

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر میزان پیش‌تندگی پیچ‌ها در عملکرد اتصالات پیچی ورق انتهایی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای

حامد نوفرستی^۱، محسن گرامی^{۲*}

۱- دکتری مهندسی عمران گرایش زلزله، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، ایران

۲- استاد گروه زلزله، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، ایران

mgerami@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۷

چکیده

اتصالات پیچی ورق انتهایی یکی از انواع اتصالاتی است که با رعایت ضوابطی از جمله ایجاد پیش‌تندگی کافی بر اساس آیین‌نامه سازه‌های فولادی، به عنوان اتصالات از پیش‌تایید شده در قاب‌های خمشی فولادی قابل استفاده هستند. در این تحقیق، با استفاده از سه اتصال پیچی ورق انتهایی، آثار مقادیر مختلف پیش‌تندگی در پیچ‌ها به صورت آزمایشگاهی تحت پروتکل بارگذاری چرخه‌ای SAC مورد مطالعه قرار گرفته است. میزان پیش‌تنش پیچ با ضریب α تعریف شده است. نمونه اول که پیچ‌ها فقط سفت شده‌اند و پیش‌تندگی ندارند، بست اولیه نامیده می‌شود. نمونه دوم و سوم که پیش‌تندگی در حد آیین‌نامه و فراتر از آن تا حد نهایی تنش پیچ ایجاد می‌شود، به ترتیب بست ثانویه و بست ثانویه کامل نامیده می‌شود. پارامترهایی از قبیل ظرفیت خمشی، انرژی جذب شده، سختی اولیه، شکل پذیری و تغییرات کرنش در پیچ‌های اتصال برای پیش‌تندگی‌های مختلف پیچ‌ها ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش ظرفیت خمشی و استهلاک انرژی در بست اولیه نسبت به بست ثانویه به ترتیب به میزان ۲۷ و ۲۳ درصد است، در حالی که در بست ثانویه کامل نسبت به بست ثانویه به ترتیب ۱۱ و ۹ درصد افزایش یافته است. آغاز تغییر شکل‌های فرا ارتجاعی به علت افزایش پیش‌تندگی در دوران‌های کوچک‌تر پدیدار شده و محدوده تغییر شکل‌های غیر الاستیک و به دنبال آن، شکل‌پذیری اتصال افزایش می‌یابد. مقایسه نمونه‌ها حاکی از این است که اتصال در حالت بست ثانویه می‌تواند به عنوان اتصال قاب خمشی ویژه مورد استفاده قرار گیرد، در حالی که افزایش پیش‌تندگی بیش از حد آیین‌نامه با وجود بهبود عملکرد چرخه‌ای اتصال، مورد نیاز نیست.

واژگان کلیدی: پیش‌تندگی، اتصالات پیچی، بارگذاری چرخه‌ای، مطالعه آزمایشگاهی

۱- مقدمه

اتصالات مورد استفاده، اتصالات پیچی ورق انتهایی با و بدون استفاده از سخت کننده و همچنین اتصالات ورق بال پیچی به علت ظرفیت شکل‌پذیری بالای این اتصالات، است و با لحاظ محدودیت‌های ذکر شده هندسی و ضوابط لرزه‌ای در آیین‌نامه‌ها به عنوان اتصالات پیش‌پذیرفته مورد قبول است

در سال‌های اخیر اجرای سازه‌های بلند فولادی با سیستم قاب خمشی فولادی ویژه با استفاده از اتصالات از پیش‌تایید شده پیچی مطابق با آیین‌نامه سازه‌های فولادی AISC-360 به طور قابل توجهی افزایش یافته است [13]. در این بین عمده

[13,15]. اتصالات پیچی ورق انتهایی یکی از قدیمی‌ترین اتصالات صلب تیر به ستون است که فقط همراه با مقاطع ستون‌های صلیبی و ۱ شکل قابل کاربرد است. فرآیند طراحی اتصالات ورق انتهایی ۴ پیچی با و بدون استفاده از سخت کننده و ورق انتهایی ۸ پیچی با سخت کننده در سال ۱۹۹۰ توسط موری^۱ ارایه شد [1]. آستانه اصل دو نمونه اتصال ۴ پیچی ورق انتهایی بدون سخت کننده را تحت آزمایش سیکلی قرار داد. در نمونه اول شکل‌پذیری اتصال که سرانجام منجر به کماتش بال تیر شد، مورد بررسی قرار گرفت. در نمونه دوم از ورق‌های شیم ۱ شکل بین ورق انتهایی و بال ستون استفاده شد. در نتیجه تحقیق، استفاده از ورق شیم می‌تواند عملکرد اتصال را بهبود بخشد [2]. در سال ۱۹۹۸ فانالا^۲ و همکاران اثر پیش‌تندگی بر رفتار اتصال پیچی با سپری اتصال را تحت اثر بار محوری، با مطالعه آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند [3]. آدی^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۰ پارامترهایی شامل ابعاد تیر، چیدمان پیچ‌ها، ضخامت صفحه انتهایی و سخت‌کننده‌های ورق انتهایی در قابلیت جذب انرژی اتصال پیچی ورق انتهایی را از طریق آزمایش روی ۱۵ نمونه اتصال با اعمال بار سیکلی، ارزیابی نمودند. در نتیجه تحقیق، قابلیت جذب انرژی با افزایش ابعاد تیر، کاهش یافته و در مقابل، سخت‌کننده‌های ورق انتهایی منجر به افزایش جذب انرژی اتصال می‌شود [4].

رفتار اتصالات پیچی ورق انتهایی ۴ پیچی بدون سخت کننده و ۸ پیچی با سخت کننده توسط سامنر^۴ و موری در سال ۲۰۰۲ به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج تحقیق نشان داد، اتصال ورق انتهایی ۴ پیچی بدون سخت کننده و اتصال ورق انتهایی ۸ پیچی با سخت کننده را می‌توان برای باربری لرزه‌ای در قاب‌های خمشی فولادی طراحی نمود [5]. تحقیقات گرامی و همکاران نشان داد که رفتار سیکلی اتصالات پیچی شامل اتصال پیچی ورق انتهایی و سپری

اتصال، وابسته به چیدمان افقی و قائم پیچ‌های اتصال است. نتیجه تحقیق آن‌ها حاکی از آن است که با تغییر چیدمان پیچ‌ها، احتمال گسیختگی در سپری اتصال نسبت به اتصال با ورق انتهایی، افزایش می‌یابد [6]. اثر حذف سخت کننده انتهایی و چیدمان مختلف پیچ‌ها در عملکرد اتصال ۸ پیچی ورق انتهایی سخت شده توسط موریسون^۵ و همکاران بررسی شد. بر اساس نتایج تحقیق صورت گرفته، حذف سخت کننده انتهایی، با وجود نیاز به ضخامت بیشتر برای ورق انتهایی، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه خواهد بود [7]. با استفاده از آزمایش بارگذاری استاتیکی تاثیر مقاومت مصالح پیچ‌های پر مقاومت و چیدمان مختلف پیچ‌ها روی ظرفیت باربری و تغییر شکل اتصال پیچی با ورق پوششی بررسی گردید [8]. مطالعه پارامترهایی از قبیل نیروی برشی، قطر پیچ‌ها، ضخامت صفحه انتهایی و استفاده از سخت کننده انتهایی رفتار اتصالات پیچی ورق انتهایی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای و مونوتونیک نشان می‌دهد نیروی برشی، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر سختی اتصال دارد [9]. مطالعه عددی تاثیر پیش‌تندگی پیچ‌ها در ظرفیت باربری اتصالات پیچی با ورق پوششی روی هم، حاکی از آن است که پیش‌تندگی در مودهای گسیختگی تاثیر ناچیزی داشته و قابل چشم‌پوشی است [10]. مطالعه عددی رفتار اتصالات فلنجی در سازه‌هایی که تحت تاثیر بارگذاری ضربه‌ای قرار دارند با استفاده از روش‌های غیر مخرب مورد بررسی قرار گرفته است و میزان شل شدن پیچ‌ها با استفاده از سیگنال‌های شتاب تعیین می‌شود [11].

در هنگام برپایی اسکلت فولادی، به طور معمول گروه‌های اجرایی اسکلت فولادی، اسکلت طبقاتی از سازه را اجرا نموده و پیچ‌های اتصال را سفت می‌کنند که اصطلاحاً در این تحقیق، بست اولیه نامیده می‌شود. با پیش‌روی ساخت و تکمیل اسکلت سازه، طبقات تحتانی که پیچ‌های اتصال در آن‌ها بست اولیه شده‌اند، حداقل تا حد نیروی آیین‌نامه‌ای پیش‌تندیده می‌شوند که در این مقاله اصطلاحاً بست ثانویه نامیده شده و بدین ترتیب اتصال کامل می‌شود. این در

1. Murray
2. Faella
3. Adey
4. Sumner

شده است. آزمایش جوش نمونه‌ها در شکل (۲) نمایش داده شده است.

شکل ۱. مشخصات هندسی مقطع و چیدمان کرنش سنج‌ها

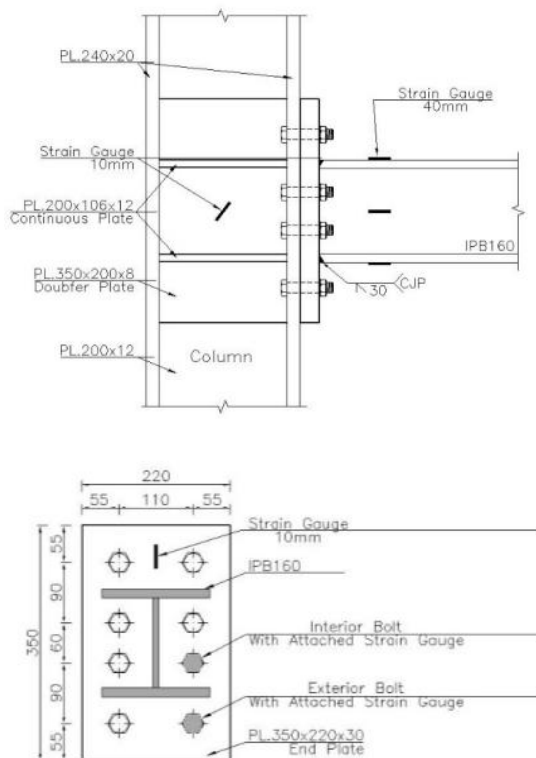


Fig. 2. Properties of specimen fabricating parameters and location of strain gauges

به منظور مشخص شدن ناحیه تغییر شکل‌های پلاستیک در تیر و سایر نقاط اتصال، از رنگ پلاستیک سفید بر روی تیر در طولی به اندازه تقریبی ۶۰ سانتی‌متر، استفاده شده است.

علاوه بر این، محدوده‌ای روی تیر و ستون

شکل ۲. آزمایش جوش اولتراسونیک برای جوش نفوذی



Fig. 2. CJP Ultrasonic Weld Test

حالیست که تعدادی از طبقات فوقانی دارای بست اولیه است. این روند پی در پی می‌تواند تا تکمیل سازه ادامه یابد. بنابراین در دوره ساخت، شل و سفت بودن پیچ‌ها به تناوب تکرار می‌شود و ویژگی‌های سازه با زمان تغییر می‌کند. از طرفی عوامل مختلفی از جمله روش پیش‌تینده کردن پیچ‌ها، رزوه پیچ‌ها، لغزش صفحات و مشخصات سوراخ در عملکرد اتصالات پیچی برای پیش‌تیندگی‌های مختلف اثر گذار است. در پژوهش‌های پیشین همواره رفتار اتصال با فرض پیش-تیندگی در حد آیین‌نامه ارزیابی شده است پس با توجه به اهمیت پیش‌تیندگی پیچ‌های اتصال در پایداری سازه‌های فولادی در حین ساخت و از آنجایی که پیش از این رفتار آزمایشگاهی اتصالات پیچی ورق انتهایی تحت بارگذاری چرخه‌ای برای مقادیر مختلف پیش‌تیندگی پیچ‌ها و همچنین رفتار پیچ‌ها به صورت میکروسکوپی بررسی نشده، رفتار چرخه‌ای اتصالات پیچی ورق انتهایی برای مقادیر مختلف پیش‌تیندگی به صورت آزمایشگاهی مطالعه شده است.

۲- نمونه‌های آزمایش

در این تحقیق سه نمونه اتصال پیچی ورق انتهایی بدون سخت‌کننده^۶ که بر اساس آیین‌نامه سازه‌های فولادی ایران و آمریکا [12,13] طراحی شده‌اند، مورد مطالعه قرار گرفته است (شکل ۱). بر اساس مدل زیرسازه ارایه شده در FEMA350، [14] اتصال تیر به ستون بیان‌گر یک اتصال کنج در سازه است.

مقطع تیر مورد استفاده، IPB160 با طول ۱٫۴۵ متر است. ستون مورد نظر با استفاده از ورق‌هایی که ابعاد آن در شکل (۱) نمایش داده شده است، به طول ۲ متر ساخته شده است. اتصال تیر به ستون با استفاده از ورق انتهایی و بر اساس ضوابط آیین‌نامه AISC-358 [15] و همچنین راهنمای شماره ۴ آیین‌نامه سازه‌های فولادی آمریکا [16] طرح و با استفاده از جوش نفوذی و تکنیک جوش کاری CO2 انجام

6. Bolted Unstiffened Extended End Plate Moment Connection(BUEEP)

تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی نیز در جدول (۱) تعریف شده‌اند. با توجه به چگونگی استقرار ستون به صورت افقی، لازم است کنترل شود که ستون مربوطه که روی کف صلب، کاملاً افقی قرار گرفته و تراز است. همچنین لازم است کنترل شود که ورق انتهایی که روی بال ستون قرار می‌گیرد و از طریق پیچ‌های اتصال به بال ستون متصل می‌شود نیز کاملاً به صورت افقی روی ستون قرار گرفته باشد (شکل ۴). به منظور جلوگیری از کمانش موضعی بال فشاری و با توجه به ماهیت بارگذاری چرخه‌ای که به صورت رفت و برگشتی بوده و مرتباً بال فشاری در حال تغییر است، پیش‌بینی لازم باید در روند انجام آزمایش صورت گیرد تا از هرگونه کمانش موضعی در هنگام انجام آزمایش جلوگیری شود.

شکل ۴. استقرار ستون و ورق انتهایی در پیکربندی آزمایش



Fig. 4. Column and End Plate Configuration of Test Setup

نیز با استفاده از ماژیک مشکی به صورت سلول‌های مربعی مش بندی شده است که هر گونه تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی به وضوح روی تیر مشخص شود. با استفاده از این مش‌بندی که مربع‌های آن به ابعاد ۲ سانتی‌متر هستند، می‌توان به طور دقیق محدوده شروع تغییر شکل‌های پلاستیک و سرانجام مفصل پلاستیک را مشخص نمود (شکل ۳). برای تعیین مقادیر مختلف پیش‌تندگی از ضریب α در رابطه نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها در آیین‌نامه سازه‌های فولادی [12]، مطابق رابطه ۱ استفاده می‌شود:

$$\alpha(0.7F_u A_e) \quad (1)$$

در رابطه فوق F_u و A_e به ترتیب تنش حد نهایی و سطح مقطع موثر پیچ است. به منظور بررسی تاثیر پیش‌تندگی در رفتار اتصالات پیچی ورق انتهایی ۳ سطح مختلف پیش‌تندگی در نظر گرفته شده که بر اساس آن،

شکل ۳. رنگ آمیزی و ترسیم مش بندی بر روی تیر و ستون

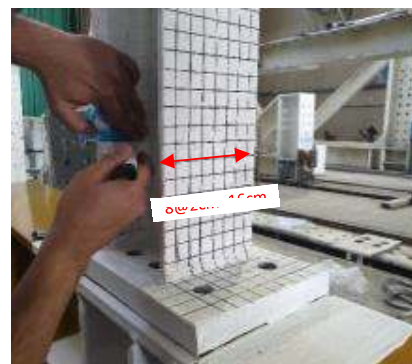


Fig. 3. Grid Dimensions

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های آزمایش

Group	Specimen test name	α	Bolt Layout	End plate thickness(mm)	Weld type	Bolt Diameter(mm)
BUEEP	UEP-0.00-R	0.00	Snug-tightened	30	CJP	24
	UEP-1.00	1.00	Pre-tensioned	30	CJP	24
	UEP-1.43	1.43	Fully pre-tensioned	30	CJP	24

جدول ۲. مشخصات مصالح اجزای مختلف اتصال

Material	Application	Measured average yield strength(MPa)	Measured average ultimate modulus(MPa)	Measured average elastic modulus(MPa)
ST37	Beam	243	371	195,164
ST37	Column, End Plate	238	365	187.183
A490(Gr.10.9)	Bolts	943	1073	-



Fig. 7. Installation of strain gauges on bolt shanks

همان گونه که ملاحظه می شود، ستون به صورت افقی و تیر به صورت قائم کار گذاشته شده است. ستون از طریق تکیه گاه های غلتکی روی کف صلب واقع شده و اتصال تیر به ستون به صورت یک طرفه است.

به منظور اطمینان از عدم کمناش پیچشی-جانبی از مهار جانبی در وسط ارتفاع تیر استفاده شده است. برای قرائت تغییر مکان سر تیر که از طریق یک جک ۲۰ تنی به انتهای تیر اعمال می شود نیز از LVDT در انتهای تیر استفاده شده است.

۴- نصب پیچ ها و فرآیند پیش تنیدگی

به منظور ایجاد نیروی پیش تنیدگی در پیچ های اتصال از دو روش دور اضافه و تورک-متر استفاده شده است تا دقت روش پیش تنیدگی مورد استفاده نیز تحقیق شود. بدین منظور ابتدا کلیه پیچ ها تا حد سفتی کامل بسته می شوند، به شکلی که مطابق با آیین نامه RCSC [17] با آخرین توان و بدون اعمال وزن، پیچ ها سفت شده تا ورق های اتصال به طور کامل در تماس با یکدیگر قرار گیرند که به اصطلاح بست اولیه نامیده می شود. پس از اعمال بست اولیه، مهره و پیچ، علامت گذاری می شوند. با توجه به اینکه پیچ مورد نظر برای اتصال از نوع M24 است و طول پیچ ها ۱۰ سانتی متر است، به منظور پیش تنیده کردن پیچ ها تا حد آیین نامه (بست ثانویه) در روش دور اضافه لازم است پیچ مورد نظر پس از بست اولیه به اندازه نیم دور اضافه چرخانیده شود. در روش تورک-متر نیز بر اساس آیین نامه سازه های فولادی ایران (مبحث ۱۰ مقررات ملی

بدین منظور مطابق شکل (۵) از قیدی استفاده می شود که به عنوان یک مهار جانبی در هر دو وجه تیر عمل کرده و از کمناش جانبی- پیچشی و همچنین کمناش موضعی تیر جلوگیری می کند. بارگذاری چرخه ای با استفاده از جک هیدرولیکی ۲۰ تنی با قابلیت اعمال بارگذاری به صورت رفت و برگشتی، مطابق بر FEMA350 بر اساس دستور العمل بارگذاری SAC97 [14] به انتهای تیر اعمال می شود (شکل ۶).

شکل ۵. سیستم مهار جانبی در طول تیر



Fig. 5. Out of Plane Bracing System

به منظور ثبت نتایج در حین بارگذاری چرخه ای، از کرنش سنج هایی در قسمت های مختلف اتصال مطابق شکل (۱) و همچنین پیچ های اتصال استفاده شده است. کرنش سنج ها با ایجاد شیار در سطح پیرامونی بدنه پیچ ها کار گذاشته می شوند (شکل ۷). کل قاب و پیکربندی آزمایش در شکل (۸) نمایش داده شده است.

شکل ۶. دستورالعمل بارگذاری چرخه ای SAC97 [14]

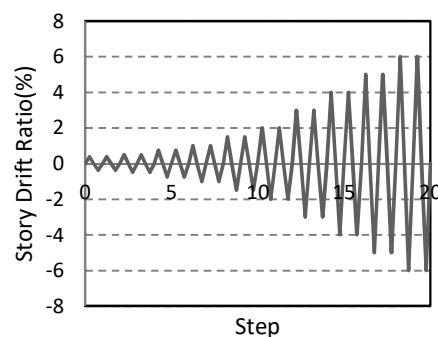


Fig. 6. SAC97 Loading Protocol

توجه به رابطه (۱)، نیروی پیش‌تندگی آیین‌نامه برای پیچ M24، ۲۵۶/۹ کیلونیوتن و لنگر پیچشی متناظر با آن، ۱۲۳۰ نیوتن-متر است. از طرفی نیروی پیش‌تندگی برای حالتی که پیچ تا حد تنش نهایی پیش‌تندیده می‌شود با استفاده از رابطه ۱، ۳۶۷ کیلونیوتن و لنگر تورک-متر متناظر با آن بر اساس رابطه ۲، ۱۷۷۰ نیوتن-متر است.

ساختمان [12] لنگر متناظر با نیروی پیش‌تندگی با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$M_t = K.T_b.d_b \quad (2)$$

در رابطه اخیر K ، T_b و d_b به ترتیب ضریب مهره (بدون بعد)، نیروی پیش‌تندگی لازم مطابق با آیین‌نامه و قطر اسمی پیچ است. با توجه به اینکه پیچ‌های مورد استفاده برای هر اتصال پیچ نو هستند، ضریب مهره بر اساس آیین‌نامه برای پیچ نو و بدون پوشش ۰/۲ در نظر گرفته شده است. با

شکل ۸ جزئیات پیکربندی آزمایش

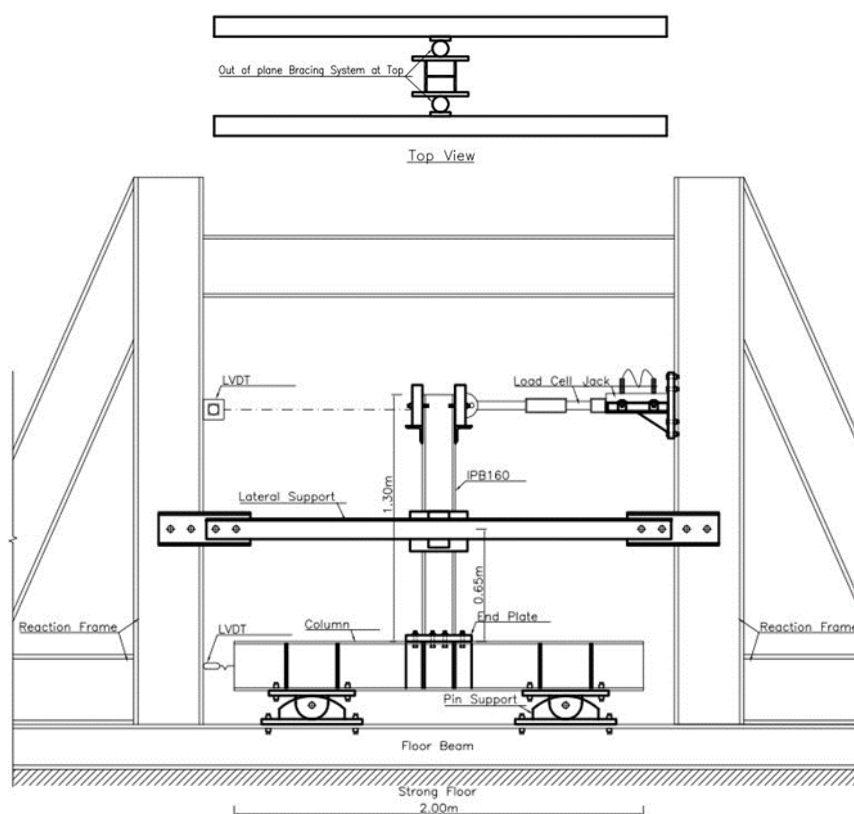


Fig. 8. Details of the Test Setup

مشخص شده است. در جدول (۳)، میزان متوسط چرخش مهره در روش‌های مختلف برای تامین پیش‌تندگی در حد بست ثانویه و بست ثانویه کامل نیز مشخص شده است. با توجه به جدول (۳) می‌توان دریافت روش دور اضافه نسبت به روش تورک-متر روش دقیق‌تری برای ایجاد نیروی پیش-تندگی مورد نظر است.

به منظور مشخص شدن دقیق میزان چرخش مهره نسبت به پیچ در بست ثانویه، طلق دایره‌ای مدرج شده ۳۶۰ درجه‌ای استفاده شده است (شکل ۹).

در شکل (۱۰) چگونگی پیش‌تندیده کردن با استفاده از تورک-متر و روش دور اضافه نمایش داده شده و میزان چرخش لازم برای مهره به منظور تامین نیروی پیش‌تندگی تا حد بست ثانویه و بست ثانویه کامل بر حسب درجه

شکل ۹. ابزار مدرج شده دایروی

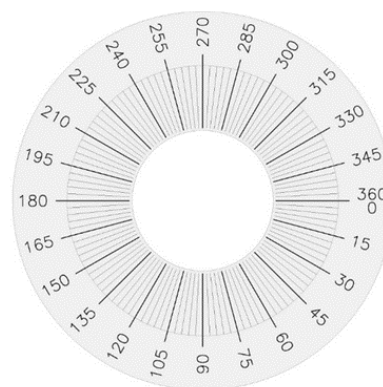


Fig. 9. Circular graduated instrument



شکل ۱۰-ج. پیش‌تندگی با تورک-متر

Fig. 10. Bolt pre-tensioning procedure

۵- بحث در خصوص نتایج

در این بخش، رفتار هر یک از نمونه‌ها تحت بارگذاری سیکلی در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته است. برای هریک از نمونه‌ها پارامترهای مختلفی از جمله بیشترین ظرفیت خمشی اتصال، سختی اولیه و ثانویه، دررفت متناظر با تسلیم، مد‌های گسیختگی و همچنین تغییرات کرنش در پیچ-های داخلی و خارجی هر یک از نمونه‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در جداول (۴ و ۵) خلاصه نتایج ارائه شده و شرح آن برای هریک از نمونه‌ها به طور جداگانه بیان می‌شود.

به عنوان نمونه میزان چرخش لازم برای تامین نیروی پیش-تندگی لازم در حد آیین‌نامه با استفاده از روش دور اضافه نیم دور و معادل ۱۸۰ درجه است، در حالی‌که با استفاده از روش تورک-متر میزان چرخش مورد نیاز برای مهره، ۱۶۵ درجه به دست آمده است.

شکل ۱۰. فرآیند پیش‌تندید کردن پیچ‌های اتصال



شکل ۱۰-د. بست ثانویه کامل



شکل ۱۰-الف. بست ثانویه

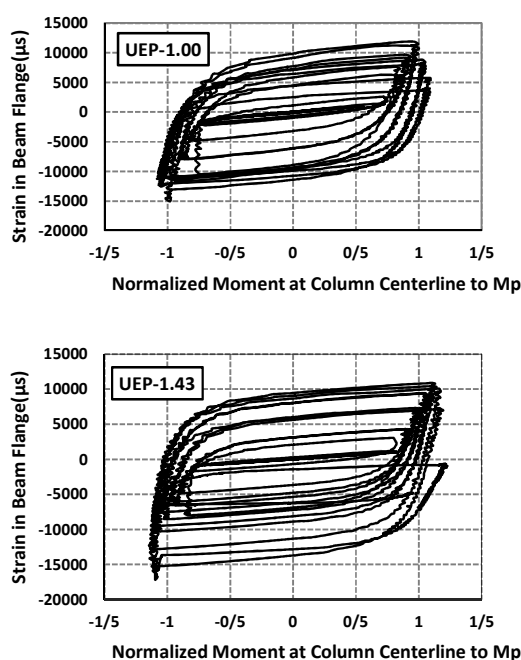
جدول ۳. میزان چرخش مهره برای پیش‌تندگی در پیچ‌ها

Specimen test name	Torque in calibrated wrench method(N.M)	Match marking turn of nut method	Average rotation of the nut(Degree)
UEP-1.00	1230	0.5 turn	170
UEP-1.43	1770	More than 0.75 turn	290

۵-۱- نمونه UEP-0.00

تغییر شکل پلاستیک با توجه به ریزش لایه رنگ پلاستیک، در فاصله‌ای به اندازه تقریبی ۸ سانتی متر از بر ستون رخ داده است. تغییر شکل‌های تسلیم در بال تیر و در دوران مانند ۰/۲۵ رادیان آغاز می‌شوند. با افزایش گام‌های بارگذاری تغییر شکل‌های پلاستیک رشد کرده و در هر دو بخش داخلی و خارجی بال تیر، تغییر شکل‌های فرا ارتجاعی گسترش می‌یابند. تغییرات کرنش در بال تیر در طول فرآیند بارگذاری در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در منحنی‌های نشان داده

در این نمونه، پیچ‌ها تنها سفت می‌شوند و α صفر است. شده در شکل (۱۱)، محور افقی به لنگر خمشی پلاستیک تیر (M_p) نرمال شده است. عدم وجود پیش‌تندگی در پیچ‌ها منجر به افزایش بازشدگی (شکاف) به میزان تقریبی ۴ میلی‌متر، بین صفحه انتهایی و ستون در پایان فرآیند بارگذاری می‌شود که مربوط به دررفت نظیر دوران ۰/۰۷ رادیان در گام‌های انتهایی بارگذاری است (شکل ۱۲). در منحنی هیستریزس، در محل لنگر صفر، کاهش سختی قابل ملاحظه‌ای به علت افزایش لقی و لغزش در اتصال رخ داده است. در پایان



آزمایش، ظرفیت خمشی اتصال M_p ۰/۸۹ M_p ظرفیت خمشی پلاستیک) شده است (شکل ۱۳). با توجه به تشکیل مفصل پلاستیک به ازای دوران ۰/۰۳ رادیان، شیب منحنی استهلاک انرژی پس از دریافت متناظر با دوران ۰/۰۳ رادیان افزایش یافته است.

شکل ۱۱. تغییرات کرنش در بال تیر نمونه‌ها در طول بارگذاری

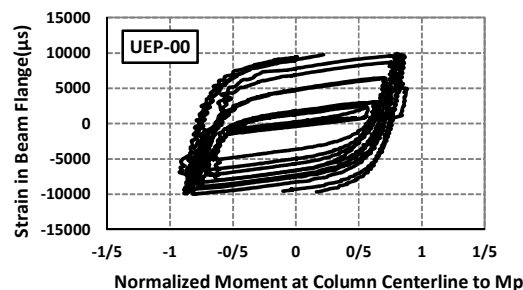


Fig. 11. Strain variation history in beam flange

جدول ۴. خلاصه نتایج

Specimen	M_{max} (kN.m)	$\frac{M_{max}}{M_{pb}}$	M_y (kN.m)	θ_y (rad)	$R_{in} = \frac{M_y}{\theta_y}$ (kN.m/rad)	E (kJ)	θ_u (rad)
UEP-0.00	75	0.89	52	0.025	2072	58	0.07
UEP-1.00	95	1.12	64	0.0175	3667	71	0.07
UEP-1.43	104	1.23	68	0.015	4533	76.5	0.07

جدول ۵. خلاصه مقایسه نتایج نمونه‌های اتصال

Group	Specimens	$\frac{M_{max}}{M_{max-ref}}$	$\frac{R_{in}}{R_{in-Ref}}$	$\frac{E}{E_{Ref}}$	Failure mode
BUEEP	UEP-0.00	1.00	1.00	1.00	Plastic hinge in the beam
	UEP-1.00	1.27	1.77	1.23	Plastic hinge in the beam
	UEP-1.43	1.38	2.18	1.32	Plastic hinge in the beam

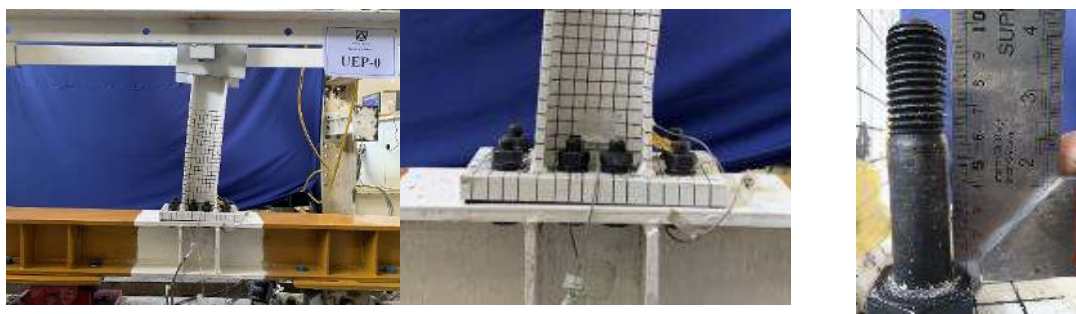
کرنش پیچ‌ها افزایش می‌یابد که این موضوع ارتباطی به پیش‌تندگی در پیچ‌ها ندارد. مقایسه چگونگی تغییرات کرنش پیچ داخلی و خارجی در این نمونه نشان می‌دهد که پیچ خارجی کرنش بیشتری را نسبت به پیچ داخلی تجربه کرده که می‌تواند نشان از تاثیر بیشتر پیچ خارجی در رفتار و ظرفیت اتصال باشد.

۵-۲- نمونه UEP-1.00

در این نمونه، پس از آغاز بارگذاری، تا دوران ۰/۰۱ رادیان هیچ گونه تغییر شکل پلاستیک و ریزشی در رنگ و تغییر فرمی در شبکه ترسیم شده مشاهده نشد.

در پایان آزمایش و با توجه به تغییر شکل‌های فرا ارتجاعی که بیشتر در بال تیر رخ داده است، انرژی به میزان ۵۸ کیلوژول مستهلک می‌شود (شکل ۱۴). در حالت بست اولیه، رفتار اتصال مانند یک اتصال اتکایی است و پیچ و بدنه سوراخ در حین بارگذاری رفت و برگشتی با یکدیگر در تماس کامل قرار گرفته و در نتیجه اندرکنش نیروهای کششی و برشی پیچ‌ها، منجر به تغییر شکل بدنه پیچ‌ها نسبت به محور طولی خود می‌شود (شکل ۱۲). با توجه به عدم وجود نیروی پیش-تندگی در این نمونه، در ابتدای تست هیچ کرنشی در پیچ‌ها وجود ندارد. با شروع بارگذاری، مطابق شکل (۱۵) مرتباً

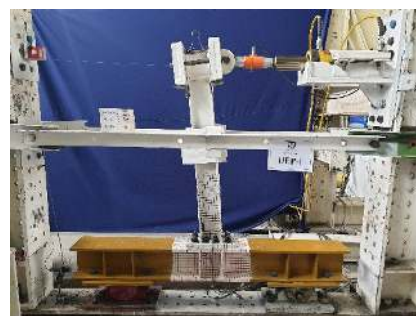
شکل ۱۲. تغییر شکل نمونه‌ها در پایان آزمایش



الف) UEP-0.00



ب) UEP-1.00



ج) UEP-1.43

Fig. 12. Specimens at the end of loading

دوران ۰/۰۲۶ رادیان افزایش یافته و جذب انرژی به علت رفتار پلاستیک و شکل پذیری اتصال افزایش می‌یابد (شکل ۱۴). همان‌گونه که در شکل (۱۵) ملاحظه می‌شود، در طول بارگذاری تنش پیش‌تنیدگی در پیچ‌های اتصال کاهش یافته تا اینکه در پایان اتصال پیش‌تنیدگی‌ها تقریباً ناپدید می‌شود.

۵-۳- نمونه UEP-1.43

در این نمونه، همان‌گونه که در شکل (۱۱ و ۱۲) می‌توان مشاهده کرد، کرنش پلاستیک در تیرها به ازای دوران ۰/۰۱۵ رادیان آغاز شده است. لازم به ذکر است مفصل پلاستیک در

با ادامه بارگذاری چرخه‌ای، تغییر شکل‌های پلاستیک پس از دوران ۰/۰۱۷ رادیان در وجوه داخلی و خارجی تیر آغاز می‌شود و مطابق با شکل‌های (۱۱ و ۱۲)، مفصل پلاستیک در فاصله تقریبی به اندازه نصف ارتفاع تیر از بر ستون تشکیل می‌شود. لنگر متناظر با حالت تسلیم 64 kN.m (My) بوده و بیشترین لنگر ایجاد شده در اتصال $1/12 \text{ Mp}$ است (شکل ۱۳). به علت وجود نیروی پیش‌تنیدگی در پیچ‌ها، رفتار اتصال به شکلی است که سختی اولیه به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. در پایان فرآیند بارگذاری بیشترین انرژی جذب شده توسط اتصال به میزان 71 kJ است. شیب منحنی انرژی از

شکل ۱۴. منحنی انرژی مستهلک شده نمونه‌ها در برابر دوران

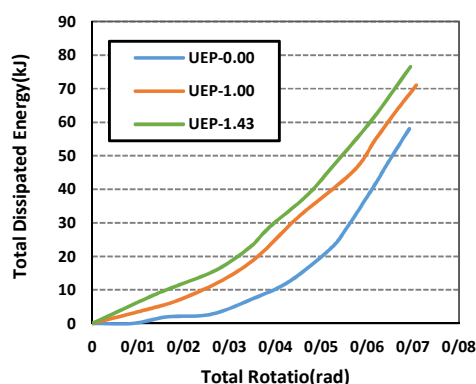


Fig. 14. Total Dissipated Energy of the Specimens During the Loading Process

همان‌گونه که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، ظرفیت خمشی اتصال در این حالت به علت افزایش نیروی پیش‌تندگی در پیچ‌ها و کاهش لقی افزایش یافته و برابر $1/23 \text{ Mp}$ است. در پایان بارگذاری حداکثر انرژی جذب شده توسط اتصال $76/5 \text{ kJ}$ است. در دوران حدودی $0/02$ رادیان، شیب منحنی انرژی افزایش یافته و جذب انرژی اتصال افزایش یافته است (شکل ۱۴). با توجه به نیروی پیش‌تندگی قابل توجه اولیه در این نمونه، تغییرات کرنش در پیچ‌های اتصال به شکلی است که در پایان آزمایش نیروی پیش‌تندگی در پیچ‌ها به طور کامل از بین نمی‌رود. از طرفی کاهش نیروی پیش‌تندگی در پیچ خارجی نسبت به پیچ داخلی کمتر بوده و در ظرفیت اتصال نقش موثرتری خواهد داشت (شکل ۱۵).

۴-۵- مقایسه رفتار چرخه‌ای نمونه‌ها با یکدیگر

پارامترهایی از قبیل ظرفیت خمشی، سختی دورانی اولیه، کرنش پلاستیک در تیرها، انرژی جذب شده و رفتار پیچ‌های اتصال در هر نمونه مورد ارزیابی قرار گرفتند. در نمونه UEP-0.00، منحنی هیستریزس نشان از ظرفیت خمشی کمتر نسبت به سایر نمونه‌ها که پیچ‌ها پیش‌تند شده‌اند، دارد (شکل ۱۳). در منحنی هیستریزس در محل لنگر صفر، کاهش سختی به علت افزایش نیروی پیش‌تندگی در پیچ‌های اتصال در نمونه‌های UEP-1.00 و UEP-1.43 نسبت به نمونه

دوران بین $0/02$ رادیان تا $0/03$ رادیان ($0/026$ رادیان) و در فاصله تقریبی ۷ سانتی متری از ورق انتهایی رخ داده است. علاوه بر این، سختی اولیه بواسطه افزایش نیروی پیش‌تندگی و کاهش لقی، افزایش یافته است اشکال (۱۳ و ۱۶). در این نمونه آزمایش تا دوران $0/08$ رادیان ادامه یافته و در پایان آزمایش تغییر شکل پلاستیک در اتصال در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.

شکل ۱۳. منحنی هیستریزس لنگر در آکس ستون- دوران برای تمام نمونه‌ها

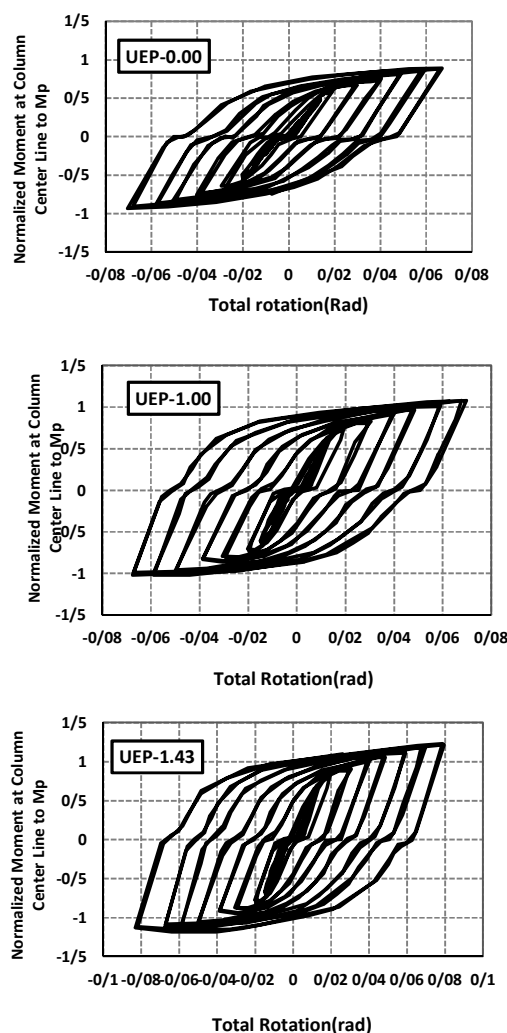


Fig. 13. Hysteretic moment at the column center line versus total rotation for all specimens

UEP-0.00 کمتر است. افزایش نیروی پیش‌تندگی در نمونه UEP-1.00 تا حد میزان آیین‌نامه، منجر به افزایش ظرفیت خمشی به میزان تقریبی ۲۷ درصد نسبت به نمونه UEP-0.00 شده است. این در حالی است که افزایش نیروی پیش‌تندگی در نمونه UEP-1.43، منجر به افزایش ظرفیت خمشی اتصال به میزان ۱۱ درصد نسبت به نمونه UEP-1.00، شده است (جدول ۵). لذا می‌توان دریافت افزایش نیروی پیش‌تندگی در پیچ‌ها به علت کاهش لقی در افزایش ظرفیت اتصال موثر است. از طرفی با وجود افزایش قابل توجه پیش‌تندگی در پیچ‌های نمونه UEP-1.43 نسبت به نمونه UEP-1.00، ظرفیت خمشی به مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد. با مقایسه منحنی هیستریزس نمونه‌ها شکل (۱۳) و همچنین پوش منحنی هیستریزس شکل (۱۳)، می‌توان دریافت که رفتار اتصال در حالت بست اولیه، متناظر با رفتار اتصال نیمه صلب است. همان‌گونه که پیش از این بیان شد، در نمونه UEP-0.00، دوران متناظر با حالت تسلیم به علت عدم وجود نیروی پیش‌تندگی در پیچ‌های اتصال، افزایش یافته، رفتار اتصال نرم‌تر و فشار تماسی بین ورق انتهایی و ستون ناچیز بوده و لقی و شکاف ایجاد شده در حین بارگذاری، منجر به افزایش دوران تسلیم به میزان ۱/۴۵ برابر نمونه UEP-1.00 و ۱/۶۷ برابر نمونه UEP-1.43 می‌شود (جدول ۴). علاوه بر آن، لنگر تسلیم در نمونه UEP-1.43 نسبت به نمونه UEP-1.00 تنها به میزان ۶/۷ درصد افزایش یافته است و در نتیجه، سختی اولیه نمونه UEP-1.43 نیز نسبت به نمونه UEP-1.00 به میزان ۱/۲۳ درصد افزایش داشته است. در نمونه UEP-0.00 که دوران متناظر با آغاز تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگتر از نمونه‌های UEP-1.00 و UEP-1.43 است، نشان می‌دهد، بخش کمتری از تغییر شکل‌ها در محدوده فرا ارتجاعی بوده و شکل‌پذیری اتصال نسبت به نمونه‌های بست ثانویه و بست ثانویه کامل، کمتر است (جدول ۴).

در پایان آزمایش، انرژی جذب شده در نمونه UEP-1.00 نسبت به نمونه UEP-0.00 ۲۳ درصد افزایش یافته است. این درحالی است که مطابق با جدول (۵)، انرژی مستهلک

شده در نمونه UEP-1.43 نسبت به نمونه UEP-1.00 تنها به اندازه ۹ درصد بیشتر است که نشان از کفایت پیش‌تندگی پیچ‌ها در حد آیین‌نامه است. میزان انرژی جذب شده و همچنین ظرفیت خمشی نمونه‌های UEP-1.00 و UEP-1.43 نشان می‌دهد، رفتار این اتصالات بر خلاف نمونه UEP-0.00، می‌تواند به عنوان اتصال صلب مربوط به یک قاب خمشی فلزی ویژه در نظر گرفته شود. کرنش در پیچ‌های داخلی و خارجی در اتصال UEP-0.00، در شروع بارگذاری صفر است. با توجه به اینکه کشش ایجاد شده به طور کامل توسط پیچ‌ها تامین می‌شود، کرنش کششی ایجاد شده در پیچ‌ها در طول بارگذاری چرخه‌ای نسبت به کرنش فشاری بیشتر است، چرا که بخش قابل توجهی از کرنش فشاری توسط فشار تماسی بین ورق انتهایی و ستون منتقل می‌شود (شکل ۱۵). از طرفی با توجه به صلیب بالا و رفتار الاستیک صفحه انتهایی، در حین آزمایش صفحه انتهایی تغییر شکلی نداده و اثر پدیده اهرمی بسیار ناچیز است که خود می‌تواند عامل افزایش کرنش در پیچ‌ها در کشش باشد. این موضوع به ویژه در مورد پیچ خارجی نسبت به پیچ داخلی مشهود می‌باشد. در نمونه UEP-1.00 در ابتدای آزمایش، پیچ‌ها دارای کرنش پیش‌تندگی است.

شکل ۱۵. تغییرات کرنش پیچ‌های داخلی و خارجی نمونه‌ها در طول بارگذاری چرخه‌ای

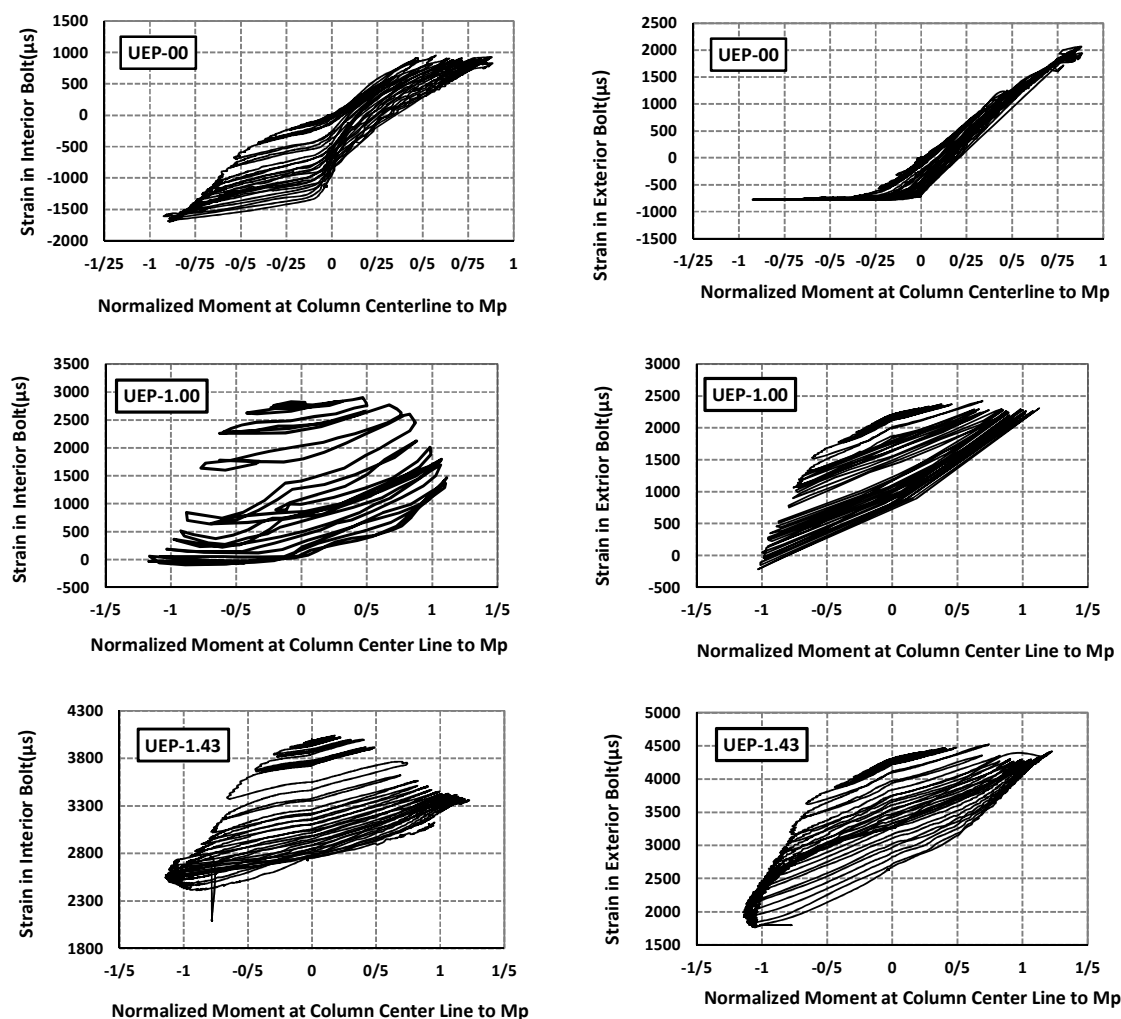


Fig. 15. Strain variation history for exterior or interior bolt of the specimens during the loading process.

شکل ۱۶. پوش هیستریزس لنگر-دوران نمونه‌ها

در هنگام انجام آزمایش و با اعمال بارگذاری چرخه‌ای به علت اعمال بارگذاری رفت و برگشتی، پیش تنیدگی پیچ‌ها کاهش یافته و تقریباً به صفر می‌رسد (شکل ۱۵). همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، میزان کرنش فشاری در پیچ‌های خارجی نسبت به پیچ‌های داخلی کمتر بوده و علت آن تحمل بخشی از فشار توسط ورق انتهایی است. در نمونه UEP-1.43 نیز با اعمال بارگذاری سیکلی بخشی از کرنش پیچ‌ها کاهش یافته، ولیکن همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، بر خلاف پیچ‌های نمونه UEP-1.00، کاملاً از بین نمی‌رود.

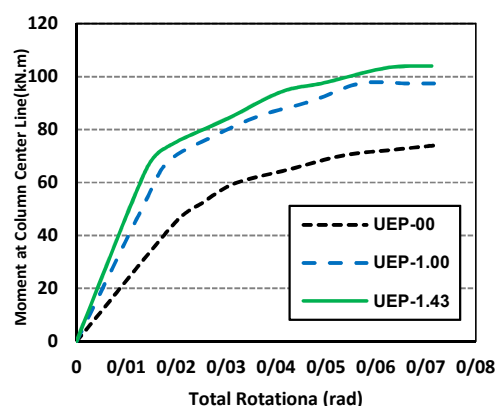


Fig. 16. Envelope of moment-rotation hysteresis curve of the specimens.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، سه نمونه اتصال پیچی ورق انتهایی به صورت آزمایشگاهی، به ازای مقادیر متفاوت پیش‌تندگی در پیچ‌ها، تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای مطابق دستورالعمل SAC، مورد مطالعه قرار گرفتند. خلاصه نتایج حاصل از آزمایش در ادامه بیان می‌شود:

• افزایش نیروی پیش‌تندگی منجر به افزایش ظرفیت خمشی در اتصال می‌شود. ظرفیت خمشی در اتصال UEP-1.43 در مقایسه با اتصال UEP-1.00، تنها به میزان ۱۱ درصد افزایش می‌یابد. پس می‌توان دریافت افزایش نیروی پیش‌تندگی تا حد تعیین شده در آیین‌نامه کافی است.

• انرژی مستهلک شده در نمونه‌های UEP-1.00 و UEP-1.43 به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. استهلاک انرژی در نمونه UEP-1.43 نسبت به نمونه UEP-1.00 تنها به میزان ۹ درصد افزایش داشته است که نشان می‌دهد با وجود افزایش پیش‌تندگی تا حد تنش نهایی در نمونه UEP-1.43، استهلاک انرژی نسبت به UEP-1.00، افزایش ناچیزی خواهد داشت.

• پیچ‌های خارجی نسبت به پیچ‌های داخلی، نیروهای کششی و فشاری حاصل از بارگذاری چرخه‌ای را به طور موثری تحمل می‌کنند و تاثیر بیشتری در رفتار چرخه‌ای اتصال دارند.

• در نمونه‌هایی که پیچ‌ها پیش‌تیده می‌شوند، عمده تغییر شکل‌ها در محدوده فرا ارتجاعی می‌باشند که این موضوع می‌تواند به علت افزایش تنش تماسی بین ورق انتهایی و بال ستون باشد که منجر به افزایش سختی دورانی و همچنین شکل‌پذیری اتصال می‌شود. در نمونه UEP-1.00، محدوده تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی ۰/۰۴ رادیان بوده، در حالی‌که برای نمونه‌های UEP-1.00 و UEP-1.43، محدوده تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی به ترتیب ۰/۰۵۳ رادیان و ۰/۰۵۵ رادیان هستند که نشان از افزایش شکل‌پذیری در نمونه‌های پیش‌تیده دارد.

• مقایسه روش‌های دور اضافه و استفاده از تورک-متر با استفاده از طلق دایروی مدرج شده نشان می‌دهد، استفاده از روش دور اضافه، دقت بیشتری در حصول نیروی پیش‌تندگی در پیچ‌ها دارد.

مراجع

- [1] T.M. Murray, "AISC Design Guide 4: Extended End-Plate Moment Connections", *American Institute of Steel Construction*, 1990.
- [2] A. Astanek-Asl, "Seismic Design of Bolted Steel Moment-Resisting Frames," *Structural Steel Educational Council, Technical Information and Product Service (Steel Tips)*, 1995.
- [3] C. Faella, V. Pilaso, and G. Rizzano, "Experimental Analysis of Bolted Connections: Snug Versus Preloaded Bolts," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, no. 7, pp. 765-774, 1998. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1998\)124:7\(765\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:7(765)).
- [4] B.T. Adey, G.Y. Grondin, and J.J.R. Cheng, "Cyclic Loading of End Plate Moment Connections," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 27, no. 4, pp. 683-701, 2000. doi: <https://doi.org/10.1139/199-080>.
- [5] E.A. Sumner, "Unified Design of Extended End Plate Moment Connections Subject to Cyclic Loading," *Ph.D. dissertation. Blackburg (VA): Virginia Polytechnic Institute and State University*, 2003.
- [6] M. Gerami, H. Saberi, V. Saberi, and A. Saedi Daryan, "Cyclic Behaviour of Bolted Connections with Different Arrangement of Bolts," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67, no. 4, pp. 690-705, 2011. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.11.011>.
- [7] M. Morrison, S. Quayyum, and T. Hassan, "Performance Enhancement of Eight Bolt Extended End-Plate Moment Connections Under Simulated Seismic Loading," *Engineering Structures*, Vol. 151, pp. 444-458, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.040>.
- [8] H. Guo, F. Xiao, Y. Liu, and G. Liang, "Experimental and Numerical Study on the Mechanical Behavior of Q460D High-Strength Steel Bolted Connections," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 151,

- <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112491>
- [12] Iranian National Code of Design and Construction of Steel Structures, 5th Edition, 2022.
- [13] AISC 360, "Specifications for Structural Steel Buildings," *American Institute of Steel Construction*, 2016.
- [14] FEMA., "Recommended seismic design criteria for new steel moment frame buildings," *FEMA-350, Federal Emergency Management Agency, California Universities for Research in Earthquake Engineering*, 2000.
- [15] AISC 358, "Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications", *American Institute of Steel Construction*, 2016.
- [16] Steel Design Guide4 "Extended End Plate Moment Connection," *American Institute of Steel Construction*, 2015.
- [17] RCSC, "Specifications for Structural Joints Using High Strength Bolts," *Research Council on Structural Connections*, 2020.
- pp. 108-121, 2018. doi: <https://org/10.1016/j.jcsr.2018.09.012>
- [9] A. Elsabbgh, T. Sharaf, S. Nagy, and M. Elghandour, "Behavior of Extended End Plate Bolted Connections Subjected to Monotonic and Cyclic Loads," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 190, pp. 142-159, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.016>.
- [10] Y. Lyu, G. Li, Y. Wang, M. Elghandour, and Y. Wang, "Effect of Bolt Pre-Tension on The Bearing Behavior of High Strength Steel Connections," *Engineering Structures*, Vol. 241, pp. 1-12, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112491>
- [11] W. Sun, Z. Guan, Y. Chen, J. Pan, and Y. Zeng, "Analytical Model of Bolted Joint Structure and Its Nonlinear Dynamic Characteristics in Transient Excitation," *Shock and Vibration*, Vol. 2022, pp. 1-25, 2022. doi:

Experimental Study on Behavior of Bolted Unstiffened End Plate Moment Connections for Different Levels of Pre-tensioning

Hamed Noferesti¹, Mohsen Gerami^{2*}

1 Ph.D of Earthquake Engineering, Semnan University, Iran

2 Professor of Earthquake Engineering, Semnan University, Iran

Corresponding email: mgerami@semnan.ac.ir

Abstract

During the construction of steel structures, the executive groups often fabricate some stories and tighten the connection bolts, defined as the snug-tightened bolt in this research. The lower stories, in which the connection bolts are snug-tightened, will be pre-tensioned at least to the level of preloading based on design codes, called pre-tensioned bolts, in this paper. The connections will be complete, while some upper stories will have snug-tightened bolts. As a result, the stiffness of the bolted connections varies throughout construction, and the structural characteristics change with time. So it is necessary to investigate the seismic behavior of bolted extended end-plate moment connections in both snug-tightened and pre-tensioned bolts while constructing high-rise structures. Bolted unstiffened end plate moment connections are one of the most usable connections used as prequalified connections in special steel moment frames. According to the AISC design code, this connection can be considered one of the most important parts of moment-resisting frames with enough bolt pre-tension levels. In this paper, using three full-scale bolted unstiffened end plate moment connections designed according to AISC, the effects of bolt pre-tension levels have been examined experimentally under SAC cyclic loading protocol. Bolt pre-tension level has been defined as α coefficient to show the pre-tensioning level in three specimens. The bolts of the first specimen are not pre-tensioned, called snug-tightened bolts, and is reference connection. The bolt pre-tension levels of the second and third specimens were created in accordance with AISC and Iranian National design code and more to F_u of bolts, called pre-tensioned and fully pre-tensioned, respectively. The bolts' moment capacity, total energy absorption, initial rotational stiffness, ductility of connection, and stress and strain variation are investigated. According to the results, an increase in bolt pre-tension level would significantly improve the cyclic behavior of connections. Further, an increase in bolt pre-tension led to the initiation of the inelastic deformation from a minor rotation, and the ductility of the connection improved. The results show that the increase in moment capacity and energy dissipation in the pre-tensioned compared to snug-tightened is 27 and 23%, respectively. However, In comparison with the pre-tensioned, the fully pre-tensioned specimen has increased by 11 and 9%, respectively. As a result, the connection with bolt pre-tension level, under design regulations in comparison with the reference connection, can be considered a connection of a special moment resisting frames. So bolt pre-tension level higher than the value mentioned in the design code is better but not needed.