اثر نیروی محوری روی رفتار اتصال خمشی با صفحه انتهايي بلند

مهدی قاسمیه*[۱] و ایمان شمیم[۲]

[۱] دانشیار دانشکده مهندسي عمران - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

[۲] دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسي عمران - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۰/۱۶ , تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۵/۵ ، تاریخ تصویب ۸۸/۵/۱۳)

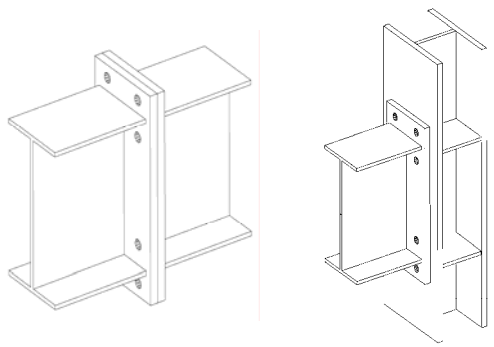
چکیده

در این مقاله رفتار یکی از اشکال اتصال خمشی با صفحه انتهايي 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 ابعادبندی اتصال نمی‌باشد.

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

مقدمه

اتصال خمشي با صفحه انتهايي شامل صفحه‌ای است که به انتهاي تیر جوش داده شده و سپس در محل به اعضاي اتصال با استفاده از چندین ردیف پیچ با مقاومت بالا متصل مي‌شود. نصب این نوع اتصال به سبب پیچي بودن نسبتاً آسان و در نتیجه سودمند مي‌باشد. عدم نیاز به جوشکاري در محل باعث مي‌شود که سازه در شرایط سرد نیز براحتی برپا شده و زمان ساخت کاهش یابد. به علت ساخت با دقت بالاتر و روش‌های طراحي بهتر، استفاده از صفحات انتهايي در سازه‌هاي چند طبقه، از لحاظ اقتصادي مقرون به صرفه مي‌باشد. از این اتصال اصولاً براي اتصال تیر به ستون یا الحاق دو تیر بهم استفاده مي‌شود (شکل ۱).

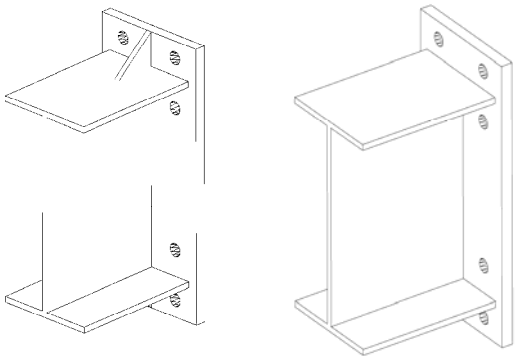


شکل ۱: انواع اتصال با صفحه انتهایی.

دو نوع اتصال با صفحه انتهايي را مي‌توان در نظر گرفت که عبارتند از نوع بلند و نوع هم‌تراز (شکل‌های ۲ و ۳). اتصال با صفحه انتهايي هم‌تراز شامل یک صفحه انتهايي است که خارج از بالهاي تیر اتصال توسعه نیافته و تمامي ردیفهاي پیچ داخل بالها قرار گرفته‌اند. اتصال با صفحه انتهايي بلند، شامل یک صفحه انتهايي است که خارج از بالهاي تیر اتصال گسترش یافته و حداقل یک ردیف پیچ در محدوده خارج از بالها و در بخش گسترش یافته قرار دارد. صفحه انتهايي بلند مي‌تواند سخت شده یا سخت نشده باشد. نوع سخت شده داراي سخت‌کننده‌هایي است که به بخش خارجي بال تیر و به صفحه انتهايي جوش داده شده و سخت‌کننده در راستاي جان تیر اتصال قرار مي‌گیرد تا بخش گسترش یافته صفحه انتهايي را مقاوم سازد.

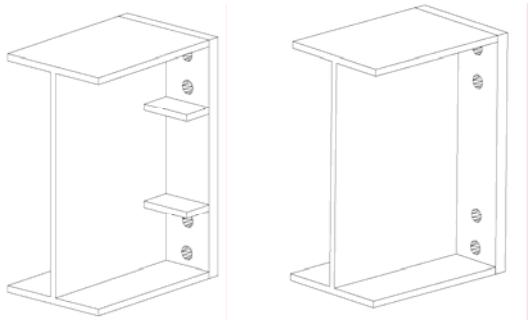
تحقیقات زیادی روی تحلیل اتصال خمشی با صفحه انتهايي با استفاده از روش اجزاء محدود صورت گرفته است ولی در هیچکدام اثر نیروی محوری روی رفتار اتصال دیده نشده است. در قاب‌هایي که تحت نیروی جانبی از قبیل با نیروی باد، نیروی زلزله، بار جراثقیل و غیره قرار می‌گیرند، این نیروی جانبی ابتدا به صورت نیروی محوری تیر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

* نویسنده مسئول : تلفن : ٦١١١٢٨٦٩ , فاکس : ٦٦٤٠٣٨٠٨ , Email: mghassem@ut.ac.ir



الف: سخت نشده ب: سخت شده

شکل ۲: اتصال خمشي با صفحه انتهايي بلندو



الف: سخت نشده ب: سخت شده

شکل ۳: اتصال خمشي با صفحه انتهايي هم‌تراز.

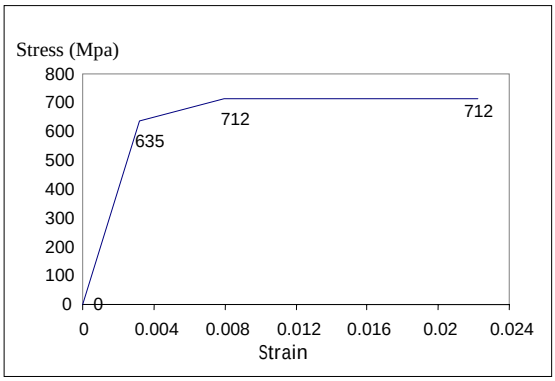
کریشنامورتی و همکار [۱] از اولین محققینی بودند که مطالعات اولیه را روي رفتار اتصال خمشي با صفحه انتهايي با استفاده از تحلیل به روش اجزاء محدود انجام دادند. سی نوع اتصال بوسیله برنامه‌هاي کامپیوتری دوبعدي- سه‌بعدی که توسط ایشان نوشته شد بود تحلیل گردید. در برنامه ایشان از المان مثلثي کرنش ثابت دو بعدي و المان آجري هشت گره‌اي سه بعدي استفاده گردید. اتصالات با پیچ پیش تنیده، با نصف بار سرویس و تمام بار سرویس تحلیل گردید. آهوجا و همکاران [۲] رفتار الاستیک اتصال خمشی با صفحه انتهايي 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 براي تحلیل مدل‌هاي سه بعدي استفاده نمودند، که به طور مناسبي رفتار اتصال خمشي با صفحه انتهايي بلند سخت نشده با چهار پیچ را پیش بیني نمود. در مدل ایشان از المان‌هاي خرپايي، المان‌های آجری هشت گره‌ای و صفحه‌ای به همراه خصوصیات غیرخطي استفاده گردید. بوز [۵] روش اجزاء محدود را براي تحلیل اتصال با صفحه انتهايي هم‌تراز سخت نشده به کار برد. اتصال با صفحه انتهايي از نوع با دو پیچ و با چهار پیچ در مطالعه ها استفاده شد، که نتایج در قیاس با نتایج آزمایشگاهي تناسب خوبي حاصل گردید. میز [۶] از تحلیل اجزاء محدود براي توسعه روشي جهت طراحي اتصال خمشي با صفحه انتهايي بلند سخت شده با ۱۶ پیچ و طراحي بال ستون سخت نشده استفاده کرد. به علاوه مدل‌هاي اجزاء محدود توسط ایشان ارائه گردید که نتایج آن مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهي براي اتصال خمشي با صفحه انتهايي از نوع سخت نشده پهن با چهار پیچ، بلند سخت شده با هشت پیچ و بلند سخت نشده با چهار پیچ مقایسه شد. تناسب خوبي با نتایج آزمایشگاهي مشاهده گردید. قاسمیه و جلال پور [۷] رفتار لرزه ای اتصال با صفحه انتهايي بلند با چهار پیچ را توسط نرم افزار ANSYS بررسی نمودند. ایشان همچنین اثر تغییرات عمق ستون و ضخامت صفحه انتهايي را در تحلیل و مطالعات خود بررسی نمودند.

در این مقاله تلاش گردیده تا اثر نیروی محوری روی رفتار اتصال با صفحه انتهايي 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، کمانش 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 مي‌رود و دیگری اتصالی که رفتار ورق متوسط یا نازک را شامل مي‌شود. لازم به توضیح است که در این اتصال ورقی ضخیم نامیده مي‌شود که نیروي اهرمی[1] تاثیری در رفتار اتصال به صورت خمشی نداشته باشد و ورقی متوسط و یا نازک نامیده مي‌شود که نیروی اهرمی در آن شکل گرفته و تا حداکثر امکان در ورق اتصال تاثیر خمشی نماید. برای اطمینان از

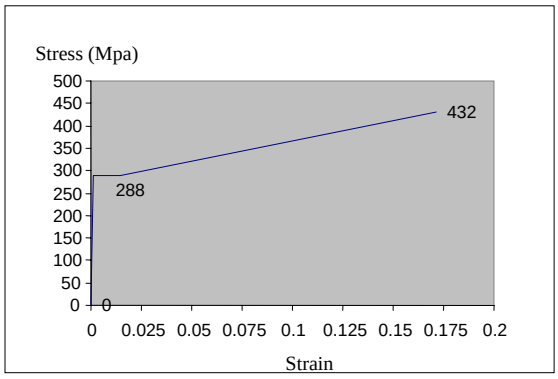
دقت و درستی نتایج تحلیل، از دو اتصال مگی و همکاران [۸] که تحت بارگذاری خمشی استاتیکی آزمایش شده‌اند، استفاده گردید. هر دو نوع اتصال جهت بررسي و مقايسه با نتايج آزمايشگاهی موجود، تحت بار استاتيكي بدون نیروی محوری قرار گرفت. سپس براي بررسي اثر نیروی محوري روي رفتار خمشي اتصال، بار خمشی همراه با نیروی محوری به نمونه‌ها اعمال گردید تا نمودار اندرکنش نيروي محوري - لنگر خمشي و مود گسيختگي به دست آيد.

مدل‌سازی

دو نمونه اتصال خمشي با صفحه انتهايي بدون سخت کننده توسط نرم افزار ABAQUS تحلیل گردید. این اتصال‌ها به گونه‌اي طراحی شده‌اند که از يكي از آنها رفتار خمشي احتمالي صفحه نازک یا متوسط (مدل ct1b6) و از ديگري رفتار خمشي احتمالي صفحه ضخيم (ct1a1) انتظار می‌رود. جهت مدل‌سازی از المان‌هاي شش وجهي براي شبكه‌بندي تمام اجزای مدل استفاده گردید. تیر، صفحه اتصال، بال ستون و پیچ‌ها توسط المان‌هاي هشت گره‌اي (C3D8I) مدل گردیده‌اند. المان C3D8I یک المان سه‌بعدي هشت گره‌اي است که در هر گره سه درجه آزادي انتقالي داشته و مي‌تواند رفتار غيرخطي داشته باشد و در آن تعداد نقاط انتگرال گيري گوسي كاهش نيافته است. فولاد بكار 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 هندسي و رفتار اتصال نسبت به صفحه جان تیر، و با استفاده از شرایط تکیه‌گاهی تنها نيمي از اتصال مدل می‌شود. بال ستون در محل جان ستون و سخت‌كننده‌هاي بال ستون، که به موازات بال تیر قرار دارند، با تکیه‌گاه گيردار مي‌شوند و جان ستون صلب فرض شده و در نتیجه مدل نمي‌شود. همانند آزمایش‌ها، ارتفاع بال ستون ۳۹۷ میلیمتر و ضخامت آن ۱۹ ميلي‌متر می‌باشد [۸]. تیر طره‌ای شکل به طول ۱/۵ متر به صفحه انتهايي اتصال یافته و سرپیچ‌ها به صفحه انتهايي و به بال ستون بسته شده‌اند. از المان تماس بين صفحه انتهايي و بال ستون استفاده شده است. برای ایجاد لنگر خمشی بار خطي يكنواخت به لبة انتهايي تیر اعمال شده و تا گسیختگی اتصال بار به صورت خطی افزایش می‌یابد. براي ايجاد پيش تنش در پيچ‌ها از بارگذاري حرارتي استفاده گرديد. ميزان پيش تنيدگي براي پيچ‌ها ۴۴۰ مگاپاسگال يعنی برابر با ۷۰% تنش تسليم پيچ در نظر گرفته شده است. با اعمال گراديان حرارتي به پيچ تنش ناشی از پيش تنيدگی در ساق پيچ توليد می‌گردد. شكل‌های (۴) و (۵) مشخصات مكانيكی اجزاء اتصال را نشان داده و همچنين در شكل‌های (۶) و (۷) و جدول (۱) به ترتيب شبكه‌بندی اجزای مدل اتصالات و ابعاد و اندازه دو اتصال ارائه شده است.



شکل ۴: مشخصات رفتار مکانیکی پیچ اتصال.

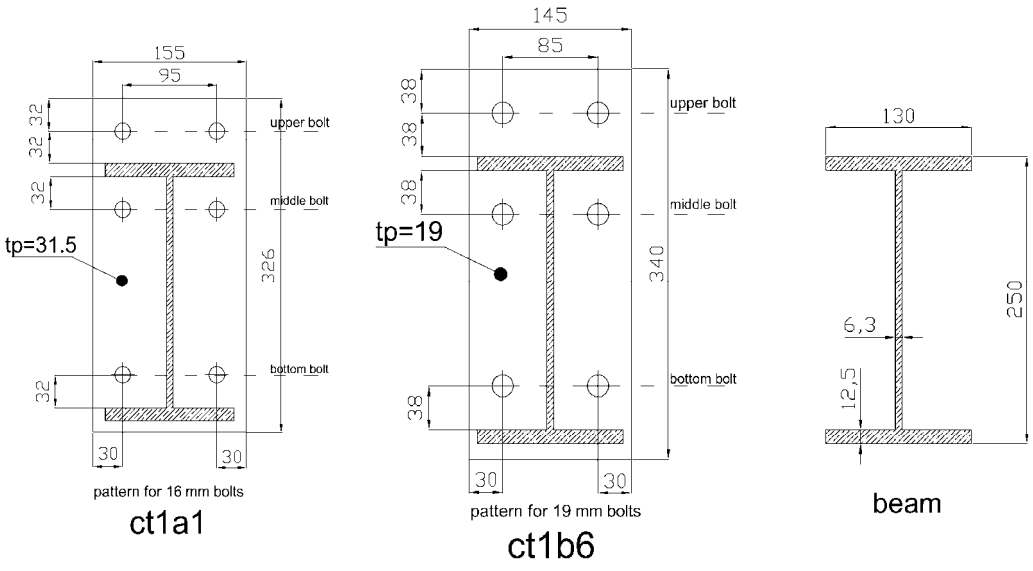


شکل ۵: مشخصات رفتار مکانیکي ستون، تیر و صفحه انتهايي.

بررسی رفتار خمشی اتصال (بدون نیروی محوري)

پیچ‌های اتصال

با توجه به اینکه بررسی نیروی پیچ‌ها حین بارگذاری می‌تواند راهنماي 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

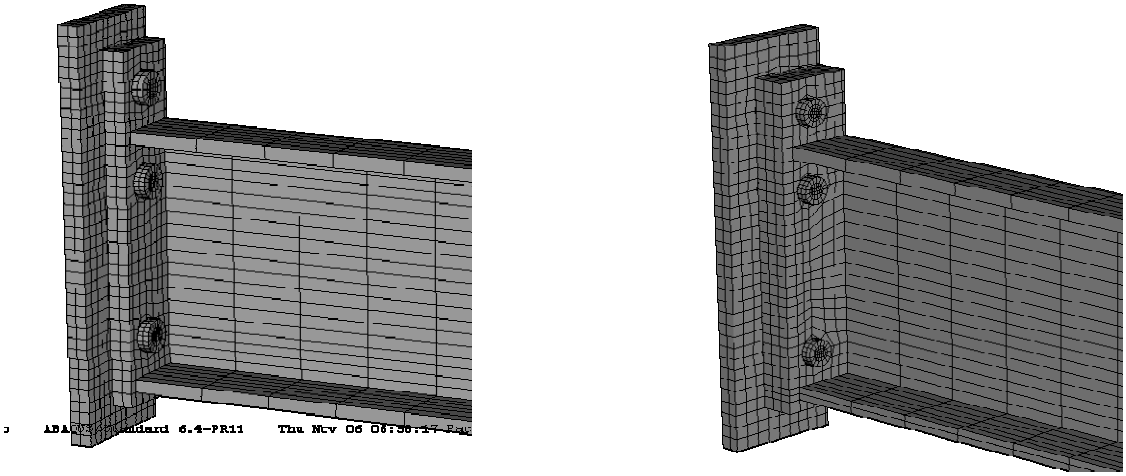


الف: تیر اتصال ب: اتصال با صفحه انتهایي متوسط (یا نازک) ج: اتصال با صفحه انتهایي ضخیم

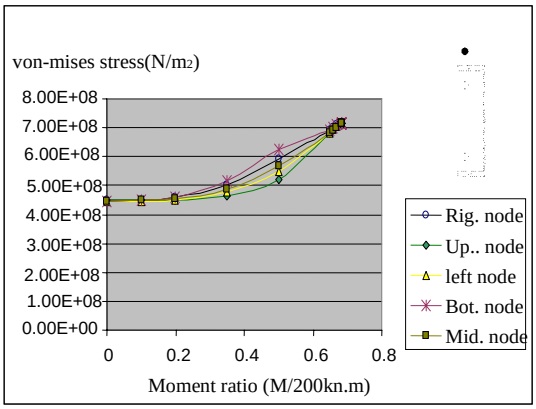
شکل ۶: ابعاد دو اتصال **ct1a1** و **ct1b6 [۸]**.

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

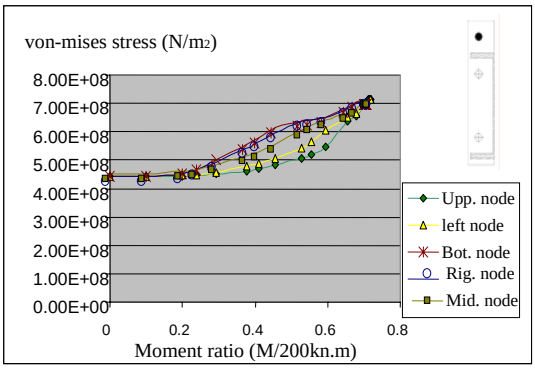
	تنش تسلیم صفحه انتهایي Fyp (MPa)	ضخامت صفحه انتهایي tp (mm)	عرض صفحه انتهایي bp (mm)	قطر پیچ d_{bolt} (mm)	مقاومت کششی پیچ Ft (MPa)	لنگر خمشی مقاوم پیچها Mnp (Kn.m)	لنگر مقاوم. صفحه انتهایي Mpl (Kn.m)
ct1a1	۲۸۸	۳۱/۵	۱۵۵	۱۶	۷۱۲/۵۶	۱۳۶/۰۴	۵۰۱/۴۹
ct1b6	۲۸۸	۱۹	۱۴۵	۱۹	۷۱۲/۵۶	۱۹۱/۹۳	۱۶۰/۹



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



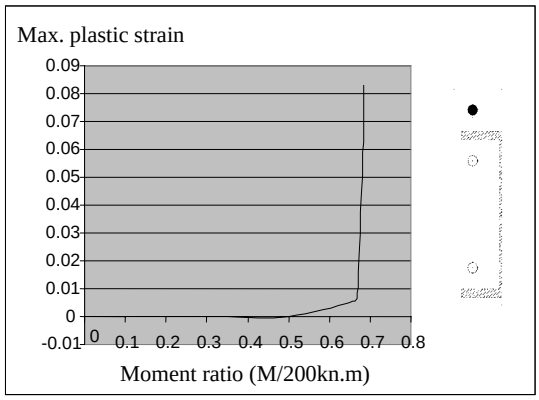
شکل ۸ : تغییرات تنش با لنگر در پیچ بالایي اتصال **ct1a1**.



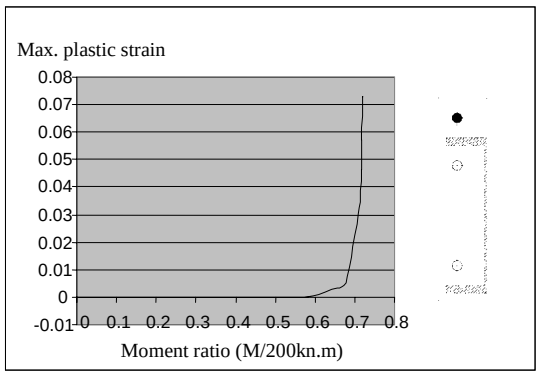
شکل ۹ : تغییرات تنش با لنگر در پیچ بالایي اتصال **ct1b6** .

(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 انتهاي 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 نهایي خود یعنی معادل با ظرفیت نهایي پیچ (۷۱۳ مگاپاسگال) رسیده است. این نشانگر گسیختگی تمامی پیچ‌های کششی درلنگر مقاوم نهایي اتصال می‌باشد. از سویي بررسی کرنش پلاستیک در پیچ‌ها (شکل‌های ۱۰ و ۱۱) به خوبی افزایش ناگهانی و شدید کرنش را در انتهای بارگذاری نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: کرنش پلاستیک با لنگر در پیچ بالایي **ct1a1**.

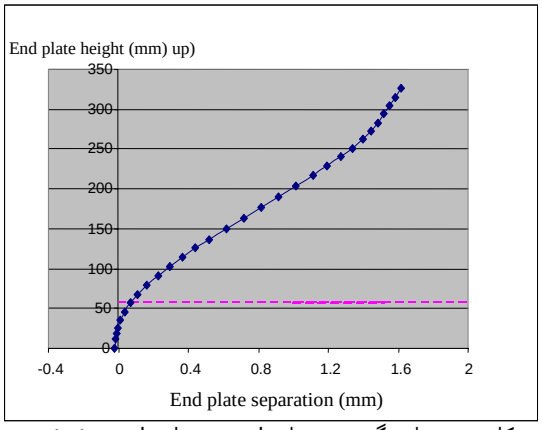


شکل ۱۱: کرنش پلاستیک با لنگر در پیچ بالایي اتصال **ct1b6**.

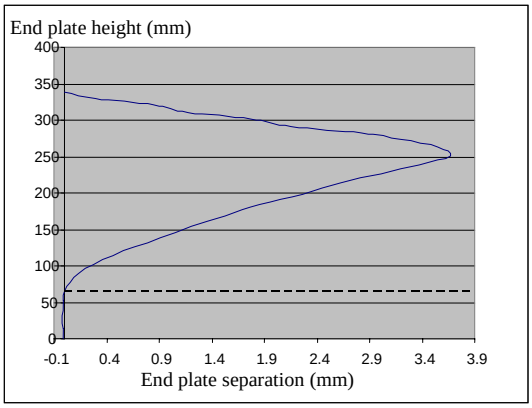
جداشدگی صفحه انتهایي و رفتار خمشی اتصال

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

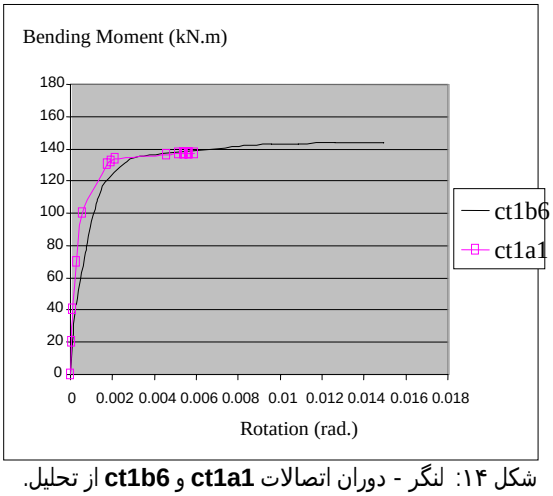
براحتی می‌توان دریافت که اتصال یک اتصال پیچی با صفحه انتهايي از نوع متوسط می‌باشد. این نتایج کاملاً با نتایج به دست آمده از آزمایش موجود [۸] منطبق است، که نشانگر صحت تحلیل اجزاء محدود می‌باشد.



شکل ۱۲: جداشدگي صفحه انتهائی در محل جان تیر **ct1a1**.

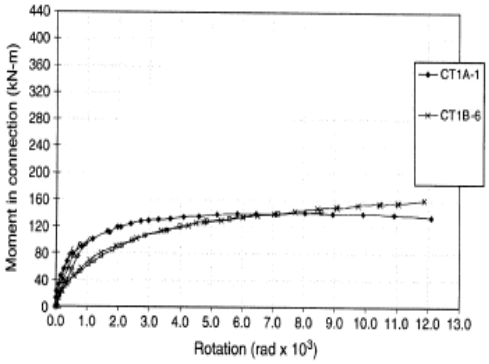


شکل ۱۳: جداشدگي صفحه انتهايي در محل جان تیر **ct1b6**.



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

شکل (۱۴) نمودار لنگر خمشی- دوران اتصالات را نشان داده که در آن دوران اتصال از تقسیم میزان جداشدگي صفحه انتهايي در محل بال کششي تیر بر فاصله مرکز به مرکز بال‌هاي تیر به دست آمده است. مقایسه دو اتصال نشان مي‌دهد با وجود یکسان بودن ظرفیت خمشي نهايي آنها، اتصال ct1b6 داراي شکل پذیري به مراتب بیشتري نسبت به اتصال ct1a1 مي‌باشد. این مقایسه بین دوران نهايي و لنگر مقاوم نهايي 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]**.

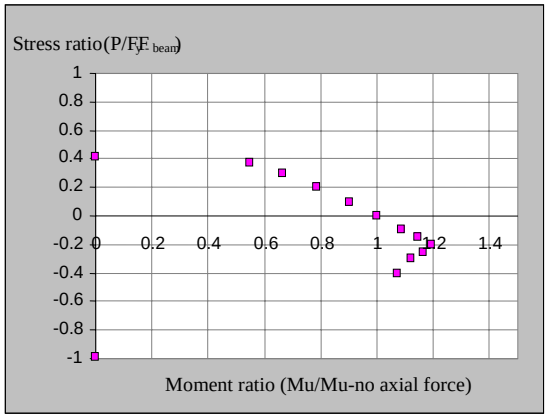
جدول ۲: مقایسه مقاومت و دوران نهایی دو اتصال .

اتصال	Mu (Kn.m)	دوران نهايي (رادیان)	نسبت لنگرخمشي	نسبت ظرفیت دوران
ct1a1	۱۳۶/۸	۰/۰۰۵۸۸	۰/۹۵	۰/۳۹
ct1b6	۱۴۴	۰/۰۱۴۹	۱/۰۵۲	۲/۵۳۴

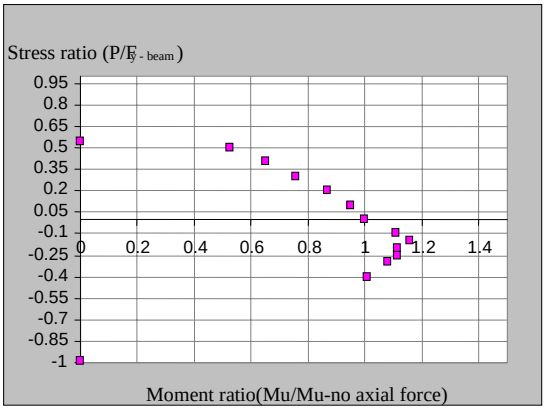
بررسی رفتار خمشی تحت نیروی محوری

بعد از شناسايي 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 محوري بر روي ظرفیت خمشي و سختي اولیه اتصال، بدست آوردن مودهاي گسیختگي و بطور کلي تعیین رفتار خمشي اتصال تحت نیروی محوري، نیروی محوری بصورت تنش معادل با درصدي از تنش تسلیم مقطع تیر، $F_{y\text{-beam}}$ ، به مقطع تیر اعمال شده و بعد از کامل شدن بارگذاري محوري، بارگذاری خمشي روی اتصال صورت گرفت. با تغییر بار محوري از حد بالايي کششي تا حد پایيني فشاري نمودار اندرکنش لنگر خمشي - نیروي محوري برای اتصالات حاصل شد. در

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

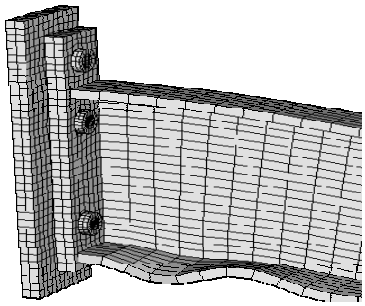


شکل ۱۶: اندرکنش نیروي محوري و لنگر در اتصال **ct1a1**.



شکل ۱۷: اندرکنش نیروي محوري و لنگر در اتصال **ct1b6**.

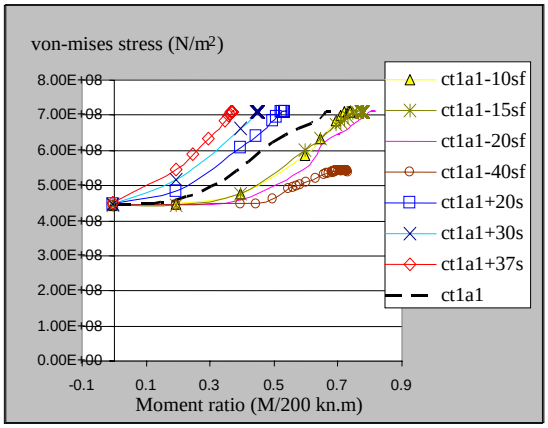
در شکل‌های ارائه شده، نسبت لنگر خمشي[۲] از تقسیم لنگر مقاوم نهایي با نیروی محوري به لنگر مقاوم نهایي بدون نیروی محوري، حاصل مي‌شود. نسبت نیروی محوری از تقسیم تنش محوری اعمال شده (P) به تنش تسلیم مقطع تیر ($F_{y\text{-beam}}$) به دست می‌آید. علامت مثبت بیانگر نیروی محوري کششي و علامت منفي بیانگر نیروی محوري فشاري مي‌باشد. در این شکل‌ها چند ناحیه رفتاري قابل مشاهده است. در حالت عدم وجود لنگر خمشي (M=0)، ظرفیت کششی نهایي اتصال، برابر با باقیمانده ظرفیت کششی پیچ‌ها با توجه به میزان پیش تنش مي‌باشد. در این حالت گسیختگي اتصال با ظرفیت کششي پیچ کنترل مي‌شود. بدیهي است این ظرفیت به علت وجود پیش تنیدگي در پیچ‌ها، کاهش یافته است. با کاهش بار محوري کششي، ظرفیت خمشي اتصال افزایش مي‌یابد زیرا در اینحالت همان‌طور که ذکر شد گسیختگي اتصال توسط ظرفیت کششي پیچ‌ها کنترل شده و به همین سبب کاهش نیروي محوري کششي، باعث افزایش ظرفیت خمشي اتصال مي‌شود. به عبارت دیگر با افزایش نیروي محوري کششي، ظرفیت خمشي اتصال کاهش مي‌یابد. در محدوده نیروی محوري فشاري با افزایش نیروی محوري، ظرفیت اتصال در ابتدا زیاد مي‌شود. در این ناحیه گسیختگي اتصال همچنان توسط ظرفیت کششي پیچ کنترل مي‌شود، به همین علت افزایش نیروي محوري فشاري یک ظرفیت افزوده براي پیچهای اتصال و در نهایت خود اتصال ایجاد مي‌کند. با ادامه افزایش نیروی محوري فشاري و در نقطه‌اي که این نیرو برابر با حدوداً ۲۰-۱۵ درصد $F_{y\text{-beam}}$ به ترتیب برای اتصال ct1b6 و ct1a1 مي‌شود، ظرفیت خمشي به مقدار حداکثر خود رسیده و سپس در ادامه، با افزایش بار محوري فشاری، کاهش مي‌یابد. کاهش ظرفیت به علت رخداد مود گسیختگي از نوع کمانش بال فشاري تیر مي‌باشد (شکل ۱۸). چون عامل کنترل کننده ظرفیت خمشي اتصال در اینحالت، کمانش بال فشاري است با افزایش نیروي محوري فشاري، ظرفیت خمشي اتصال کاهش یافته است. در نهایت ظرفیت نهایي فشاري اتصال، بدون وجود لنگر خمشي، برابر با $P= ۲۸۸ (MPa)$ به دست مي‌آید 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.



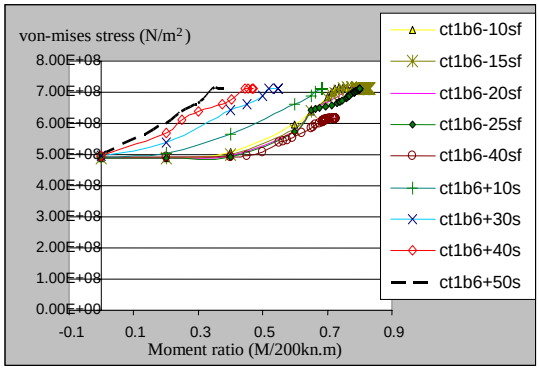
شکل ۱۸: کمانش بال پایینی تیر در **ct1b6** با نیروی محوری.

پیچ‌های اتصال

با توجه به اثر نیروی محوری در میزان لنگر مقاوم نهايي 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 ب کار رفته در نامگذاری مدلها بیانگر درصد نیروی محوری است. همان‌طور که در شکل (۱۹) مشاهده می‌شود در تمام حالاتي که بار محوري کششي است و یا به ازاي بار محوري فشاري معادل با ۰/۱ Fy-beam ، ۰/۱۵- Fy-beam و ۰/۲- Fy-beam میزان تنش در پیچ بالايي به ظرفيت نهايي خود (۷۱۳ مگاپاسگال) به ازاي ظرفيت خمشي اتصال (وضعيت گسيختگي) مي‌رسد. اين امر بيانگر رخداد مود گسيختگي در اتصال از نوع تسليم پيچهاي كششي مي‌باشد. در ادامه با افزايش نيروي محوري فشاري، تنش در پيچ بالايي مرتباً كاهش مي‌يابد، زيرا در اين حالت مود گسيختگي كمانشي در بال فشاري تير، قبل از تسليم كششي پيچ‌ها رخ مي‌دهد و با افزايش نيروي محوري و كاهش ظرفيت خمشي (ظرفيت كمانشي باقيمانده در بال فشاري تير) تنش در پيچ بالايي بيشتر كاهش مي‌يابد.

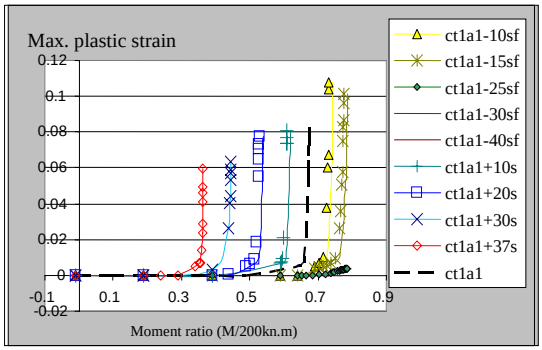


شکل ۱۹: تنش با لنگر در پیچ بالايي **ct1a1** با نيروي محوري.

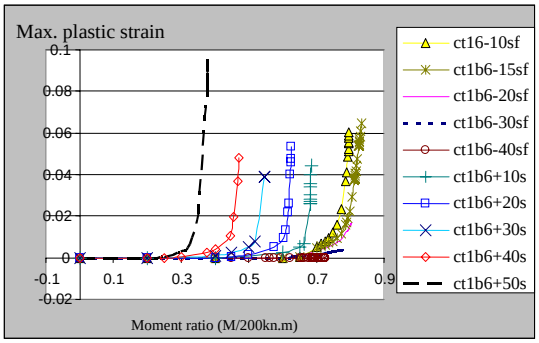


شکل ۲۰ : تنش با لنگر در پیچ بالايي **ct1b6** با نيروي محوري.

در شکل (۲۰) مشاهده مي‌شود که در تمام بارگذاري‌هاي محوري کششي و یا نیروی محوري فشاري معادل ۰/۱ Fy-beam، ۰/۱۵- Fy-beam ، ۰/۲- Fy-beam و ۰/۲۵- Fy-beam تنش در پيچ بالايي به حد نهايي خود مي‌رسد. در ادامه، با افزايش بار محوري فشاري، به علت رخداد مود گسيختگي كمانش بال فشاري تير، تنش در پيچ بالايي (پيچ كششي) كاهش مي‌يابد. در بارگذاري محوري كششي معادل با ۰/۴ Fy-beam و ۰/۵ Fy-beam، اثر پيش تنش توسط بار محوري كششي خنثي شده و با افزايش لنگر خمشي، تنش در پيچ بالايي از همان ابتدا افزايش مي‌يابد.



شکل ۲۱: کرنش پلاستیک با لنگر در پیچ بالايي **ct1a1** .

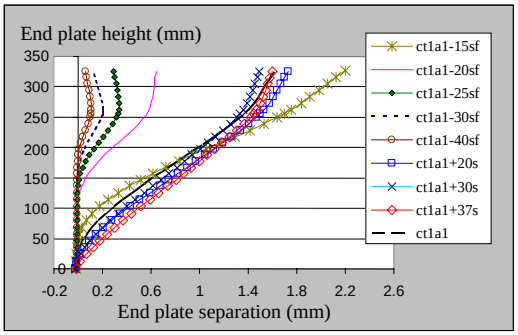


شکل ۲۲: کرنش پلاستیک با لنگر در پیچ بالايي **ct1b6**.

بررسی کرنش در پیچهای اتصال خمشی تحت نیروی محوری می‌تواند جهت تعیین اثر نیروی محوری در میزان پلاستیک شدگی پیچها بکار رود. در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) تغییرات کرنش پیچ آورده شده است. در اتصال ct1a1 تحت بار محوری معادل با ۰/۳- Fy-beam و ۰/۴- Fy-beam کرنش پلاستیک صفر بوده و پیچ بالایي الاستیک باقي مي‌ماند. در اتصال ct1b6 تحت بار محوری در تمام حالات پیچ بالایي دچار کرنش پلاستیک شده است. تنها در حالت بارگذاري محوري معادل با ۰/۴- Fy-beam ، پیچ بالایي الاستیک باقي مي‌ماند. پیچ در نیروی محوري معادل با Fy-beam ۰/۵ دچار بیشترین کرنش پلاستیک مي‌شود.

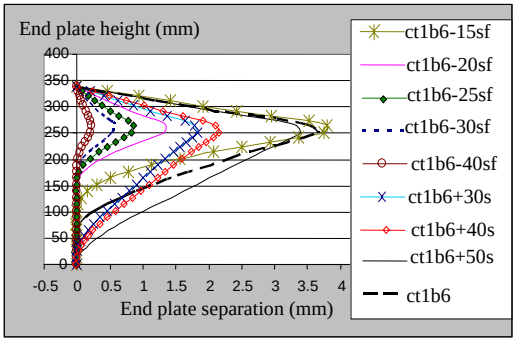
جداشدگی صفحه انتهايي و رفتار خمشی اتصال

با بررسي میزان جداشدگي صفحه انتهايي در لنگر خمشي نهايي، محل تار خنثي و شکل صفحه انتهايي به ازاي این لنگر، قابل تشخیص است. تعیین محل تار خنثي و شکل صفحه انتهايي مي‌تواند براي تعیین چگونگي توزیع نیرو در پیچ‌ها در حالت حدی نهايي به کار رود. شکل‌های (۲۳) و (۲۴) جداشدگی صفحه انتهايي از بال ستون را برای دو اتصال با نیروی محوری نشان داده است. در اتصال ct1a1 تحت نیروی محوری فشاري و در تمام حالاتي که گسیختگي از نوع کمانش بال فشاري تیر مي‌باشد، میزان جداشدگي در صفحه انتهايي به شدت کاهش یافته است. جداشدگي در سایر موارد داراي شکل کلي تقریباً یکسان مي‌باشد و تنها محل تار خنثي جا به جا مي‌شود.



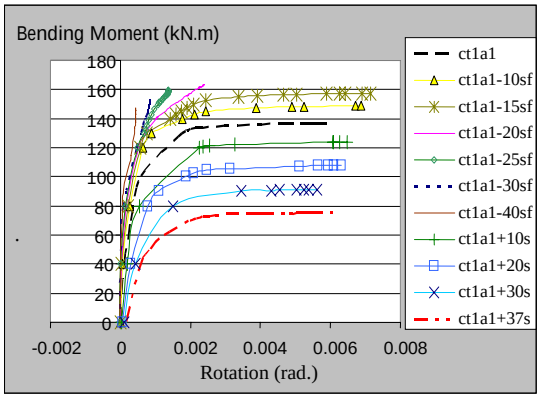
شکل ۲۳ : جداشدگي صفحه انتهايي در اتصال **ct1a1** .

در هر دو اتصال بیشترین جداشدگي در بارگذاري محوري معادل با ۰/۱۵- Fy-beam دیده مي‌شود. در اتصال ct1b6 در بارگذاري‌های محوري فشاري معادل ۰/۲۰- Fy-beam و بیشتر، جداشدگی کمترین مقدار را دارد که این بعلت رخداد مود گسیختگي از نوع کمانش بال فشاري تیر مي‌باشد.



شکل ۲۴ : جداشدگي صفحه انتهايي در اتصال **ct1b6**.

در شکل (۲۵) نمودار لنگر خمشی - دوران اتصال ct1a1 تحت نیروی محوری آورده شده است. در این شکل کمترین سختي اولیه مربوط به حالت بارگذاري محوري کششي برابر با ۰/۳۷ Fy-beam دیده می‌شود. زیرا در این وضعیت همان‌طور که دیده شد (شکل ۱۹) اثر پیش تنش از بین رفته و نیروي پیچ‌هاي کششي از همان ابتدا با لنگر افزایش می‌یابد.



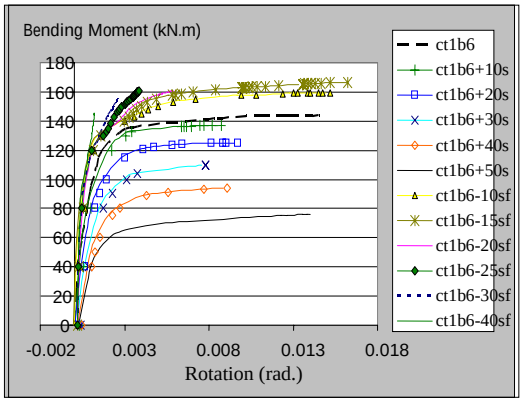
شکل ۲۵ : نمودار لنگر - دوران در اتصال **ct1a1**.

همان‌طور که در شکل فوق مشاهده مي‌شود، در تمام حالات بارگذاری محوري فشاري، سختي اولیه نسبت به اتصال بدون بار محوری، افزایش یافته است. بیشترین میزان دوران در حالت نیروی محوري برابر با ۰/۱۵- Fy-beam و ۰/۱- Fy-beam دیده مي‌شود. البته میزان این افزایش دوران نسبت به مدل اتصال ct1a1

(بدون نیروی محوري) تنها ۱/۲۱ برابر بوده و افزایش قابل توجهي در ظرفیت نهایي دوران اتصال مشاهده نمي‌شود. در ادامه و با افزایش بار محوري فشاری، کاهش شدید دوران اتصال به علت تغییر مود گسیختگي دیده مي‌شود.

در تمام حالت‌هاي بارگذاري محوري کششي دوران نهایي تقریباً ثابت و برابر با دوران نهایي مدل اتصال ct1a1 (بدون نیروی محوري) بوده و سختی اولیه از سختی اولیه اتصال بدون نیروی محوری کمتر می‌باشد. در جدول (۳) سختی اولیه اتصالات ct1a1 تحت بارگذاري 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 سختي خمشي اولیه اتصال در تمامي حالت‌هاي بارگذاري محوري کششي، از سختي خمشي اولیه اتصال بدون نیروی محوري کمتر مي‌باشد. این امر به علت کاهش اثر پیش تنش در پیچ‌ها توسط نیروی محوري کششي است. بالطبع با اعمال نیروی محوري فشاري میزان سختي خمشي اولیه اتصال افزایش مي‌یابد. بیشترین دوران در اتصال در نیروی محوري معادل با $F_{y\text{-}beam}$ ۰/۱۵- رخ مي‌دهد. میزان دوران نهایي اتصال در بارگذاري محوري کششي، به غیر از حالت بارگذاري $F_{y\text{-}beam}$ ۰/۵۰، از دوران اتصال بدون نیروی محوري به طور قابل ملاحظه‌اي کمتر مي‌باشد.



شکل ۲۶ : نمودار لنگر خمشي - دوران در اتصال **ct1b6**.

همچنین جدول (۴) سختی اولیه اتصالات ct1b6 تحت بارگذاري 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	۳/۸۹×۱۰^۵	۶/۸×۱۰^۵	۱/۰×۱۰^۶	۲/۰×۱۰^۶	۲/۰×۱۰^۶	۳/۰×۱۰^۶
نام مدل	ct1a1-40sf	ct1a1+10s	ct1a1+20s	ct1a1+30s	ct1a1+37s	_
سختی اولیه اتصال	۴/۰×۱۰^۶	۲/۴۱×۱۰^۵	۱/۶۵×۱۰^۵	۱/۲×۱۰^۵	۰/۹۵×۱۰^۵	-

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	t1b6-30sf
سختی اولیه اتصال	۱/۶×۱۰^۵	۲/۱×۱۰^۵	۵/۰۷×۱۰^۵	۷/۴۵×۱۰^۵	۱/۰×۱۰^۶	۲/۰×۱۰^۶
نام مدل	ct1b6-40sf	ct1b6+10s	ct1b6+20s	ct1b6+30s	ct1b6+40s	ct1b6+50s
سختی اولیه اتصال	۴/۰×۱۰^۶	۱/۰۸×۱۰^۵	۰/۸۳×۱۰^۵	۰/۸۷×۱۰^۵	۰/۶۳×۱۰^۵	۰/۴۶×۱۰^۵

نتیجه گیری

تحلیل استاتیکی اتصالات ورق انتهائی 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 انتهايي نشان داد که در تمام حالت‌های بارگذاری محوری کششی با افزایش نیرو، ظرفیت خمشی نهايي 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 مود گسیختگی جدید از نوع کمانش بال فشاری تیر، کاهش یافت. از این نقطه به بعد در تمام ترکیبات نیروی محوری و لنگر خمشی، گسیختگی از نوع کمانش بال تیر مشاهده گردید. لذا مي بایست در برآورد ظرفیت خمشی نهايي اتصال، اثر نیروی محوری حتماً در نظر گرفته شود.

در اتصال با صفحه انتهايي ضخیم در تمام حالات بارگذاری محوری، به جز حالاتی که نیروی محوری در ترکیب با لنگر خمشی باعث کمانش بال تیر میگردید، میزان دوران نهايي تقریباً با دوران نهايي اتصال بدون نیروی محوری برابر گردید. در اتصال با صفحه انتهايي 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 کمانش بال تیر می‌گردید، دوران اتصال نسبت به دوران نهايي 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.

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