



# مطالعه آزمایشگاهی رفتار شکست برش قالبی اتصال صفحات فولادی

یحیی زینالی<sup>۱</sup>، مجتبی جعفری صمیمی<sup>۲\*</sup>، علی مزروعی<sup>۳</sup>، جعفر عسگری مارنانی<sup>۴</sup>، محمد صادق روحانی منش<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی تهران مرکز، تهران

۲- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران

۳- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران

۴- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران

۵- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۱۴۶۹۶۶۹۱۹۱، Jaafari.Mojtaba@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۲۳)

## چکیده

در این تحقیق اثرات نیروی پیش تنیدگی اتصال‌های پیچی با عملکرد اصطکاکی در صفحات اتصال اعضای کششی فولادی مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. برای این منظور شش گروه نمونه دوتایی از دو نوع مصالح فولادی انتخاب و آزمایش گردید. به منظور مقایسه رفتار اتصالات پیچی در حالات اتکایی و اصطکاکی، در سه گروه از نمونه‌ها، صفحات اتصال با پیچ‌های دارای عملکرد اتکایی و در مابقی آنها با اتصال دارای عملکرد اصطکاکی آزمایش انجام شده است. در این تحقیق، تاثیر تعداد ردیف پیچ‌های اتصال و مشخصات مکانیکی مصالح به عنوان متغیرهای آزمایش، در هر دو نوع عملکرد اتصال اصطکاکی و اتکایی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که نه تنها رفتار نمونه‌ها برای اتصال‌های دارای عملکرد اصطکاکی، نسبت به اتصال‌های دارای عملکرد اتکایی، می‌تواند متفاوت باشد، بلکه نیروی پیش تنیدگی اتصال‌های اصطکاکی می‌تواند موجب افزایش سختی در محدوده تغییر شکل‌های کوچک شود. همچنین استفاده از اتصال‌های اصطکاکی، می‌تواند استحکام نهایی سطوح کششی و برشی حوزه برش قالبی را افزایش داده و در نتیجه استحکام نهایی گسیختگی برش قالبی افزایش یابد.

## واژگان کلیدی

گسیختگی برش قالبی، اتصال‌های پیچی، اتصال‌های اصطکاکی، سازه‌های فولادی، مطالعه آزمایشگاهی

## Experimental Study on Block Shear Rupture of Bolted Steel Plates Connection

Y. Zeynali, M. Jafari Samimi, A. Mazroi, J. Asgari Marnani, M.S. Rohanimanesh

### Abstract

This research aims to investigate the effects of clamping force on the behavior of steel gusset plates with slip-critical connection. Six specimens with two different materials are tested which three specimens are bolted with bearing-type connection and three specimens are bolted with slip-critical connection. The effects of number of bolts and material properties are investigated as the variable parameters of study. The results show that in the slip-critical bolted connections, the clamping force can increase the stiffness of connection in the small deformation zone. Also, this force increases the ultimate resistance of the tensile and shear areas that cause more resistant connection.

### Keywords

Block shear rupture, Bolted connection, Slip-critical connection, Steel structures, Experimental study



بوده است و در آنها سعی شده تا اثرات اصطکاک در نتایج آزمایش تأثیری نگذارد.

با مطالعه آزمایشگاهی که روی اعضای تیر زبانه شده انجام شد مشخص گردید که نیروی اصطکاک موجود در محل اتصال این اعضا می‌تواند اثرات قابل توجهی بر ظرفیت و رفتار آنها در پدیده گسیختگی برش قالبی داشته باشد [۹].

در تحقیق حاضر، با مطالعه آزمایشگاهی صفحات اتصال فولادی پیچی تحت بارگذاری محوری کششی، تفاوت‌های رفتاری و پاسخ ظرفیتی نمونه‌ها با دو نوع عملکرد اتصال بصورت اتکایی و اصطکاک برسی و تأثیر رفتار اصطکاک اتصال بر عملکرد برش قالبی بیان شده است.

## ۲- مشخصات هندسی و مصالح نمونه‌ها

در این تحقیق در مجموع شش گروه نمونه جفت صفحه اتصال<sup>۳</sup> با اتصال پیچی با دو نوع مصالح فولادی و تعداد مختلف ردیف پیچ‌های اتصال، تحت بارگذاری محوری کششی مورد آزمایش قرار گرفتند. نیمی از نمونه‌ها دارای اتصال با عملکرد اتکایی و مابقی نمونه‌ها دارای اتصال با عملکرد اصطکاک بودند. بارگذاری نمونه‌ها تا پایان فرآیند شکست (جدا شدن کامل بخش شکسته شده) ادامه یافت.

مصالح فولادی صفحات اتصال استفاده شده مطابق با استاندارد DIN آلمان شامل ST37-2 و ST44-2 بودند. مشخصات مکانیکی مصالح نمونه‌های صفحه اتصال از طریق آزمون استاندارد<sup>۴</sup> بر اساس استاندارد (ASTM A370 (2014 [۱۰] بدست آمد که نتایج آن در جدول (۱) قابل مشاهده است. نمونه‌های دمبلی ساخته شده برای آزمون کشش دارای ابعاد عرض و طول گیج به ترتیب برابر ۱۲/۵ میلی‌متر و ۵۰ میلی‌متر بودند. برای تعیین مقدار استحکام تسلیم مصالح نمونه‌ها از روش افست کرنش ۲٪ درصد استفاده شد.

برای تعیین مقدار ضریب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی نمونه‌های آزمایش، آزمون اندازه‌گیری ضریب اصطکاک بر اساس استاندارد (ASTM G115-10 (2013 [۱۱] انجام شد. شایان ذکر است که سطوح تمامی نمونه‌های آزمایش با استفاده از برس سیمی تمیزکاری گردیده و عاری از مواد زائد و چربی‌ها شدند. شکل (۱) نمونه نوعی آزمون اصطکاک انجام شده در ماشین کشش اینسترون<sup>۵</sup> ۵۰۰ نیوتن را نشان می‌دهد. جدول (۲)

اتصال‌های پیچی در دو نوع عملکرد اتکایی و اصطکاک طبقه‌بندی می‌شوند. در مواردی که لغزش جزئی بین صفحات اتصال مجاز باشد، اتصال اتکایی به کار می‌رود و در غیر اینصورت باید از اتصال با عملکرد اصطکاک استفاده شود. مکانیزم انتقال نیرو بین صفحات اتصال اعضای تحت نیروی محوری کششی در اتصال اتکایی بر اساس تماس تنه پیچ با جداره سوراخ است که موجب ایجاد تنش برشی در پیچ و تنش فشاری در جداره سوراخ و پیچ می‌شود. همچنین در اتصال اصطکاک انتقال نیرو بین صفحات اتصال بر اساس نیروی اصطکاک ناشی از پیش تنیدگی پیچ‌ها امکانپذیر است.

برای هر دو نوع اتصال اتکایی و اصطکاک باید مکانیزم‌های مختلف خرابی در وسیله اتصال (پیچ) و قطعات اتصال بررسی شود. در این اتصال‌ها، یکی از مکانیزم‌های خرابی قطعات اتصال، گسیختگی برش قالبی است. این گسیختگی نوعی شکست در اعضای فولادی است که از تأثیر همزمان تنش‌های کششی و برشی ناشی می‌شود که موجب کنده شدن تکه‌ای از عضو می‌گردد، که در این حالت ظرفیت برش قالبی عضو از استحکام نهایی آن کمتر می‌شود. تنش‌های کششی و برشی همزمان بگونه‌ای است که در بخشی از عضو تنش کششی و در بخش دیگر تنش برشی ایجاد می‌گردد، بطوری که سطح کششی عمود بر امتداد بارگذاری تشکیل گردیده و سطح برشی نیز در امتداد بارگذاری بوجود می‌آید. در اتصال‌های پیچی با توجه به کاهش سطح مقطع عضو بعلت وجود سوراخ پیچ‌ها، نسبت به اتصال‌های جوشی، این پدیده شایع‌تر است.

گسیختگی برش قالبی به عنوان حالت حدی در تعیین مقاومت اتصال‌های پیچی در استانداردهای مختلف طراحی سازه‌های فولادی [۱-۳] شناخته می‌شود که حالات شکست گسیختگی سطح کششی به همراه تسلیم و یا گسیختگی سطح برشی را ممکن می‌دانند. اساس روابط طراحی گسیختگی برش قالبی در استانداردهای نامبرده بر مبنای نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام شده روی اعضای تیرهای زبانه شده [۴] و صفحات اتصال [۵] می‌باشد که با ادغام مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی توزیع تنش کششی غیر یکنواخت ( $u_{bs}$ ) در سطح کششی [۶-۸] ارائه شده‌اند. این در حالی است که تمامی مطالعات آزمایشگاهی اشاره شده دارای اتصال با عملکرد اتکایی

<sup>3</sup> Double Gusset Plates

<sup>4</sup> Coupon test

<sup>5</sup> Instron

<sup>1</sup> Coped Beams

<sup>2</sup> Gusset Plates

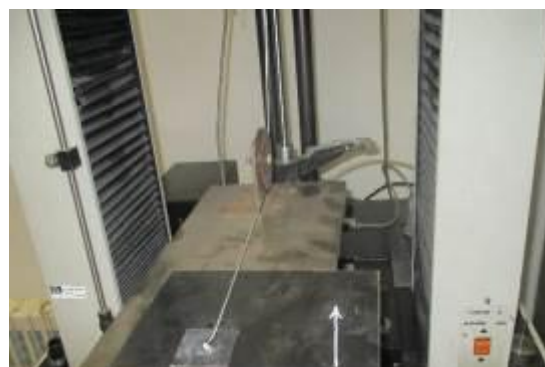


جدول ۱- مشخصات مکانیکی مصالح نمونه‌های صفحه اتصال

نوع مصالح	تنش تسلیم ( $F_y$ ) (MPa)	تنش نهایی ( $F_u$ ) (MPa)	مدول الاستیسیته ( $E$ ) (GPa)	کرنش سخت شدگی ( $\epsilon_H$ ) (%)	کرنش در تنش نهایی ( $\epsilon_U$ ) (%)	درصد ازدیاد طول نسبی ( $L_{50}$ ) (%)	سطح مقطع اولیه ( $A_0$ ) ( $\text{mm}^2$ )	سطح مقطع پس از شکست ( $A_F$ ) ( $\text{mm}^2$ )
ST37-2	۲۷۰/۱	۳۸۹/۹	۲۰۰/۶	۲/۱۶	۱۷/۰۴	۳۹/۵	۵۰/۱۶	۱۷/۴۱
ST44-2	۳۶۱/۶	۴۵۶/۸	۲۰۵/۸	۱/۴۸	۱۶/۰۸	۳۱	۵۰/۰۸	۱۸/۲۴

استفاده از این ضخامت و گرید مصالح برای صفحات بارگذاری نسبت به صفحات نمونه‌ها، حصول اطمینان از عدم ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک در آنها بود تا بتوان فرض تقریباً صلب آنها را معتبر دانست و از تاثیر متقابل آنها بر یکدیگر جلوگیری کرد. این موضوع بخاطر ساده سازی در تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش لحاظ گردید.

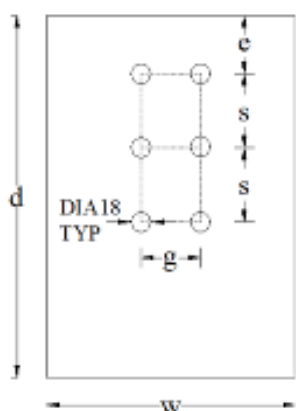
برای تمامی نمونه‌های آزمایش ضخامت ( $t$ ) و عرض ( $w$ ) صفحات اتصال به ترتیب برابر ۴ و ۲۰۰ میلی‌متر، فاصله پیچ‌ها از لبه برابر ۳۲ میلی‌متر (معادل دو برابر قطر پیچ)، فاصله پیچ‌ها از هم در راستای موازی با بارگذاری ( $s$ ) و عمود بر بارگذاری ( $g$ ) برابر ۴۸ میلی‌متر (معادل ۳ برابر قطر پیچ) در نظر گرفته شد. جزئیات نمونه‌های آزمایش در شکل (۲) قابل مشاهده است.



شکل ۱- آزمون اصطکاک در ماشین کشش اینسترون ۵۰۰ نیوتن

جدول ۲- نتایج آزمون اصطکاک

نوع مصالح	ضریب اصطکاک استاتیکی (%)	ضریب اصطکاک دینامیکی (%)
ST37-2	۳۳	۲۴
ST44-2	۳۱	۲۳



شکل ۲- جزئیات هندسی نمونه‌های آزمایش

برای نامگذاری نمونه‌ها از چندین حرف و عدد استفاده شد که در آنها "P<sub>1</sub>" و "P<sub>2</sub>" نشان دهنده نوع مصالح فولادی نمونه‌ها به ترتیب ST 37-2 و ST 44-2، "B16" و یا "F16" نشان دهنده نوع عملکرد اتصال اتکایی و یا اصطکاک‌ی و با قطر اسمی پیچ‌ها برابر ۱۶ میلی‌متر و اعداد ۴ و ۶ نشان دهنده تعداد پیچ‌های اتصال به ترتیب برابر ۴ عدد در دو ردیف دوتایی و ۶

تمامی پیچ‌های مصرفی از کلاس ۱۰.۹ مطابق با استاندارد خواص مکانیکی DIN EN-14399-4 [۱۲] و استاندارد ابعادی DIN6914 [۱۳] انتخاب شده و همچنین تمامی مهره‌ها و واشرها نیز از کلاس ۱۰ مطابق با استاندارد خواص مکانیکی DIN EN-14399-4 و DIN EN-14399-6 [۱۴] و استاندارد ابعادی DIN6915 [۱۵] و DIN6916 [۱۶] انتخاب شدند.

در تمامی صفحات اتصال آزمایش شده، قطر پیچ‌ها ( $d_b$ ) برابر ۱۶ میلی‌متر به کار گرفته شد. کلیه نمونه‌ها با استفاده از روش مته<sup>۱</sup> و بصورت استاندارد (با قطری به میزان ۲ میلی‌متر بیشتر از قطر پیچ یعنی برابر ۱۸ میلی‌متر) سوراخکاری شدند.

برای اتصال نمونه‌ها و همچنین انتقال بار، از صفحات با ضخامت ۴۰ میلی‌متر و از فولاد نوع ST 52 استفاده شد. علت

<sup>1</sup> Drill

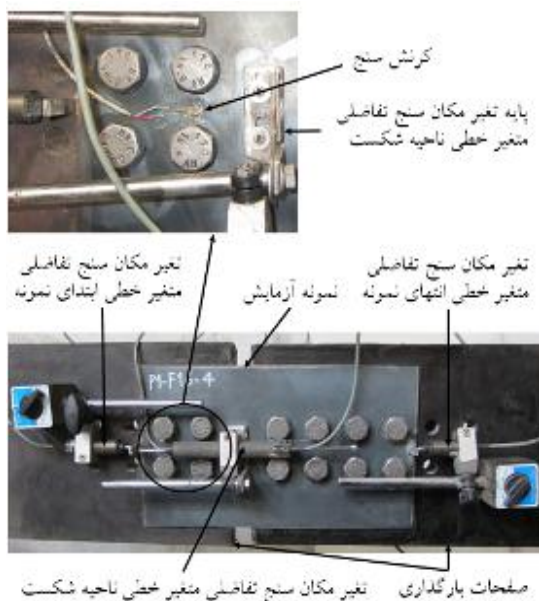
به اتصال دارای عملکرد اتکایی نمونه‌های مشابه؛ ارائه شده است.

عدد در سه ردیف دوتایی می‌باشند. در جدول (۳) مشخصات ابعاد هندسی، نوع اتصال، استحکام نهایی، مد شکست و همچنین نسبت استحکام نهایی اتصال دارای عملکرد اصطکاکی

جدول ۳- جزئیات نمونه‌های آزمایش و نسبت استحکام اصطکاکی به اتکایی مشابه

نام نمونه	نوع عملکرد اتصال	تعداد ردیف پیچ‌ها	طول نمونه (mm)	نوع مصالح فولاد	مد شکست	استحکام نهایی (kN)	نسبت استحکام نمونه اصطکاکی به نمونه مشابه اتکایی
P1-F16-4	اصطکاکی	۲	۳۵۰	ST37	برش قالبی	۲۷۸/۱	۱/۰۴۴
P1-B16-4	اتکایی	۲	۳۵۰	ST37	برش قالبی	۲۶۶/۵	
P1-F16-6	اصطکاکی	۳	۴۵۰	ST37	برش قالبی	۲۱۱/۵	۱/۰۴۳
P1-B16-6	اتکایی	۳	۴۵۰	ST37	مقطع خالص	۲۰۲/۹	
P2-F16-4	اصطکاکی	۲	۳۵۰	ST44	برش قالبی	۱۷۶/۷	۱/۰۶۷
P2-B16-4	اتکایی	۲	۳۵۰	ST44	برش قالبی	۱۶۵/۶	

کرنش سنج‌ها در این ناحیه از این نمونه‌ها، در نظر گرفته شد که در شکل (۳) قابل مشاهده است.



شکل ۳- جزئیات پربایی نمونه آزمایش

شایان ذکر است که برای مقایسه تغییر شکل‌های الاستیک تنها در دو نمونه P1-B16-4 با اتصال دارای عملکرد اتکایی و نمونه P1-F16-4 با اتصال دارای عملکرد اصطکاکی از کرنش‌سنج‌های الاستیک استفاده گردید و در سایر نمونه‌های آزمایش، تغییرات کرنش اندازه‌گیری نشد. با توجه به اینکه بحرانی‌ترین ناحیه، سطح بین اولین ردیف پیچ‌ها در قسمت اتصال است و زودتر از سایر بخش‌های نمونه وارد محدوده

### ۳- نحوه آزمایش

برای اندازه‌گیری تغییر شکل حوزه برش قالبی در راستای اعمال بار، از تغییر مکان‌سنج تفاضلی متغیر خطی (LVDT) استفاده گردید و به فاصله ۳ برابر قطر پیچ از اولین ردیف پیچ‌ها نصب گردید. این مقدار فاصله بر اساس مطالعات مقدماتی با روش اجزای محدود بدست آمد که نتایج آنها حاکی از آن بود که در نمونه‌هایی که با نوع شکست برش قالبی همراه هستند، در این فاصله از اولین ردیف پیچ‌ها، بدلیل توزیع تنش نسبتاً یکنواخت در این سطح ناخالص، تغییر شکل‌ها نیز بصورت تقریباً یکنواخت خواهد بود. این حد فاصل بعنوان نقطه مرجع جهت مقایسه تغییر شکل‌های حوزه برش قالبی برای نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

برای اطلاع از مقدار و زمان لغزش اتصال‌های اصطکاکی، از دو تغییر مکان‌سنج تفاضلی متغیر خطی در محل وسط عرض نمونه‌ها در ابتدا و انتهای صفحه استفاده شد که پایه آنها روی صفحه بارگذاری قرار گرفت. شایان ذکر است که برای مقایسه تغییر شکل‌های الاستیک تنها در دو نمونه P1-B16-4 با اتصال دارای عملکرد اتکایی و نمونه P1-F16-4 با اتصال دارای عملکرد اصطکاکی از کرنش‌سنج‌های الاستیک استفاده گردید و در سایر نمونه‌های آزمایش، تغییرات کرنش اندازه‌گیری نشد. با توجه به اینکه بحرانی‌ترین ناحیه، سطح بین اولین ردیف پیچ‌ها در قسمت اتصال است و زودتر از سایر بخش‌های نمونه وارد محدوده پلاستیک می‌شود [۵ و ۱۹-۱۷]، بنابراین محل نصب

شدن کامل قسمت شکسته شده نمونه‌ها، ادامه یافت. در شکل (۶) مسیر شکست نمونه‌ها قابل مشاهده است. همچنین شکست سطوح کششی و برشی حوزه برش قالبی در آنها نشان داده شده است. تمامی نمونه‌ها در حالت گسیختگی برش قالبی شکسته شده‌اند و تنها در نمونه P1-F16-6 حالت شکست نوع مقطع خالص رخ داده است.

در تمامی نمونه‌هایی که در حالت گسیختگی برش قالبی شکسته‌اند، شکست ابتدا در سطح بین اولین ردیف پیچ‌ها مشاهده شد که به علت ایجاد تنش‌های کششی بزرگتر از استحکام کششی قطعه بوده است که این امر منجر به ایجاد کرنش‌های بزرگتر از کرنش شکست قطعه گردیده است. بنابراین با رسیدن کرنش سطح کششی قطعه به کرنش شکست، شکل پذیری در این سطوح به پایان رسیده و شکست در این سطح شکل خواهد گرفت. سپس با افزایش بارگذاری کششی نمونه‌های آزمایش، تنش برشی در سطوح برشی حوزه برش قالبی که موازی با امتداد بارگذاری می‌باشد، به حد تنش شکست برشی رسیده و در نهایت با تکمیل شکست سطوح برشی حوزه برش قالبی، فرآیند شکست پایان یافت و قسمت اتصال به شکل بلوکی کنده شد.

نمونه‌های P1-F16-6 و P1-B16-6 از لحاظ ابعاد و سوراخکاری کاملاً مشابه هم بودند و تنها اختلافشان در عملکرد اتصال به صورت عملکرد اتصال اصطکاکی و اتکایی است. این دو نمونه با نوع متفاوتی از شکست همراه بودند. بطوریکه روند شروع و گسترش شکست در نمونه با اتصال اصطکاکی بگونه‌ای بود که بعد از شکست سطح بین اولین ردیف پیچ‌ها، مسیر شکست به سمت لبه‌های نمونه در جهت عرضی (در راستای عمود بر امتداد بارگذاری) انتشار یافت. در واقع با ایجاد نیروی پیش‌تندگی در پیچ‌های اتصال نمونه P1-F16-6 و ایجاد عملکرد اصطکاکی در اتصال آن، نوع شکست از گسیختگی برش قالبی به نوع شکست مقطع خالص تغییر یافت.

از طرفی برای هر نمونه آزمایش، یک منحنی بار-جابجایی از نتایج آزمایش بدست آمد که در در منحنی‌های ارائه شده در شکل‌های (۷)، (۸)، و (۹) قابل مشاهده است. از آنجایی که برای هر آزمایش از دو نمونه کاملاً مشابه استفاده شد، و با توجه به اینکه اختلاف بار و جابجایی در دو نمونه در تمامی آزمایشات بسیار اندک بوده است، بنابراین از مقدار میانگین بار و جابجایی آنها استفاده گردید. محور عمودی در این منحنی‌ها نشان دهنده میانگین بار کششی برحسب کیلونیوتن و محور افقی میانگین تغییر طول حوزه برش قالبی در راستای موازی با

پلاستیک می‌شود [۵ و ۱۹-۱۷]، بنابراین محل نصب کرنش سنج‌ها در این ناحیه از این نمونه‌ها، در نظر گرفته شد که در شکل (۳) قابل مشاهده است.

پیچ‌های نمونه‌های صفحه اتصال با اتصال دارای عملکرد اتکایی فقط تا حالت سفت شدن اولیه (بدون ایجاد نیروی پیش‌تندگی) بوسیله آچار معمولی محکم شدند. ولی برای محکم کردن پیچ‌ها برای نمونه‌های با اتصال دارای عملکرد اصطکاکی از روش آچار مدرج (تورک متر) استفاده شد. نیروی پیش‌تندگی بر اساس مقدار بیان شده در جدول ۱۰-۲-۹-۷ مبحث دهم مقررات ملی (و مقدار بیان شده در جدول J3.1M استاندارد AISC2010) برابر ۱۱۴ کیلو نیوتن اعمال گردید. سفت کردن پیچ‌های اصطکاکی با توجه به ضوابط بیان شده در استاندارد مبحث دهم مقررات ملی، و در دو مرحله انجام شد.

برای تعیین مقدار لنگر پیچشی لازم برای ایجاد نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها، با استفاده از دستگاه آزمون اصطکاکی، آزمایشی بر روی مجموعه پیچ، مهره و واشر برای پیچ‌های پرمقاومت با قطر اسمی ۱۶ میلی‌متر انجام گردید که در شکل (۴) نشان داده شده است. نتیجه آزمایش مذکور منحنی نشان داده شده در شکل (۵) است که در آن محور عمودی مقدار بار پیش‌تندگی پیچ‌ها بر حسب کیلونیوتن می‌باشد و محور افقی زاویه چرخش مهره بر حسب درجه (برای مواردی که سفت کردن پیچ‌ها از روش سفت کردن مجدد مهره انجام گردد) و لنگر پیچشی مورد نیاز بر حسب نیوتن متر (برای مواردی که پیچ‌ها بوسیله آچار مدرج سفت شوند) است. بر این اساس برای ایجاد نیروی پیش‌تندگی ۱۱۴ کیلونیوتن، باید لنگر پیچشی برابر ۲۹۶ نیوتن متر (محل تقاطع خطوط خط چین) ایجاد شود.



شکل ۴- دستگاه آزمون اصطکاکی

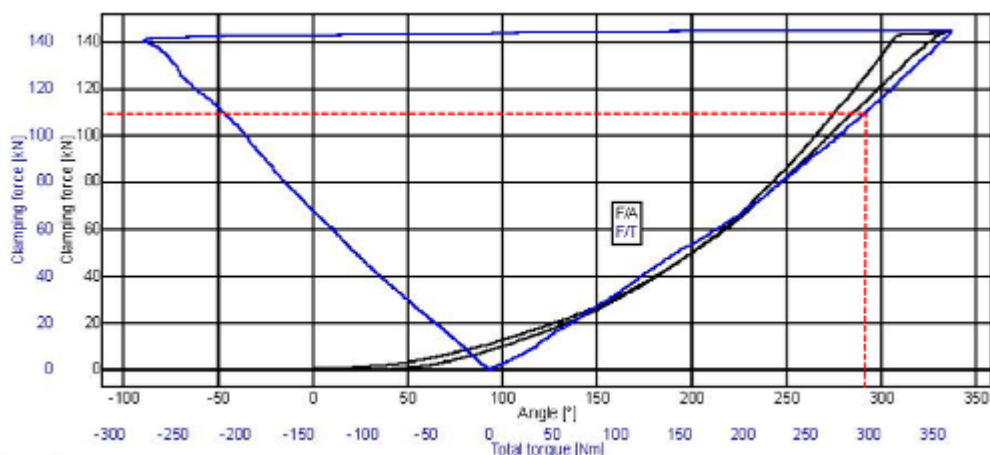
#### ۴- نتایج آزمایش

بارگذاری کششی نمونه‌های صفحه اتصال تا زمان تکمیل شکست کامل (به صورت برش قالبی یا مقطع خالص) و جدا



اتکایی به ترتیب با خطوط ممتد و خط چین ترسیم شده است.

امتداد بارگذاری برحسب میلی متر را نشان می‌دهد، که در آنها پاسخ ظرفیتی نمونه‌های دارای عملکرد اتصال اصطکاکی و



شکل ۵- نمودار نیروی پیش‌تنیدگی - لنگر پیچشی

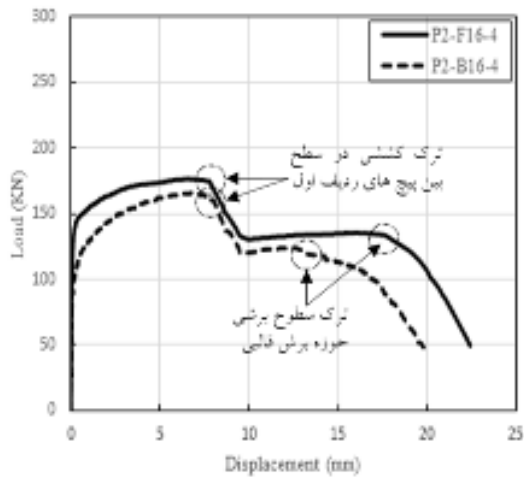


شکل ۶- مسیر شکست نمونه‌های آزمایش

مشاهده شد. این موضوع نشان دهنده اثرات بیشتر نیروی اصطکاکی در مصالح با استحکام پایین‌تر است. همچنین نیروی اصطکاکی همانطور که موجب افزایش سختی اتصال اعضای تیر زبانه شده می‌شود [۹]، می‌تواند بر سختی بخش اتصال اعضای صفحه اتصال نیز اثر بگذارد. بطوریکه در ناحیه تغییرشکل‌های کوچک افزایش شیب در نمودار بار-جابجایی نمونه‌های با اتصال اصطکاکی نسبت به نمونه‌های مشابه با اتصال اتکایی در منحنی‌های ارائه شده در

بطور کلی نیروی اصطکاکی در نمونه‌های صفحات اتصال، همانند اعضای تیر زبانه شده [۹]، موجب افزایش استحکام گسیختگی برش قالبی می‌گردد. بطوریکه نسبت استحکام نهایی نمونه‌های با اتصال اصطکاکی به نمونه‌های مشابه با اتصال اتکایی بین ۱/۰۴۳ الی ۱/۰۶۷ برای گروه‌های مختلف آزمایش بوده است. در نمونه P2-F16-4 که از مصالح نوع ST37-2 بود، بیشترین افزایش در استحکام نهایی نمونه با عملکرد اتصال اصطکاکی نسبت به نمونه مشابه با عملکرد اتصال اتکایی



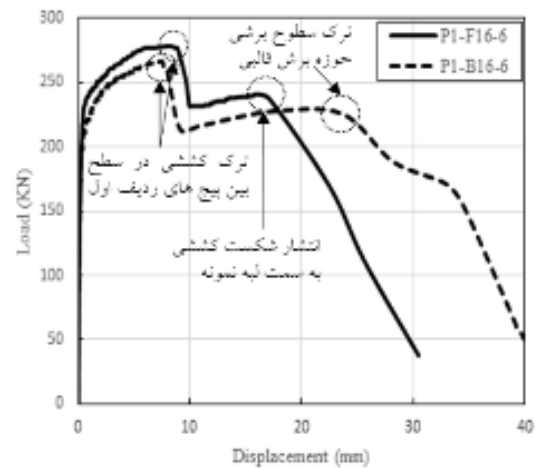


شکل ۹- منحنی های بار-جابجایی نمونه های P2-F16-4 و P2-B16-4

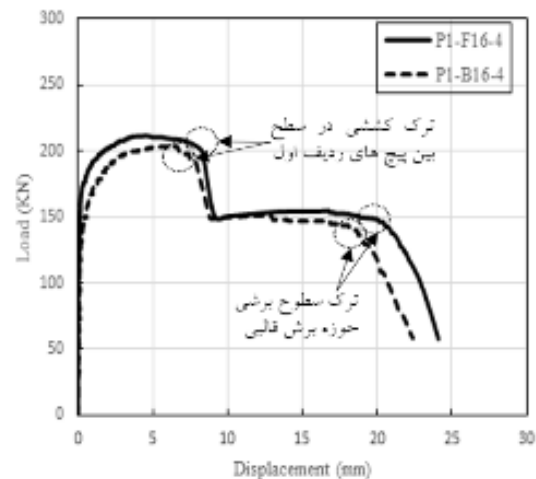
افزایش سختی ناشی از اثرات نیروی اصطکاک، موجب می شود تا در اتصال های اصطکاکی در مقایسه با اتصال های اتکایی در نمونه های مشابه، برای مقدار بار یکسان تغییر شکل های کمتری در کل ناحیه اتصال و بخصوص در نواحی تمرکز تنش، حاصل شود. نواحی تمرکز تنش در نمونه های آزمایش شده، نقاط اطراف سوراخ پیچ ها و سطوح بین آنها هستند. از بین این سطوح، سطح کششی که بین سوراخ های اولین ردیف پیچ های اتصال است، زودتر دچار شکست می شود. با توجه به اینکه شکست سطوح بدلیل پایان قابلیت شکل پذیری مصالح نمونه ها در ناحیه شکست است [۲۰]، بنابراین سطوحی که زودتر می شکنند زودتر به تغییر شکل نهایی خود می رسند و قابلیت شکل پذیری شان را از دست می دهند. این موضوع به معنای وجود تنش های بزرگتر نسبت به سایر سطوح که دچار شکست نشده اند می باشد. نتایج حاصل از کرنش سنج های نصب شده در این ناحیه (سطح بین اولین ردیف پیچ های اتصال) برای دو نمونه P1-F16-4 و P1-B16-4 در منحنی های شکل (۱۰) مبین این موضوع است که در آن محوری عمودی نشان دهنده میانگین بار کششی برحسب کیلونیوتن و محور افقی میانگین کرنش الاستیک در سطح بین اولین ردیف پیچ های اتصال را نشان می دهد.

البته به علت عدم توانایی اندازه گیری کرنش های پلاستیک در کرنش سنج های بکار گرفته شده در آزمایش ها، نمودار بار-کرنش نمونه ها فقط برای محدوده الاستیک بدست آمده است، که در آن محور عمودی نشان دهنده مقدار بار کششی نمونه ها بر حسب کیلونیوتن و محور افقی نشان دهنده کرنش می باشد. منحنی ترسیم شده با خط ممتد نمونه اصطکاکی است

شکل های (۷)، (۸) و (۹) قابل مشاهده است. این افزایش شیب به علت افزایش در سختی اتصال نمونه های با اتصال اصطکاکی می باشد. در واقع در اتصال های با عملکرد اصطکاکی نیروی اصطکاک بین قطعات و وسایل اتصال ایجاد می شود که می تواند موجب جلوگیری از لغزش نمونه ها در راستای بارگذاری شود. این رفتار نیروی اصطکاک را می توان نوعی تکیه گاه اصطکاکی برای نمونه های صفحه اتصال دانست که موجب محدودیت در جابجایی نمونه ها می گردد. این اثرات موجب افزایش سختی ناحیه اتصال برای محدوده تغییر شکل های کوچک نمونه های اصطکاکی شده است.



شکل ۷- منحنی های بار-جابجایی نمونه های P1-F16-6 و P1-B16-6



شکل ۸- منحنی های بار-جابجایی نمونه های P1-F16-4 و P1-B16-4

نتایج آزمایشات نشان داد که نیروی اصطکاک می‌تواند بر رفتار شکست و پاسخ ظرفیتی اتصال‌های پیچی با حالت شکست برش قالبی اثر بگذارد. بطوریکه این نیرو در محدوده تغییر شکل‌های کوچک، سختی اتصال‌ها را افزایش داده و شیب منحنی بار-جابجایی را در این محدوده افزایش داده است.

علاوه بر این، مقدار بیشینه استحکام ناحیه نسبتاً خطی پاسخ ظرفیتی نمونه‌های با اتصال اصطکاک از نمونه‌های با اتصال اتکایی بیشتر است. همچنین با کاهش تمرکز تنش در سوراخ پیچ‌ها و نواحی اطراف آنها در نمونه‌های با اتصال اصطکاک، استحکام نهایی نمونه‌ها نیز افزایش یافته است. بطوریکه در نمونه‌هایی که با مد شکست برش قالبی همراه بوده‌اند، افزایش استحکام در هر دو سطح کششی و برشی حوزه برش قالبی رخ دادند که بطور میانگین نسبت استحکام نهایی نمونه‌های اصطکاک به نمونه‌های مشابه اتکایی برابر ۱/۰۵۱ بوده است.

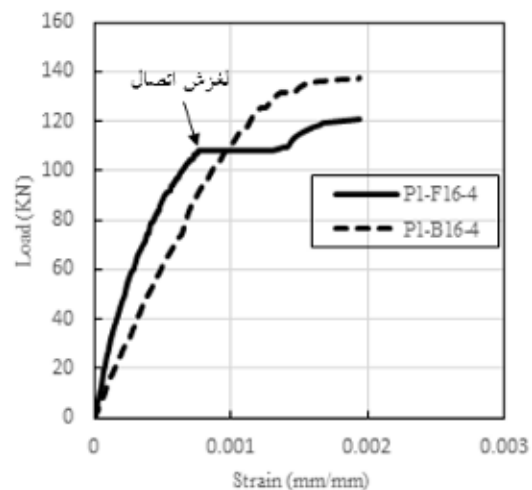
در یکی از نمونه‌های آزمایش تغییر کلی در مد شکست مشاهده شد که این تغییر با توزیع یکنواخت‌تر تنش به جهت اثرات ناشی از نیروی اصطکاک، ارتباط دارد. این بخاطر تقاضای کمتر شکل‌پذیری برای بارهای یکسان در نمونه‌های مشابه با اتصال‌های دارای عملکرد متفاوت است. در واقع برای بارهای یکسان در نمونه‌های با اتصال اصطکاک تغییر شکل‌های کمتری در مقایسه با اتصال اتکایی ایجاد شده است که این پدیده بخاطر ثابت بودن کرنش نهایی مصالح نمونه‌ها است که منجر به شروع شکست سطح کششی در بار بزرگتر می‌شود.

در دو نمونه از مصالح فولادی نوع ST 37-2 با تنش تسلیم و تنش نهایی پایین‌تر نسبت به مصالح فولادی نوع ST 44-2 استفاده شد. نتایج آزمایشات نشان داد که با افزایش خصوصیات مقاومتی مصالح فولادی (با شکل پذیری ثابت)، اثرات نیروی اصطکاک کاهش می‌یابد.

### تقدیر و تشکر

از شرکت آکام فلز و آکام بتن برای در اختیار قرار دادن فضا و امکانات کمکی آزمایشگاهی قدردانی می‌شود. همچنین از شرکت ایران توحید برای در اختیار قرار دادن پیچ‌های مصرفی در آزمایشات تشکر می‌شود. از همکاری‌های مرکز پژوهش متالوژی مواد رازی بخصوص سرپرست آزمایشگاه بررسی خواص مکانیکی فلزات سپاسگزاری می‌گردد.

که دارای شیب بیشتری نسبت به منحنی ترسیم شده با خط‌چین که برای نمونه اتکایی است، می‌باشد. نمونه اصطکاک در بار ۱۰۸ کیلونیوتن، بطور ناگهانی بصورت افقی ادامه مسیر داده است که بعلت لغزش اتصال در این نقطه از استحکام نمونه می‌باشد. این نتیجه، مجدداً بحث ایجاد محدودیت در تغییر شکل نمونه‌ها در محل اتصال‌های اصطکاک را نشان می‌دهد. البته پس از لغزش نمونه‌ها، بعلت از بین نرفتن کامل نیروی اصطکاک، اثرات نیروی اصطکاک با نسبت کمتری باقی می‌ماند. این ادعا از نتایج منحنی‌های بار-جابجایی در شکل (۷) قابل مشاهده است. زیرا اختلاف در شیب منحنی نمونه اصطکاک نسبت به نمونه اتکایی در بارهای بزرگتر از بار معادل لحظه لغزش، نیز وجود دارد. این در حالی است که در نمونه‌های P2-B16-4 و P2-F16-4 که از مصالح با استحکام پایین‌تر ساخته شده بودند، اختلاف به مراتب بیشتری در شیب بخش نسبتاً خطی پاسخ ظرفیتشان رخ داده است که در منحنی‌های شکل (۹) قابل مشاهده است.



شکل ۱۰- منحنی بار-کرنش

### ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق شش گروه نمونه صفحه اتصال با بارگذاری محوری کششی مورد آزمایش قرار گرفتند. متغیرهای آزمایش شامل مشخصات مصالح نمونه‌ها، تعداد پیچ‌ها، و نوع عملکرد اتصال بودند. در مقابل هر نمونه اصطکاک، یک نمونه اتکایی کاملاً مشابه نیز ساخته شد و در شرایط یکسان آزمایش گردید تا بتوان با مقایسه داده‌های آنها تأثیرات نیروی اصطکاک حاصل از پیش تنیدگی پیچ‌ها را مشاهده نمود.



- [۱] دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، (۱۳۹۲)، "مبحث دهم: طرح و اجرای ساختمان های فولادی"، تهران: نشر توسعه ایران.
- [2] AISC, (2010), Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction Chicago.
- [3] CSA-S16-01, (2003), Limit States Design of Steel Structures, Canadian Standards Association.
- [4] Birkemoe, P.C. and Gilmor, M.I. (1978), "Behavior of Bearing-Critical Double-Angle Beam Connections", Engineering Journal, AISC, Vol. 15, pp. 109-115.
- [5] Hardash, S.G. and Bjorhovde, R. (1985), "New Design Criteria for Gusset Plates in Tension", Engineering Journal, AISC, Vol. 22, pp. 77-94.
- [6] Yura, J.A., Birkemoe, P.C. and Ricles, J.M. (1982), "Beam Web Shear Connections: An Experimental Study", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, pp. 311-326.
- [7] Kulak, G.L. and Grondin, G.Y. (2001), "AISC LRFD Rules for Block Shear-A Review," Engineering Journal, AISC, Vol. 38, pp. 199-203.
- [8] Kulak, G.L. and Grondin, G.Y. (2002), "Closure: AISC LRFD Rules for Block Shear-A Review," Engineering Journal, AISC, Vol. 39, pp. 241.
- [9] Fang, C., Lam, A.C.C., Yam, M.C.H. and Seak, K.S. (2013), "Block Shear Strength of Coped Beams with Single-Sided Bolted Connection", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 86, pp. 153-166.
- [10] ASTM A370, (2014), Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, American Society for Testing and Material.
- [11] ASTM G115-10, (2013), Standard Guide for Measuring and Reporting Friction Coefficients, American Society for Testing and Material.
- [12] DIN EN 14399-4, (2006), High-Strength Structural Bolting Assemblies for Preloading-Part 4: System HV-Hexagon Bolt and Nut Assemblies English Version of DIN En, European Committee for Standardization.
- [13] DIN 6914, (2007), High-Strength Hexagon Head Bolts with Large Widths Across Flats for Structural Steel Bolting, International Organization for Standardization.
- [14] DIN EN 14399-6, (2006), High-Strength Structural Bolting Assemblies for Preloading-Part 6: Plain Chamfered Washers, European Committee for Standardization.
- [15] DIN 6915, (2007), Steel Hexagon Nuts with Large Width Across Flats for High-Strength Structural Bolting, International Organization for Standardization.
- [16] DIN 6916, (2007), Round Washers for High-Strength Structural Bolting, International Organization for Standardization.
- [17] Huns, B.B.S., Grondin, G.Y. and Driver, R.G. (2006), "Tension and Shear Block Failure of Bolted Gusset Plates", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 33, pp. 395-408.
- [18] Teh, L.H. and Clements, D.D.A. (2012), "Block Shear Capacity of Bolted Connections in Cold-Reduced Steel Sheets", Journal of Structural Engineering, Vol. 138, pp. 459-467.
- [19] The, L.H. and Yazici, V. (2013), "Unconventional block shear failures of bolted connections in cold-reduced steel sheets", Engineering Structures, Vol. 56, pp. 567-571.
- [20] Wei, F., Fang, C., Yam, M.C.H. and Zhang, Y. (2015), "Fracture Behaviour and Design of Steel Tensile Connections with Staggered Bolt Arrangements", International Journal of Steel Structures, Vol. 15, pp. 863-879.