****

مجله علمی – پژوهشی

مهندسی عمران مدرس

دوره بیست و دوم، شماره6، سال1401

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

**نویسندگان: ؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟**

**1-؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟**

**2-؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟**

**ایمیل:**

تاریخ دریافت تاریخ پذیرش

چکیده

اتصالات پیچی ورق انتهایی یکی از انواع اتصالاتی است که با رعایت ضوابطی از جمله ایجاد پیش­تنیدگی 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 پیش­تنیدگی 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 پیش­تنیدگی ندارند، بست اولیه نامیده می­شود. نمونه دوم و سوم که پیش­تنیدگی 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 پیش­تنیدگی­های 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 27 و 23 درصد است، در حالی‌که در بست ثانویه کامل نسبت به بست ثانویه به ترتیب 11 و 9 درصد افزایش یافته است. آغاز تغییر شکل­های فرا ارتجاعی به علت افزایش پیش­تنیدگی 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 پیش­تنیدگی بیش از حد آیین­نامه با وجود بهبود عملکرد چرخه­ای اتصال، مورد نیاز نیست.

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

**1- مقدمه**

در سال­های اخیر اجرای سازه­های بلند فولادی با سیستم قاب خمشی فولادی ویژه با استفاده از اتصالات از پیش تایید شده پیچی مطابق با آیین­نامه سازه­های فولادی AISC-360 به طور قابل توجهی افزایش یافته است [13]. در این بین عمده 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 ظوابط لرزه­ای در آیین‌نامه­ها به عنوان اتصالات پیش پذیرفته مورد قبول است [13,15]. اتصالات پیچی ورق انتهایی یکی از قدیمی­ترین اتصالات صلب تیر به ستون است که فقط همراه با مقاطع ستون­های صلیبی و I شکل قابل کاربرد است. فرآیند طراحی اتصالات ورق انتهایی 4 پیچی با و بدون استفاده از سخت کننده و ورق انتهایی 8 پیچی با سخت کننده در سال 1990 توسط موری[[1]](#footnote-1) ارایه شد[1]. آستانه اصل دو نمونه اتصال 4 پیچی ورق انتهایی بدون سخت کننده را تحت آزمایش سیکلی قرار داد. در نمونه‌ اول شکل­پذیری اتصال که سرانجام منجر به کمانش بال تیر شد مورد بررسی قرار گرفت. در نمونه دوم از ورق‌های شیم I 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 1998 فائلا[[2]](#footnote-2) و همکاران اثر پیش تنیدگی بر رفتار اتصال پیچی با سپری اتصال را تحت اثر بار محوری، با مطالعه آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند [3]. آدی[[3]](#footnote-3) و همکاران در سال 2000 پارامترهایی شامل ابعاد تیر، چیدمان پیچ­ها، ضخامت صفحه انتهایی و سخت کننده‌های ورق انتهایی در قابلیت جذب انرژی اتصال پیچی ورق انتهایی را از طریق آزمایش روی 15 نمونه اتصال با اعمال بار سیکلی، ارزیابی نمودند. در نتیجه تحقیق، قابلیت جذب انرژی با افزایش ابعاد تیر، کاهش یافته و در مقابل، سخت کننده‌های ورق انتهایی منجر به افزایش جذب انرژی اتصال می­شود [4].

رفتار اتصالات پیچی ورق انتهایی 4 پیچی بدون سخت کننده و 8 پیچی با سخت کننده توسط سامنر[[4]](#footnote-4) و موری در سال 2002 به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج تحقیق نشان داد، اتصال ورق انتهایی 4 پیچی بدون سخت کننده و اتصال ورق انتهایی 8 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 قایم 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 8 پیچی ورق انتهایی سخت شده توسط موریسون[[5]](#footnote-5) 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 چرخه ای و مونوتونیک نشان می­دهد نیروی برشی، تاثیر قابل ملاحظه­ای بر سختی اتصال دارد [9]. مطالعه عددی تاثیر پیش تنیدگی پیچ­ها در ظرفیت باربری اتصالات پیچی با ورق پوششی روی هم، حاکی از آن است که پیش تنیدگی در مودهای گسیختگی تاثیر ناچیزی داشته و قابل چشم پوشی 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 آیین نامه‌ای پیش تنیده می­شوند که در این مقاله اصطلاحا بست ثانویه نامیده شده و بدین ترتیب اتصال کامل می­شود. این در 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 پیش­تنیده کردن پیچ­ها، رزوه پیچ‌ها، لغزش صفحات و مشخصات سوراخ در عملکرد اتصالات پیچی برای پیش­تنیدگی­های مختلف اثر گذار است. در پژوهش­های پیشین همواره رفتار اتصال با فرض پیش­تنیدگی در حد آیین­نامه ارزیابی شده است پس با توجه به اهمیت پیش­تنیدگی 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 پیش­تنیدگی پیچ­ها و همچنین رفتار پیچ­ها به صورت میکروسکوپی بررسی نشده، رفتار چرخه­ای اتصالات پیچی ورق انتهایی برای مقادیر مختلف پیش تنیدگی به صورت آزمایشگاهی مطالعه شده است.

**2- نمونه­های آزمایش**

در این تحقیق سه نمونه اتصال پیچی ورق انتهایی بدون سخت‌کننده[[6]](#footnote-6) که بر اساس آیین­نامه سازه­های فولادی ایران و آمریکا [12,13] طراحی شده­اند، مورد مطالعه قرار گرفته است (شکل 1). 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 1.45 متر است. ستون مورد نظر با استفاده از ورق­هایی که ابعاد آن در شکل (1) نمایش داده شده است، به طول 2 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 4 آیین­نامه سازه­های فولادی آمریکا [16] طرح و با استفاده از جوش نفوذی و تکنیک جوش­کاری CO2 انجام شده است. جزییات جوشکاری و آزمایش جوش نمونه­ها در شکل­های (1 و 2) نمایش داده شده است.

**شکل 1.** مشخصات هندسی مقطع و چیدمان کرنش سنج­ها

|  |
| --- |
| **C:\Users\13502\Desktop\2.jpg** |
| **C:\Users\13502\Desktop\2.jpg** |
| **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 60 سانتی­متر، استفاده شده است. علاوه بر این، محدوده­ای روی تیر و ستون

**شکل 2.** آزمایش جوش اولتراسونیک برای جوش نفوذی



|  |
| --- |
| **Fig. 2.** CJP Ultrasonic Weld Test |

نیز با استفاده از ماژیک مشکی به صورت سلول­های مربعی مش‌بندی 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 2 سانتی­متر هستند، می­توان به طور دقیق محدوده شروع تغییر شکل‌های پلاستیک و سرانجام مفصل پلاستیک را مشخص نمود (شکل 3). برای تعیین مقادیر مختلف پیش­تنیدگی از ضریب α در رابطه نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها در آیین­نامه سازه­های فولادی[12]، مطابق رابطه 1 استفاده می­شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |

در رابطه فوق Fu و Ae به ترتیب تنش حد نهایی و سطح مقطع موثر پیچ است. به منظور بررسی تاثیر پیش­تنیدگی در رفتار اتصالات پیچی ورق انتهایی 3 سطح مختلف پیش­تنیدگی در نظر گرفته شده که بر اساس آن،

**شکل3.** رنگ آمیزی و ترسیم مش بندی بر روی تیر و ستون

|  |
| --- |
| E:\phd\My Thesis\MAIN-FINAL\مقالات\علمی-پژوهشی\Original Pic\500dpi\20210309_114706(500DPI)low.jpg  8@2cm=16cm |

**Fig. 3.** Grid Dimensions

تعداد نمونه­های آزمایشگاهی نیز در جدول (1) تعریف شده­اند. با توجه به چگونگی استقرار ستون به صورت افقی، لازم است کنترل شود که ستون مربوطه که روی کف صلب، کاملا 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 کاملا به صورت افقی روی ستون قرار گرفته باشد (شکل 4). به منظور جلوگیری از کمانش موضعی بال فشاری و با توجه به ماهیت بارگذاری چرخه­ای که به صورت رفت و برگشتی بوده و مرتبا 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.

**شکل4.** استقرار ستون و ورق انتهایی در پیکربندی آزمایش

|  |
| --- |
| E:\phd\My Thesis\MAIN-FINAL\مقالات\علمی-پژوهشی\Original Pic\500dpi\20210308_101952(500DPI)low.jpg |
| **Fig. 4.** Column and End Plate Configuration of Test Setup |

**جدول 1.** 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 2.** 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 | - |

بدین منظور مطابق شکل (5) از قیدی استفاده می­شود که به عنوان یک مهار جانبی در هر دو وجه تیر عمل کرده و از کمانش جانبی- پیچشی و همچنین کمانش موضعی تیر جلوگیری می­کند. بارگذاری چرخه­ای با استفاده از جک هیدرولیکی 20 تنی با قابلیت اعمال بارگذاری به صورت رفت و برگشتی، موافق بر FEMA350 بر اساس دستور‌العمل بارگذاری SAC97 [14] به انتهای تیر اعمال می­شود (شکل 6).

**شکل5.** سیستم مهار جانبی در طول تیر

|  |
| --- |
| E:\phd\My Thesis\MAIN-FINAL\مقالات\علمی-پژوهشی\Original Pic\500dpi\20210308_102200(500DPI)low.jpg |
| **Fig. 5.** Out of Plane Bracing System |

به منظور ثبت نتایج در حین بارگذاری چرخه­ای، از کرنش سنج­هایی در قسمت­های مختلف اتصال مطابق شکل (1) و همچنین پیچ­های اتصال استفاده شده است. کرنش‌سنج‌ها با ایجاد شیاری در سطح پیرامونی بدنه پیچ‌ها کار گذاشته می­شوند (شکل 7). کل قاب و پیکربندی آزمایش در شکل (8) نمایش داده شده است.

**شکل6.** دستورالعمل بارگذاری چرخه­ای SAC97[14]

|  |
| --- |
|  |
| **Fig. 6.** SAC97 Loading Protocol |

**شکل7.** نصب کرنش سنج روی بدنه پیچ

|  |  |
| --- | --- |
| E:\phd\My Thesis\MAIN-FINAL\مقالات\علمی-پژوهشی\Original Pic\500dpi\4(500DPI)low.jpg |  |
| **Fig. 7.** Installation of strain gauges on bolt shanks | |

همان­گونه که ملاحظه می­شود، ستون به صورت افقی و تیر به صورت قایم کار گذاشته شده است. ستون از طریق تکیه‌گاه‌های غلتکی روی کف صلب واقع شده و اتصال تیر به ستون به صورت یک طرفه است.

به منظور اطمینان از عدم کمانش پیچشی-جانبی از مهار جانبی در وسط ارتفاع تیر استفاده شده است. برای قرائت تغییر مکان سر تیر که از طریق یک جک 20 تنی به انتهای تیر اعمال می­شود نیز از LVDT در انتهای تیر استفاده شده است.

**4- نصب پیچ­ها و فرآیند پیش­تنیدگی**

به منظور ایجاد نیروی پیش­تنیدگی در پیچ های اتصال از دو روش دور اضافه و تورک-متر استفاده شده است تا دقت روش پیش­تنیدگی مورد استفاده نیز تحقیق شود. بدین منظور ابتدا کلیه پیچ‌ها تا حد سفتی کامل بسته می‌شوند، به شکلی که مطابق با آیین‌نامه RCSC [17] با آخرین توان و بدون اعمال وزن، پیچ­ها سفت شده تا ورق­های اتصال به طور کامل در تماس با یکدیگر قرار گیرند که به اصطلاح بست اولیه نامیده می­شود. پس از اعمال بست اولیه، مهره و پیچ، علامت گذاری می­شوند. با توجه به اینکه پیچ مورد نظر برای اتصال از نوع M24 است و طول پیچ‌ها 10 سانتی‌متر است، به منظور پیش‌تنیده کردن پیچ­ها تا حد آیین­نامه(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 آیین­نامه سازه‌های فولادی ایران(مبحث 10 مقررات ملی ساختمان) [12] لنگر متناظر با نیروی پیش­تنیدگی با استفاده از رابطه2 محاسبه می­شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (2) |  |

در رابطه اخیر K، Tb و db به ترتیب ضریب مهره (بدون بعد)، نیروی پیش تنیدگی لازم مطابق با آیین نامه و قطر اسمی پیچ است. با توجه به اینکه پیچ­های مورد استفاده برای هر اتصال پیچ نو هستند، ضریب مهره بر اساس آیین نامه برای پیچ نو و بدون پوشش 2/0 در نظر گرفته شده است. با توجه به رابطه (1)، نیروی پیش تنیدگی آیین‌نامه برای پیچ M24، 9/256کیلونیوتن و لنگر پیچشی متناظر با آن، 1230 نیوتن-متر است. از طرفی نیروی پیش­تنیدگی برای حالتی­که پیچ تا حد تنش نهایی پیش­تنیده می­شود با استفاده از رابطه1، 367 کیلونیوتن و لنگر تورک-متر متناظر با آن بر اساس رابطه2، 1770 نیوتن-متر است.

**شکل8.** جزییات پیکربندی آزمایش

|  |
| --- |
|  |
|  |
| **Fig. 8.** Details of the Test Setup |

به منظور مشخص شدن دقیق میزان چرخش مهره نسبت به پیچ در بست ثانویه، طلق دایره­ای مدرج شده 360 درجه­ای استفاده شده است (شکل 9).

در شکل (10) چگونگی پیش­تنیده کردن با استفاده از تورک-متر روش دور اضافه نمایش داده شده و میزان چرخش لازم برای مهره به منظور تامین نیروی پیش‌تنیدگی تا حد بست ثانویه و بست ثانویه کامل بر حسب درجه مشخص شده است. در جدول (3)، میزان متوسط چرخش مهره در روش­های مختلف برای تامین پیش­تنیدگی در حد بست ثانویه و بست ثانویه کامل نیز مشخص شده است. با توجه به جدول(3) می­توان دریافت روش دور اضافه نسبت به روش تورک-متر روش دقیق­تری برای ایجاد نیروی پیش­تنیدگی مورد نظر است.

**شکل9.** ابزار مدرج شده دایروی

|  |
| --- |
|  |
| **Fig. 9.** Circular graduated instrument |

به عنوان نمونه میزان چرخش لازم برای تامین نیروی پیش­تنیدگی لازم در حد آیین­نامه با استفاده از روش دور اضافه نیم دور و معادل 180 درجه است، در حالی‌که با استفاده از روش تورک-متر میزان چرخش مورد نیاز برای مهره، 165 درجه به دست آمده است.

**شکل 10**. فرآیند پیش­تنیده کردن پیچ­های اتصال

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| E:\phd\My Thesis\MAIN-FINAL\مقالات\علمی-پژوهشی\pic\3.png | | E:\phd\My Thesis\MAIN-FINAL\مقالات\علمی-پژوهشی\pic\4.png |
| **شکل 10-الف.** بست ثانویه | **شکل 10-د.** بست ثانویه کامل | |
| E:\phd\My Thesis\MAIN-FINAL\مقالات\علمی-پژوهشی\Original Pic\500dpi\20210317_095421(500DPI)low.jpg | | |
| **شکل 10-ج.** پیش­تنیدگی با تورک-متر | | |
| **Fig. 10.** Bolt pre-tensioning procedure | | |

**5- بحث در خصوص نتایج**

در این بخش، رفتار هر یک از نمونه ها 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، دریفت متناظر با تسلیم، مد های گسیختگی و همچنین تغییرات کرنش در پیچ­های داخلی و خارجی هر یک از نمونه­ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در جداول (4 و 5) خلاصه نتایج ارایه شده و شرح آن برای هریک از نمونه‌ها به طور جداگانه بیان می­شود.

**جدول 3.** میزان چرخش مهره برای پیش­تنیدگی 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 |

**5-1- نمونه UEP-0.00**

در این نمونه، پیچ‌ها تنها سفت می‌شوند و α صفر است.

تغییر شکل پلاستیک با توجه به ریزش لایه رنگ پلاستیک، در فاصله‌ای به اندازه تقریبی 8 سانتی متر از بر ستون رخ داده است. تغییر شکل‌های تسلیم در بال تیر و در دوران مانند 025/0 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 (11) نشان داده شده است. در منحنی­های نشان داده شده در شکل (11)، محور افقی به لنگر خمشی پلاستیک تیر(Mp) نرمال شده است. عدم وجود پیش تنیدگی در پیچ­ها منجر به افزایش بازشدگی(شکاف) به میزان تقریبی 4 میلی­متر، بین صفحه انتهایی و ستون در پایان فرآیند بارگذاری می­شود که مربوط به دریفت نظیر دوران 07/0 رادیان در گام­های انتهایی بارگذاری است (شکل 12). در منحنی هیسترزیس، در محل لنگر صفر، کاهش سختی قابل ملاحظه­ای به علت افزایش لقی و لغزش در اتصال رخ داده است. در پایان آزمایش، ظرفیت خمشی اتصالMp 89/0 (Mp ظرفیت خمشی پلاستیک) شده است (شکل 13). با توجه به تشکیل مفصل پلاستیک به ازای دوران 03/0 رادیان، شیب منحنی استهلاک انرژی پس از دریفت متناظر با دوران 03/0 رادیان افزایش یافته است.

**شکل11.** تغییرات کرنش در بال تیر نمونه­ها در طول بارگذاری

|  |
| --- |
|  |
|  |
|  |
| **Fig. 10.** Strain variation history in beam flange |

**جدول4.** خلاصه نتایج

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Specimen | Mmax (kN.m) |  | My (kN.m) | (rad) | (kN.m/rad) | E (kJ) | (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 |

**جدول5.** خلاصه مقایسه نتایج نمونه­های اتصال

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Group | Specimens |  |  |  | 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 |

در پایان آزمایش و با توجه به تغییر شکل­های فرا ارتجاعی که بیشتر در بال تیر رخ داده است، انرژی به میزان 58 کیلوژول مستهلک می‌شود (شکل 14). 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 12). با توجه به عدم وجود نیروی پیش­تنیدگی در این نمونه، در ابتدای تست هیچ کرنشی در پیچ­ها وجود ندارد. با شروع بارگذاری، مطابق شکل (15) مرتبا کرنش پیچ­ها افزایش می­یابد که این موضوع ارتباطی به پیش‌تنیدگی در پیچ­ها ندارد. مقایسه چگونگی تغییرات کرنش پیچ داخلی و خارجی در این نمونه نشان می­دهد که پیچ خارجی کرنش بیشتری را نسبت پیچ داخلی تجربه کرده که می­تواند نشان از تاثیر بیشتر پیچ خارجی در رفتار و ظرفیت اتصال باشد.

**5-2- نمونه UEP-1.00**

در این نمونه، پس از آغاز بارگذاری، تا دوران 01/0 رادیان هیچ گونه تغییر شکل پلاستیک و ریزشی در رنگ و تغییر فرمی در شبکه ترسیم شده مشاهده نشد.

**شکل12.** تغییر شکل نمونه­ها در پایان آزمایش

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **E:\phd\My Thesis\MAIN-FINAL\مقالات\علمی-پژوهشی\Original Pic\500dpi\low-q4(500DPI)low.jpg** | **E:\phd\My Thesis\MAIN-FINAL\مقالات\علمی-پژوهشی\Original Pic\500dpi\low-q3(500DPI)low.jpg** | | **E:\phd\My Thesis\MAIN-FINAL\مقالات\علمی-پژوهشی\Original Pic\500dpi\low-q2(500DPI)low.jpg** |
| **الف)** UEP-0.00 | | | |
| **E:\phd\My Thesis\MAIN-FINAL\مقالات\علمی-پژوهشی\Original Pic\500dpi\20210317_133319(500DPI)low.jpg** | | **E:\phd\My Thesis\MAIN-FINAL\مقالات\علمی-پژوهشی\Original Pic\500dpi\20210317_133859(500DPI)low.jpg** | |
| **ب)** UEP-1.00 | | | |
| E:\phd\My Thesis\MAIN-FINAL\مقالات\علمی-پژوهشی\Original Pic\500dpi\20210529_104202(500DPI)low.jpg | | E:\phd\My Thesis\MAIN-FINAL\مقالات\علمی-پژوهشی\Original Pic\500dpi\20210529_104243(500DPI)low.jpg | |
| **ج)** UEP-1.43 | | | |
| **Fig. 12.** Specimens at the end of loading | | | |

با ادامه بارگذاری چرخه­ای، تغییر شکل­های پلاستیک پس از دوران 017/0 رادیان در وجوه داخلی و خارجی تیر آغاز می­شود و مطابق با شکل‌های (11 و 12)، مفصل پلاستیک در فاصله تقریبی به اندازه نصف ارتفاع تیر از بر ستون تشکیل می‌شود. لنگر متناظر با حالت تسلیم (My) kN.m64 بوده و بیشترین لنگر ایجاد شده در اتصال Mp12/1 است (شکل 13). 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 kJ71 است. شیب منحنی انرژی از دوران 026/0 رادیان افزایش یافته و جذب انرژی به علت رفتار پلاستیک و شکل پذیری اتصال افزایش می‌یابد (شکل 14). همان‌گونه که در شکل (15) ملاحظه می­شود، در طول بارگذاری تنش پیش­تنیدگی در پیچ­های اتصال کاهش یافته تا اینکه در پایان اتصال پیش­تنیدگی­ها تقریبا ناپدید می­‌شود.

**5-3- نمونه UEP-1.43**

در این نمونه، همان­گونه که در شکل (11 و 12) می­توان مشاهده کرد، کرنش پلاستیک در تیرها به ازای دوران 015/0 رادیان آغاز شده است. لازم به ذکر است مفصل پلاستیک در دوران بین 02/0 رادیان تا 03/0 رادیان(026/0 رادیان) و در فاصله تقریبی 7 سانتی متری از ورق انتهایی رخ داده است. علاوه بر این، سختی اولیه بواسطه افزایش نیروی پیش تنیدگی و کاهش لقی، افزایش یافته است اشکال (13 و 16). در این نمونه آزمایش تا دوران 0.08 رادیان ادامه یافته و در پایان آزمایش تغییر شکل پلاستیک در اتصال در شکل (12) نمایش داده شده است.

**شکل13.** منحنی هیسترزیس لنگر در آکس ستون- دوران برای تمام نمونه­ها

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
|  | |
|  | |
| **Fig. 13.** Hysteretic moment at the column center line versus total rotation for all specimens  **شکل14.** منحنی انرژی مستهلک شده نمونه­ها در برابر دوران | |
|  |
| **Fig. 14.** Total Dissipated Energy of the Specimens During the Loading Process |

همان­گونه که در شکل (13) مشاهده می­شود، ظرفیت خمشی اتصال در این حالت به علت افزایش نیروی پیش تنیدگی در پیچ ها و کاهش لقی افزایش یافته و برابر Mp 23/1 است. در پایان بارگذاری حداکثرانرژی جذب شده توسط اتصال kJ5/76 است. در دوران حدودی 02/0 رادیان، شیب منحنی انرژی افزایش یافته و جذب انرژی اتصال افزایش یافته است (شکل 14). با توجه به نیروی پیش‌تنیدگی قابل توجه اولیه در این نمونه، تغییرات کرنش در پیچ‌های اتصال به شکلی است که در پایان آزمایش نیروی پیش تنیدگی در پیچ­ها به طور کامل از بین نمی‌رود. از طرفی کاهش نیروی پیش تنیدگی در پیچ خارجی نسبت به پیچ داخلی کمتر بوده و در ظرفیت اتصال نقش موثرتری خواهد داشت (شکل 15).

**5-4- 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 هیسترزیس نشان از ظرفیت خمشی کمتر نسبت به سایر نمونه­ها که پیچ­ها پیش تنیده شده­اند، دارد (شکل 13). در منحنی هیسترزیس در محل لنگر صفر، کاهش سختی به علت افزایش نیروی پیش‌تنیدگی در پیچ­های اتصال در نمونه‌های UEP-1.43 و UEP-1.00 نسبت به نمونه UEP-0.00 کمتر است. افزایش نیروی پیش‌تنیدگی در نمونه UEP-1.00 تا حد میزان آیین­نامه، منجر به افزایش ظرفیت خمشی به میزان تقریبی 27 درصد نسبت به نمونه UEP-0.00 شده است. این در حالی است که افزایش نیروی پیش تنیدگی در نمونه UEP-1.43، منجر به افزایش ظرفیت خمشی اتصال به میزان 11درصد نسبت به نمونه UEP-1.00، شده است (جدول 5). پس می­توان دریافت افزایش نیروی پیش‌تنیدگی در پیچ­ها به علت کاهش لقی در افزایش ظرفیت اتصال موثر است. از طرفی با وجود افزایش قابل توجه پیش­تنیدگی در پیچ­های نمونه UEP-1.43 نسبت به نمونه UEP-1.00، ظرفیت خمشی به مقدار ناچیزی افزایش می­یابد. با مقایسه منحنی هیسترزیس نمونه‌ها شکل (13) و همچنین پوش منحنی هیسترزیس شکل (13)، 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 پیش­تنیدگی 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 45/1 برابر نمونه UEP-1.00 و 67/1 برابر نمونه UEP-1.43 می­شود (جدول 4). علاوه بر آن، لنگر تسلیم در نمونه UEP-1.43 نسبت به نمونه UEP-1.00 تنها به میزان 7/6 درصد افزایش یافته است و در نتیجه، سختی اولیه نمونه UEP-1.43 نیز نسبت به نمونه UEP-1.00 به میزان 23/1 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 شکل پذیری اتصال نسبت به نمونه‌های بست ثانویه و بست ثانویه کامل، کمتر است (جدول 4).

در پایان آزمایش، انرژی جذب شده در نمونه UEP-1.00 نسبت به نمونه UEP-0.00 23 درصد افزایش یافته است. این درحالی است که مطابق با جدول (5)، انرژی مستهلک شده در نمونه UEP-1.43 نسبت به نمونه UEP-1.00 تنها به اندازه 9 درصد بیشتر است که نشان از کفایت پیش تنیدگی پیچ ها در حد آیین­نامه است. میزان انرژی جذب شده و همچنین ظرفیت خمشی نمونه های 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 15). از طرفی با توجه به صلبیت 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 پیش تنیدگی است.

**شکل15.** 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.  **شکل16.** پوش هیسترزیس لنگر-دوران نمونه­ها | |

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

در هنگام انجام آزمایش و با اعمال بارگذاری چرخه­ای به علت اعمال بارگذاری رفت و برگشتی، پیش تنیدگی پیچ­ها کاهش یافته و تقریبا به صفر می­رسد (شکل 15). 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، کاملا از بین نمی‌رود.

**6- نتیجه‌گیری**

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

* افزایش نیروی پیش­تنیدگی 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 11 درصد افزایش می­یابد. پس می­توان دریافت افزایش نیروی پیش­تنیدگی تا حد تعیین شده در آیین­نامه کافی است.
* انرژی مستهلک شده در نمونه­های UEP-1.00 و UEP-1.43 به طور قایل توجهی افزایش می­یابد. استهلاک انرژی در نمونه UEP-1.43 نسبت به نمونه UEP-1.00 تنها به میزان 9 درصد افزایش داشته است که نشان می­دهد با وجود افزایش پیش­تنیدگی 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 پیش­تنیده 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 04/0 رادیان بوده، در حالی­که برای نمونه­های UEP-1.00 و UEP-1.43، محدوده تغییر شکل­های غیر ارتجاعی به ترتیب 053/0 رادیان و 055/0 رادیان هستند که نشان از افزایش شکل پذیری در نمونه­های پیش­تنیده 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 پیش­تنیدگی 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. Astaneh-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))](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112633).
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/l99-080>.
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](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.11.011)](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106737).
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://[org/10.1016/j.engstruct.2017.08.040](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, pp. 108-121, 2018. doi: https://[org/10.1016/j.jcsr.2018.09.012](https://doi.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](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.016)](https://doi.org/10.1139/l99-080).
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](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112491)](https://doi.org/10.1139/l99-080)
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: [https://doi.[org/10.1016/j.engstruct.2021.112491](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112491)](https://doi.org/10.1139/l99-080)
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.

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

**؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟**

**؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟**

**؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟**

**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 Fu 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.

1. . Murray [↑](#footnote-ref-1)
2. . Faella [↑](#footnote-ref-2)
3. .Adey [↑](#footnote-ref-3)
4. .Sumner [↑](#footnote-ref-4)
5. . Morrison [↑](#footnote-ref-5)
6. 6. Bolted Unstiffened Extended End Plate Moment Connection(BUEEP) [↑](#footnote-ref-6)