

## اثر نیروی محوری روی رفتار اتصال خمشی با صفحه انتهایی بلند

مهدی قاسمی<sup>۱\*</sup> و ایمان شمیم<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار 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 ۸۵/۱۰/۱۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۵/۵، تاریخ تصویب ۸۸/۵/۱۳)

### چکیده

در این مقاله رفتار یکی از اشکال اتصال خمشی با صفحه انتهایی بلند با چهار پیچ و بدون سخت‌کننده، به روش اجزاء محدود تحت اثر بار محوری، ارزیابی و بررسی شده است. در مدل اجزاء محدود تمامی اثرات غیر خطی شامل رفتار مصالح و هندسه در نظر گرفته شده است. به این منظور مطالعه روی رفتار اتصال تحت ترکیب بارهای ذکر شده (نیروی محوری و لنگر خمشی) صورت گرفته و منحنی‌های اندرکنش نیروی محوری - لنگر خمشی ترسیم گردید. ملاحظه گردید که وجود نیروی محوری با میزان کم هم (نسبت به نیروی تسلیم مقطع تیر)، می‌تواند موجب تغییر در مود گسیختگی اتصال و در نتیجه تغییر در ظرفیت خمشی پیش‌بینی شده اتصال شود. همچنین ملاحظه گردید که شکل عمومی نمودار اندرکنش نیروی محوری - لنگر خمشی تابع ابعاد بندی اتصال نمی‌باشد.

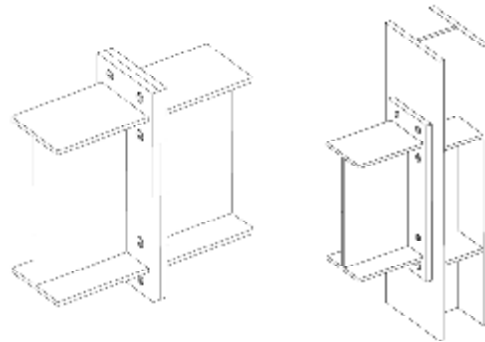
**واژه‌های کلیدی:** اتصالات خمشی، صفحه انتهایی بلند، اجزاء محدود غیرخطی، بارگذاری محوری، مود گسیختگی

### مقدمه

دو نوع اتصال با صفحه انتهایی را می‌توان در نظر گرفت که عبارتند از نوع بلند و نوع هم‌تراز (شکل‌های ۲ و ۳). اتصال با صفحه انتهایی هم‌تراز شامل یک صفحه انتهایی است که خارج از بالهای تیر اتصال توسعه نیافته و تمامی ردیف‌های پیچ داخل بالها قرار گرفته‌اند. اتصال با صفحه انتهایی بلند، شامل یک صفحه انتهایی است که خارج از بالهای تیر اتصال گسترش یافته و حداقل یک ردیف پیچ در محدوده خارج از بالها و در بخش گسترش یافته قرار دارد. صفحه انتهایی بلند می‌تواند سخت شده یا سخت نشده باشد. نوع سخت شده دارای سخت‌کننده‌هایی است که به بخش خارجی بال تیر و به صفحه انتهایی جوش داده شده و سخت‌کننده در راستای جان تیر اتصال قرار می‌گیرد تا بخش گسترش یافته صفحه انتهایی را مقاوم سازد.

تحقیقات زیادی روی تحلیل اتصال خمشی با صفحه انتهایی با استفاده از روش اجزاء محدود صورت گرفته است ولی در هیچکدام اثر نیروی محوری روی رفتار اتصال دیده نشده است. در قاب‌هایی که تحت نیروی جانبی از قبیل باد، نیروی زلزله، بار جراثقیل و غیره قرار می‌گیرند، این نیروی جانبی ابتدا به صورت نیروی محوری تیر وارد اتصال شده و در نهایت به ستون منتقل می‌شود.

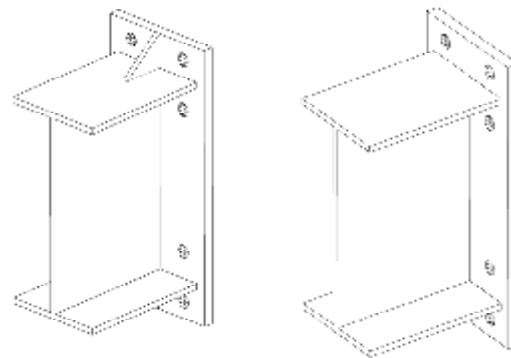
اتصال خمشی با صفحه انتهایی شامل صفحه‌ای است که به انتهای تیر جوش داده شده و سپس در محل به اعضای اتصال با استفاده از چندین ردیف پیچ با مقاومت بالا متصل می‌شود. نصب این نوع اتصال به سبب پیچی بودن نسبتاً آسان و در نتیجه سودمند می‌باشد. عدم نیاز به جوشکاری در محل باعث می‌شود که سازه در شرایط سرد نیز براحتی برپا شده و زمان ساخت کاهش یابد. به علت ساخت با دقت بالاتر و روش‌های طراحی بهتر، استفاده از صفحات انتهایی در سازه‌های چند طبقه، از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد. از این اتصال اصولاً برای اتصال تیر به ستون یا الحاق دو تیر بهم استفاده می‌شود (شکل ۱).



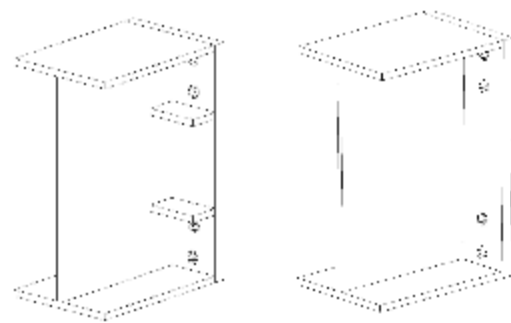
شکل ۱: انواع اتصال با صفحه انتهایی.

تحلیل مدل‌های سه بعدی استفاده نمودند، که به طور مناسبی رفتار اتصال خمشی با صفحه انتهایی بلند سخت نشده با چهار پیچ را پیش بینی نمود. در مدل ایشان از المان‌های خرابایی، المان‌های آجری هشت گره‌ای و صفحه‌ای به همراه خصوصیات غیرخطی استفاده گردید. بوز [۵] روش اجزاء محدود را برای تحلیل اتصال با صفحه انتهایی هم‌تراز سخت نشده به کار برد. اتصال با صفحه انتهایی از نوع با دو پیچ و با چهار پیچ در مطالعه‌ها استفاده شد، که نتایج در قیاس با نتایج آزمایشگاهی تناسب خوبی حاصل گردید. میز [۶] از تحلیل اجزاء محدود برای توسعه روشی جهت طراحی اتصال خمشی با صفحه انتهایی بلند سخت شده با ۱۶ پیچ و طراحی بال ستون سخت نشده استفاده کرد. به علاوه مدل‌های اجزاء محدود توسط ایشان ارائه گردید که نتایج آن مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی برای اتصال خمشی با صفحه انتهایی از نوع سخت نشده پهن با چهار پیچ، بلند سخت شده با هشت پیچ و بلند سخت نشده با چهار پیچ مقایسه شد. تناسب خوبی با نتایج آزمایشگاهی مشاهده گردید. قاسمیه و جلال پور [۷] رفتار لرزه ای اتصال با صفحه انتهایی بلند با چهار پیچ را توسط نرم افزار ANSYS بررسی نمودند. ایشان همچنین اثر تغییرات عمق ستون و ضخامت صفحه انتهایی را در تحلیل و مطالعات خود بررسی نمودند.

در این مقاله تلاش گردیده تا اثر نیروی محوری روی رفتار اتصال با صفحه انتهایی بلند سخت نشده را با چهار پیچ در محل بال تیر، توسط نرم افزار ABAQUS بررسی نموده و نمودار اندرکنش نیروی محوری با لنگر خمشی را بدست آورد. تمامی عوامل غیرخطی شامل رفتار غیر خطی مواد، تماس، تغییرشکل‌های بزرگ، کماتش و پایداری در تحلیل اجزاء محدود در نظر گرفته شده است. به این منظور این اتصال با دو نوع رفتار متفاوت مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت که عبارتند از اتصالی که از آن رفتار ورق ضخیم انتظار می‌رود و دیگری اتصالی که رفتار ورق متوسط یا نازک را شامل می‌شود. لازم به توضیح است که در این اتصال ورق ضخیم نامیده می‌شود که نیروی اهرمی<sup>۱</sup> تأثیری در رفتار اتصال به صورت خمشی نداشته باشد و ورق متوسط و یا نازک نامیده می‌شود که نیروی اهرمی در آن شکل گرفته و تا حد اکثر امکان در ورق اتصال تأثیر خمشی نماید. برای اطمینان از



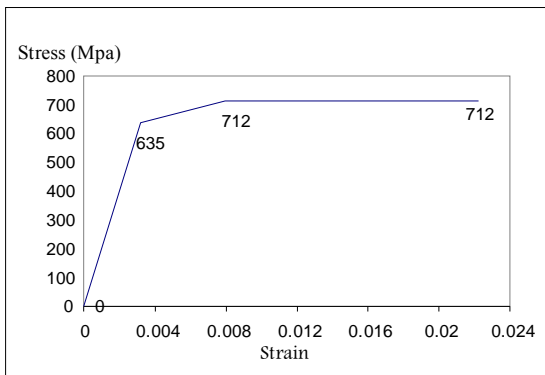
الف: سخت نشده  
ب: سخت شده  
شکل ۲: اتصال خمشی با صفحه انتهایی بلندو



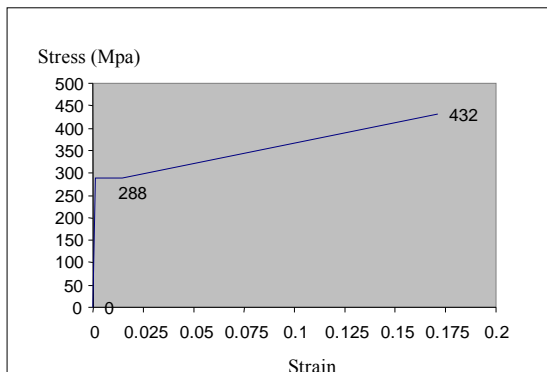
الف: سخت نشده  
ب: سخت شده  
شکل ۳: اتصال خمشی با صفحه انتهایی هم‌تراز.

کریشنامورتنی و همکار [۱] از اولین محققینی بودند که مطالعات اولیه را روی رفتار اتصال خمشی با صفحه انتهایی با استفاده از تحلیل به روش اجزاء محدود انجام دادند. سی نوع اتصال بوسیله برنامه‌های کامپیوتری دوبعدی- سه‌بعدی که توسط ایشان نوشته شد بود تحلیل گردید. در برنامه ایشان از المان مثلثی کرنش ثابت دو بعدی و المان آجری هشت گره‌ای سه بعدی استفاده گردید. اتصالات با پیچ پیش تنیده، با نصف بار سرویس و تمام بار سرویس تحلیل گردید. آهوچا و همکاران [۲] رفتار الاستیک اتصال خمشی با صفحه انتهایی از نوع بلند سخت شده با هشت پیچ را با استفاده از روش اجزاء محدود بررسی نمودند. قاسمیه و همکاران [۳] با در نظر گرفتن رفتار غیر الاستیک ماده برای اتصال خمشی مشابه، مطالعات را دنبال نمودند. برای این منظور برنامه کامپیوتری دوبعدی- سه‌بعدی غیرخطی تهیه گردید و نتایج تحلیل با نتایج آزمایش‌های انجام شده مقایسه گردید. بهاری و شربورن [۴] از نرم افزار ANSYS برای

پیش تنش در پیچ‌ها از بارگذاری حرارتی استفاده گردید. میزان پیش تنیدگی برای پیچ‌ها ۴۴۰ مگاپاسکال یعنی برابر با ۷۰٪ تنش تسلیم پیچ در نظر گرفته شده است. با اعمال گرادیان حرارتی به پیچ تنش ناشی از پیش تنیدگی در ساق پیچ تولید می‌گردد. شکل‌های (۴) و (۵) مشخصات مکانیکی اجزاء اتصال را نشان داده و همچنین در شکل‌های (۶) و (۷) و جدول (۱) به ترتیب شبکه‌بندی اجزای مدل اتصالات و ابعاد و اندازه دو اتصال ارائه شده است.



شکل ۴: مشخصات رفتار مکانیکی پیچ اتصال.



شکل ۵: مشخصات رفتار مکانیکی ستون، تیر و صفحه انتهایی.

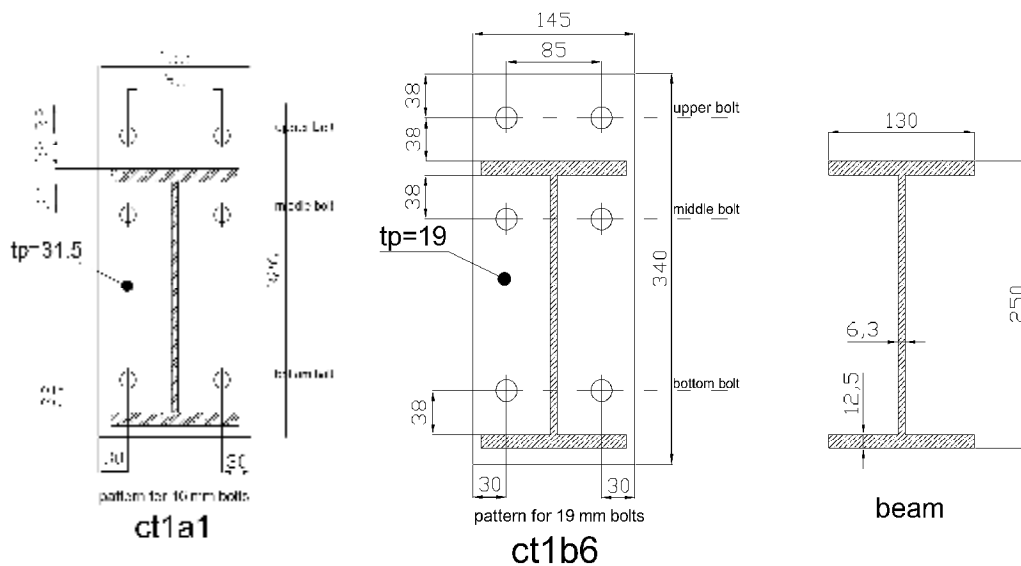
### بررسی رفتار خمشی اتصال (بدون نیروی محوری) پیچ‌های اتصال

با توجه به اینکه بررسی نیروی پیچ‌ها حین بارگذاری می‌تواند راهنمای مناسبی جهت پی بردن به رفتار خمشی اتصال و نوع گسیختگی اتصال باشد و نیز جهت اطمینان از درستی نتایج تحلیل، این نیرو در پیچ‌های کششی بررسی گردید. تغییرات تنش در پیچ ناحیه کششی هر دو اتصال نسبت به تغییرات لنگر خمشی نرمالایز شده (نسبت به ظرفیت تقریبی تیر) در شکل‌های

دقت و درستی نتایج تحلیل، از دو اتصال مگی و همکاران [۸] که تحت بارگذاری خمشی استاتیکی آزمایش شده‌اند، استفاده گردید. هر دو نوع اتصال جهت بررسی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی موجود، تحت بار استاتیکی بدون نیروی محوری قرار گرفت. سپس برای بررسی اثر نیروی محوری روی رفتار خمشی اتصال، بار خمشی همراه با نیروی محوری به نمونه‌ها اعمال گردید تا نمودار اندرکنش نیروی محوری - لنگر خمشی و مود گسیختگی به دست آید.

### مدل‌سازی

دو نمونه اتصال خمشی با صفحه انتهایی بدون سخت کننده توسط نرم افزار ABAQUS تحلیل گردید. این اتصال‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که از یکی از آنها رفتار خمشی احتمالی صفحه نازک یا متوسط (مدل ct1b6) و از دیگری رفتار خمشی احتمالی صفحه ضخیم (ct1a1) انتظار می‌رود. جهت مدل‌سازی از المان‌های شش وجهی برای شبکه‌بندی تمام اجزای مدل استفاده گردید. تیر، صفحه اتصال، بال ستون و پیچ‌ها توسط المان‌های هشت گره‌ای (C3D8I) مدل گردیده‌اند. المان C3D8I یک المان سه بعدی هشت گره‌ای است که در هر گره سه درجه آزادی انتقالی داشته و می‌تواند رفتار غیرخطی داشته باشد و در آن تعداد نقاط انتگرال گیری گوسی کاهش نیافته است. فولاد بکار رفته در تیر، صفحه اتصال و بال ستون از نوع فولاد ASTM A36 بوده و پیچ‌ها از نوع پرمقاومت ASTM A325 می‌باشند. با توجه به تقارن هندسی و رفتار اتصال نسبت به صفحه جان تیر، و با استفاده از شرایط تکیه‌گاهی تنها نیمی از اتصال مدل می‌شود. بال ستون در محل جان ستون و سخت‌کننده‌های بال ستون، که به موازات بال تیر قرار دارند، با تکیه‌گاه گیردار می‌شوند و جان ستون صلب فرض شده و در نتیجه مدل نمی‌شود. همانند آزمایش‌ها، ارتفاع بال ستون ۳۹۷ میلیمتر و ضخامت آن ۱۹ میلی‌متر می‌باشد [۸]. تیر طره‌ای شکل به طول ۱/۵ متر به صفحه انتهایی اتصال یافته و سرپیچ‌ها به صفحه انتهایی و به بال ستون بسته شده‌اند. از المان تماس بین صفحه انتهایی و بال ستون استفاده شده است. برای ایجاد لنگر خمشی بار خطی یکنواخت به لبه انتهایی تیر اعمال شده و تا گسیختگی اتصال بار به صورت خطی افزایش می‌یابد. برای ایجاد



ج: اتصال با صفحه انتهایی ضخیم

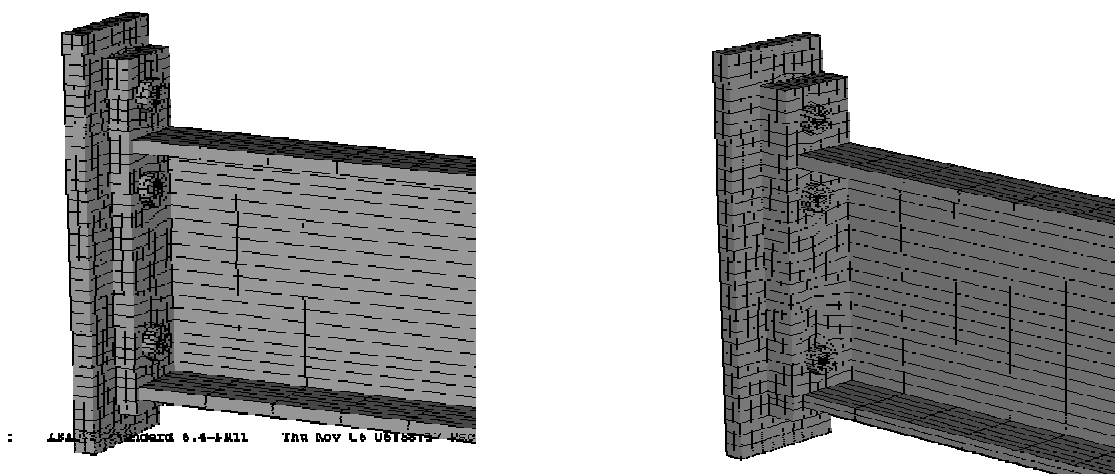
ب: اتصال با صفحه انتهایی متوسط (یا نازک)

الف: تیر اتصال

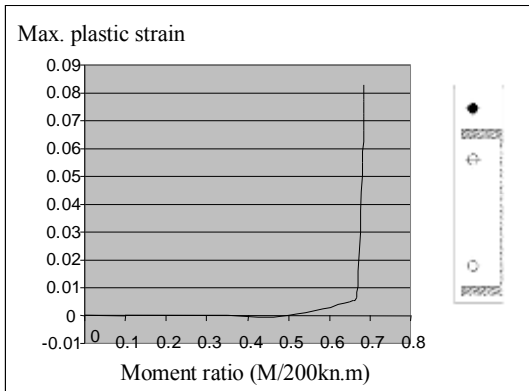
شکل ۶: ابعاد دو اتصال ct1a1 و ct1b6 [۸].

جدول ۱: مشخصات اتصالات ct1a1 و ct1b6 [۸].

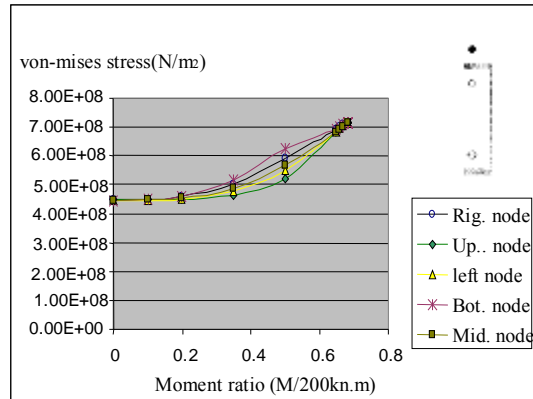
| تنش تسلیم<br>صفحه انتهایی<br>Fyp (MPa) | ضخامت صفحه<br>انتهایی<br>tp (mm) | عرض صفحه<br>انتهایی<br>bp (mm) | قطر پیچ<br>dbolt (mm) | مقاومت<br>کششی پیچ<br>Ft (MPa) | لنگر خمشی مقاوم<br>پیچها<br>Mnp (Kn.m) | لنگر مقاوم<br>صفحه انتهایی<br>Mpl (Kn.m) |       |
|--|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|--|--|-------|
| ۲۸۸                                    | ۳۱/۵                             | ۱۵۵                            | ۱۶                    | ۷۱۲/۵۶                         | ۱۳۶/۰۴                                 | ۵۰۱/۴۹                                   | ct1a1 |
| ۲۸۸                                    | ۱۹                               | ۱۴۵                            | ۱۹                    | ۷۱۲/۵۶                         | ۱۹۱/۹۳                                 | ۱۶۰/۹                                    | ct1b6 |



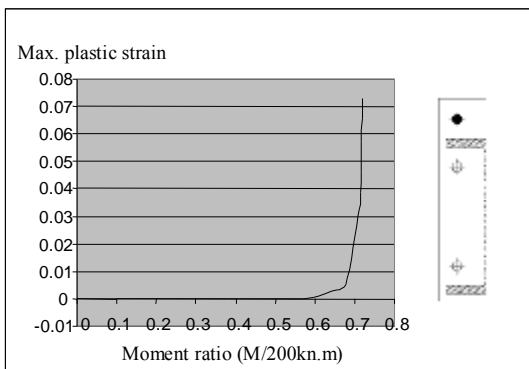
شکل ۷: شبکه‌بندی اتصالات ct1a1 (راست) و ct1b6 (چپ).



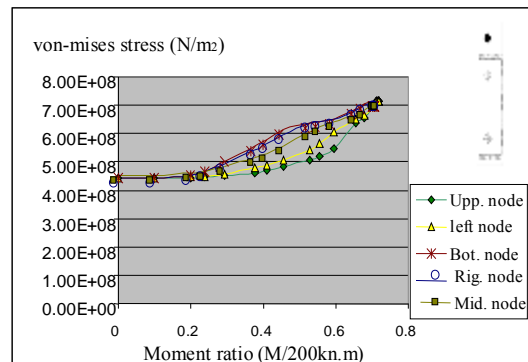
شکل ۱۰: کرنش پلاستیک با لنگر در پیچ بالایی ct1a1.



شکل ۸: تغییرات تنش با لنگر در پیچ بالایی اتصال ct1a1.



شکل ۱۱: کرنش پلاستیک با لنگر در پیچ بالایی اتصال ct1b6.



شکل ۹: تغییرات تنش با لنگر در پیچ بالایی اتصال ct1b6.

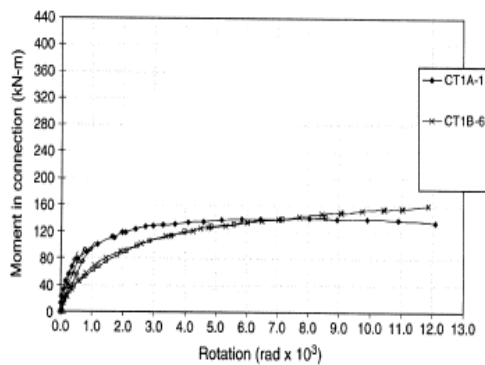
### جداشدگی صفحه انتهایی و رفتار خمشی اتصال

با بررسی جداشدگی صفحه انتهایی می‌توان مود گسیختگی اتصال را تعیین نمود. در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) جداشدگی صفحه انتهایی در دو اتصال را به صورت اغراق آمیزی در ارتفاع صفحه انتهایی نشان داده شده است. بخوبی می‌توان از روی شکل‌های فوق رفتار خمشی دو اتصال ct1a1 و ct1b6 را تعیین کرد. در اتصال ct1a1 صفحه انتهایی از محل پیچ پایینی (محل تار خنثی) تا لبه بالایی خود از بال ستون جدا شده است (شکل ۱۲). به عبارت دیگر نیروی افزایشنده در پیچ‌ها به وجود نمی‌آید و اتصال یک اتصال پیچی با صفحه انتهایی از نوع ضخیم می‌باشد. در اتصال ct1b6 (شکل ۱۳)، دیده می‌شود که صفحه انتهایی در محل بال کششی تیر بیشترین جداشدگی را از بال ستون داشته و در لبه بالایی خود به بال ستون چسبیده است. با توجه به این امر و نیز گسیختگی پیچ‌های کششی در لنگر مقاوم نهایی اتصال،

(۸) و (۹) ارائه گردیده اند.

همان‌طور که انتظار می‌رفت نیروی پیچ‌های پایینی در طی تحلیل تقریباً ثابت و معادل نیروی پیش تنش اولیه باقی ماند. البته در انتهای تحلیل به علت رخداد گسیختگی، نیروی پیچ‌ها به علت عدم تعادل ایجاد شده ناگهان افزایش یافت. در هر کدام از شکل‌های (۸) و (۹) تنش در چند نقطه از مقطع پیچ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به علت وجود پیش‌تنش، نیروی پیچ‌ها در ابتدای بارگذاری خمشی ثابت مانده و در ادامه و با افزایش لنگر خمشی نیروی پیچ‌های کششی در هر دو اتصال به حد نهایی خود یعنی معادل با ظرفیت نهایی پیچ (۷۱۳ مگاپاسگال) رسیده است. این نشانگر گسیختگی تمامی پیچ‌های کششی در لنگر مقاوم نهایی اتصال می‌باشد. از سویی بررسی کرنش پلاستیک در پیچ‌ها (شکل‌های ۱۰ و ۱۱) به خوبی افزایش ناگهانی و شدید کرنش را در انتهای بارگذاری نشان می‌دهد.

میزان جداشدگی صفحه انتهایی در محل بال کششی تیر بر فاصله مرکز به مرکز بال‌های تیر به دست آمده است. مقایسه دو اتصال نشان می‌دهد با وجود یکسان بودن ظرفیت خمشی نهایی آنها، اتصال ct1b6 دارای شکل پذیری به مراتب بیشتری نسبت به اتصال ct1a1 می‌باشد. این مقایسه بین دوران نهایی و لنگر مقاوم نهایی دو اتصال در جدول (۲) آورده شده است. تناسب خوبی بین نتایج تحلیل اجزاء محدود و نتایج آزمایش موجود دیده می‌شود (شکل ۱۵).



شکل ۱۵: لنگر - دوران اتصالات از آزمایش [۸].

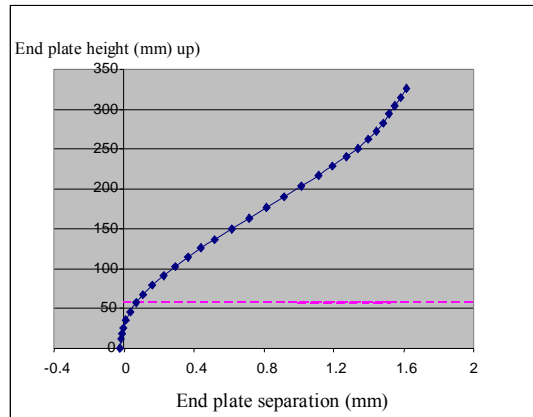
جدول ۲: مقایسه مقاومت و دوران نهایی دو اتصال .

| اتصال | Mu (Kn.m) | دوران نهایی (راد بیان) | نسبت لنگر خمشی | نسبت ظرفیت دوران |
|-------|-----------|------------------------|----------------|------------------|
| ct1a1 | ۱۳۶/۸     | ۰/۰۰۵۸۸                | ۰/۹۵           | ۰/۳۹             |
| ct1b6 | ۱۴۴       | ۰/۰۱۴۹                 | ۱/۰۵۲          | ۲/۵۳۴            |

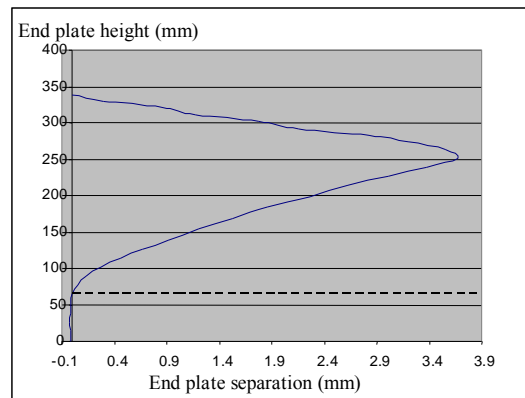
### بررسی رفتار خمشی تحت نیروی محوری

بعد از شناسایی رفتار خمشی دو اتصال و معتبرسازی نتایج تحلیل اجزاء محدود، رفتار خمشی دو اتصال همزمان تحت نیروی محوری مورد مطالعه گردید. برای بررسی اثر نیروی محوری بر روی ظرفیت خمشی و سختی اولیه اتصال، بدست آوردن مودهای گسیختگی و بطور کلی تعیین رفتار خمشی اتصال تحت نیروی محوری، نیروی محوری بصورت تنش معادل با درصدی از تنش تسلیم مقطع تیر،  $F_y$ -beam، به مقطع تیر اعمال شده و بعد از کامل شدن بارگذاری محوری، بارگذاری خمشی روی اتصال صورت گرفت. با تغییر بار محوری از حد بالایی کششی تا حد پایینی فشاری نمودار اندرکنش لنگر خمشی - نیروی محوری برای اتصالات حاصل شد. در

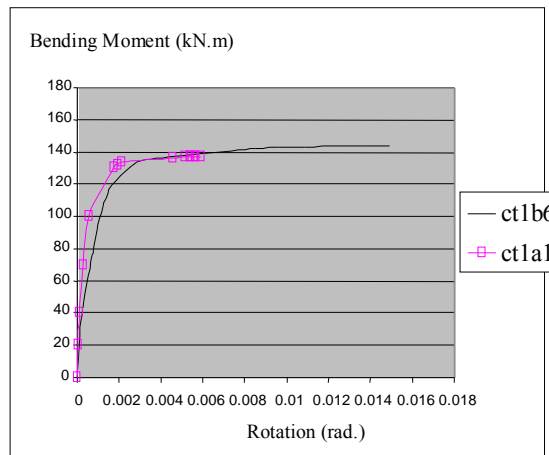
براحتی می‌توان دریافت که اتصال یک اتصال پیچی با صفحه انتهایی از نوع متوسط می‌باشد. این نتایج کاملاً با نتایج به دست آمده از آزمایش موجود [۸] منطبق است، که نشانگر صحت تحلیل اجزاء محدود می‌باشد.



شکل ۱۲: جداشدگی صفحه انتهایی در محل جان تیر ct1a1.



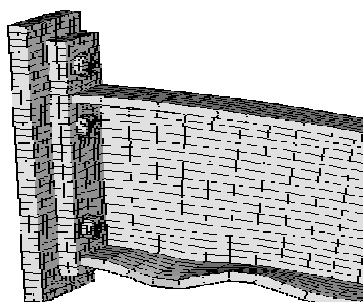
شکل ۱۳: جداشدگی صفحه انتهایی در محل جان تیر ct1b6.



شکل ۱۴: لنگر - دوران اتصالات ct1b6 و ct1a1 از تحلیل.

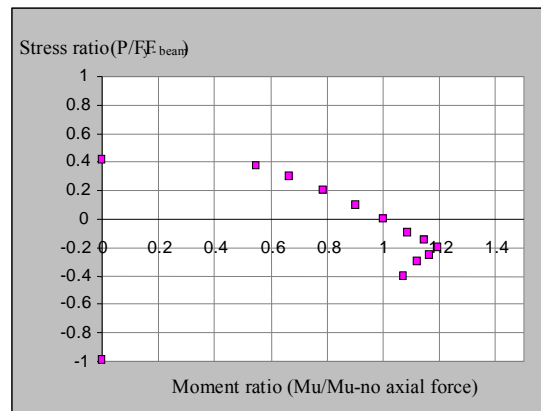
شکل (۱۴) نمودار لنگر خمشی - دوران اتصالات را نشان داده که در آن دوران اتصال از تقسیم

می‌یابد زیرا در اینحالت همان‌طور که ذکر شد گسیختگی اتصال توسط ظرفیت کششی پیچ‌ها کنترل شده و به همین سبب کاهش نیروی محوری کششی، باعث افزایش ظرفیت خمشی اتصال می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش نیروی محوری کششی، ظرفیت خمشی اتصال کاهش می‌یابد. در محدوده نیروی محوری فشاری با افزایش نیروی محوری، ظرفیت اتصال در ابتدا زیاد می‌شود. در این ناحیه گسیختگی اتصال همچنان توسط ظرفیت کششی پیچ کنترل می‌شود، به همین علت افزایش نیروی محوری فشاری یک ظرفیت افزوده برای پیچ‌های اتصال و در نهایت خود اتصال ایجاد می‌کند. با ادامه افزایش نیروی محوری فشاری و در نقطه‌ای که این نیرو برابر با حدوداً ۲۰-۱۵ درصد  $F_y$ -beam به ترتیب برای اتصال ct1b6 و ct1a1 می‌شود، ظرفیت خمشی به مقدار حداکثر خود رسیده و سپس در ادامه، با افزایش بار محوری فشاری، کاهش می‌یابد. کاهش ظرفیت به علت رخداد مود گسیختگی از نوع کمانش بال فشاری تیر می‌باشد (شکل ۱۸). چون عامل کنترل کننده ظرفیت خمشی اتصال در اینحالت، کمانش بال فشاری است با افزایش نیروی محوری فشاری، ظرفیت خمشی اتصال کاهش یافته است. در نهایت ظرفیت نهایی فشاری اتصال، بدون وجود لنگر خمشی، برابر با  $P = 288 \text{ (MPa)}$  به دست می‌آید که برابر با تنش تسلیم مقطع تیر است. در مدل‌ها در نیروی محوری کششی برابر با ۲۰ درصد تنش تسلیم مقطع تیر، ظرفیت خمشی تا ۱۷ درصد کاهش یافته است. به عبارتی با اعمال نیروی محوری کششی به مقدار کم، میزان کاهش ظرفیت خمشی اتصال قابل توجه است. همچنین در نیروی محوری فشاری برابر با ۱۵ تا ۲۰ درصد تنش تسلیم مقطع تیر، ظرفیت خمشی اتصال تا حدود ۱۶ الی ۱۹ درصد نسبت به ظرفیت خمشی اتصال بدون نیروی محوری، افزایش یافته است.

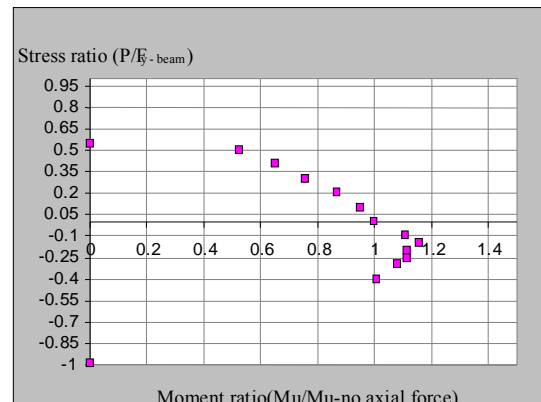


شکل ۱۸: کمانش بال پایینی تیر در ct1b6 با نیروی محوری.

شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نیروی محوری به همراه نسبت لنگر خمشی مقاوم نهایی اتصال تحت نیروی محوری مربوطه (نمودار اندرکنش)، نشان داده شده است.



شکل ۱۶: اندرکنش نیروی محوری و لنگر در اتصال ct1a1.

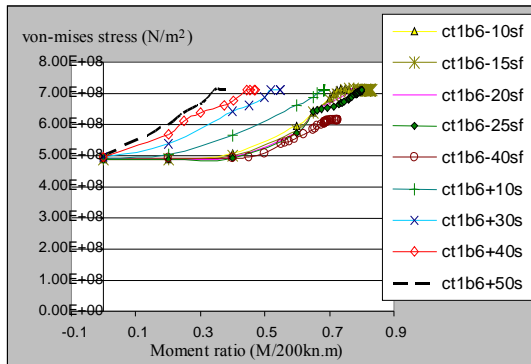


شکل ۱۷: اندرکنش نیروی محوری و لنگر در اتصال ct1b6.

در شکل‌های ارائه شده، نسبت لنگر خمشی<sup>۲</sup> از تقسیم لنگر مقاوم نهایی با نیروی محوری به لنگر مقاوم نهایی بدون نیروی محوری، حاصل می‌شود. نسبت نیروی محوری از تقسیم تنش محوری اعمال شده ( $P$ ) به تنش تسلیم مقطع تیر ( $F_y$ -beam) به دست می‌آید. علامت مثبت بیانگر نیروی محوری کششی و علامت منفی بیانگر نیروی محوری فشاری می‌باشد. در این شکل‌ها چند ناحیه رفتاری قابل مشاهده است. در حالت عدم وجود لنگر خمشی ( $M=0$ )، ظرفیت کششی نهایی اتصال، برابر با باقیمانده ظرفیت کششی پیچ‌ها با توجه به میزان تنش می‌باشد. در این حالت گسیختگی اتصال با ظرفیت کششی پیچ کنترل می‌شود. بدیهی است این ظرفیت به علت وجود پیش تنیدگی در پیچ‌ها، کاهش یافته است. با کاهش بار محوری کششی، ظرفیت خمشی اتصال افزایش

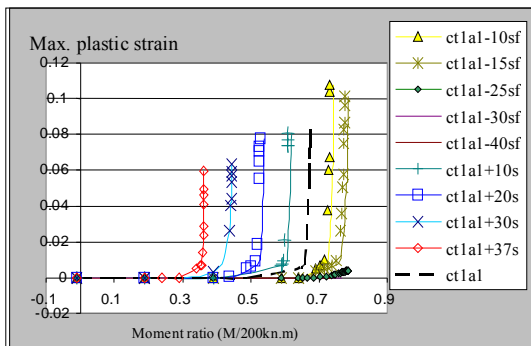
### پیچ‌های اتصال

با توجه به اثر نیروی محوری در میزان لنگر مقاوم نهایی اتصال و نیز رخداد یک مود گسیختگی جدید (نسبت به حالت اتصال خمشی بدون بار محوری)، می‌بایست اثر نیروی محوری را در میزان نیروی پیچ‌ها بررسی نمود. شکل‌های (۱۹) و (۲۰) تغییرات تنش در پیچ‌ها را نسبت به لنگر نشان داده است. در تمامی مدل‌ها پسوند sf به معنای استفاده از سخت کننده عرضی در سر تیر برای جلوگیری از خم‌شدگی بال تیر در محل اعمال بار لبه‌ای و همچنین ریزتر کردن شبکه‌بندی در انتهای تیر (محل کمانش بال تیر) می‌باشد. پسوند s نیز به معنای استفاده از سخت کننده عرضی بدون ریزتر کردن شبکه‌بندی می‌باشد. ضریب عددی b کار رفته در نامگذاری مدل‌ها بیانگر درصد نیروی محوری است. همان‌طور که در شکل (۱۹) مشاهده می‌شود در تمام حالتی که بار محوری کششی است و یا به ازای بار محوری فشاری معادل با  $0/1 Fy-beam$ ،  $0/15 Fy-beam$  و  $0/2 Fy-beam$  میزان تنش در پیچ بالایی به ظرفیت خود (۷۱۳ مگاپاسگال) به ازای ظرفیت خمشی اتصال (وضعیت گسیختگی) می‌رسد. این امر بیانگر رخداد مود گسیختگی در اتصال از نوع تسلیم پیچ‌های کششی می‌باشد. در ادامه با افزایش نیروی محوری فشاری، تنش در پیچ بالایی مرتباً کاهش می‌یابد، زیرا در این حالت مود گسیختگی کمانشی در بال فشاری تیر، قبل از تسلیم کششی پیچ‌ها رخ می‌دهد و با افزایش نیروی محوری و کاهش ظرفیت خمشی (ظرفیت کمانشی) باقیمانده در بال فشاری تیر، تنش در پیچ بالایی بیشتر کاهش می‌یابد.

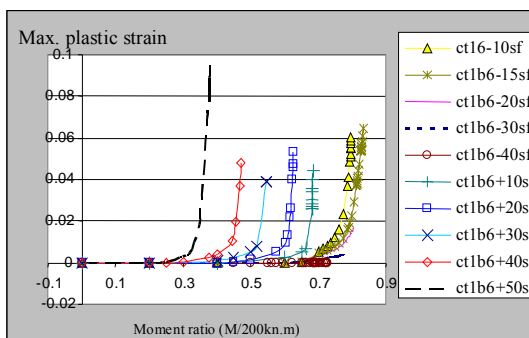


شکل ۲۰: تنش با لنگر در پیچ بالایی ct1b6 با نیروی محوری.

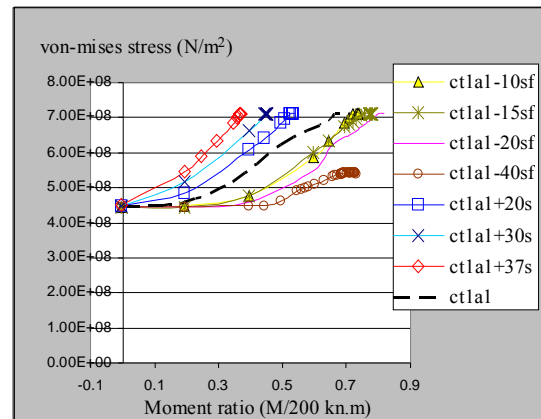
در شکل (۲۰) مشاهده می‌شود که در تمام بارگذاری‌های محوری کششی و یا نیروی محوری فشاری معادل  $0/1 Fy-beam$ ،  $0/15 Fy-beam$ ،  $0/2 Fy-beam$  و  $0/25 Fy-beam$  تنش در پیچ بالایی به حد نهایی خود می‌رسد. در ادامه، با افزایش بار محوری فشاری، به علت رخداد مود گسیختگی کمانش بال فشاری تیر، تنش در پیچ بالایی (پیچ کششی) کاهش می‌یابد. در بارگذاری محوری کششی معادل با  $0/4 Fy-beam$  و  $0/5 Fy-beam$  اثر پیش تنش توسط بار محوری کششی خنثی شده و با افزایش لنگر خمشی، تنش در پیچ بالایی از همان ابتدا افزایش می‌یابد.



شکل ۲۱: کرنش پلاستیک با لنگر در پیچ بالایی ct1a1.



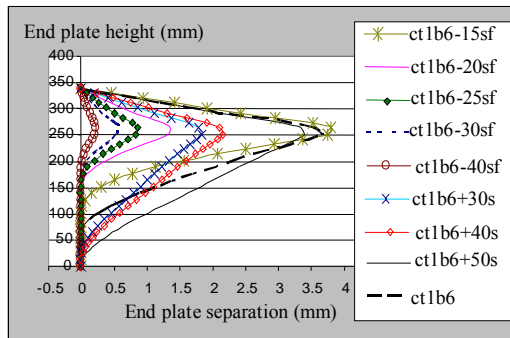
شکل ۲۲: کرنش پلاستیک با لنگر در پیچ بالایی ct1b6.



شکل ۱۹: تنش با لنگر در پیچ بالایی ct1a1 با نیروی محوری.

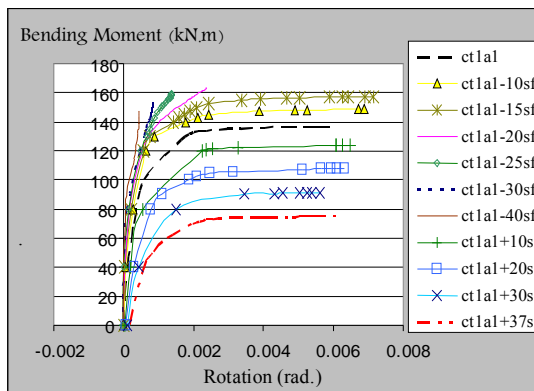


در هر دو اتصال بیشترین جداسازی محوری در بارگذاری محوری معادل با  $0.15 F_y \text{-beam}$  دیده می‌شود. در اتصال ct1b6 در بارگذاری‌های محوری فشاری معادل  $0.20 F_y \text{-beam}$  و بیشتر، جداسازی کمترین مقدار را دارد که این بعلت رخداد مود گسیختگی از نوع کمانش بال فشاری تیر می‌باشد.



شکل ۲۴: جداسازی صفحه انتهایی در اتصال ct1b6.

در شکل (۲۵) نمودار لنگر خمشی - دوران اتصال ct1a1 تحت نیروی محوری آورده شده است. در این شکل کمترین سختی اولیه مربوط به حالت بارگذاری محوری کششی برابر با  $0.37 F_y \text{-beam}$  دیده می‌شود. زیرا در این وضعیت همان‌طور که دیده شد (شکل ۱۹) اثر پیش تنش از بین رفته و نیروی پیچ‌های کششی از همان ابتدا با لنگر افزایش می‌یابد.



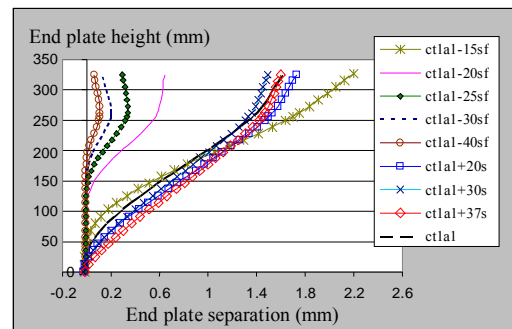
شکل ۲۵: نمودار لنگر - دوران در اتصال ct1a1.

همان‌طور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، در تمام حالات بارگذاری محوری فشاری، سختی اولیه نسبت به اتصال بدون بار محوری، افزایش یافته است. بیشترین میزان دوران در حالت نیروی محوری برابر با  $0.15 F_y \text{-beam}$  و  $0.1 F_y \text{-beam}$  دیده می‌شود. البته میزان این افزایش دوران نسبت به مدل اتصال ct1a1

بررسی کرنش در پیچهای اتصال خمشی تحت نیروی محوری می‌تواند جهت تعیین اثر نیروی محوری در میزان پلاستیک شدن پیچها بکار رود. در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) تغییرات کرنش پیچ آورده شده است. در اتصال ct1a1 تحت بار محوری معادل با  $0.3 F_y \text{-beam}$  و  $0.4 F_y \text{-beam}$  کرنش پلاستیک صفر بوده و پیچ بالایی الاستیک باقی می‌ماند. در اتصال ct1b6 تحت بار محوری در تمام حالات پیچ بالایی دچار کرنش پلاستیک شده است. تنها در حالت بارگذاری محوری معادل با  $0.4 F_y \text{-beam}$ ، پیچ بالایی الاستیک باقی می‌ماند. پیچ در نیروی محوری معادل با  $0.5 F_y \text{-beam}$  دچار بیشترین کرنش پلاستیک می‌شود.

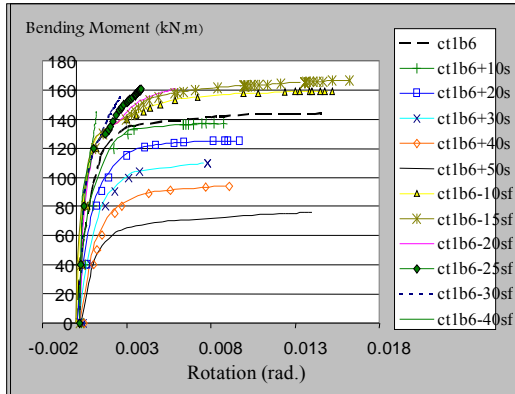
### جداسازی صفحه انتهایی و رفتار خمشی اتصال

با بررسی میزان جداسازی صفحه انتهایی در لنگر خمشی نهایی، محل تار خنثی و شکل صفحه انتهایی به ازای این لنگر، قابل تشخیص است. تعیین محل تار خنثی و شکل صفحه انتهایی می‌تواند برای تعیین چگونگی توزیع نیرو در پیچها در حالت حدی نهایی به کار رود. شکل‌های (۲۳) و (۲۴) جداسازی صفحه انتهایی از بال ستون را برای دو اتصال با نیروی محوری نشان داده است. در اتصال ct1a1 تحت نیروی محوری فشاری و در تمام حالاتی که گسیختگی از نوع کمانش بال فشاری تیر می‌باشد، میزان جداسازی در صفحه انتهایی به شدت کاهش یافته است. جداسازی در سایر موارد دارای شکل کلی تقریباً یکسان می‌باشد و تنها محل تار خنثی جا به جا می‌شود.



شکل ۲۶: جداسازی صفحه انتهایی در اتصال ct1a1.

Fy-beam ۰/۱۵ - رخ می‌دهد. میزان دوران نهایی اتصال در بارگذاری محوری کششی، به غیر از حالت بارگذاری Fy-beam ۰/۵۰، از دوران اتصال بدون نیروی محوری به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر می‌باشد.



شکل ۲۶: نمودار لنگر خمشی - دوران در اتصال ct1b6

همچنین جدول (۴) سختی اولیه اتصالات ct1b6 تحت بارگذاری محوری مختلف، را ارائه نموده است. مجدداً همان‌طور که انتظار می‌رود با کاهش نیروی محوری کششی و افزایش نیروی محوری فشاری سختی اولیه اتصال افزایش یافته است.

جدول ۳: سختی دورانی اولیه اتصال ct1a1 با نیروی محوری بر حسب (Kn.m/rad).

| نام مدل          | ct1a1              | ct1a1-10sf         | ct1a1-15sf         | ct1a1-20sf        | ct1a1-25sf         | ct1a1-30sf        |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| سختی اولیه اتصال | $3/89 \times 10^5$ | $6/8 \times 10^5$  | $1/0 \times 10^6$  | $2/0 \times 10^6$ | $2/0 \times 10^6$  | $3/0 \times 10^6$ |
| نام مدل          | ct1a1-40sf         | ct1a1+10s          | ct1a1+20s          | ct1a1+30s         | ct1a1+37s          | -                 |
| سختی اولیه اتصال | $4/0 \times 10^6$  | $2/41 \times 10^5$ | $1/65 \times 10^5$ | $1/2 \times 10^5$ | $0/95 \times 10^5$ | -                 |

جدول ۴: سختی دورانی اولیه اتصال ct1b6 با نیروی محوری بر حسب (Kn.m/rad).

| نام مدل          | ct1b6             | ct1b6-10sf         | ct1b6-15sf         | ct1b6-20sf         | ct1b6-25sf         | ct1b6-30sf         |
|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| سختی اولیه اتصال | $1/6 \times 10^5$ | $2/1 \times 10^5$  | $5/07 \times 10^5$ | $7/45 \times 10^5$ | $1/0 \times 10^6$  | $2/0 \times 10^6$  |
| نام مدل          | ct1b6-40sf        | ct1b6+10s          | ct1b6+20s          | ct1b6+30s          | ct1b6+40s          | ct1b6+50s          |
| سختی اولیه اتصال | $4/0 \times 10^6$ | $1/08 \times 10^5$ | $0/83 \times 10^5$ | $0/87 \times 10^5$ | $0/63 \times 10^5$ | $0/46 \times 10^5$ |

(بدون نیروی محوری) تنها ۱/۲۱ برابر بوده و افزایش قابل توجهی در ظرفیت نهایی دوران اتصال مشاهده نمی‌شود. در ادامه و با افزایش بار محوری فشاری، کاهش شدید دوران اتصال به علت تغییر مود گسیختگی دیده می‌شود. در تمام حالت‌های بارگذاری محوری کششی دوران نهایی تقریباً ثابت و برابر با دوران نهایی مدل اتصال ct1a1 (بدون نیروی محوری) بوده و سختی اولیه از سختی اولیه اتصال بدون نیروی محوری کمتر می‌باشد. در جدول (۳) سختی اولیه اتصالات ct1a1 تحت بارگذاری محوری متفاوت، قابل مشاهده است. همان‌طور که انتظار می‌رود با کاهش نیروی محوری کششی و افزایش نیروی محوری فشاری سختی اولیه اتصال افزایش یافته است.

در اتصال ct1b6 تحت نیروی محوری (شکل ۲۶) میزان سختی خمشی اولیه اتصال در تمامی حالت‌های بارگذاری محوری کششی، از سختی خمشی اولیه اتصال بدون نیروی محوری کمتر می‌باشد. این امر به علت کاهش اثر پیش تنش در پیچ‌ها توسط نیروی محوری کششی است. بالطبع با اعمال نیروی محوری فشاری میزان سختی خمشی اولیه اتصال افزایش می‌یابد. بیشترین دوران در اتصال در نیروی محوری معادل با

## نتیجه گیری

مود گسیختگی جدید از نوع کماتش بال فشاری تیر، کاهش یافت. از این نقطه به بعد در تمام ترکیبات نیروی محوری و لنگر خمشی، گسیختگی از نوع کماتش بال تیر مشاهده گردید. لذا می بایست در برآورد ظرفیت خمشی نهایی اتصال، اثر نیروی محوری حتماً در نظر گرفته شود. در اتصال با صفحه انتهایی ضخیم در تمام حالات بارگذاری محوری، به جز حالاتی که نیروی محوری در ترکیب با لنگر خمشی باعث کماتش بال تیر میگردد، میزان دوران نهایی تقریباً با دوران نهایی اتصال بدون نیروی محوری برابر گردید. در اتصال با صفحه انتهایی متوسط در نیروهای محوری کششی (به غیر از نیروی محوری کششی معادل ۵۰ درصد تنش تسلیم مقطع تیر) و نیروهای محوری فشاری که در ترکیب با لنگر خمشی موجب کماتش بال تیر می گردید، دوران اتصال نسبت به دوران نهایی اتصال بدون نیروی محوری کاهش یافت. در هر دو اتصال بیشترین دوران در نیروی محوری فشاری معادل با ۱۵٪ تنش تسلیم مقطع تیر مشاهده گردید.

تحلیل استاتیکی اتصالات ورق انتهایی با ابعادبندی متفاوت بدون نیروی محوری نشان داد که نتایج حاصل از تحلیل، تناسب بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته و به درستی مود گسیختگی اتصال را پیش بینی نمود. اعمال نیروی محوری روی اتصال با صفحه انتهایی نشان داد که در تمام حالت‌های بارگذاری محوری کششی با افزایش نیرو، ظرفیت خمشی نهایی اتصال کاهش می‌یابد، بطوریکه در نیروی محوری کششی معادل با ۲۰ درصد تنش تسلیم مقطع تیر، ظرفیت خمشی به طور متوسط تا ۱۷ درصد نسبت به ظرفیت خمشی اتصال بدون نیروی محوری کاهش یافت. در بارگذاری محوری فشاری ابتدا با افزایش نیروی محوری و در نیروی معادل با ۱۵ تا ۲۰ درصد تنش تسلیم مقطع تیر اتصال، ظرفیت خمشی حدود ۱۶ تا ۱۹ درصد نسبت به ظرفیت خمشی اتصال بدون نیروی محوری افزایش یافت. با افزایش نیروی محوری فشاری، ظرفیت خمشی اتصال به علت رخداد یک

## مراجع

- 1 - Krishnamurthy, N. and Graddy, D. E. (1976). "Correlation between 2- and 3-dimensional finite element analysis of steel bolted end-plate connections." *Computers and Structures*, Vol. 6, PP. 381-389.
- 2 - Ahuja, V, Kukreti, A. R. and Murray, T. M. (1982). "Analysis of stiffened end-plate connections using the finite element method." Research report No. *FSEL/MBMA 82-01*, *Fears Structural Engineering Laboratory*, School of Civil Engineering and Environmental Science, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma.
- 3 - Ghassemieh, M., Kukreti, A. R. and Murray, T. M. (1983). "Inelastic finite element analysis of stiffened end-plate moment connections." *Research report No. FSEL/MBMA 83-02*, *Fears Structural Engineering Laboratory*, School of Civil Engineering and Environmental Science, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma.
- 4 - Bahaari, M. R. and Sherbourne, A. N. (1994). "Computer modeling of an extended end-plate bolted connection." *Computer and Structures*, Vol. 52, PP. 879-893.
- 5 - Bose, B., Wang, Z. M. and Sarkar, S. (1997). "Finite element analysis of unstiffened flush end-plate bolted joints." *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, PP. 1614-1621.
- 6 - Mays, T.W., (2000). "Application of the finite element method to the seismic design and analysis of large moment end-plate connections", Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- 7 - Ghassemieh, M. and Jalalpour, M. (2007). "Seismic behavior of steel extended end-plate moment connections." *Journal of University College of Engineering*, University of Tehran, Vol. 41, No. 1, PP. 103-116.

8 - Maggi, Y.I., Goncalves, R. M., Leon, R. T. and Ribeiro, L.F. L., (2004). "Parametric analysis of steel bolted end plate connections using finite element modeling." *Journal of Construction Steel Research*, Vol. 61, PP. 689-670.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Prying Force
- 2 - Moment Ratio