های تفصیلی اجزاء محدود نمونه‌های مورد مطالعه، ضمن نیل به الگوی انتقال تنش مطلوب‌تر، مقادیر تنش دو محوری در بالهای

### مراجع

- 1- Federal Emergency Management Agency. (1998). FEMA 273, *Commentary on the NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*.
- 2- Federal Emergency Management Agency. (2000). FEMA 350, *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment Frame Buildings*.
- 3- AISC. (1999). *Seismic Provisions For Structural Steel Buildings, Including Supplement No. 1*.
- 4- SAC. (1998). Steel Project: *Strength and Ductility of FR Welded-Bolted Connections*. Report No. SAC/BD-98/01, SAC Joint Venture, CA.
- 5- ANSYS Finite Element Program. Version 6.1.
- 6 - Maalek, S. et.al. (1385). *Seismic Vulnerability Assessment and Retrofit of the Main Building of the Development and Novation Organization of the Iranian Industry*. Natural Disaster Reduction Institute, in 14 volumes (in Persian).
- 7- BHRC. (2005). *The Iranian Code of Practice for the Seismic Resistant Design of Buildings*, Standard No. 2800-05 (3 rd Edition).
- 8(a)- The Iranian National Building Provisions, Part 10: (2005). *The Design and Construction of Steel Buildings* the ASD version, (in Persian).
- 8(b)- The Iranian National Building Provisions, Part 10: (2008). *The Design and Construction of Steel Buildings* the LRFD version, (in Persian).
- 9(a)- Tarighat, A. (1994). *A finite element study of the behaviour of the by-pass type of connections*. M.Sc. Dissertation, the School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran. Supervised by: S. Maalek (in Persian).

- 9(b)- Kalantar-zadeh, M. (1995). *An Investigation of the behaviour of the stiffened by-pass connections*. M.Sc. Dissertation, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Kerman Branch. Supervised by: S. Maalek (in Persian).
- 9(c)- Kamyab-Moghaddass, R. (1998). *The Dynamic behaviour of the by-pass connections*. M.Sc. Dissertation, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Kerman Branch. Supervised by: S. Maalek (in Persian).
- 9(d)- Pooshideh, M. (1999). *The non linear analysis of the by pass type of connections*. M.Sc. Dissertation, the School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran. Supervised by S. Maalek ( in Persian).
- 10 - American Standards for Testing and Materials, ASTM-A645-A738 Steels.
- 11- Paulay, T. and Priestly, M. J. N. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, Wiley, New York.
- 12 - ATC 40. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. Vol.1, Report No. SSC 96-01, CA.
- 13 - Maalek, S. and Ziaei, M. (2005). " The behaviour of the composite beam to column connections." *Proceedings of the Second National Congress of Civil Engineering*, the University of Science and Technology of Iran (in Persian).
- 14 - Maalek, S. and Choobdar-Toosi, M. (1996). The Analysis and Design of Tubular T and K types of connections, *Proceedings of the second International Conference on Coastal and Offshore Structures (ICOPMAS-II)*, The University of Science and Technology of Iran (in Persian).

#### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Continuity Plate
- 2 - Monotonic
- 3 - Cyclic
- 4 - Panel Zone Distortion
- 5 - Large Displacements
- 6 - Solid Element
- 7 - Dog Bone
- 8 - Confined
- 9 - Bench Mark
- 10 - Compression only