



اثر اصطکاک دینامیکی سرعت بستن پیچ‌های پر مقاومت بر نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها

علیرضا رضائیان^۱، محمد علی کافی^۲، فرزاد بحری^۳
(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۶/۲۵، تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۲/۰۶)

چکیده

یکی از عوامل اصلی در اتصالات پیچ و مهره‌ای با رفتار اصطکاکی، رسیدن یا تأمین پیش‌تندگی لازم در پیچ‌ها پر مقاومت می‌باشد. این پیش‌تندگی به عوامل متفاوتی از جمله شرایط رزوه پیچ، رفتار موضعی غیر خطی (رزوه، کله، مهره و اجزای اتصال)، نوع روغن و روغن‌کاری یا عدم روغن‌کاری و اثر اصطکاک دینامیکی سرعت بستن پیچ وابسته است. در این مقاله به یکی از این عوامل که اثر دینامیکی سرعت بستن پیچ به وسیله دستگاه‌های اتوماتیک پرداخته شده است. به این امر نمونه مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت که نتایج حاصله عبارتند از ضریب اصطکاک بستن پیچ با حداقل سرعت دستگاه کمتر از ضریب اصطکاک با سرعت متوسط دستگاه بدست آمد. این ضرایب نشان می‌دهد در سرعت‌های پایین بستن پیچ با اعمال پیچش کمتر به پیش‌تندگی‌های بیشتر می‌توان رسید و با سرعت‌های بستن بالا امکان افزایش ضریب اصطکاک، ضریب مهره و در نهایت نرسیدن به پیش‌تندگی لازم وجود دارد.

کلمات کلیدی

اتصالات اصطکاکی، پیچ پر مقاومت، ضریب اصطکاک، پیش‌تندگی، اصطکاک دینامیکی، سرعت بستن پیچ

Dynamic Frictional Effect of Tightening Speed on Clamping Force in High Strength Bolts

A.R. Rezaeian, M.A. Kafi, F. Bahri

ABSTRACT

While working with slip critical connections, one of the most critical factors for high strength bolts is to achieve to a specific value of pretension. This pretension varies depending on several factors such as condition of thread, nonlinear local behavior (head, thread, nut, and other components of the connection), lubrication, and dynamic frictional effect of tightening speed. The current study addresses one of these factors which is the dynamic effect of tightening speed of the bolt performed by automatic machines. In this respect, four samples were carefully examined in laboratory showing that the friction factor of bolt tightening with minimum speed is smaller than the same with average speed. The results indicate that lower tightening speed with smaller torques concludes to a higher pretention, while increasing the tightening speed results in a greater friction factor and nut factor, and consequently, making it difficult to reach to the needed pretention.

KEYWORDS

Slip critical connection, High strength bolt, Friction coefficient, Clamping force, Speed of tightening

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، alireza.rezaeian@kiauo.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، mkafi@semnan.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه سمنان، bahri@students.semnan.ac.ir



$$T = FDK \quad (2)$$

در این رابطه: T : پیچش اعمالی، F نیروی پیش‌تندگی، D قطر اسمی پیچ و K ضریب مهره می‌باشد. در تحقیقات Tan و همکاران در سال ۲۰۰۴ [۹] نشان داده شد به دلیل‌های فوق تا ۳۰ درصد پراکندگی میزان پیش‌تندگی از مقدار مورد انتظار وجود دارد که می‌تواند منجر به عدم دسترسی به پیش‌تندگی مطلوب شود. هدف از انجام این تحقیق بررسی آزمایشگاهی اثر سرعت بستن پیچ به وسیله ابزارهای اتوماتیک بر میزان اصطکاک بستن پیچ و در نهایت تاثیر آن بر پیش‌تندگی است.

۲- بررسی عوامل موثر در بسته شدن و پیش‌تندگی

پیچ‌ها

عملیات بستن وقتی که ارتباط بین پیچش و چرخش برای رسیدن به پیش‌تندگی توضیح داده شود، قابل درک است. قبل از مطالعه روش‌های بستن پیچ لازم است اتفاقاتی که در حین بستن پیچ می‌افتد بیشتر توضیح داده شود.

یکی از مرسوم‌ترین مدل‌هایی که در مورد بستن پیچ مطرح می‌شود، در شکل (۱) قابل مشاهده است که از ۴ قسمت تشکیل شده است. قسمت اول مربوط می‌شود به بخشی از بستن پیچ که سطح کله یا مهره با ورق تماسی ندارد. قسمت دوم مربوط به هم‌تراز شدن و فشرده شدن ورق و پیچ می‌باشد. در قسمت سوم نیروی پیش‌تندگی الاستیک با یک شیب ثابت شروع به افزایش می‌کند. در قسمت چهارم پیچ در ناحیه پس از تسلیم قرار می‌گیرد که این اتفاق می‌تواند در ورق، فیلر، رزوه‌های بدنه پیچ و یا مهره و ناحیه پیش‌تندگی شده باشد.

قسمت غیرخطی شدن اولیه، به علت یک عملیات پیچیده در پیچ برای کشیدن و به هم چسبیدن قطعات اتصال است، که نتیجه آن خمش در اجزای اتصال برای به هم رسیدن و یا خمش در پیچ به دلیل هم‌تراز نبودن کله پیچ می‌باشد. که به اثرات کلی معروف است. همچنین فرایند به هم رسیدن اجزا اتصال اثرات جزئی نیز دارد که شامل تماس

امروزه پیچ و مهره در طراحی و اجرای اتصالات کاربرد بسیاری دارد. اساساً این نوع اتصالات به دو صورت اتکایی و اصطکاکی در آیین‌نامه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳-۱]. اگر بار در اتصال کاملاً توسط اصطکاک منتقل شود این اتصال اصطکاکی نامیده می‌شود این نوع از اتصال مناسب موقعیت‌هایی است که امکان بارهای تناوبی وجود داشته باشد. مخصوصاً در طرح‌های مقاوم در برابر زلزله استفاده از اتصالات اصطکاکی الزامیست [۲]. آیین‌نامه‌ها و استانداردهای پیچ، مهره و واشر از جمله ASTM، ISO و DIN فقط استفاده از پیچ‌های پرمقاومت را در این نوع از اتصالات مجاز می‌دانند و ضوابط زیادی برای کنترل مشخصات هندسی، مکانیکی و پوشش آن‌ها دارند [۶-۴].

در سال ۱۹۹۳ Kulak و Birkemoe [۷] در دانشگاه آلبرتا با انجام آزمایش‌هایی نشان دادند عواملی همچون شرایط رزوه پیچ، رفتار موضعی غیر خطی اتصال، رابطه کرنش المان‌های در تماس اتصال، نوع روغن و روغن‌کاری در میزان اصطکاک و در نتیجه در مقدار پیش‌تندگی موثر است. اصطکاک باعث می‌شود حدود ۱۰ درصد انرژی پیچشی اعمالی به پیش‌تندگی تبدیل شود و ۴۰ درصد انرژی پیچشی توسط اصطکاک زیر کله پیچ با ورق اتصال و ۵۰ درصد توسط اصطکاک قسمت رزوه شده اتلاف شود.

Shigley در سال ۲۰۰۱ [۸] رابطه کلی برای برقراری ارتباط بین پیچش اعمالی و پیش‌تندگی براساس اصطکاک زیر کله و اصطکاک رزوه به صورت رابطه (۱) ارائه شد.

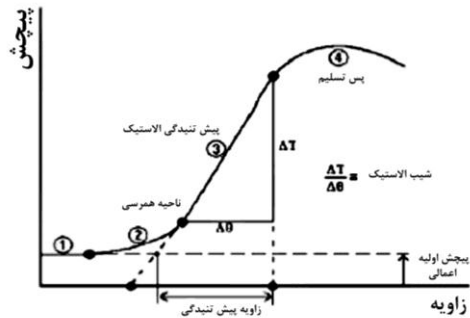
$$T_{in} = F_p \left(\frac{P}{2\pi} + \frac{\mu_t r_t}{\cos \beta} + \mu_n r_n \right) \quad (1)$$

در این رابطه: T_{in} پیچش اعمالی به پیچ، F_p نیروی پیش‌تندگی، P گام رزوه پیچ، μ_t ضریب اصطکاک رزوه، μ_n ضریب اصطکاک زیر کله و واشر (مربوط به قسمتی از کله یا مهره که بر روی واشر می‌چرخد) و β زاویه گام رزوه پیچ می‌باشد.

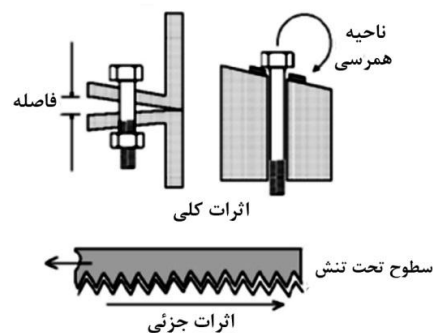
از رابطه (۱) ضریبی به نام ضریب مهره (K) استخراج می‌شود که مجموعی از ضرایب اصطکاک است.



قسمت‌های تحت تنش شامل: سطوح آبکاری شده، رنگ شده، پوشش شده و رزوه شده می‌باشد (شکل (۲)).

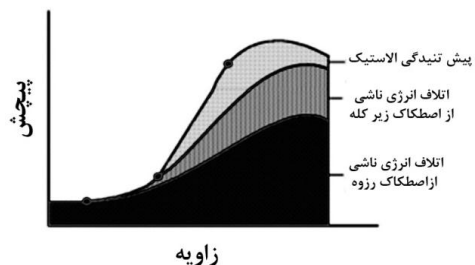


شکل (۱): چهار منطقه عملیات بستن پیچ [۱۰]



شکل (۲): اثر رسیدن قطعات اتصال [۱۰]

سطح زیر نمودار پیچش-زاویه بیانگر انرژی پیچشی اعمالی به پیچ برای بستن آن است. همانطور که در شکل (۳) مشخص است حدود ۱۰ درصد از سطح زیر نمودار صرف پیش‌تنیدگی الاستیک پیچ و اجزای اتصال شده است. انرژی پیچشی اعمالی در محدوده الاستیک همانطور که در نمودار پیچش-زاویه مشاهده شد مقدار مساوی با سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان دارد.



شکل (۳): نمودار پیچش-زاویه و نحوه توزیع انرژی پیچشی [۱۰]

۳- روش تحقیق

در این تحقیق مطالعه آزمایشگاهی اثر سرعت بسته شدن پیچ‌ها بر میزان اصطکاک و پیش‌تنیدگی انجام شد. در این آزمایش‌ها ۲ پیچ با سرعت ۳۰ درجه بر ثانیه و ۲ پیچ با سرعت ۵ درجه بر ثانیه، توسط دستگاه و نیروسنج آزمایش پیش‌تنیدگی و اصطکاک بسته شدند که در ادامه به توضیح آن پرداخته می‌شود و نتایج هردو آزمایش با سرعت یکسان به صورت میانگین ارائه می‌شود.

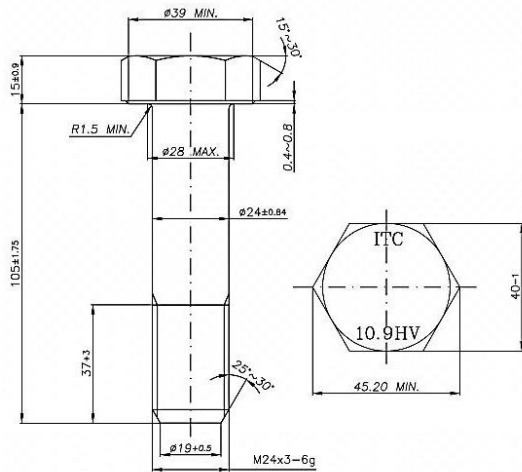
در این مقاله به تعداد ۴ عدد پیچ یکسان از نظر مشخصات مکانیکی و هندسی با ۲ سرعت پیچش اعمال شد و میزان پیچش، زاویه، ضرایب اصطکاک، ضریب مهره و پیش‌تنیدگی بدست آمد که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

۴- پیکربندی آزمایش

این آزمایش‌ها توسط یک نیروسنج ویژه تحقیقاتی و یک دستگاه اعمال انرژی پیچشی با توانایی ثبت پیچش-کشش که مقطع آن در شکل (۴) آمده انجام شد که برای اندازه‌گیری همزمان پیچش رزوه، T_G و نیروی پیش‌تنیدگی، F_p ، استفاده می‌شود. این دستگاه برای اندازه‌گیری پیچش کلی، T_A ، اعمالی جهت تشخیص مقدار پیچش اصطکاک قسمت رزوه شده و رزوه نشده نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نتیجه تست نشان داده شده در شکل (۵) مهره ابتدا به پیچ بسته شده است و پیچش اصطکاک رزوه برابر است با پیچش اعمالی تا تماس قسمت کله پیچ با سطح اتکا ایجاد شود. با تماس سطح زیر کله پیچش مربوط به اصطکاک زیر کله اندازه‌گیری می‌شود که برابر با تفاضل بین پیچش کلی اعمالی و اصطکاک قسمت رزوه شده است. اصطکاک زیر کله مربوط به قسمتی از کله یا مهره می‌باشد که بر روی واشر می‌چرخد که در این آزمایش‌ها کله ثابت بوده و مهره توسط دستگاه بسته می‌شود.

با توجه به ابزارهای اتوماتیک بستن پیچ که با نیروهای باد یا برق کار می‌کنند. سرعت‌های متفاوت و در خیلی از موارد کنترل نشده آن‌ها می‌تواند در میزان پیش‌تنیدگی موثر

بوده و حتی این امکان وجود دارد که در شرایط خاص پیش‌تندگی به حداقل مقدار مطلوب آیین‌نامه‌ها نیز نرسد.



شکل (۶): مشخصات هندسی نمونه‌ها

جدول (۱): مشخصات هندسی و مکانیکی نمونه‌ها

سختی (راکول C)	طول (mm)	قطر (mm)	سطح تنش (mm ²)	بار کششی (kN)	بار آزمایشی (kN)
۳۷	۱۰۵	۲۴	۳۵۳	۴۲۲/۶	۳۷۶/۱۱۴

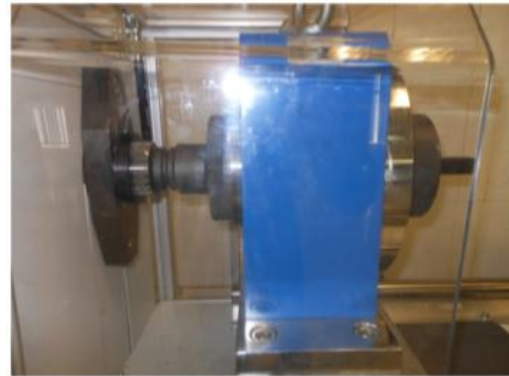
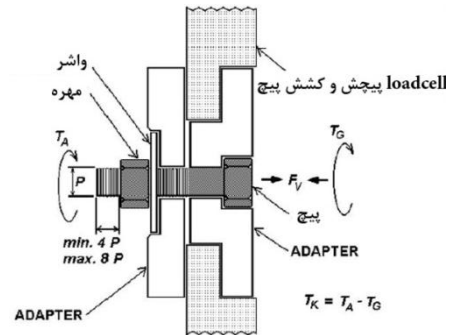
جدول (۲): حدود سختی پیچ‌های رده ۱۰/۹ و ASTM-A490

[۴]

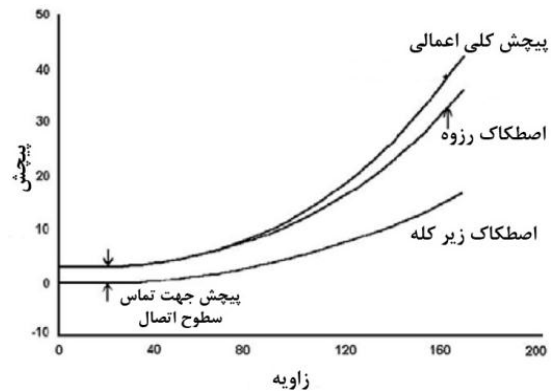
قطر پیچ (mm)		طول		برینل		راکول C	
max	min	max	min	max	min	max	min
M۱۲ تا M۲۴		کمتر از ۲D		۳۵۲	۳۱۱	۳۹	۳۳
Inclusive		۲D و بلندتر		۳۵۲	...	۳۹	...
بیش از M۲۴ تا M۳۶		کمتر از ۳D		۳۵۲	۳۱۱	۳۹	۳۳
Inclusive		۳D و بلندتر		۳۵۲	...	۳۹	...

۶- نتایج آزمایش‌ها

نتایج آزمایش‌ها به صورت جدول (۴) ارائه شده است که این نتایج در هر ردیف میانگین دو آزمایش انجام شده در هر سرعت می‌باشد. منحنی شکل (۷) مقدار پیش‌تندگی (kN) در مقابل زاویه (Degree)، منحنی شکل (۸) مقدار پیش‌تندگی (kN) در مقابل پیچش اعمالی (N.m) و منحنی شکل (۹) مقدار پیچش اعمالی (N.m) در مقابل زاویه (Degree) می‌باشد.



شکل (۴): وسیله اندازه‌گیری پیچش-کشش



شکل (۵): تشخیص نیروهای اصطکاکی [۱۰]

۵- نمونه‌های آزمایش

در این مقاله مطالعه آزمایشگاهی بر روی ۴ نمونه پیچ M۲۴ رده 10.9 HV با پوشش زینک فلیک و مشخصات مکانیکی جدول (۱) انجام شد. مشخصات هندسی نمونه‌ها در شکل (۶) آورده شده است. این مشخصات با ضوابط استاندارد های ASTM-A490 و DIN [۴-۶] مطابق جداول (۲) و (۳) مطابقت دارد.

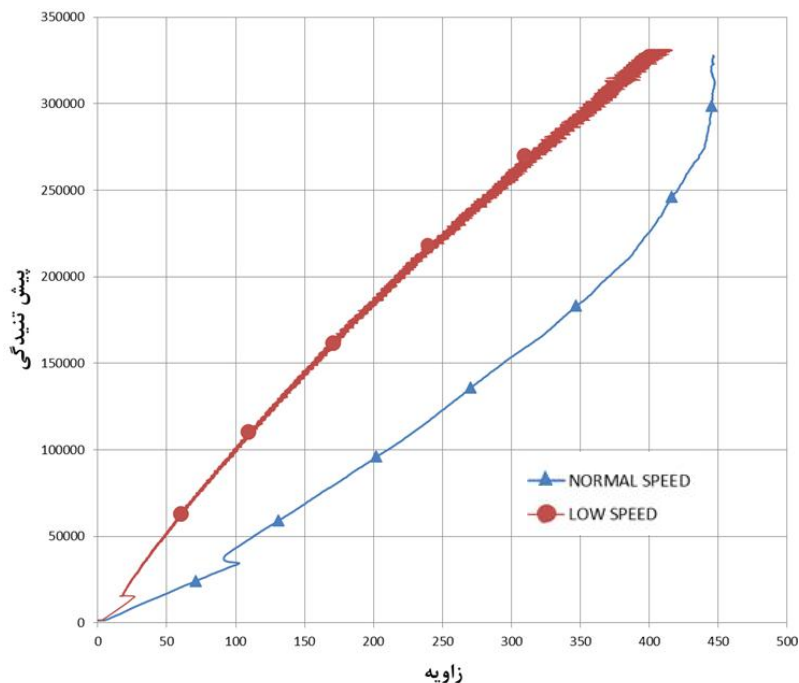


جدول (۳): مشخصات مکانیکی، ASTM-A490 [۴]

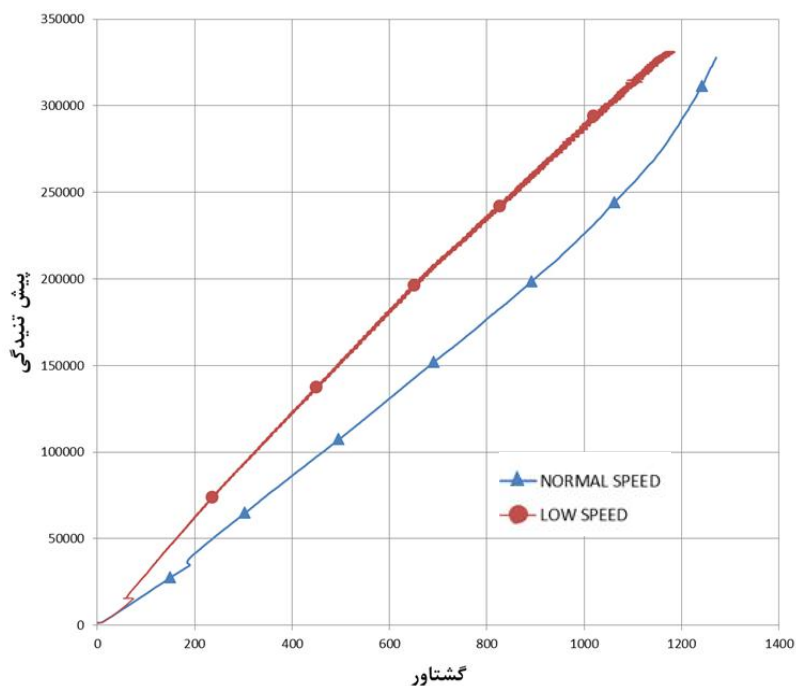
بار گواہ جایگزین (kN)	بار گواہ (kN)	بار کششی (kN)		سطح تنش (mm ²)	قطر اسمی پیچ و گام رزوه (mm)
		Max	Min		
روش مقاومت تسلیم ستون ۶	روش اندازه گیری طول ستون ۵	ستون ۴	ستون ۳	ستون ۲	ستون ۱
۷۹/۲	۷۰	۱۰۳	۸۷/۷	۸۴/۳	M۱۲×۱/۷۵
۱۴۸	۱۳۰	۱۹۰	۱۶۳	۱۵۷	M۱۶×۲
۲۳۰	۲۰۲	۲۹۶	۲۵۵	۲۴۵	M۲۰×۲/۵
۲۸۵	۲۵۱	۳۶۶	۳۱۵	۳۰۳	M۲۲×۲/۵
۳۳۲	۲۹۲	۴۲۷	۳۶۷	۳۵۳	M۲۴×۳
۴۲۱	۳۸۱	۵۵۵	۴۷۷	۴۵۹	M۲۷×۳
۵۲۷	۴۶۶	۶۷۹	۵۸۳	۵۶۱	M۳۰×۳/۵
۷۶۸	۶۷۸	۹۸۹	۸۵۰	۸۱۷	M۳۶×۴

جدول (۴): نتایج آزمایش‌های اصطکاک بر روی نمونه‌ها

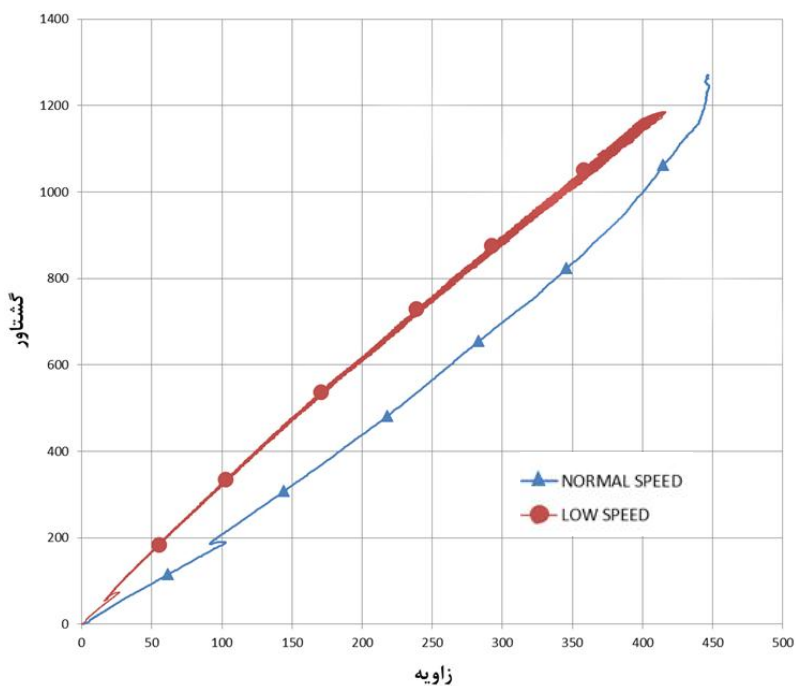
ماکزیمم گشتاور پیچشی (N.m)	ماکزیمم پیش‌تندگی (kN)	گشتاور پیچشی مورد نیاز (N.m)	پیش‌تندگی مطلوب (kN)	K (nut factor)	سرعت (Degree per sec)
۱۱۸۵/۹۱۸	۳۳۱/۳	۱۱۳۹/۱۲	۳۲۵	۰/۰۹۸	۵
۱۲۷۰/۶۲۶	۳۲۷/۸	۱۲۶۵	۳۲۵	۰/۱۳۶	۳۰



شکل (۷): نمودار پیش‌تندگی-زاویه



شکل (۸): نمودار پیش‌تندی-پیچش



شکل (۹): نمودار پیش-زاویه

۷- نتایج

دینامیکی به میزان ۳۸ درصد و کاهش پیش‌تندی مورد انتظار می‌شود.

- با اعمال سرعت یکنواخت‌تر بوسیله دستگاه‌های اتوماتیک بستن پیچ با اعمال پیچش کمتر به

- اعمال سرعت پیچش بیشتر در هنگام بستن پیچ و سریع‌تر بستن آن موجب افزایش اصطکاک اثر



[6] DIN 6916, "Standard Specification for High-Strength Head Bolts", Deutsches Institut für Normung (German Institute for Standardization).

[7] Kulak, G.L. and Birkemoe, P.C. (1993), "Field Studies of Bolt Pretension", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 25, No. 1-2, pp. 95-106.

[8] Shigley, J.E. and Mischke, C.R. (2001), "Mechanical Engineering Design", 7th Edition, McGraw-Hill.

[9] Tan, W. (2004), "Installation Behavior of ASTM F1852 Twist-Off Type Tension Control Bolts", Department of Civil Engineering, University of Toronto.

[10] Shoberg, R.S., "Engineering Fundamentals of Threaded Fastener Design and Analysis", PCB Load and Torque Company Publication.

[۱۱] "نشریه ۲۶۴ سازمان برنامه و بودجه طراحی اتصالات ساختمان‌های فولادی"، ۱۳۸۲.

پیش‌تنیدگی مناسب می‌توان رسید و انرژی کمتری توسط اصطکاک تلف می‌شود.

- با توجه به اینکه اشاره شد شیب الاستیک نمودار پیچش-پیش‌تنیدگی نشان دهنده ضریب مهره می‌باشد (شکل (۸)). که اعمال سرعت کمتر در هنگام بستن ضریب مهره بالاتر و در نتیجه با اعمال پیچش کمتر به پیش‌تنیدگی بیشتر می‌توان رسید.
- همانطور که در نمودار شکل (۷) مشخص است با اعمال سرعت‌های کمتر و یکنواخت‌تر پیچ با زاویه پیچش کمتری به نقطه تسلیم می‌رسد.
- در مقایسه ضرایب مهره بدست آمده با مقدارهای ارائه شده در نشریه ۲۶۴ طراحی اتصالات [۱۱]، مقدار بدست آمده در سرعت پایین اعمال پیچش کمتر از پیچ‌گریس کاری شده و مقدار بدست آمده در سرعت اعمال پیچش بیشتر، نزدیک به خمیر مولبیدین سولفات می‌باشد.

۸- سپاس و قدردانی

در این تحقیق آزمایش‌ها در آزمایشگاه شرکت ایران توحید انجام شد. سپاس و قدردانی ویژه از پرسنل محترم دفتر مرکزی و کارخانه این شرکت به جهت همکاری‌های بیدریغ‌شان و به‌خصوص مدیریت عامل محترم این شرکت جناب آقای مهندس مرعشی به جهت فراهم نمودن بستر مناسب برای انجام این تحقیقات.

۹- مراجع

[1] "AISC 360-10 Specification for Structural Steel Buildings", American Institute of Steel Construction.

[۲] "مبحث دهم مقررات ملی ساختمان"، ۱۳۸۷.

[3] RCSC. (2004), "Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts. Research Council on Structural Connections", Available online at www.boltcouncil.org.

[4] ASTM A490M-04. (2004), "Standard Specification for High-Strength Steel Bolts, Classes 10.9 and 10.9.3, for Structural Steel Joints", American Society for Testing and Materials.

[5] ISO 898-1. (2009), "Standard Specification for Mechanical Properties of Fastener", International Standard Organization.