

بررسی رفتار اتصالات خمشی با ورق انتهایی تحت اثر بارگذاری ترکیبی

محمد طاهری پور^۱، مهدی قاسمیه^{۲*}

- ۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران
۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

*m.ghassemieh@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۳/۱۷

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۵/۳۱

چکیده

در این پژوهش رفتار اتصالات خمشی با صفحه انتهایی گسترش یافته تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی شامل اعمال هم‌زمان لنگر خمشی، لنگر پیچشی و یا نیروی محوری بر اتصال بررسی شده است. با توجه به اینکه تاکنون مطالعات چندانی در این زمینه روی اتصالات خمشی با ورق انتهایی صورت نگرفته است و اندرکنش نیروهای مذکور می‌تواند رفتار اتصال را به نحو چشم‌گیری تغییر دهد، مدل اجزای محدود اتصال تهیه شده و علاوه بر بررسی رفتار اتصال تحت اثر خمش خالص، از صحت مدل‌های اجزای محدود اطمینان حاصل شد. با توجه به اینکه سازوکار انتقال بار توسط تیرها در قاب‌های تحت بار جانبی (زلزله، باد و ...) به صورت نیروی محوری و لنگر خمشی به اتصال است، به بررسی رفتار اتصال، تحت اثر هم‌زمان خمش و نیروی محوری پرداخته می‌شود. در این حالت، نیروی محوری نه چندان زیاد، می‌تواند مد گسیختگی و ظرفیت خمشی اتصال را تغییر دهد. در ادامه با توجه به اینکه در حالاتی مانند اعمال بارگذاری خارج از محور، لنگرهای پیچشی و خمشی به صورت هم‌زمان بر تیر اعمال می‌شوند، اثر این نوع بارگذاری نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که حضور پیچش علاوه بر کاهش سختی اولیه اتصال، سبب افزایش تنش نرمال در یک سمت اتصال و کاهش آن در سمت دیگر شده و نیز می‌تواند مد گسیختگی اتصال را به کماتش پیچشی جانبی تیر تغییر دهد. در انتها اثر ترکیب لنگر خمشی، لنگر پیچشی و نیروی محوری بر اتصال بررسی شد. در این حالت، اعمال نیروی فشاری در هم‌هی نمونه‌ها، سبب رخداد کماتش پیچشی جانبی در تیر شده و رفتار ترد اتصال را در پی دارد. در مقابل اعمال نیروی کششی، ضمن کاهش ظرفیت خمشی اتصال، اثر پیچش وارده و پتانسیل رخداد کماتش پیچشی جانبی در تیر را کاهش می‌دهد. همچنین در کلیه حالات بارگذاری ترکیبی، نمودارهای اندرکنش نیروها ترسیم شده است.

واژگان کلیدی: اتصالات خمشی، ورق انتهایی، بارگذاری ترکیبی، اندرکنش نیروها، پیچش، کماتش پیچشی جانبی

۱- مقدمه

نیروی محوری به اتصال است. همچنین در سازه‌هایی مانند

سازه‌های صنعتی (از قبیل سوله‌ها) که دارای تیرهای مایل در تراز سقف هستند، اتصالات پیچی (چه از نوع اتصال تیر به تیر

در قاب‌های خمشی تحت بار جانبی (مانند زلزله و باد)، سازوکار انتقال بار توسط تیرها به صورت لنگر خمشی و

منحنی لنگر خمشی- دوران اتصال به ازای مقادیر مختلف نیروی محوری ارائه دادند [27]. الخوریبی و همکاران⁴ با استفاده از مدل اجزای محدود پوسته‌ای دو بعدی، عامل‌ها و متغیرهای اثرگذار در رفتار انواع اتصالات شامل اتصالات جوشی، هم‌تراز و گسترش‌یافته انجام دادند و تاثیر نیروی محوری بر ظرفیت خمشی اتصال را ارزیابی نمودند [28].

همان‌گونه که ملاحظه شد، با وجود وجود پژوهش‌های گسترده بر این اتصالات، تعداد محدودی از این پژوهش‌ها به بررسی بارگذاری ناشی از ترکیب خمش و نیروی محوری پرداخته‌اند و هیچ‌یک اثر ترکیب خمش و پیچش یا ترکیب نیروهای خمشی، پیچشی و محوری را بر رفتار این اتصالات مورد بررسی قرار نداده‌اند. همچنین در حال حاضر آیین‌نامه خاصی برای تحلیل و طراحی اتصالات خمشی با ورق انتهایی تحت بارگذاری‌های اشاره شده وجود ندارد. در نظر نگرفتن این بارگذاری‌ها می‌تواند به طراحی غیر ایمن سازه منجر شود. با توجه به موارد یاد شده، در این پژوهش به بررسی اثر هر یک از ترکیبات بارگذاری بر اتصالات خمشی با ورق انتهایی پرداخته خواهد شد.

۲- مدل‌سازی اجزای محدود

در پژوهش حاضر، اثر ترکیب نیروهای خمشی، پیچشی و محوری بر رفتار اتصال با صفحه انتهایی بلند سخت‌نشده توسط نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس⁵ بررسی می‌شود. تمامی عوامل غیر خطی شامل رفتار غیر خطی مواد، تغییر شکل‌های بزرگ، کماتش و پایداری در تحلیل اجزای محدود در نظر گرفته شده است. بدین منظور، اتصال با دو نوع رفتار متفاوت مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد که اتصال نخست (CTIA-1) دارای رفتار صفحه ضخیم و اتصال دوم (CTIB-6) دارای رفتار صفحه متوسط است. دو اتصال مذکور از نمونه‌های آزمایشگاهی مگی و همکاران [29] که تحت بارگذاری خمشی استاتیکی قرار گرفته‌اند، انتخاب شده‌اند.

و چه از نوع اتصال تیر به ستون) تحت ترکیب لنگر خمشی و نیروی محوری قرار می‌گیرند. حضور نیروی محوری می‌تواند ظرفیت خمشی و رفتار اتصال را تحت تاثیر قرار دهد. همچنین در بسیاری از موارد به دلیل وجود بارگذاری خارج از محور، لنگرهای پیچشی و خمشی به صورت هم‌زمان بر عضو اعمال می‌شود. یکی از عضوهایی که ممکن است تحت این بارگذاری قرار گیرند، تیرهای پیرامونی یک قاب ساختمانی است. بنابراین، در اثر زلزله، اتصال می‌تواند تحت لنگر خمشی، لنگر پیچشی و نیروی محوری قرار گیرد. در زمینه اتصالات با ورق انتهایی، تحقیقات قبل از دهه ۱۹۶۰ میلادی آغاز شده و تاکنون نیز ادامه دارد. این پژوهش‌ها منجر به ارائه روش‌های تحلیل و طراحی دقیقی، برای هر دو نوع اتصال ورق انتهایی هم‌تراز و بلند شده است [1-5]. مطالعات اخیر برای یافتن عامل‌های رفتار اتصال از نمونه‌های آزمایشگاهی [6-12] یا مدل‌سازی اجزاء محدود [13-18] و یا هر دو روش فوق بهره می‌گیرند [19-23].

از جمله پژوهش‌های صورت گرفته بر رفتار اتصالات خمشی با ورق انتهایی تحت ترکیب خمش و نیروی محوری می‌توان به پژوهش لیما و همکاران¹ اشاره نمود که در آن آزمایش‌هایی بر اتصالات خمشی تیر به ستون توسط ورق انتهایی هم‌تراز [24] و گسترش‌یافته [25] صورت پذیرفت. این اتصالات تحت ترکیب خمش و نیروی محوری به صورت کششی و فشاری قرار گرفتند و نقش نیروی محوری بر رفتار اتصالات، تعیین کننده ارزیابی شد.

اوربوناس و دانیوناس²، اتصالات ورق انتهایی نیمه صلب تیر به تیر را تحت خمش و نیروی محوری مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که هنگام اعمال نیروی محوری قابل توجه، طراحی اتصالات خمشی با ورق انتهایی می‌بایست با در نظر گرفتن اثر نیروی محوری و لنگر خمشی صورت پذیرد [26]. دل‌ساویو و همکاران³ ضمن بررسی اثر نیروی محوری بر رفتار اتصالات خمشی با ورق انتهایی، روشی برای پیش‌بینی

¹ Lima et al.

² Urbonas and Daniunas

³ Del Savio et al.

⁴ El-Khoriby et al.

⁵ ABAQUS

شکل ۳. شبکه‌بندی اتصال همگرا شده

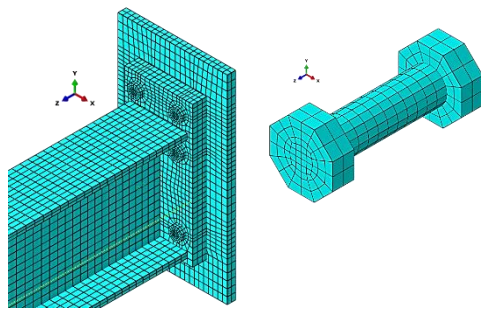


Fig. 3. Mesh pattern of the finite element modelling

شکل (۴) ابعاد اتصالات (به سانتی متر)

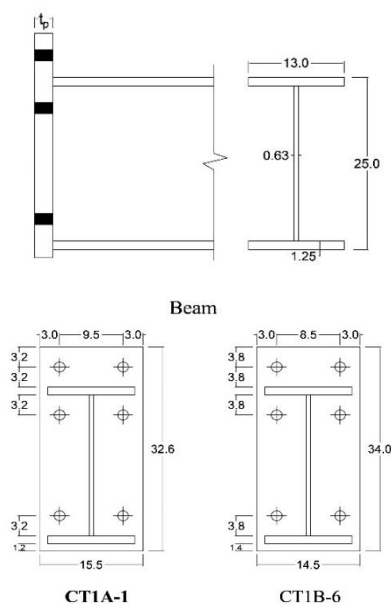


Fig. 4. Geometrical dimensions of connections (cm)

۳- بررسی اتصال تحت خمش خالص و صحت‌سنجی مدل‌ها

برای تعیین رفتار خمشی اتصال و نیز درستی آزمایشی مدل‌سازی، اتصالات تحت خمش خالص قرار گرفته و نتایج تحلیل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی [29] مقایسه می‌شود. برای ایجاد لنگر خمشی، بار خطی یکنواخت به سطح مقطع انتهایی تیر اعمال شده و تا گسیختگی اتصال افزایش می‌یابد.

نمودار لنگر خمشی- دوران اتصال در دو حالت آزمایشگاهی [29] و عددی برای اتصال CT1A-1 در شکل (۵) و برای اتصال CT1B-6 در شکل (۶) نمایش داده شده است.

تمام اجزای اتصال توسط المان‌های C3D8 مدل شده‌اند. فولاد به کار رفته در تیر، صفحه اتصال و بال ستون از نوع فولاد ASTM A36 و در پیچ‌ها از نوع فولاد پر مقاومت ASTM A325 است. نمودار رفتار مواد تیر، ستون و صفحه انتهایی در شکل (۱) و نمودار رفتار مواد پیچ در شکل (۲) نشان داده شده است.

شکل ۱. مشخصات رفتار مکانیکی تیر، ستون و صفحه انتهایی

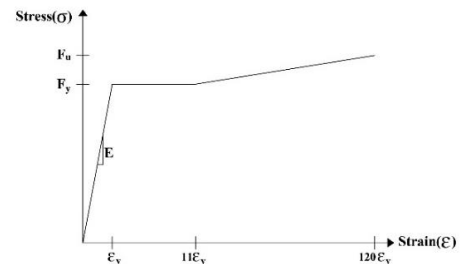


Fig. 1. Mechanical behavior characteristics of beams, columns and endplates

شکل ۲. مشخصات رفتار مکانیکی پیچ‌ها

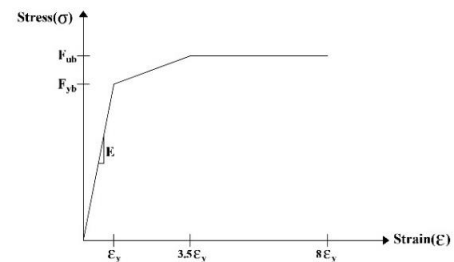


Fig. 2. Mechanical behavior characteristics of bolts

تنش نهایی پیچ و تنش تسلیم صفحه انتهایی به ترتیب ۷۱۲ و ۲۸۸ مگاپاسکال است. شکل (۳) شبکه‌بندی اتصال همگرا شده و جدول (۱) مشخصات اتصالات را نشان می‌دهد. اتصالات نیز در شکل (۴) ملاحظه می‌شود. میزان پیش‌تیندگی پیچ‌ها برابر با ۷۰٪ تنش تسلیم پیچ (۴۴۰ MPa) در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. ابعاد دو اتصال CT1A-1 و CT1B-6

End plate thickness (mm)	End plate length (mm)	End plate width (mm)	Bolt diameter (mm)	Model ID
31.5	326	155	16	CT1A-1
19	340	145	19	CT1B-6

Table 1. Geometrical dimensions of CT1A-1 and CT1B-6 connections

برای اتصال CT1B-6، مقدار M_u از هر دو لنگر مقاوم پیش‌بینی شده کم‌تر است. این امر به دلیل وجود نیروی اهرمی است که با ایجاد یک لنگر مخالف از ظرفیت خمشی اتصال می‌کاهد. برای پی بردن به رفتار اتصال، نیروی پیچ‌ها و محل پلاستیک شدگی صفحه انتهایی به ترتیب در شکل‌های (۷ و ۸) ترسیم می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود پیچ‌های هر دو ردیف کششی اتصال به تنش نهایی خود رسیده و صفحه انتهایی در محل بال کششی اتصال (و نه محل پیچ‌ها) تسلیم شده است. بنابراین رفتار اتصال CT1B-6 از نوع صفحه متوسط است.

شکل ۷. تغییرات تنش پیچ‌ها با لنگر خمشی CT1B-6

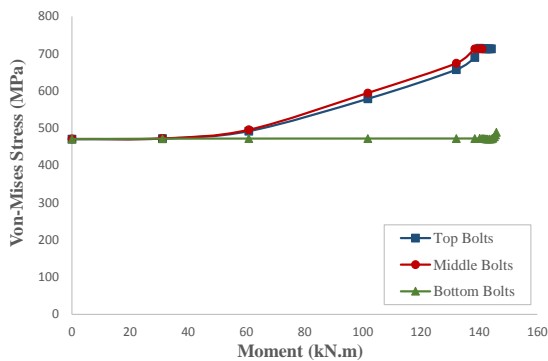


Fig. 7. Von-Mises stress vs. bending moment in the bolts of CT1B-6

شکل ۸. تسلیم صفحه انتهایی در اتصال CT1B-6

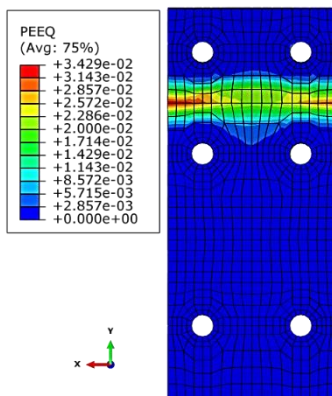


Fig. 8. Plastic Strain of CT1B-6

میزان جداشدگی ورق انتهایی در دو حالت آزمایشگاهی [29] و عددی برای اتصال CT1B-6 در شکل (۹) ارائه می‌شود. هماهنگی مناسب جداشدگی اتصال در دو حالت آزمایشگاهی و عددی در این شکل مشهود است.

شکل ۵. لنگر خمشی - دوران اتصال CT1A-1

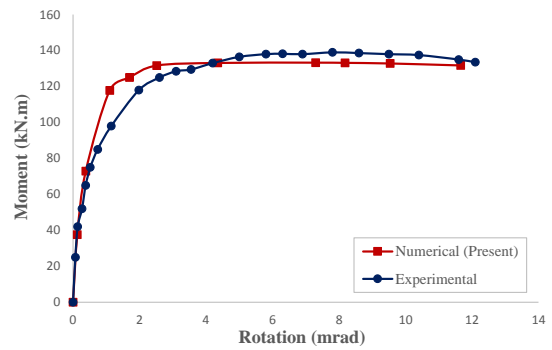


Fig. 5. Moment vs. rotation curve in CT1A-1

شکل ۶. لنگر خمشی - دوران اتصال CT1B-6

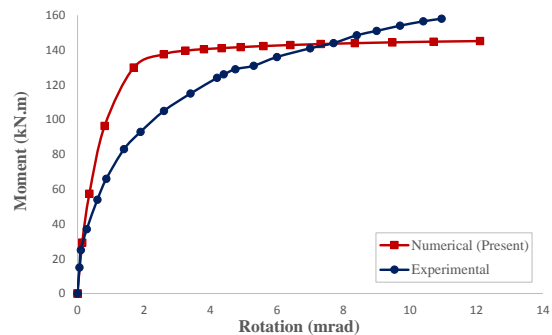


Fig. 6. Moment vs. rotation curve in CT1B-6

در جدول (۲) مقادیر لنگر خمشی نهایی صفحه انتهایی (M_{pl}), لنگر خمشی نهایی پیچ‌ها بدون اثر نیروی افزایشده (M_{np}), مقاومت کششی پیچ (F_t), تنش تسلیم صفحه انتهایی (F_{yp}) با استفاده از مرجع [30] و ظرفیت خمشی اتصال از طریق تحلیل اجزای محدود (M_u) ارائه می‌شود.

جدول ۲. مقایسه نتایج تحلیلی و اجزای محدود

M_u (kN.m)	M_{np} (kN.m)	M_{pl} (kN.m)	Model ID
133	136	360	CT1A-1
146	192	161	CT1B-6

Table. 2. Analytical Values vs. Finite Element Results

در مدل CT1A-1 ظرفیت خمشی به دست آمده از روش اجزای محدود (M_u), هماهنگی خوبی با میزان لنگر نهایی پیچ بدون اثر نیروی افزایشده (M_{np}) دارد. با توجه به نزدیکی M_u و M_{np} و فاصله زیاد M_{pl} از این مقادیر، پیچ‌های کششی اتصال گسیخته شده و رفتار این اتصال از نوع صفحه ضخیم است.

جدول ۳. نام‌گذاری مدل‌ها در حالت ترکیب خمش و نیروی محوری

Thick endplate models (mode 3)	Medium endplate models (mode 2)	P/F _y
-	B+0.58F _y	58%
-	B+0.5F _y	50%
A+0.43F _y	-	43%
A+0.3F _y	B+0.3F _y	30%
A+0.2F _y	B+0.2F _y	20%
A+0.1F _y	B+0.1F _y	10%
A0	B0	0
A-0.1F _y	B-0.1F _y	-10%
A-0.15F _y	B-0.15F _y	-15%
A-0.2F _y	B-0.2F _y	-20%
A-0.25F _y	B-0.25F _y	-25%
A-0.3F _y	B-0.3F _y	-30%
A-0.4F _y	B-0.4F _y	-40%
A-0.99F _y	B-0.99F _y	-99%

Table 3. Designation of models in bending and axial force combination

شکل ۱۰. نمودار لنگر خمشی-دوران CT1A-1 تحت ترکیب خمش و نیروی محوری

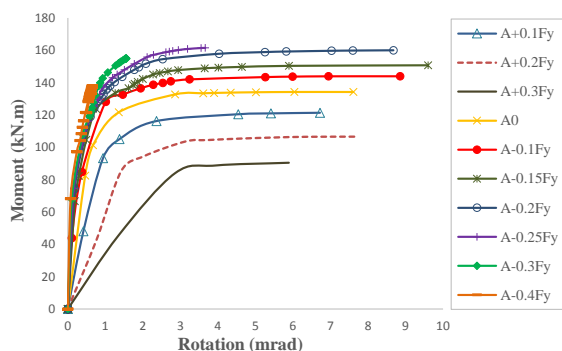


Fig. 10. Moment vs. rotation curve in CT1A-1 in bending and axial force combination

شکل ۱۱. نمودار لنگر خمشی-دوران CT1B-6 تحت ترکیب خمش و نیروی محوری

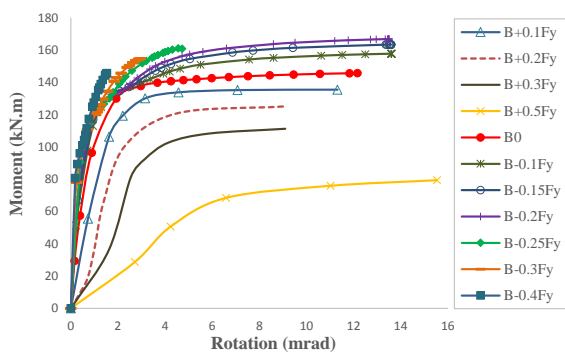


Fig. 11. Moment vs. rotation curve in CT1B-6 in bending and axial force combination

شکل ۹. جداسازی صفحه انتهایی در انتهای بارگذاری در دو حالت آزمایشگاهی [29] و عددی CT1B-6

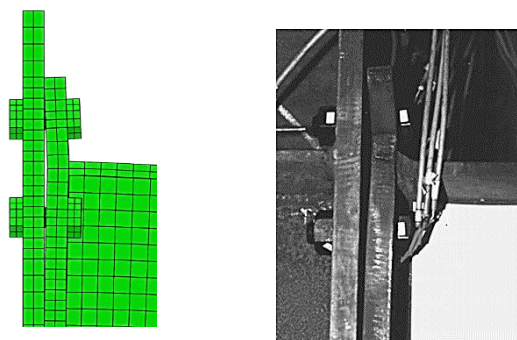


Fig. 9. Endplate separation at the end of loading in two experimental [29] and numerical modes

۴- بررسی اتصالات تحت ترکیب خمش و نیروی محوری

پس از شناسایی رفتار خمشی اتصال تحت خمش خالص و اعتبارسنجی نتایج اجزای محدود، اکنون به بررسی رفتار خمشی اتصالات معرفی شده در حضور بار محوری پرداخته می‌شود. بدین منظور پس از پیش‌تنیده کردن پیچ‌ها، بار محوری به صورت درصدی از تنش تسلیم تیر به مقطع انتهایی تیر اعمال می‌شود و پس از بارگذاری محوری، بارگذاری خمشی روی اتصال صورت می‌گیرد. نام‌گذاری مدل‌ها متناسب با تنش محوری اعمالی به مقطع تیر است. نسبت لنگر خمشی-نیروی محوری (MAR) از تقسیم لنگر مقاوم نهایی اتصال در حضور بار محوری به لنگر مقاوم نهایی بدون بار محوری (تحت خمش خالص) حاصل می‌شود. علامت مثبت بیانگر بار محوری کششی و علامت منفی بیانگر بار محوری فشاری است. نام‌گذاری مدل‌ها و نسبت لنگر خمشی در جدول (۳) ملاحظه می‌شود. در این جدول، P تنش محوری اعمال شده به مقطع تیر و F_y تنش تسلیم مقطع تیر است.

نمودار رفتار خمشی اتصالات CT1A-1 و CT1B-6 تحت اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی به ترتیب در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) قابل ملاحظه است. چنانچه ملاحظه می‌شود با افزایش بار محوری فشاری یا کاهش بار محوری کششی سختی اتصال افزایش می‌یابد.

بنابراین با افزایش نیروی محوری فشاری، ظرفیت خمشی اتصال کاهش یافته است. در نهایت ظرفیت نهایی فشاری اتصال، بدون وجود لنگر خمشی، برابر با ۲۸۸ MPa به دست می‌آید که برابر با تنش تسلیم مقطع تیر است.

۵- بررسی اتصالات تحت ترکیب خمش و پیچش

اعمال بارگذاری ترکیبی ناشی از خمش و پیچش در نرم‌افزار اجزای محدود در سه گام صورت می‌گیرد. گام اول شامل ایجاد پیش‌تندگی در پیچ‌ها است که با ایجاد دمای منفی روی پیچ‌ها اعمال می‌شود. در گام دوم مقدار معینی لنگر پیچشی بر اساس درصدی از ظرفیت پیچشی اسمی تیر تحت اثر پیچش خالص (T_{II}) به انتهای تیر اعمال می‌شود و نهایتاً در مرحله سوم لنگر خمشی به صورت جابه‌جایی تا گسیختگی مدل به انتهای تیر اعمال می‌شود. برای محاسبه‌ی ظرفیت پیچشی اسمی تیر، مدل اجزای محدود اتصالات تحت پیچش خالص قرار گرفت و ظرفیت پیچشی اسمی هر دو نمونه مطابق شکل (۱۴) برابر با ۷/۵ kN.m به دست آمد.

شکل ۱۴. لنگر پیچشی - دوران پیچشی اتصال تحت پیچش خالص

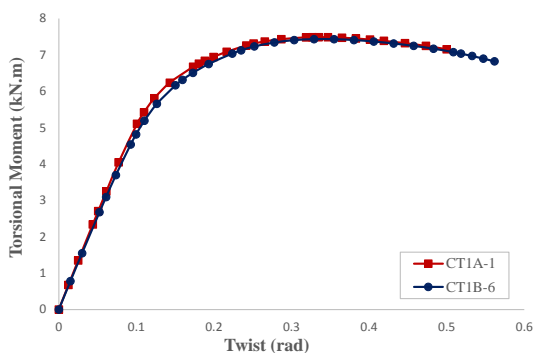


Fig. 14. Torque vs. twist under pure torsion

لازم به ذکر است که تیر با رسیدن به ظرفیت پیچشی اسمی، به دلیل ناپایداری هندسی ایجاد شده در مقطع، توانایی تحمل لنگر پیچشی بیشتری را ندارد؛ اما به دلیل عدم گسیختگی و تسلیم، همچنان توانایی باربری داشته و امکان اعمال لنگر خمشی بر آن میسر است.

نام‌گذاری مدل‌ها در جدول (۴) و نمودار اندرکنش خمش

با تغییر بار محوری از حد بالایی کششی تا حد پایینی فشاری نمودار اندرکنش لنگر خمشی - نیروی محوری مطابق شکل (۱۲) حاصل می‌شود. در ناحیه نیروی محوری کششی، گسیختگی اتصال با گسیختگی پیچ‌های کششی کنترل می‌شود. با توجه به نمودار، با افزایش بار محوری کششی، نسبت لنگر خمشی - نیروی محوری (MAR) و به تبع آن ظرفیت خمشی اتصال کاهش می‌یابد، زیرا در این حالت گسیختگی اتصال توسط ظرفیت کششی پیچ‌ها کنترل می‌شود.

در ناحیه بار محوری فشاری در ابتدا با افزایش بار محوری، ظرفیت اتصال افزایش می‌یابد. 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 بار محوری فشاری ظرفیت خمشی به مقدار بیشینه خود خواهد رسید. سپس با افزایش بار فشاری، ظرفیت خمشی نمونه کاهش می‌یابد. کاهش ظرفیت به علت رخداد حالت گسیختگی از نوع کمانش بال فشاری تیر است (شکل ۱۳).

شکل ۱۲. نمودار اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی

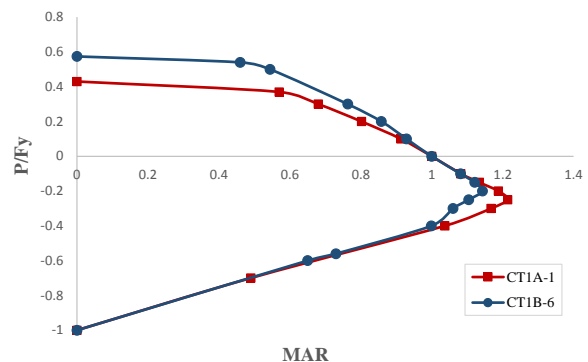


Fig. 12. Axial force ratio vs. MAR curve

شکل ۱۳. کمانش بال فشاری تیر در حالت ترکیب نیروی فشاری و خمش

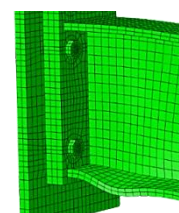


Fig. 13. Bottom flange buckling in bending and axial compressive force combination

شکل ۱۶. لنگر خمشی-دوران CT1A-1 تحت ترکیب خمش و پیچش

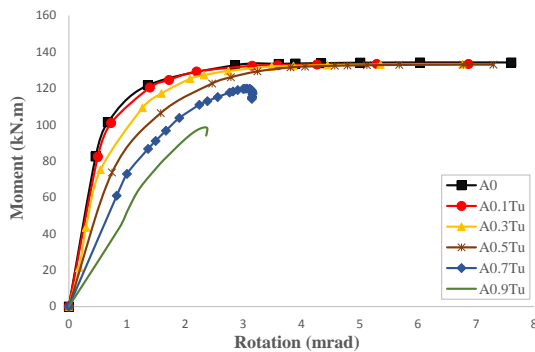


Fig. 16. Moment vs. rotation curve in CT1A-1 in bending and torsion combination

نمودار لنگر خمشی بر حسب دوران اتصال به ازای مقادیر مختلف لنگر پیچشی برای دو اتصال CT1A-1 و CT1B-6 به ترتیب در شکل های (۱۶ و ۱۷) نمایش داده شده است.

چنانچه ملاحظه می شود با افزایش لنگر پیچشی، میزان سختی اولیه اتصال کاهش می یابد.

علت افت مقاومت ناگهانی برخی از نمونه ها، کمناش پیچشی جانبی تیر می باشد. اتصال در این وضعیت رفتاری ترد از خود نشان می دهد و میزان دوران نهایی آن کاهش قابل ملاحظه ای دارد.

شکل ۱۷. لنگر خمشی-دوران CT1B-6 تحت ترکیب خمش و پیچش

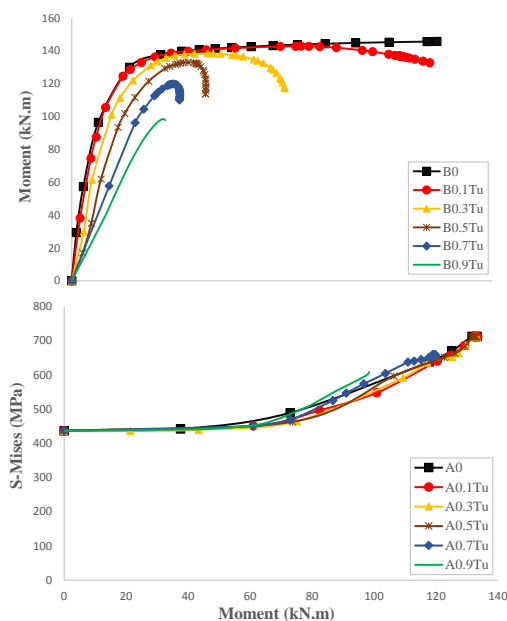


Fig. 17. Moment vs. rotation curve in CT1B-6 in bending and torsion combination

و پیچش در شکل (۱۵) قابل ملاحظه است. منظور از نسبت لنگر خمشی-پیچشی (MTR)، نسبت ظرفیت خمشی اتصال در حالت ترکیب خمش و پیچش به ظرفیت خمشی اتصال در حالت خمش خالص است. T لنگر پیچشی اعمالی به نمونه و T_u ظرفیت پیچشی اسمی تیر است.

مطابق این نمودار در نمونه صفحه ضخیم، لنگرهای پیچشی با مقادیر کمتر از نیمی از ظرفیت پیچشی تیر ($0.5T_u$) تاثیری بر ظرفیت خمشی اتصال ندارد. تجاوز لنگر پیچشی از مقدار فوق سبب کاهش ظرفیت خمشی نمونه و تبدیل مکانیسم گسیختگی اتصال از گسیختگی پیچ های کششی به کمناش پیچشی جانبی تیر می شود. در مقابل در اتصال با رفتار صفحه نازک یا متوسط، لنگرهای پیچشی با مقادیر کم نیز بر ظرفیت خمشی اتصال تاثیر گذار است. در نمونه های صفحه متوسط ذکر شده، به ازای لنگرهای پیچشی مساوی یا بیش از $0.3T_u$ شاهد گسیختگی از نوع کمناش پیچشی جانبی تیر خواهیم بود.

جدول ۴. نام گذاری مدل ها در حالت ترکیب خمش و پیچش

Thick endplate models (mode 3)	Medium endplate models (mode 2)	T/T _u
A0	B0	0%
A0.1T _u	B0.1T _u	10%
A0.3T _u	B0.3T _u	30%
A0.5T _u	B0.5T _u	50%
A0.7T _u	B0.7T _u	70%
A0.9T _u	B0.9T _u	90%
A1.0T _u	B1.0 T _u	100%

Table 4. Designation of models in bending and torsion combination

شکل ۱۵. نمودار اندرکنش خمش و پیچش

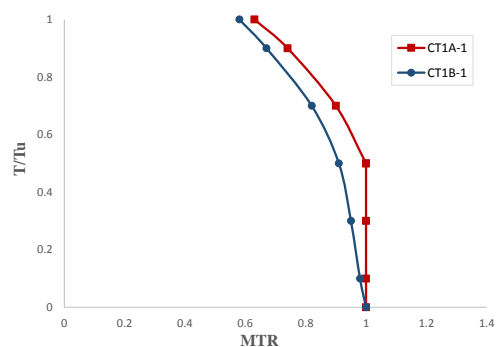


Fig. 15. Torque ratio vs. MTR curve

نسبت خمشی است که برابر با نسبت ظرفیت خمشی اتصال در حالت بارگذاری ترکیبی ناشی از اندرکنش خمش، پیچش و نیروی محوری به ظرفیت خمشی در حالت خمش خالص است. این نمودارها به صورت حلقه‌هایی تودرتو هستند که هر حلقه برای یک لنگر پیچشی خاص ترسیم شده است. در صورتی که به ازای یک لنگر پیچشی خاص، بارگذاری ترکیبی در خارج از محدوده داخلی نمودار مربوط به آن صورت گیرد، اتصال گسیخته خواهد شد. به عبارت دیگر محدوده داخلی هر نمودار، منطقه‌ی مجاز بارگذاری را نشان می‌دهد و نمودارهای ترسیمی مرزهای این محدوده‌ی مجاز هستند. افزایش لنگر پیچشی سبب کاهش محدوده‌ی مجاز بارگذاری خواهد شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، شکل کلی نمودارهای اندرکنش در هر دو اتصال صفحه ضخیم و متوسط مشابه است و می‌توان نتیجه گرفت که شکل کلی منحنی‌های اندرکنش، مستقل از ابعاد اتصال است.

شکل ۱۹. اندرکنش خمش، پیچش و نیروی محوری CT1A-1

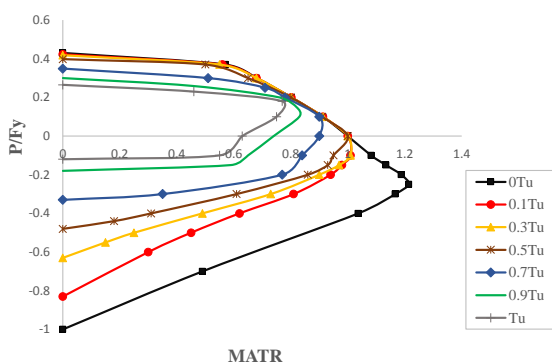


Fig. 19. Axial force ratio vs. MATR curve for different torque values in CT1A-1

شکل ۲۰. اندرکنش خمش، پیچش و نیروی محوری CT1B-6

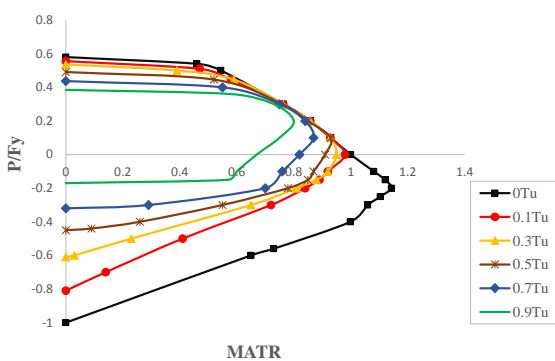


Fig. 20. Axial force ratio vs. MATR curve for different torque values in CT1B-6

تحت خمش خالص، پیچ‌های دو سمت بال کششی رفتاری مشابه دارند. چنانچه در شکل (۱۸) ملاحظه می‌شود در حالتی که به نمونه علاوه بر خمش، پیچش نیز وارد می‌شود، به دلیل اعوجاج ناشی از پیچش، تنش نرمال در یک سمت اتصال تشدید شده و در سمت دیگر کاهش می‌یابد. این امر سبب تفاوت در میزان نیرو و پلاستیک‌شدگی پیچ‌های واقع در دو سمت بال کششی می‌شود.

شکل (۱۸) تفاوت تنش پیچ ردیف بحرانی با لنگر خمشی در دو سمت بال کششی تیر، در اتصال CT1A-1 ناشی از اعوجاج

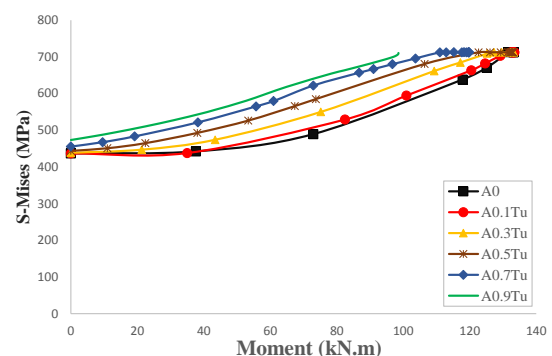


Fig. 18. The difference of stress between left and right bolts in CT1A-1 due to distortion

۶- بررسی اتصال تحت ترکیب خمش، پیچش و نیروی محوری

در این بخش با استفاده از ۱۶۰ مدل اجزای محدود، اثر بارگذاری ترکیبی ناشی از خمش، پیچش و نیروی محوری بر رفتار اجزای اتصال بررسی می‌شود. بارگذاری در نرم‌افزار اجزای محدود در سه گام صورت می‌گیرد. گام اول شامل ایجاد پیش‌تنیدگی در پیچ‌ها است که با ایجاد دمای منفی بر روی پیچ‌ها اعمال می‌شود. در گام دوم مقدار معینی بار محوری (بر اساس درصدی از تنش تسلیم تیر) و لنگر پیچشی (بر اساس درصدی از ظرفیت پیچشی اسمی تیر) به تیر وارد می‌شود و نهایتاً در مرحله سوم لنگر خمشی به صورت جابه‌جایی تا گسیختگی مدل به انتهای تیر اعمال می‌شود.

نمودارهای اندرکنش به ازای مقادیر مختلف لنگرهای پیچشی، برای دو اتصال CT1A-1 و CT1B-6 به ترتیب در شکل‌های (۱۹ و ۲۰) نشان داده شده است. مقصود از MATR

همچنین در این حالت یکی از دو سازوکار کماتش پیچشی جانبی تیر یا گسیختگی پیچ‌های کششی سبب گسیختگی اتصال می‌شود. افزایش نیروی کششی اثر پیچش وارده به تیر و پتانسیل رخداد کماتش پیچشی جانبی در آن را کاهش داده و ضمن افزایش ظرفیت خمشی اتصال، می‌تواند سبب تغییر مد گسیختگی آن شود.

جداشدگی صفحه‌ی انتهایی در راستای جان تیر در لحظه‌ی رسیدن به لنگر خمشی نهایی در اتصال CT1A-1، برای مدل‌های دارای بار محوری کششی و فشاری به ترتیب در شکل‌های (۲۲) و (۲۳) نمایش داده شده است. در حالتی که کماتش پیچشی جانبی در تیر رخ می‌دهد، جداشدگی صفحه انتهایی کاهش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت و بیشینه میزان آن در محل بال کششی تیر رخ خواهد داد. در غیر این صورت میزان جداشدگی در محدوده‌ی حالت خمش خالص خواهد بود. در این اتصال در شرایطی که تجاوز از ظرفیت کششی پیچ‌ها سبب گسیختگی اتصال شود، رفتار صفحه انتهایی تقریباً صلب بوده و بیشترین جابه‌جایی در لبه‌ی فوقانی ورق انتهایی رخ می‌دهد.

جدول ۵. مدل‌های بررسی‌شده در حالت ترکیب خمش، پیچش و نیروی محوری

T/T _u	P/F _y	Model ID	MR	Failure mecha nism	Model ID	MR	Failure mecha nism
0	0	A0	1	BTF	B0	1	BTF
10%	-10%	A0.1T _u -0.1F _y	1.01	LTB	B0.1T _u -0.1F _y	0.92	LTB
10%	-15%	A0.1T _u -0.15F _y	0.98	LTB	B0.1T _u -0.15F _y	0.89	LTB
10%	-20%	A0.1T _u -0.2F _y	0.94	LTB	B0.1T _u -0.2F _y	0.84	LTB
10%	-30%	A0.1T _u -0.3F _y	0.81	LTB	B0.1T _u -0.3F _y	0.72	LTB
30%	-10%	A0.3T _u -0.1F _y	1.01	LTB	B0.3T _u -0.1F _y	0.92	LTB
30%	-15%	A0.3T _u -0.15F _y	0.97	LTB	B0.3T _u -0.15F _y	0.88	LTB
30%	-20%	A0.3T _u -0.2F _y	0.90	LTB	B0.3T _u -0.2F _y	0.81	LTB
30%	-30%	A0.3T _u -0.3F _y	0.73	LTB	B0.3T _u -0.3F _y	0.65	LTB
50%	-10%	A0.5T _u -0.1F _y	0.95	LTB	B0.5T _u -0.1F _y	0.87	LTB
50%	-15%	A0.5T _u -0.15F _y	0.93	LTB	B0.5T _u -0.15F _y	0.85	LTB
50%	-20%	A0.5T _u -0.2F _y	0.86	LTB	B0.5T _u -0.2F _y	0.78	LTB
50%	-30%	A0.5T _u -0.3F _y	0.61	LTB	B0.5T _u -0.3F _y	0.55	LTB
50%	10%	A0.5T _u +0.1F _y	0.91	BTF	B0.5T _u +0.1F _y	0.93	BTF
50%	20%	A0.5T _u +0.2F _y	0.80	BTF	B0.5T _u +0.2F _y	0.85	BTF
50%	30%	A0.5T _u +0.3F _y	0.65	BTF	B0.5T _u +0.3F _y	0.76	BTF
70%	10%	A0.7T _u +0.1F _y	0.90	BTF	B0.7T _u +0.1F _y	0.87	LTB
70%	20%	A0.7T _u +0.2F _y	0.78	BTF	B0.7T _u +0.2F _y	0.84	BTF
70%	30%	-	-	-	B0.7T _u +0.3F _y	0.75	BTF
90%	10%	A0.9T _u +0.1F _y	0.83	LTB	B0.9T _u +0.1F _y	0.75	LTB
90%	15%	A0.9T _u +0.15F _y	0.82	BTF	-	-	-
90%	20%	-	-	-	B0.9T _u +0.2F _y	0.80	LTB
90%	30%	A0.9T _u +0.3F _y	-	-	B0.9T _u +0.3F _y	0.73	BTF

BTF: Bolt tension failure

LTB: Lateral torsional buckling

Table 5. Designation of models in bending, torsion and axial force combination

نقطه‌ی برگشت نمودار اندرکنش نقطه‌ی تغییر مد گسیختگی اتصال را نشان می‌دهد، به طوری که در شاخه‌ی بالایی انهدام اتصال از نوع گسیختگی پیچ‌های کششی بوده و در شاخه‌ی پایینی در صورت وجود پیچش (اندرکنش خمش، نیروی محوری و پیچش) کماتش پیچشی جانبی تیر و در حالت عدم حضور پیچش (اندرکنش خمش و نیروی محوری) کماتش بال فشاری تیر، سبب خرابی اتصال می‌شود. نمودارهای اندرکنش اتصالات را به صورت سه بعدی نیز می‌توان ترسیم نمود. به عنوان نمونه نمودار اندرکنش سه بعدی اتصال CT1B-6 در شکل (۲۱) ملاحظه می‌شود.

شکل ۲۱. اندرکنش خمش، پیچش و نیروی محوری CT1B-6

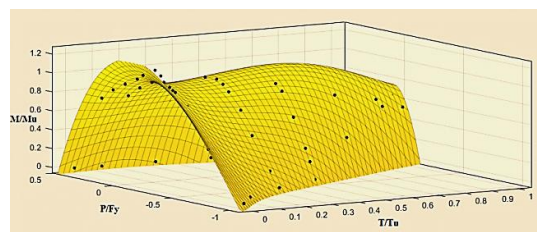


Fig. 21. Interaction of bending, torsion and axial force in CT1B-6

نام‌گذاری مدل‌ها بر اساس میزان بار محوری و لنگر پیچشی اعمالی به نمونه صورت می‌گیرد. جدول (۵) نام مدل‌ها، به همراه تنش محوری و لنگر پیچشی اعمالی به نمونه‌ها، نسبت لنگر خمشی (MATR) و سازوکار گسیختگی مدل‌ها را نشان می‌دهد. مدل‌هایی که با حرف A آغاز می‌شوند دارای رفتار صفحه ضخیم بوده و مدل‌هایی که با حرف B شروع می‌شوند رفتار صفحه متوسط دارند. مقادیر مثبت نیروی محوری بیانگر نیروی کششی و مقادیر منفی نمایشگر نیروی فشاری است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در تمامی نمونه‌های تحت نیروی فشاری، گسیختگی اتصال به صورت ترد و با سازوکار کماتش پیچشی جانبی تیر رخ می‌دهد. بنابراین پیچ‌های اتصال به ظرفیت نهایی خود نمی‌رسند. در این نمونه‌ها، افزایش نیروی فشاری یا لنگر پیچشی، سبب تسریع در کماتش پیچشی جانبی تیر شده و ظرفیت خمشی اتصال را کاهش می‌دهد. در نمونه‌های تحت کشش، ظرفیت خمشی اتصال نسبت به وضعیت خمش خالص کاهش می‌یابد.

در حالت ترکیب خمش و پیچش، حضور پیچش علاوه بر کاهش سختی اولیه اتصال، سبب افزایش تنش نرمال در یک سمت اتصال و کاهش آن در سمت دیگر شده و در نتیجه تنش پیچ‌های دو سمت بال کششی متفاوت خواهد بود. همچنین وجود پیچش می‌تواند مد گسیختگی اتصال را به کماتش پیچشی جانبی تیر تغییر دهد.

در ترکیب خمش، پیچش و نیروی فشاری، مد حاکم بر گسیختگی اتصال از نوع گسیختگی ترد بر اثر کماتش پیچشی جانبی تیر است. در این حالت پیچ‌های اتصال به ظرفیت کششی نهایی خود نرسیده و جداسدگی صفحه انتهایی نسبت به وضعیت خمش خالص، کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد. افزایش پیچش و نیروی فشاری ظرفیت خمشی اتصال را کاهش می‌دهد.

در ترکیب خمش، پیچش و نیروی کششی، گسیختگی اتصال توسط یکی از دو سازوکار گسیختگی پیچ‌های کششی یا کماتش پیچشی جانبی تیر رخ می‌دهد. در حالت رخداد گسیختگی پیچ‌های کششی، پیچ‌های اتصال به تنش نهایی خود رسیده و جداسدگی ورق انتهایی در محدوده‌ی جداسدگی حالت خمش خالص است، به علاوه افزایش نیروی کششی سبب کاهش ظرفیت خمشی اتصال می‌شود. افزایش لنگر پیچشی می‌تواند مد گسیختگی را به کماتش پیچشی جانبی تیر تغییر دهد. اما در صورتی که مد حاکم بر گسیختگی اتصال از نوع کماتش پیچشی جانبی در تیر باشد، افزایش نیروی کششی می‌تواند سبب تغییر مد انهدام اتصال به گسیختگی پیچ‌های کششی شود.

References

[1] Ghassemieh, M., Abolmaali, A., & Razavi, H. 2007 Invisible elastic bolt model concept for finite element analysis of bolted connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 63, 647-657.
 [2] Ghassemieh, M., Kukerti, A.R., & Murray, T.M. 1981 Inelastic finite element analysis of stiffened end-plate moment connections, Research of Civil Engineering Laboratory, School of Civil Engineering and Environmental Science, University of Oklahoma, Oklahoma.
 [3] Borgsmiller, J.T. 1995 Simplified method for design

۷- مراجع

شکل ۲۲. جداسدگی صفحه انتهایی در راستای جان تیر در انتهای بارگذاری در اتصال CT1A-1 تحت ترکیب خمش، پیچش و نیروی کششی

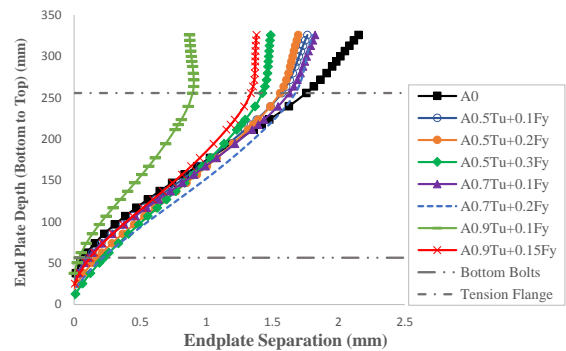


Fig. 22. Endplate separation in the direction of the beam web in CT1A-1 under the axial tensile force, bending moment and torque

شکل ۲۳. جداسدگی صفحه انتهایی در راستای جان تیر در انتهای بارگذاری در اتصال CT1A-1 تحت ترکیب خمش، پیچش و نیروی فشاری

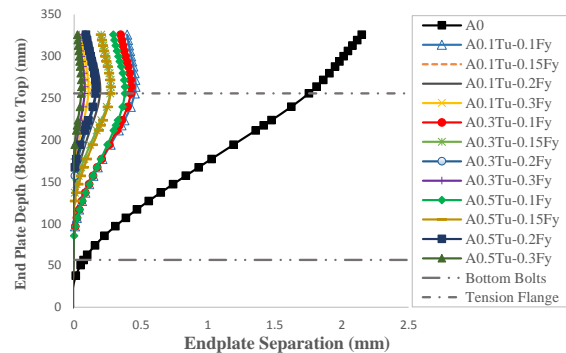


Fig. 23. Endplate separation in the direction of the beam web in CT1A-1 under the axial compressive force, bending moment and torque

۶- نتیجه گیری

با توجه به متداول بودن رخداد بارگذاری‌های ترکیبی، اهمیت این بارها و عدم بررسی نقش آن بر رفتار اتصالات خمشی با ورق انتهایی در پژوهش‌های گذشته، در این پژوهش اثر انواع مختلف ترکیب بارگذاری بر رفتار اتصال بررسی شد و نمودارهای اندرکنش برای هر یک از حالات بارگذاری ارائه شد.

در حالت ترکیب خمش و نیروی محوری ملاحظه شد که نیروی محوری نه چندان زیاد، می‌تواند مد گسیختگی و ظرفیت خمشی اتصال را تغییر دهد. همچنین اعمال نیروی کششی سبب کاهش ظرفیت خمشی و سختی اولیه اتصال و اعمال نیروی فشاری با افزایش سختی اولیه اتصال، در ابتدا سبب افزایش ظرفیت خمشی و سپس کاهش آن شد.

- Moment Connection Subjected to Cyclic Loading. *Current Advances in Civil Engineering*, 2 (1), 35-43
- [18] Bai, R., Chan, S.L., & Hao, J.P. 2015 Improved design of extended end-plate connection allowing for prying effects. *Journal of Constructional Steel Research*, 113, 13-27.
- [19] Tahir, M.M., Juki, I., Yong, L., Mohammad, S., & Ngian, S. 2011 Finite element analysis of flush end-plate connections connected to column web. *International Journal of Steel Structures*, 11 (3).
- [20] Prinz, G.S., Nussbaumer, A., Borges, L., & Khadka, S. 2014 Experimental testing and simulation of bolted beam-column connections having thick extended endplates and multiple bolts per row. *Engineering Structures*, 59, 434-447.
- [21] Sofias, C.E., Kalfas, C.N., & Pachoumis, D.T. 2014 Experimental and FEM analysis of reduced beam section moment endplate connections under cyclic loading. *Engineering Structures*, 59, 320-329.
- [22] Augusto, H., Da Silva, L.S., Rebelo, C., & Castro, J.M. 2016 Characterization of web panel components in double-extended bolted end-plate steel joints. *Journal of Constructional Steel Research*, 116, 271-293.
- [23] Yu, H., Burgess, I.W., Davison, J.B., & Plank, R.J. 2011 Experimental and Numerical Investigations of the Behavior of Flush End Plate Connections at Elevated Temperatures" *Journal of Structural Engineering*, 137 (1), 80-87.
- [24] Lima, L., Da Silva, L., Vellasco, P., & Andrade, S. 2004 Behaviour of flush endplate beam-to-column joints under bending and axial force. *Steel Composite Structure*, 4 (2), 77-94.
- [25] Lima, L., Da Silva, L., Vellasco, P., & Andrade, S. 2004 "Experimental evaluation of extended endplate beam-to-column joints subjected to bending and axial force *Engineering Structures*, 26, 1333-1347.
- [26] Urbonas, K., & Daniunas, A. 2006 Behaviour of semi-rigid steel beam-to-beam joints under bending and axial forces. *Journal of Constructional Steel Research*, 62, 1244-1249.
- [27] Del Savio, A.A., Nethercot, D.A., Vellasco, P.C.G.S., Andrade, S.A.L., & Martha, L.F. 2009 Generalised component-based model for beam-to-column connections including axial versus moment interaction. *Journal of Constructional Steel Research*, 65, 1876-1895.
- [28] El-Khoriby, S., Sakr, M., Khalifa, T., & Eladly, M. 2017 Modelling and behaviour of beam-to-column connections under axial force and cyclic bending. *Journal of Constructional Steel Research*, 129, 171-184.
- [29] Maggi, Y.I., Goncalves, R.M., Leon, R.T., & Ribeiro, L.F.L. 2005 Parametric analysis of steel bolted end plate connections using finite element modeling. *Journal of Constructional Steel Research*, 61, 689-708.
- [30] Murry, T.M, & Sumner, E.A. 2004 Extended Endplate Moment Connection Seismic and Wind Applications. *AISC Seel Design Guide*.
- of moment end-plate connections. *M.S. Thesis*, Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- [4] Sumner, E.A. 2003 Unified design of extended end-plate moment connections subject to cyclic loading, *Ph.D. Dissertation*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- [5] Abolmaali, A., Kukreti, A.R., & Razavi, H. 2005 Development of momentrotation model equations for flush end-plate connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 59, 1057-1082.
- [6] Girão Coelho, A.M., & Bijlaard, F.S.K. 2007 Experimental behaviour of high strength steel end-plate connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 63 (9), 1228-1240.
- [7] Chen, Y., & Wang, S. 2009 Research on end-plate connection with non-completely penetrated welds. *Journal of Constructional Steel Research*, 65 (1), 228-236.
- [8] Mirza, O., & Uy, O. 2011 Behaviour of composite beam-column flush end-plate connections subjected to low-probability, high-consequence loading. *Engineering Structures*, 33 (2), 647-662,.
- [9] Abidelah, A., Bouchaïr, A., & Kerdal, D.E. 2012 Experimental and analytical behavior of bolted end-plate connections with or without stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, 76, 13-27.
- [10] Qiang, X., Bijlaard, F.S.K., Kolstein, H., & Jiang, X. 2014 Behaviour of beam-to-column high strength steel endplate connections under fire conditions – Part 1: Experimental study. *Engineering Structures*, 64, 23-38.
- [11] Grimsmo, E.L., Clausen, A.H., Langseth, M., & Aalberg, A. 2015 An experimental study of static and dynamic behaviour of bolted end-plate joints of steel. *International Journal of Impact Engineering*, 85, 132-145.
- [12] Shi, G., Chen, X., & Wang, D. 2017 Experimental study of ultra-large capacity end-plate joints. *Journal of Constructional Steel Research*, 128, 354-361.
- [13] Goudarzi, A., Ghassemieh, M., Fanaie, N., Laefer, D. & Baei, M. 2017 Axial load effects on flush end-plate moment connections. *Structures and Buildings*, 170 (3), 199-210.
- [14] Mohamadi-shooreh, M.R., & Mofid, M. 2008 Parametric analyses on the initial stiffness of flush end-plate splice connections using FEM. *Journal of Constructional Steel Research*, 64 (10), 1129-1141.
- [15] Díaz, C., Victoria, M., Martí, P., & Querin, OM. 2011 FE model of beam-to-column extended end-plate joints. *Journal of Constructional Steel Research*, 67 (10), 1578-1590.
- [16] Wang, M., Shi, Y., Wang, Y., & Shi, G. 2013 Numerical study on seismic behaviors of steel frame end-plate connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 90, 140-152.
- [17] Ghassemieh, M., Jalalpour, M., & Gholampour, A. 2013 Numerical Evaluation of the Extended Endplate

Evaluation of End-Plate Moment Connection Subjected to Combined Loading

M. Taheripour¹, M. Ghassemieh^{2*}

1- M.Sc. of Earthquake Engineering, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran

2- Prof. of School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran

*m.ghassemieh@ut.ac.ir

Abstract:

The study investigated the effect of combined loading on end-plate moment connection considering the interaction of bending moments, axial forces and twisting moments. In some cases, beam-to-column joints can be subjected to the simultaneous action of bending moments, axial forces and twisting moments. Current specifications for steel joints do not take into account the presence of axial forces (tension and / or compression) or twisting moments in the joints. Although the axial force or twisting moments that transferred from the beam is usually low, it may, in some situations attain values which can lead to a considerable effect on the connections behaviour and significantly reduce the joint flexural capacity. Unfortunately, few studies considering the bending moment versus axial force interactions have been reported and there aren't any reports considering bending moments versus twisting moments interactions or combination of all the mentioned cases of loads. The lack of knowledge for understanding the performance of end-plate moment connection under combined loads may lead to unreasonable or even unsafe design, so in this study a combination of different loads have been examined. Therefore two extended End-Plate connections with different behaviour modeled using finite element method of analysis. The interactions between connection components (bolts, members and endplate) were accurately modelled to simulate the actual behaviour of connections. Both material and geometric nonlinearities were considered. At first the behavior of these models are investigated in pure bending application and numerical results validated against experimental data. The suggested finite element models showed good agreement with experimental results. The level of axial forces in joints of structures can be significant and has a significant influence on characteristics of joints. Because of the existence of this force in the moment resisting frames, the combination of bending and axial force in beams should be considered. Structures under fire situations where the effects of beam thermal expansion and membrane action can induce significant axial forces in the connection is a common condition. The results show that even in small amount of axial force the mode of failure and moment capacity of connection can change. Axial tensile forces decrease the initial stiffness of connection and axial compressive forces increase the stiffness. In many applications beams are eccentrically loaded and as a result experience twisting loads in combination with bending. The interaction effects due to torsion acting in combination with bending can reduce the capacity of the beam and initial stiffness of connection. Finally axial forces were added to the previous models so they experienced a combination of axial force, bending and twisting moment. The results indicated that the level and direction of axial force significantly modified the connection response. It was observed that compression forces significantly decrease the bending capacity of the models and lateral-torsional buckling of beam occurs in all models. Tension forces can reduce the effect of torsion and in many cases they caused the bolts ruptured. Moreover, interaction diagram for predicting the bending capacity considering interaction of bending, torsion and axial forces are proposed based on the results from finite element analysis.

Keywords: Moment Connection, End-Plate, Combined Loading, Force Interactions, Torsion, Lateral Torsional Buckling.