

Experimental and Numerical Investigation of Failure Patterns of High-Strength Bolts in Conventional Tensile Test Methods

Ali Zardkouhi ^a, Javad Katebi ^{b*}, Yousef Hosseinzadeh ^c

^a. Ms.C of Eartquake Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

^b. *Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

^c. Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

<https://doi.org/10.22034/ispdrc.2024.2029732.1105>

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Bolt Failure Pattern,
Thread Stripping,
High-Strength Bolt,
Bolt Tensile Test,
Tensile Strength.

The tensile strength of high-strength bolts is determined by two test methods. In the first method, the tensile strength of the bolt is determined using a nut. The second method uses the device introduced in ISO instead of the nut. In the tested bolts, two failure patterns are observed, the bolt thread stripping and fracture in the threaded length of bolt. In this research, in addition to the experiment, the elastic-plastic numerical simulation of the bolt failure pattern was also performed in Finite element software. The results of the study show that the frequency of the thread stripping failure pattern is 4% in the bolt tension test with the ISO device and 90% in the bolt tension test with the nut. In addition, the tensile strength obtained from the bolt tension test with a nut is lower than the bolt tension test method with the ISO device. According to the frequency of the failure pattern in each method, the bolt tension test with the ISO device leads to the determination of the tensile strength of the bolt material, and the bolt tension test with the nut leads to the evaluation of the tensile strength of the bolt and nut assembly. Due to the compatibility of bolt and nut performance in steel structure, this research suggests performing tensile test of bolt and nut, in addition to other tests.

Received:

20 May 2024

Received in revised form:

01 June 2024

Accepted:

08 June 2024

pp. 15-27

Corresponding author (Email: jkatebi@tabrizu.ac.ir)

Extended Abstract

Introduction

bolts are one of the most important components of a bolted connections, and its failure will be more destructive than the failure of other components, and even the failure caused by the weakness of the bolts in the connections can be progressive. Therefore, the importance of bolt inspection reveals the need for more accuracy and study in this field. In case of inaccuracy in the selection of bolts, contrary to expectation, a lower level of safety will be achieved. Therefore, not paying attention to any part of the inspection process of bolts will cause errors in the test results, and ultimately this will cause wrong approval to be issued for the use of rejected bolts in the structure. The tensile strength test of bolts is done in two common ways in laboratories. In this study, while performing both common methods of testing the tensile strength of Bolts, the frequency of failure patterns in each method was investigated. In this regard, the previous related studies and the statistics and frequency of each pattern were examined in the test methods. Numerical simulation was also performed for both tensile test methods.

Methodology

Prerequisite tests for testing the tensile strength of bolts

In this study, before performing the tensile test, Decarbonization test (ISO 898-1, 2013), Charpy impact test at -20 degrees Celsius (EN ISO 148-1, 2016), Proof load on the nut (ISO 898-2, 2012), was conducted on both specimens. The reason for conducting these three tests was that the results of the experimental failure pattern belonged to the bolts according to the standard, and possibly the results of the non-standard bolts should not be relied upon, and thus the health of the bolt and nut threads was examined as much as possible. In all three mentioned tests, all the specimens confirmed the standard conditions.

Common tests to determine the tensile strength of bolts

The tensile strength of high-strength Bolts is determined by two test methods. At first method, the tensile test is doing with bolt and nut and but by second method, ISO 898-1 (2013) device fastened instead of nut on the bolt. On the Bolts fracture, observed two

damage Pattern, the thread striping and fracture in the threaded length of bolt (Fig 1).



Fig. 1. Failure patterns: (a) Tensile test by nut, (b) Tensile test by ISO 898-1 device

Results and discussion

To evaluate the frequency of the failure pattern in the two test methods, the statistics of the failure pattern in the two test methods were collected and analyzed from several laboratories (fig 2).

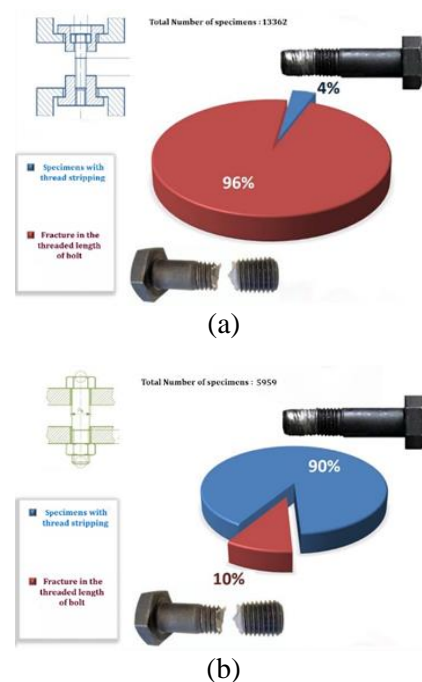


Fig. 2. Percentage of failure pattern in tensile test: (a) By ISO 898-1 device tensile test, (b) By nut

Conclusion

In this research, according to the results obtained from the laboratory investigation, the frequency of the failure pattern and the numerical simulation, we obtain the following important results:

- Bolt performance in joints is more conformity with bolt-to-nut tensile testing.
- The tensile strength of the bolt with nut is lower than the tensile strength of the bolt with the ISO 898-1 device, and it will not be correct to refer to the number obtained from the tensile test with the ISO 898-1 device as the tensile strength of the bolt and nut set.
- Pre-tensioning or over-tightening will cause the thread stripping and the strength of the bolt to decrease significantly. This defect does not have any visible symptoms and therefore it can be frequent.

- The shortness of the bolt length can reduce the tensile strength of the bolt and nut and thread stripping when pre-tensioning the bolt.
- Based on the results of this research, the tensile test of bolt with nut is suggested, in addition to other test methods.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



انجمن علمی دانشدگان غیر عامل ایران

مجله شهر ایمن

شاپا الکترونیکی: 2676-556X

Journal Homepage: www.ispdrc.ir



مقاله پژوهشی

بررسی تجربی و عددی الگوهای خرابی پیچ‌های پرمقاومت در روش‌های متداول آزمایش کشش

علی زردکوهی - کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

جواد کاتبی* - دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

یوسف حسین‌زاده - استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

<https://doi.org/10.22034/ispdrc.2024.2029732.1105>

چکیده

استحکام کششی پیچ‌های پرمقاومت، با دو شیوه آزمایش تعیین می‌شود. در روش اول، مقاومت کششی پیچ با استفاده از مهره، تعیین می‌گردد. اما در روش دوم، به‌جای مهره از ابزار معرفی شده در استاندارد ایزو استفاده می‌شود. در پیچ‌های مورد آزمایش، دو الگوی خرابی مشاهده می‌شود، لهیدگی رزوه‌ی پیچ و گسیختگی پیچ از ناحیه کاهش‌یافته رزوه. در این تحقیق علاوه بر انجام آزمایش، شبیه‌سازی عددی الاستیک - پلاستیک الگوی خرابی پیچ‌ها، در نرم‌افزار اجزاء محدود، نیز انجام شده است. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد، فراوانی الگوی خرابی لهیدگی رزوه، در آزمایش کشش پیچ با ابزار ایزو، چهار درصد و در آزمایش کشش پیچ با مهره ۹۰ درصد است. در ضمن استحکام کششی حاصل از آزمایش کشش پیچ با مهره، کمتر از روش آزمایش کشش پیچ با ابزار ایزو است. با توجه به درصد فراوانی الگوی خرابی در هر روش آزمایش معلوم می‌گردد، آزمایش کشش پیچ با ابزار ایزو منجر به تعیین استحکام کششی مصالح پیچ و آزمایش کشش پیچ با مهره، منجر به ارزیابی استحکام کششی مجموعه پیچ و مهره می‌گردد. به دلیل مطابقت عملکرد پیچ و مهره در طراحی و اجرای سازه‌های فولادی، این تحقیق انجام آزمایش کشش پیچ با مهره را علاوه بر انجام سایر آزمایش‌ها پیشنهاد می‌نماید.

اطلاعات مقاله

واژگان کلیدی:

الگوی خرابی پیچ، لهیدگی رزوه، پیچ پرمقاومت، آزمایش کشش پیچ، استحکام کششی.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۲/۳۱

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۳/۱۲

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۳/۱۹

صص. ۲۷-۱۵

* نویسنده مسئول

رایانامه: jkatebi@tabrizu.ac.ir

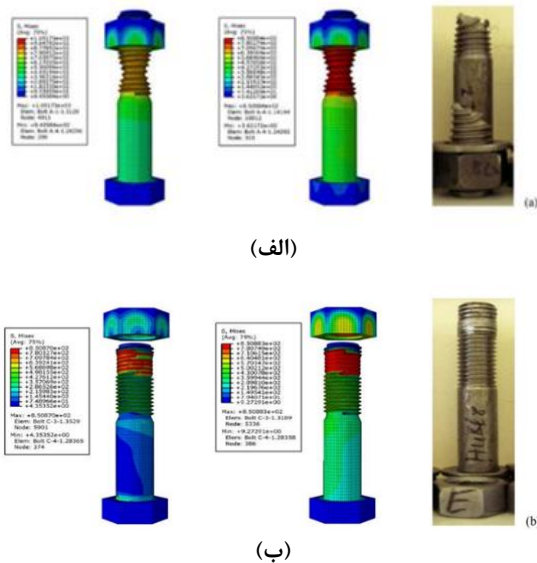
مقدمه

سرعت نصب و مونتاژ بالا، عدم نیاز به کارگر ماهر، کم هزینه بودن عملیات نصب اتصالات پیچی و رفتار شکل‌پذیر، از مزایای اتصالات پیچی است (کازمی و شریفی، ۱۳۹۴). با توجه به مزایای ذکر شده، سازه‌های با اتصالات پیچی روز به روز در حال افزایش می‌باشد و مزیت اقتصادی ساختمان‌های بلند، و ارجحیت ساختمان‌های بلند با اتصالات پیچی، دلیل افزایش تعداد ساختمان‌های با ارتفاع زیاد با اتصالات پیچی گردیده‌است. پیچ‌ها از مهم‌ترین اجزای یک اتصال پیچی می‌باشند و خرابی آن بیشتر از خرابی سایر اجزاء مخرب خواهد بود. حتی بسیاری از عیوب و مشکلات مشاهده شده در سازه‌ها نیز از اتصالات پیچی بکار رفته در آنها به وجود می‌آید (Sakai, 2008). با این حال اتصالات پیچی یکی از پرکاربردترین اتصالات در ابزارها و دستگاه‌های مکانیکی در جوامع مدرن می‌باشد (Younis, 2012).

علاوه بر مواد و عناصر تشکیل دهنده پیچ‌ها، موارد دیگر از جمله شکل رزوه‌ها، ابعاد، زوایا، درجه لقی بین رزوه‌های خارجی پیچ و رزوه‌های داخلی مهره‌ها و عملیات حرارتی حین فرم‌دهی و پس از فرم‌دهی، میزان ازدست دادن کربن حین عملیات حرارتی در سطح خارجی رزوه (ISO 898-1, 2013) و آیت‌های فراوان دیگر مانند سرعت شکل‌دهی رزوه‌ها (داودی و سلیمانی، ۱۳۹۸)، نیز در استحکام پیچ‌ها موثرند.

در مطالعه ای Hu و همکاران (2015)، بر روی پیچ‌های رده مقاومتی ۸/۸، چند عامل را در الگوی خرابی پیچ‌ها محتمل می‌داند، از جمله درجه لقی و اجرای پوشش گالوانیزه روی پیچ و مهره که ممکن است موجب تضعیف رزوه داخلی یا خارجی گردد. طبق اصول طراحی، لهیدگی رزوه‌ها به معنای کاهش مقاومت کششی پیچ‌های سازه‌ای در شرایط آتش‌سوزی یا غیرآتش‌سوزی است که در آزمایش‌های تجربی Kirby (1995)، Hu و همکاران (2007) به اثبات رسیده است. اما در این تحقیق Hu و همکاران (2007) مهم‌ترین عامل، در الگوی خرابی پیچ را در درجه لقی پیچ و مهره عنوان کرده و با شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی این فرضیه را اثبات نمودند. نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایش، به اتفاق نشان دادند که شکل خرابی پیچ به درجه لقی پیچ مرتبط می‌باشد. همچنین Hu و همکاران (2015) برای هر دو محدوده لقی و رفتار مواد دو خطی و سه خطی شبیه‌سازی را تکرار نمودند. خرابی پیچ‌های سازه‌ای در شبیه‌سازی عددی جهت مقایسه با مکانیزم‌های شکست پیچ، در آزمایش تجربی در شکل ۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که مکانیزم‌های شکست ایجاد شده از تجزیه و تحلیل عددی با آزمایش‌های تجربی، از جمله گلوبی شدن و لهیدگی رزوه برای پیچ‌های سازه‌ای سازگار است. با این

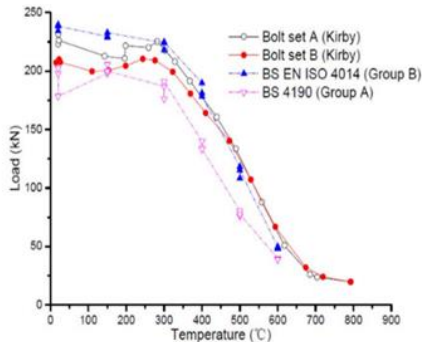
حال، مطابق شکل ۱ بدلیل عدم معرفی معیارهای گسیختگی، شبیه‌سازی عددی قادر به نمایش رفتار گسیختگی و تعیین محل آن نمی‌باشد.



شکل ۱. الگوهای خرابی پیچ: (الف) شکست پیچ از ناحیه رزوه شده، (ب) لهیدگی رزوه (Hu و همکاران، ۲۰۱۵)

در مطالعه‌ای Hu و همکاران (2016)، شکل شکست پیچ‌های پرمقاومت رده ۸/۸ را بررسی نمودند. آزمایش‌های تجربی نشان داد، عملکرد مکانیکی پیچ‌ها تحت بار کششی و خرابی پیچ‌های سازه‌ای به یکی از دو روش شناخته شده است: لهیدگی رزوه‌ها و گسیختگی از ناحیه کاهش‌یافته رزوه‌دار ساقه پیچ، که احتمالاً به دلیل درجه لقی بین رزوه‌های داخلی و خارجی، اتفاق می‌افتد. در ادامه با شبیه‌سازی عددی آزمایش کشش، با توجه به درجه لقی بین پیچ و مهره انجام‌دادند و مشخص شد که درجه لقی بین رزوه‌های داخلی و خارجی پیچ و مهره به عنوان یک عامل حیاتی، بر الگوهای شکست پیچ‌های با مقاومت بالا، در کشش، موثر است. این مطالعه ثابت‌کرد که شکل خرابی پیچ در ظرفیت استحکام کششی پیچ موثر می‌باشد و در این آزمایش‌ها پیچ‌های ۸/۸ که با مهره رده بالاتر آزمایش می‌شوند به احتمال زیاد از ناحیه رزوه شده پیچ قطع می‌شوند و در پیچ‌های ۸/۸ با مهره گالوانیزه خرابی به شکل لهیدگی رزوه اتفاق می‌افتد و شبیه‌سازی عددی قادر است الگوی خرابی را شبیه‌سازی نماید. مطابق استانداردهای پیچ‌ها، ضخامت انواع پوشش‌های محافظتی بین ۳۵ تا ۵۳ میکرون برای اجرای پوشش ضخامت پیچ را به خود اختصاص می‌دهد و این امر نیز در مقاومت و الگوی شکست پیچ‌ها تاثیرگذار خواهد بود. پیچ‌های انتخاب شده از کلاس مقاومتی ۸/۸ و مهره با دو کلاس مقاومتی ۸ و ۱۰ و دو کلاس لقی و دو نوع پوشش آبکاری روی و سیاه‌کاری شده بودند. این آزمایش نشان داد اگر پیچ با مهره رده بالاتر آزمایش شود،

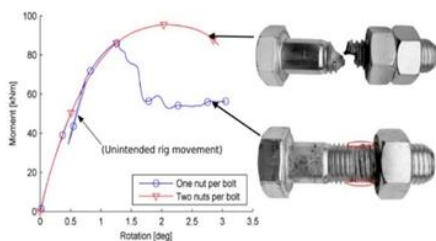
مقاومت پیچ‌ها در دماهای بالا را نشان می‌دهد. این پیچ‌ها در دماهای بین ۲۰ تا ۶۰۰ درجه سلسیوس تحت آزمایش کشش قرار گرفتند و در تمامی پیچ‌ها، الگوی خرابی، لهیدگی رزوه مشاهده شد. با این که آزمایش در دمای محیط نشان داد که، استفاده از مهره یک رده مقاومتی بالاتر از پیچ، باعث می‌شود، خرابی پیچ، بصورت گسیختگی پیچ در ناحیه کاهش یافته رزوه اتفاق بیافتد. اما این آزمایش نشان داد، مهره با رده بالاتر از پیچ، همیشه نمی‌تواند مانع خرابی پیچ، از نوع لهیدگی رزوه گردد.



شکل ۲. مقاومت نهایی پیچ‌ها در دماهای مختلف (*Hu*) و *Shen*، (۲۰۱۶)

در یک مطالعه آزمایشگاهی، *Saedi* و *Ketabdari* (۲۰۱۹) خواص مکانیکی پیچ‌های رده ۸/۸ و ۱۰/۹ را بعد از قرار دادن در دماهای بالا مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که، هنگام گرم شدن نمونه‌ها تا دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد برای هر دو رده ۸/۸ و ۱۰/۹، مقاومت نهایی و پسماند پیچ‌ها به سرعت کاهش می‌یابد.

در مطالعه‌ای دیگر *Grimsmo* و همکاران (۲۰۱۵) آزمایش‌هایی شبه استاتیکی، بر روی پیچ‌های نمره ۱۶ از رده مقاومتی ۸/۸ که با یک و دومهره در یک اتصال بسته شده بودند، به صورت اعمال لنگر و در نواحی مختلف دوران عضو انجام دادند. مطابق شکل ۳، نتایج آزمایش نشان داد که وقتی پیچ با یک مهره آزمایش می‌گردد، خرابی پیچ به شکل لهیدگی رزوه اتفاق می‌افتد، و آزمایش با دو مهره، موجب گسیختگی پیچ می‌گردد و استفاده از دو مهره، جهت جلوگیری از لهیدگی رزوه باعث افزایش ظرفیت خمشی و دورانی اتصال می‌گردد.



شکل ۳. نمودار لنگر-دوران گره اتصال تیر به ستون با ورق انتهایی (*Grimsmo* و همکاران، ۲۰۱۵)

خرابی از نوع شکست پیچ از ناحیه کاهش یافته رزوه خواهد بود. بیش از بیست نوع فلز و آلیاژ ممکن است برای پوشش دادن رزوه‌های پیچ و مهره با ضخامت‌های مختلف استفاده شود، که رایج‌ترین فرآیندهای پوشش عبارتند از: روکش روی، گالوانیزه، پوشش زاین و اکسیداسیون سیاه (*Hu* و همکاران، ۲۰۱۶).

با توجه به مکانیزم‌های شکست پیچ‌ها، تحت کشش محوری، پیچ و مهره‌های با استحکام بالا را می‌توان به دو گروه پیچ‌های *HR* و *HV* دسته‌بندی کرد. در آزمایش تعیین استحکام کششی، پیچ‌های *HR* با مکانیزم شکست پیچ از ساقه و در پیچ‌های *HV* با مکانیزم لهیدگی رزوه گسیخته می‌شوند (*Plaitano* و همکاران، ۲۰۲۲).

در یک مطالعه تجربی و عددی، *Grimsmo* و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که، لهیدگی رزوه نوعی خرابی نامطلوب به حساب می‌آید چون لهیدگی رزوه، در محدوده تغییر شکل کوچک‌تری در مقایسه با گسیختگی پیچ در ناحیه کاهش یافته رزوه، اتفاق می‌افتد. علاوه بر آن لهیدگی زود هنگام رزوه، ممکن است مشکل ساز باشد چون هنگام پیش تنیده کردن پیچ‌ها هم اتفاق می‌افتد و چون یک خرابی بدون علائم ظاهری است، حتی بعد از لهیده‌گی رزوه، پیچ در داخل سوراخ و روی اتصال باقی می‌ماند و ما متوجه از بین رفتن و خرابی پیچ، نمی‌شویم. چند عامل موجب لهیدگی رزوه می‌تواند باشد. از جمله طول درگیر رزوه‌های مهره و پیچ و رده مقاومتی پیچ و مهره. عاملی که در مطالعات، زیاد به آن پرداخته نشده است، محل قرارگیری مهره در طول رزوه شده پیچ است. آن‌ها در این مطالعه آزمایش‌هایی بر روی پیچ نمره ۱۶ انجام دادند. که در آن‌ها محل قرارگیری مهره رو طول رزوه شده تفاوت داشتند. برخی از نمونه‌ها با قراردادن مهره در نزدیکی قسمت بدون رزوه پیچ (ساقه)، منجر به لهیدگی رزوه شد، در حالی که قراردادن مهره به اندازه کافی دور از قسمت بدون رزوه پیچ، منجر به شکستگی پیچ شد. در این تحقیق جهت بررسی بیشتر الگوی شکست پیچ شبیه‌سازی عددی نیز انجام شد. شبیه‌سازی آشکار نمود، در موردی که مهره در نزدیکی رزوه قرار داشت، تحت تاثیر طول درگیر رزوه داخلی مهره و رزوه خارجی پیچ، گلوبی شدن - تغییر شکل به صورت افزایش طول و کاهش سطح مقطع، اتفاق می‌افتد. به نظر می‌رسد که این اثر گلوبی شدن در هر دو حالت آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی، به لهیدگی رزوه کمک می‌کند.

در مورد عملکرد مجموعه پیچ و مهره‌ها پس قرارگیری در شرایط آتش سوزی و دماهای بالا تحقیقات نسبتاً زیادی در سال‌های اخیر انجام شده است. *Hu* و همکاران (۲۰۱۶) تعدادی پیچ را در دمای بالا آزمایش مورد آزمایش کشش قرار دادند. مطابق شکل ۲، نتایج بدست آمده از این مطالعه، کاهش شدید

افزایش یابد. لذا جهت حصول اطمینان از مورد تایید بودن پیچ‌ها، چند خصوصیت که با اهمیت‌تر به نظر می‌رسد، آزمایش‌شدند. بنابراین ابتدا قبل از انجام آزمایش کشش آزمایش‌های دکربوره (*ISO 898-1*, ۲۰۱۳)، آزمون ضربه شاری در ۲۰- درجه سلسیوس (*EN ISO 148-1*, ۲۰۱۶)، بارگواه بر روی مهره (*ISO 898-2*, ۲۰۱۲)، هرکدام روی دو نمونه تکرار گردید. دلیل انجام این سه آزمایش این بود که نتایج الگوی شکست تجربی، متعلق به پیچ‌هایی مطابق با استاندارد بوده باشد، و احيانا بر نتایج پیچ‌های غیر استاندارد استناد نگردد و لذا بدین ترتیب تا حد امکان، سلامت روزه‌های پیچ و مهره مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین در این مطالعه دو روش آزمایش در آزمایشگاه جهاد تحقیقات سهند و همچنین شبیه‌سازی عددی برای هر دو روش آزمایش کشش جهت تصدیق حالات خرابی نیز، انجام گردید. همچنین در این تحقیق با جمع‌آوری آمار الگوهای خرابی پیچ‌ها، از آزمایشگاه‌های مقاومت مصالح دانشگاه تبریز، تحلیل صنعت سهند، جهاد تحقیقات سهند، دانشگاه صنعتی امیرکبیر و آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان آذربایجان شرقی، الگوهای خرابی مشاهده شده بر اساس نوع آزمایش طبقه بندی و ارزیابی گردید و همچنین برای هر روش انتخابی آزمایش کشش بر روی تعدادی نمونه پیچ مورد آزمایش قرار گرفت.

نکاتی که این پژوهش را نسبت به تحقیقات پیشین و استاندارد *ISO 898-1* (۲۰۱۳) متمایز می‌کند، این است که در تحقیق حاضر با توجه به نتایج حاصل از مطالعه تجربی و آماری، توصیه می‌شود که برای تعیین مقاومت کششی مجموعه پیچ و مهره در کنار سایر روش‌های رایج آزمایش، از آزمون کشش پیچ با مهره نیز استفاده گردد که مطابقت و سازگاری بیشتری در عملکرد مجموعه پیچ و مهره در طراحی و اجرای سازه‌های فولادی دارد. درحالی‌که استاندارد *ISO 898-1* (۲۰۱۳) برای تعیین استحکام کششی مجموعه پیچ و مهره، فقط یک روش آزمایش را با ابزار مخصوصی که در آن معرفی شده است، توصیه می‌کند که در بخش مطالعه آماری این پژوهش، ثابت می‌شود که اکتفا کردن به تنهایی به روش ایزو موجب صدور تأییدیه غلط و استفاده از پیچ‌های معیوب در سازه می‌شود.

آزمایش‌های پیش‌نیاز آزمایش کششی

آزمایش دکربورگی مطابق (*ISO 898-1*, ۲۰۱۳)

دکربورگی فرایندی است که در حین عملیات حرارتی سطح خارجی، پیچ کربن از دست داده و سختی کافی و لازم را نخواهد داشت. برای کنترل این نقص آزمایش دکربوره انجام می‌شود. بنابراین، بر روی دو نمونه مطابق شکل ۴، آزمایش دکربورگی به روش میکروسکوپی انجام گردید. در هیچ یک از نمونه‌ها مطابق شکل ۵، دکربورگی مشاهده نشد.

همچنین در مطالعه *Plaitano* و همکاران (۲۰۲۲) حالات خرابی پیچ‌های پرمقاومت را تحت بارگذاری ترکیبی کششی و خمشی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌های تجربی، دو حالت شکست مختلف را نشان دادند: لهیدگی رزوه تحت کشش خالص و شکستگی تنه پیچ تحت کشش و خمش ترکیبی.

معمولا در طراحی اتصالات پیچ و مهره‌ای به دلیل ظرفیت تغییر شکل کمتر پیچ‌ها نسبت به صفحات متصل به آن‌ها، از خرابی پیچ‌ها در معرض کشش صرف‌نظر می‌شود. این یکی از دلایلی است که مطالعات اندکی بر روی رفتار شکست کششی پیچ‌ها انجام شده است. با این حال، مطالعه تجربی رفتار خرابی پیچ‌ها برای تحلیل المان محدود پیشرفته به ویژه مربوط به ظرفیت تغییر شکل و حالات شکست اتصالات پیچ و مهره‌ای ضروری است. (*Yang* و همکاران، ۲۰۲۱).

دلیل اخیر اهمیت بازرسی پیچ‌ها لزوم دقت و مطالعه بیشتر در این حوزه را بیشتر نمایان می‌کند. بازرسی، تفسیر و نتایج آزمایش پیچ‌های ساختمانی بسیار مهم و حیاتی بوده و استحکام سازه‌های فلزی با اتصالات پیچ و مهره‌ای به آن وابسته است. واضح است که هرچه سازه فولادی مقاوم‌تر، اعضای آن سنگین‌تر خواهد بود و در صورت عدم دقت در انتخاب پیچ، برخلاف انتظار، سطح ایمنی پایین‌تری حاصل خواهد شد. پیچ‌هایی که حداقل استانداردها را احراز می‌نمایند، با کوچک‌ترین خطا در نحوه نمونه‌برداری و یا روش‌های آزمایش، از مرز محدوده عدم پذیرش عبور کرده و وارد محدوده پذیرش خواهند شد. بنابراین عدم توجه به هر قسمت از مراحل بازرسی پیچ‌ها موجب بروز خطا در نتایج آزمایش خواهد شد و نهایتاً این امر موجب صدور تأییدیه نابجا برای استفاده از پیچ‌های مردود در سازه خواهد شد. در بین آزمایش‌های متنوع پیچ، آزمایش کشش پیچ از متداول‌ترین آنها است، که به دو شیوه معمول در آزمایشگاه‌ها انجام می‌گردد و دو الگوی خرابی در پیچ‌ها مشاهده می‌گردد.

در این تحقیق بررسی آزمایشگاهی بر روی چند نمونه پیچ نمره ۲۰ از رده مقاومتی ۱۰/۹ و مهره رده مقاومتی ۱۰ به دو روش آزمایش کشش پیچ مطابق ابزار *ISO 898-1* (۲۰۱۳) و آزمایش کشش پیچ با مهره، انجام شده است. تهیه پیچ و مهره از یک تولیدکننده، توسط استاندارد *RCSC* (۲۰۱۴) توصیه شده است. طبق استاندارد *ISO 3269* (۲۰۱۹) برای کارهای مهم تعداد نمونه زیادی لازم است آزمایش شود، که مستلزم آزمایش نمونه‌های بیشتر و هزینه بیشتری است. به شرطی می‌توان نسبت پیچ و مهره‌های بازرسی شده را کاهش داد که محموله پیچ و مهره از منابع شناخته‌شده با کنترل‌های مداوم خط تولید و محصول تولیدی، تهیه شده باشد و اگر نمی‌توان محموله را یکنواخت فرض کرد یا توسط بیش از یک تولیدکننده عرضه شده است، ممکن است لازم باشد نسبت پیچ و مهره‌های بازرسی شده،



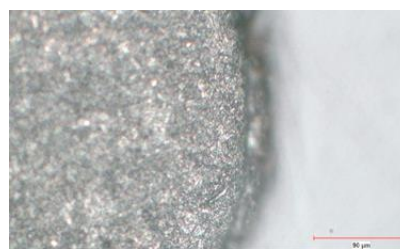
شکل ۸. انجام آزمایش و شکست نمونه‌های ۲۰- درجه در آزمون ضربه شاری



شکل ۴. نمونه‌سازی آزمایش دکربورگی

جدول ۱. نتایج آزمون ضربه شاری روی دو نمونه

نمونه	دما (°C)	نتیجه (Joule)	حد	
			استاندارد (Joule)	نتیجه
M 20x80_1	-20	57/77	27	قبول
M 20x80_2	-20	57/77	27	قبول



شکل ۵. تصویر میکروسکوپی آزمایش دکربورگی

آزمایش بار گواه بر روی مهره

در این آزمون مهره مورد نظر با یک پیچ از رده مقاومتی بالاتر بر روی دستگاه کشش بسته می‌شود و سپس تا حد نیروی تعیین شده در استاندارد ISO 898-2 (۲۰۱۳)، به مدت ۱۵ ثانیه تحت تنش قرار می‌گیرد و سپس باربرداری می‌شود. پس از باربرداری، مهره باید با کمک دست از پیچ باز شود یا اگر امکان باز کردن با دست به راحتی میسر نباشد، باز کردن مهره از پیچ با کمک آچار تا نیم دور مجاز بوده و بعد از نیم دور باید با دست به راحتی باز شود ISO 898-2 (۲۰۱۳).

در مطالعه حاضر، دو نمونه مهره ۲۰ نیز شرایط آزمون بارگواه را نیز مطابق شکل ۹ احراز نمودند که نتایج آن‌ها در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۹. انجام آزمون بار گواه بر روی مهره

جدول ۲. نتایج آزمون بارگواه روی دو نمونه مهره

نمونه	سایز	بار گواه (N)	رده نمونه	تعداد	نتیجه
مهره	۲۰	۲۵۹۷۰۰	۱۰	۲	قبول

آزمون ضربه شاری مطابق (EN ISO 148-1 ۲۰۱۶)

با انجام نمونه‌سازی مطابق شکل ۶ از دو پیچ نمره ۲۰، کاهش دمای نمونه‌ها تا ۲۰- درجه سلسیوس که مطابق شکل ۷ و انجام آزمایش ضربه شاری (شکل ۸)، نمونه‌های شیاردار شکسته شده و میزان جذب انرژی آنها اندازه‌گیری گردید هر قدر میزان جذب انرژی برای شکست نمونه بیشتر باشد به معنی شکل‌پذیری بیشتر مصالحی است که نمونه از آن تهیه شده است. در این آزمایش مشخص شد، پیچ‌های مورد نظر دارای شکل‌پذیری استاندارد و نسبتاً خوبی هستند. نتایج بدست آمده از آزمون ضربه شاری بر روی دو نمونه در جدول ۱ ارائه شده است.



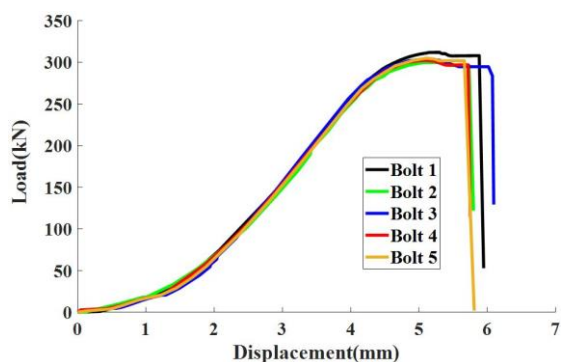
شکل ۶. نمونه‌های ساخته شده برای آزمون ضربه شاری



شکل ۷. کاهش دمای نمونه‌ها به ۲۰- درجه سانتی‌گراد برای آزمون ضربه شاری

جدول ۳. نتایج آزمایش کشش پنج نمونه پیچ با ابزار ایزو

ردیف	اندازه (mm)	حداقل نیروی کششی (kN)		رده	نتیجه
		دستگاه	استاندارد		
۱	۲۰×۸۰	۳۱۲/۰۰	۲۵۵	۱۰/۹	قبول
۲	۲۰×۸۰	۲۹۹/۸۰	۲۵۵	۱۰/۹	قبول
۳	۲۰×۸۰	۳۰۳/۱۰	۲۵۵	۱۰/۹	قبول
۴	۲۰×۸۰	۳۰۲/۳۰	۲۵۵	۱۰/۹	قبول
۵	۲۰×۸۰	۳۰۵/۰۰	۲۵۵	۱۰/۹	قبول



شکل ۱۳. منحنی بار-جابجایی مجموعه پیچ و مهره در روش ایزو

آزمایش کشش پیچ با مهره

مطابق شکل ۱۴، پنج نمونه پیچ نمره ۲۰ در آزمون کشش با مهره آزمایش شدند. در این روش نیز همه نمونه‌ها شرط استحکام کششی بیش از ۲۵۵ کیلونیوتن را مطابق استاندارد (*ISO 898-1*، ۲۰۱۳)، احراز نمودند و طبق شکل ۱۵، الگوی خرابی همه نمونه‌ها به شکل لهیدگی رزوه می‌باشد. این آزمایش تا حد امکان مشابه، وضعیت عملکرد واقعی پیچ در اتصال می‌باشد. که خلاصه نتایج این آزمایش در شکل ۱۶ و جدول شماره ۴ بطور خلاصه، ارائه گردیده است.



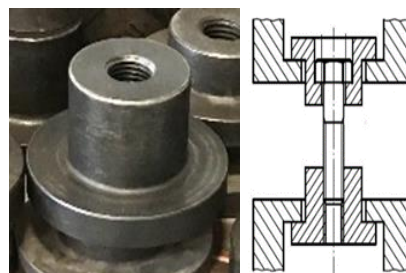
شکل ۱۴. انجام آزمایش کشش با پیچ با مهره

آزمایش‌های تعیین استحکام کششی پیچ

آزمایش کشش پیچ مطابق (*ISO 898-1* ۲۰۱۳)

در روش اول، مطابق شکل ۱۰، کشش پیچ با ابزاری که استاندارد *ISO 898-1* (۲۰۱۳) معرفی نموده است، که با ابعاد و شکل خاص و سختی ۴۵ راکول ساخته می‌شود و جهت انجام آزمایش کشش پیچ به جای مهره به قسمت رزوه‌شده پیچ بسته شده و تحت کشش قرار می‌گیرد.

در این مطالعه پنج نمونه پیچ نمره ۲۰ در آزمون کشش به وسیله ابزار معرفی شده در استاندارد *ISO 898-1* (۲۰۱۳) مطابق شکل ۱۱، آزمایش شدند. تمامی نمونه‌ها شرط استحکام کششی بیش از ۲۵۵ کیلونیوتن را مطابق استاندارد *ISO 898-1* (۲۰۱۳)، احراز نمودند. مطابق شکل ۱۲، الگوی خرابی همه نمونه‌ها از نوع گسیختگی پیچ از ناحیه کاهش یافته رزوه پیچ بود که در شکل ۱۳ و جدول ۳ نتایج آن ارائه شده است.



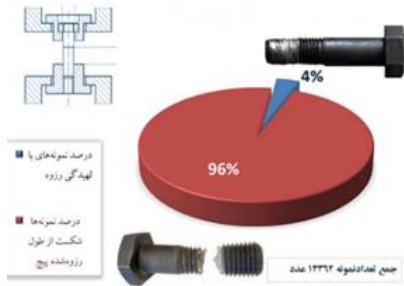
شکل ۱۰. ابزار آزمایش کشش پیچ به روش *ISO 898-1* (۲۰۱۳)



شکل ۱۱. انجام آزمایش کشش پیچ به روش ایزو



شکل ۱۲. حالات خرابی پیچ نمونه پیچ نمره ۲۰ در آزمایش استحکام کششی با ابزار ایزو



شکل ۱۷. درصد الگوی شکست در آزمایش کشش پیچ با ابزار *ISO 898-1* (۲۰۱۳)



شکل ۱۸. درصد الگوی شکست در آزمایش کشش پیچ با مهره

مدل اجزا محدود

نحوه مدل‌سازی آزمایش کشش پیچ با مهره

در مطالعه حاضر مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار *Abaqus* (۲۰۲۲) در حوزه الاستوپلاستیک و تحلیل استاتیکی برای پیچ نمره ۲۰ رده مقاومتی ۱۰/۹ به طول ۸۰ میلی‌متر انجام گردید.

مشخصات مکانیکی مصالح پیچ و مهره به صورت غیر خطی برابر نمودار بدست آمده از آزمایش یکی از پیچ‌های ۱۰/۹ نمره ۲۰ به شرح زیر تعریف شده است:

مدول الاستیسیته ۲۱۰۰۰۰ مگاپاسکال و تنش شروع محدوده پلاستیک ۱۰۰۰ مگاپاسکال نظیر کرنش ۰/۰۵۷ و مقدار مقاومت نهایی ۱۱۵۰ مگاپاسکال، نظیر کرنش ۰/۰۷۸ تعیین گردید.

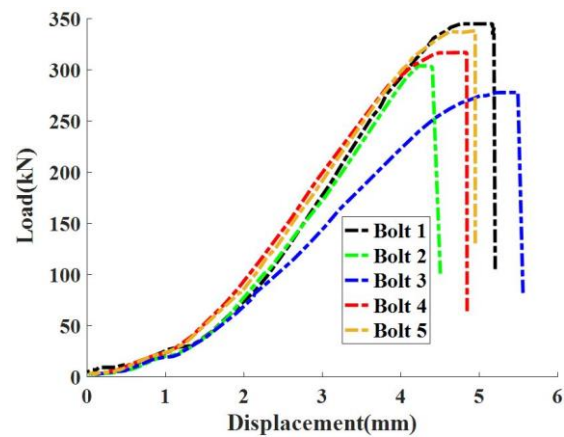
محل برخورد قطعات از نوع سطح به سطح، سطح داخلی رزوه مهره و سطح خارجی رزوه پیچ برای جلوگیری از نفوذ سطوح به همدیگر، از نوع *Hard contact* و ضریب اصطکاک بین سطوح ۰/۲ تعیین شده است.

مطابق شکل ۱۹، در مرحله شرایط مرزی، بارگذاری از نوع جابجایی کنترل بوده و نیز محل برخورد واقعی واشر با انتهای شش وجهی پیچ به عنوان تکیه‌گاه گیردار کامل و قسمت روبروی آن بر روی مهره محل تماس واشر با مهره محل اعمال جابجایی تعریف شده است.

همچنین پیچ و مهره با استفاده از المان ۱۰ گرهی، چهار وجهی یا *Tetrahedron* و مرتبه دوم، مش‌بندی شدند. این المان با نام اختصاری *C3D10* شناخته می‌شود که در کتابخانه المان‌ها در نرم‌افزار آباکوس موجود می‌باشد (شکل ۲۰).



شکل ۱۵. حالات خرابی پنج نمونه پیچ نمره ۲۰ در آزمایش استحکام کششی با مهره



شکل ۱۶. منحنی بار-جابجایی مجموعه پیچ و مهره در روش آزمون کشش توسط مهره

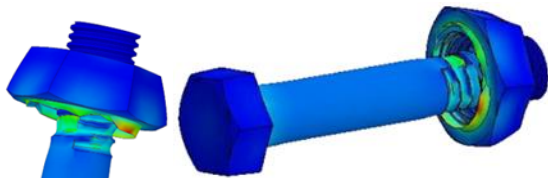
جدول ۴. نتایج آزمایش استحکام کشش پنج نمونه پیچ نمره ۲۰ با مهره

ردیف	اندازه (mm)	حداقل نیروی کششی (kN)		رده	نتیجه
		دستگاه	استاندارد		
۱	۲۰×۸۰	۳۴۵/۰۰	۲۵۵	۱۰/۹	قبول
۲	۲۰×۸۰	۳۰۴/۰۰	۲۵۵	۱۰/۹	قبول
۳	۲۰×۸۰	۲۷۸/۰۰	۲۵۵	۱۰/۹	قبول
۴	۲۰×۸۰	۳۱۷/۰۰	۲۵۵	۱۰/۹	قبول
۵	۲۰×۸۰	۳۳۸/۰۰	۲۵۵	۱۰/۹	قبول

جمع‌آوری آمار فراوانی الگوهای خرابی از آزمایشگاه‌های مختلف

برای بررسی فراوانی الگوی شکست در دو روش آزمایش، آمار الگوی شکست در هر دو روش آزمایش، از چندین آزمایشگاه جمع‌آوری و بررسی گردید. نتایج آمار الگوی شکست، به همراه، نتایج آزمایش انجام شده در این تحقیق، مطابق شکل‌های ۱۷ و ۱۸ می‌باشد.

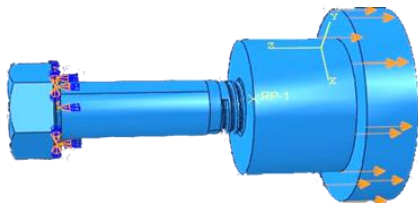
شکل‌یافته آن به شکل منشور ناقص است. این تغییر شکل در شکل ۲۲ نیز قابل مشاهده است. افزایش غیر یکنواخت قطر به دلیل گلوئی شدن پیچ و لهیده شدن رزوه‌ها در قسمت سمت چپ پیچ (شکل ۲۲) جفت رزوه‌های درگیر مهره و پیچ در سمت چپ شکل ۲۲ بر روی هم سوار شده‌اند و موجب افزایش قطر نیمه سمت چپ مهره شده‌اند. ولی باریک شدگی پیچ هنوز به سمت راست نرسیده و رزوه‌های سمت راست مهره و پیچ با این که تغییر شکل داده‌اند ولی هنوز کنار هم قرار دارند.



شکل ۲۲. لهیدگی رزوه‌ها و افزایش قطر مهره

نحوه مدل‌سازی آزمایش پیچ با ابزار معرفی شده در استاندارد *ISO 898-1 (۲۰۱۳)*

نحوه مدل‌سازی و مشخصات پیچ در این روش آزمایش، مشابه بخش قبلی است، با این تفاوت که ابزار ایزو از نوع صلب در نظر گرفته شده و از نظر ابعاد رزوه داخلی مشابه مهره در نظر گرفته شده است و طبق شکل ۲۴ مانند روش آزمایش پیچ با مهره، تگه‌گاه گیردار روی پیچ و جابجایی بر روی ابزار ایزو اعمال گردید.

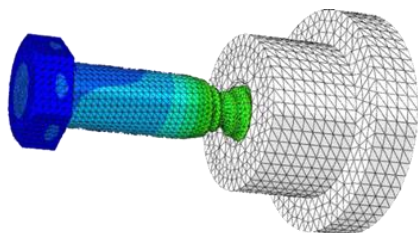


شکل ۲۴. شرایط تکیه‌گاهی و اعمال جابجایی پیچ آزمایش شده با ابزار استاندارد *ISO 898-1 (۲۰۱۳)*

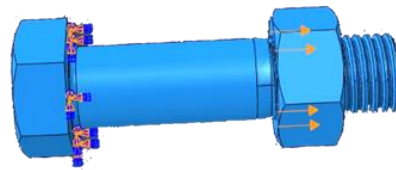
صحت‌سنجی حالات خرابی پیچ در آزمایش تعیین

استحکام کششی پیچ به روش ایزو

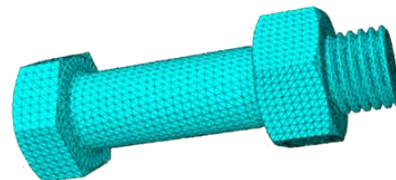
مطابق شکل ۲۳، تغییر شکل حاصل شده در پیچ، محل گسیختگی پیچ در ناحیه کاهش‌یافته رزوه و ناحیه گلوئی شده قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲۵. مقطع پیچ و ابزار استاندارد *ISO 898-1 (۲۰۱۳)* بعد از اعمال جابجایی



شکل ۱۹. شرایط تکیه‌گاهی و اعمال جابجایی پیچ آزمایش شده با مهره

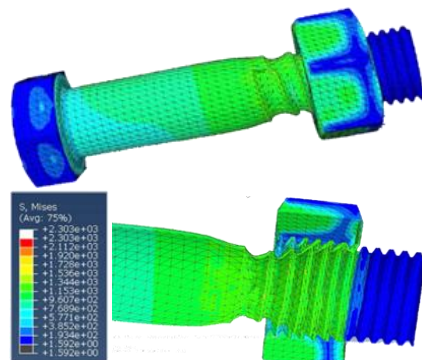


شکل ۲۰. مش‌بندی پیچ و مهره

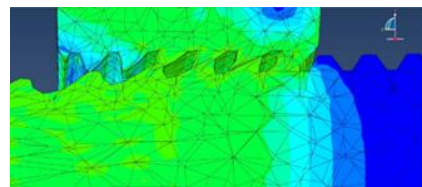
صحت‌سنجی حالات خرابی پیچ در آزمایش تعیین

استحکام کششی پیچ توسط مهره

مطابق شکل‌های ۲۱ و ۲۲ لهیدگی رزوه و گلوئی شدن پیچ در شبیه‌سازی آزمایش تعیین استحکام کششی پیچ با مهره قابل مشاهده است.



شکل ۲۱. تغییر شکل پیچ و مهره پس از اعمال جابجایی



شکل ۲۲. لهیدگی رزوه‌ها پس از اعمال جابجایی

مدل‌سازی عددی خطی با نرم‌افزار *Solidworks (۲۰۲۰)*، الگوی خرابی را در کشش پیچ با مهره، با بزرگنمایی ۱۰ برابری تغییرشکل‌ها مطابق شکل ۲۳ نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، علاوه بر لهیدگی رزوه در پیچ و گلوئی شدن آن، تغییرشکل و افزایش قطر و لهیدگی رزوه داخلی، در مهره نیز دیده می‌شود. افزایش قطر مهره یکنواخت نبوده و تغییر

جمع‌بندی نتایج شبیه‌سازی عددی

الگوی خرابی پیچ در حالت آزمایش کشش پیچ با ابزار استاندارد ISO 898-1 (۲۰۱۳)، به صورت گسیختگی پیچ در ناحیه کاهش‌یافته رزوه می‌باشد.

الگوی خرابی پیچ در حالت آزمایش کششی پیچ با مهره، به صورت لهیدگی رزوه می‌باشد. همچنین در این حالت علاوه بر تغییر شکل گلویی شدن و لهیده‌شدن رزوه‌های خارجی پیچ، در مهره نیز افزایش قطر و لهیدگی رزوه‌های داخلی دیده می‌شود.

نتیجه‌گیری

الف- فراوانی الگوی شکست لهیدگی رزوه، در آزمایش کشش پیچ با مهره و کشش پیچ با ابزار ISO 898-1 (۲۰۱۳)، به ترتیب ۹۰ و ۴ درصد می‌باشد.

ب- استحکام کششی حاصل در روش کشش پیچ با ابزار ISO 898-1 (۲۰۱۳)، بدلیل تغییر الگوی شکست به نوع گسیختگی، عدد بزرگتری نسبت به آزمایش کشش پیچ با مهره است.

ج- سه تفاوت اصلی ابزار ISO 898-1 (۲۰۱۳)، با مهره هم رده مقاومتی پیچ، ۱- سختی و مقاومت بیشتر ۲- طول رزوه درگیر بیشتر ۳- ابعاد هندسی قطور، می‌باشند که هر کدام از آنها به تنهایی می‌توانند، مانع خرابی از نوع لهیدگی رزوه شوند.

د- کاربرد عملی پیچ در اتصالات سازه فولادی، با مهره هم رده خود می‌باشد. واضح است که آزمایش پیچ با مهره نتایج نزدیکتری با عملکرد پیچ در اتصال خواهد داشت.

در متن آیین نامه اتصالات در سازه‌های فولادی (نشریه ۲۶۴، ۱۳۸۵) به طور صریح عبارت، «آزمایش کشش پیچ با مهره» قید شده است. بنابراین روش آزمایش کشش پیچ با مهره با آیین نامه مذکور نیز مطابقت دارد.

و- در مطالعات پیشین بررسی شده در این تحقیق، هیچ یک از آزمایشات با ابزار ایزو انجام نشده است.

ز- با توجه به الگوی شکست متفاوت در دو روش آزمایش، قابل مشاهده است که، در آزمایش کشش پیچ با ابزار ISO 898-1 (۲۰۱۳)، میزان استحکام بدست آمده مربوط به استحکام کششی مجموعه پیچ و مهره است. ولی در آزمایش کشش پیچ با ابزار ایزو استحکام کششی مصالح پیچ حاصل می‌شود.

ح- استفاده از ابزار ایزو در آزمایش کشش پیچ، به سه دلیل صحیح نبوده و عامل بروز خطا در نتایج آزمایش، به ضرر اطمینان می‌گردد:

۱- به دلیل عدم مطابقت با کاربرد عملی پیچ در اتصالات سازه.
۲- به دلیل عدم مطابقت با آیین نامه اتصالات سازه‌های فولادی (نشریه ۲۶۴، ۱۳۸۵)

۳- به دلیل تغییر الگوی شکست از لهیدگی رزوه به گسیختگی پیچ، و در نتیجه آن، نمایش استحکام غیر واقعی و بیش از استحکام کششی مجموعه پیچ و مهره یعنی پیچی که در بازرسی و آزمایش کشش پیچ با مهره، با اختلاف کوچکی مردود شده است، اگر با روش کشش پیچ با ابزار ISO 898-1 (۲۰۱۳)، آزمایش شود، به احتمالاً زیاد وارد محدوده پذیرش می‌گردد. اما باید توجه نمود، عدد نمایش داده شده در روش کشش پیچ با ابزار ISO 898-1 (۲۰۱۳)، مربوط به استحکام کششی مجموعه پیچ و مهره نبوده و عددی بیشتر از استحکام کششی مجموعه پیچ و مهره می‌باشد.

بدین ترتیب با انتخاب روش آزمایش کشش با ابزارگاه ISO 898-1 (۲۰۱۳)، خطایی در نتایج آزمایش استحکام کششی پیچ وارد می‌شود که ممکن است، موجب صدور تاییدیه نابجا برای محموله بزرگی از پیچ معیوب و مردود شده و در اتصالات تاییدیه نابجا برای محموله بزرگی از پیچ معیوب و مردود شده و در اتصالات استفاده گردد.

References

- [1] Dassault Systèmes Simulia. 2020. "DS Solidworks.
- [2] Dassault Systèmes Simulia. 2022. "Abaqus| Standard", (6.14).
- [3] Davoudi, Behnam, & Soleimani, Mehdi. (2019). Experimental study of changing of texture, Hardness and Strength of threads on tube made by thread rolling and Machining. *Mechanical Engineering, University of Tabriz*, 49(1), 111-117. [In persian]
- [4] Deputy of Technical Affairs, Technical Affairs Office, Development of criteria and reduction of earthquake risk, Regulations for connections in steel structures (Publication 264), *National Management and Planning Organization*, No. 264, 3rd edition, 2006. [In persian]
- [5] Grimsno, E.L., Aalberg, A., Langseth, M. and Clausen, A.H., (2017). [How placement of nut determines failure mode of bolt-and-nut assemblies](#). *Steel Construction*, 10(3), pp.241-247.
- [6] Grimsno, E.L., Clausen, A.H., Langseth, M. and Aalberg, A., (2015). [An experimental study of static and dynamic behaviour of bolted end-plate joints of steel](#). *International Journal of Impact Engineering*, 85, pp.132-145.
- [7] Hu, Y., Davison, J.B., Burgess, I.W. and Plank, R.J., (2007), July. Comparative study of the behaviour of BS 4190 and BS EN ISO 4014 bolts in fire. In Proceedings of 3rd international conference on steel and composite structures.
- [8] Hu, Y., Shen, L., Nie, S., Yang, B. and Sha, W., (2016). [FE simulation and experimental tests of](#)

- [high-strength structural bolts under tension](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 126, pp.174-186.
- [9] Hu, Y., Yang, B., Nie, S.D. and Da, G.X., (2015). [Performance of high strength structural bolts in tension: effects of tolerance classes](#).
- [10] ISO 148-1: 2016 (E), 2016. Metallic materials. Charpy pendulum impact test.
- [11] ISO 3269: 2019 (E), 2019. Fasteners. Acceptance inspection.
- [12] ISO 898-1: 2013 (E), 2013. Mechanical Properties of Fasteners Made of Carbon Steel and Alloy Steel.
- [13] ISO 898-2: 2012 (E), 2012. Part 2: Nuts with specified property classes. Coarse thread and fine pitch thread.
- [14] Kazemi P, Sharifi F, Comprehensive Principles of Inspection of Bolted and Nut Connections of Structures, *Fadak ISATIS*, First Edition, 2015. [In persian]
- [15] Kirby, B.R., (1995). [The behaviour of high-strength grade 8.8 bolts in fire](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 33(1-2), pp.3-38.
- [16] Plaitano, F., Stratan, A. and NASTRI, E., (2022). [Simplified modelling of failure in high strength bolts under combined tension and bending](#). *Journal of Composites Science*, 6(10), p.302.
- [17] Saedi Daryan, A. and Ketabdari, H., (2019). [Mechanical properties of steel bolts with different diameters after exposure to high temperatures](#). *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10), p.04019221.
- [18] Sakai, T., (2008). Bolted joint engineering: fundamentals and applications. *Beuth Verlag*.
- [19] Yang, F., Veljkovic, M. and Liu, Y., (2021). [Fracture simulation of partially threaded bolts under tensile loading](#). *Engineering structures*, 226, p.111373.
- [20] Younis, N., (2012). [Experimental strain investigation of bolt torque effect in mechanically fastened joints](#). *Engineering*, 04(07), pp. 359-367.