

Experimental and Statistical Study of Failure Mechanisms of High-Strength Bolts in the Common Tensile Strength Tests

Ali Zardkouhi¹, Javad Katebi^{2*}, Yousef Hosseinzadeh³, Gholamreza Eftekhari⁴

1- Ms.C of Earthquake Engineering Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

4- Ms.C of Structural Engineering Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ABSTRACT

The tensile strength of high strength bolts is determined by two common methods. In the first method, the tensile strength of the bolt is determined using a special device introduced in the ISO standard. In the second method, the tensile strength test of the bolt is performed using a nut. In bolts that were studied experimentally, two types of failure mechanisms are observed, bolt thread Stripping and bolt breakage in the reduced area of the thread. In this study, the tensile strength of the bolt has been tested by two common methods. The results of the present study and the statistical data collected from the mechanics of materials laboratories show that in the bolt tension test with the device introduced in the ISO standard, 96% of the test specimens are broken in the form of bolt breakage along the threaded length, while in the tensile test of the bolt with nut, only 10% of the specimens are broken by the bolt breakage mechanism along the threaded length. According to the frequency of failure mechanisms in both methods, it is found that the tensile strength of the bolt is determined in the bolt tensile test with the ISO device. When, in the bolt and nut tension test, it leads to the evaluation of the tensile strength of the bolt and nut set. Considering the compatibility of bolt and nut performance in steel structures, it is suggested to perform tensile test of bolt and nut, in addition to other tests. In this research, in addition to conducting experiments and collecting statistical data, numerical simulation in finite element software has been carried out to validate the mechanisms of bolt failure in both methods.

ARTICLE INFO

Receive Date: 03 May 2024

Revise Date: 21 August 2024

Accept Date: 17 September 2024

Keywords:

Bolt Failure Mechanism High Strength Bolt
Bolt Tension Test
Bolt Tensile Strength
Thread Stripping
Bolt Shank Breakage
Statistical Study
Numerical Simulation

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.453553.3396](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.453553.3396)

*Corresponding author: Javad Katebi.

Email address: jkatebi@tabrizu.ac.ir

مطالعه آزمایشگاهی و آماری مکانیزم گسیختگی پیچ‌های پرمقاومت در شیوه‌های آزمون مرسوم استحکام کششی

علی زردکوهی^۱، جواد کاتبی^{۲*}، یوسف حسین‌زاده^۳، غلامرضا افتخاری^۴

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران- زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۴- کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

ظرفیت کششی پیچ‌های پرمقاومت، به دو روش متفاوت تعیین می‌شود. در روش معرفی شده در استاندارد ایزو، استحکام کششی با استفاده از ابزار مخصوص روش ایزو و در روش دوم، مقاومت کششی با استفاده از مهره تعیین می‌شود. در آزمایش‌های کشش، دو مکانیزم گسیختگی به صورت لهیدگی رزوه در محل تماس پیچ با مهره یا گسیختگی در ناحیه رزوه شده مشاهده می‌شود. در این پژوهش، آزمایش تعیین مقاومت کششی پیچ به این دو روش، انجام شد. همچنین اطلاعات مربوط به آزمایش‌های انجام شده برای تعیین مقاومت پیچ‌ها، از آزمایشگاه‌های مقاومت مصالح جمع‌آوری گردید. برای ارزیابی و مقایسه مقاومت و مکانیزم‌های گسیختگی پیچ‌ها، مدل‌های اجزای محدود پیچ تحت بارهای کششی در دو حالت روش ایزو و روش استفاده از مهره ایجاد شد. بررسی نشان می‌دهد که در آزمون کشش پیچ با ابزار ایزو، مکانیزم شکست ۹۶ درصد نمونه‌های آزمایش، گسیختگی در ناحیه رزوه است؛ در صورتی که در آزمون کشش پیچ با مهره، مکانیزم خرابی تنها ۱۰ درصد نمونه‌ها، گسیختگی در ناحیه رزوه می‌باشد. با توجه به نتایج بررسی تجربی و تحلیلی و ارزیابی فراوانی مکانیزم‌های گسیختگی دو روش، ملاحظه می‌شود که در روش ایزو، ظرفیت کششی مصالح پیچ تعیین می‌شود. در صورتی که، در آزمون کشش پیچ با مهره، ظرفیت کششی مجموعه پیچ و مهره تعیین می‌گردد. به طور میانگین مقاومت تعیین شده از روش ایزو، در حدود چهار درصد بیشتر از روش ساختار پیچ و مهره می‌باشد. با توجه به مطابقت عملکرد پیچ و مهره در سازه‌های فولادی با عملکرد مورد ارزیابی در آزمایش پیچ با مهره، انجام آزمایش کشش پیچ با مهره در کنار انجام سایر آزمایشات ارزیابی پیچ، توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: مکانیزم گسیختگی پیچ، پیچ پرمقاومت، آزمون کشش پیچ، مقاومت کششی پیچ، مطالعه آماری، مدل اجزای محدود

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2024.453553.3396	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.453553.3396	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	۱۴۰۳/۰۶/۲۷	۱۴۰۳/۰۶/۲۷	۱۴۰۳/۰۵/۳۱	۱۴۰۳/۰۲/۱۴
				*نویسنده مسئول:		
				جواد کاتبی		
				jkatebi@tabrizu.ac.ir		
				پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

اتصال پیچی به طور گسترده‌ای در ساختمان و صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. اتصالات پیچی از اجزای ضروری در افزایش میرایی و به حداقل رساندن میزان تشدید سازه‌ها می‌باشند [۱-۴]. هزینه کم، عدم نیاز به روش‌های بازرسی پیچیده و پرهزینه، نصب سریع و رفتار شکل‌پذیر از مزایای سازه‌های با اتصالات پیچی می‌باشد. پیچ از مهم‌ترین اجزای یک اتصال پیچی می‌باشد و خرابی آن بیشتر از خرابی سایر اجزا، پایداری سازه را تهدید می‌کند [۵].

نوع مصالح و اجزاء تشکیل دهنده پیچ و مهره‌ها، هندسه و ابعاد رزوه‌ها، درجه لقی بین رزوه‌های داخلی و خارجی ساختار پیچ و مهره، عملیات حرارتی زمان فرم دهی و پس از آن، میزان کربن‌زدایی حین عملیات حرارتی در سطح خارجی رزوه [۶] و سرعت فلاویز و حدیده-کاری برای ایجاد رزوه‌های مهره و پیچ، از عوامل تأثیرگذار در ظرفیت کششی پیچ به شمار می‌روند [۷].

هو و همکاران [۸] در مطالعه‌ای آزمایشگاهی و عددی بر روی پیچ‌های با گرید ۸/۸، عوامل مؤثر در مکانیزم گسیختگی پیچ‌ها را تعیین نمودند. از جمله این عوامل، درجه لقی و فرآیند اعمال پوشش گرم گالوانیزه بر روی پیچ و مهره است که باعث تضعیف رزوه‌های پیچ و مهره می‌شود. کربی [۹] و هو و همکاران [۱۰] در مطالعات تجربی و عددی، تأثیر رزوه و لهیدگی آن را در کاهش استحکام کششی پیچ‌های سازه‌ای بررسی نمودند. هو و همکاران [۸] مهم‌ترین عامل در مکانیزم گسیختگی پیچ از ناحیه رزوه به صورت لهیدگی را درجه لقی بین رزوه‌های داخلی و خارجی مهره و پیچ تشخیص دادند. آنها برای دو محدوده لقی متفاوت و رفتار دوطرفی و سه‌خطی مصالح، شبیه‌سازی عددی را انجام و مکانیزم‌های گسیختگی حاصل از تحلیل عددی و داده‌های آزمایش، از قبیل گلوبی شدن در ناحیه رزوه و لهیدگی رزوه را مقایسه نمودند. مقایسه انجام شده، هماهنگی خوب بین داده‌های آزمایش و نتایج تحلیل را نشان داد. هو و همکاران [۸] در این پژوهش از آزمایش تعیین استحکام کششی ساختار پیچ و مهره استفاده نمودند.

هو و همکاران [۱۱]، مکانیزم گسیختگی چهار مجموعه پیچ پرمقاومت رده ۸/۸ را بررسی نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که پیچ‌های سازه‌ای تحت کشش به دو شکل، لهیدگی رزوه‌ها و گسیختگی از ناحیه کاهش یافته رزوه در ساقه پیچ گسیخته می‌شوند. آزمایشات هو و همکاران [۱۱] نشان داد که درجه لقی بین رزوه‌های پیچ و مهره عامل مؤثر در مکانیزم گسیختگی پیچ‌های پرمقاومت تحت کشش است. بر اساس استانداردهای پیچ، ضخامت انواع پوشش‌های محافظتی در محدوده ۳۵ تا ۵۳ میکرون، می‌باشد و این امر در استحکام و مکانیزم گسیختگی پیچ‌ها تأثیرگذار خواهد بود. پیچ‌های انتخاب‌شده در آزمایش هو و همکاران [۱۱] از درجه مقاومتی ۸/۸ و مهره با دو رده مقاومتی ۸ و ۱۰، دو درجه لقی و دو نوع پوشش آبکاری روی و سیاه‌کاری بود. بررسی‌ها نشان داد که در پیچ با مهره رده بالاتر، مکانیزم گسیختگی از نوع شکست پیچ از ناحیه کاهش یافته رزوه خواهد بود.

بررسی هو و همکاران [۱۱] نشان داد که ساختار پیچ با گرید ۸/۸ و مهره با یک گرید بالاتر به احتمال زیاد با مکانیزم گسیختگی در ناحیه کاهش یافته رزوه دچار خرابی می‌شود. همچنین ساختار پیچ با گرید ۸/۸ و مهره گالوانیزه غالباً با لهیدگی رزوه گسیخته می‌شود. در شبیه‌سازی عددی هو و همکاران [۱۱]، مدل‌های مختلف مصالح برای ارزیابی عملکرد مکانیکی پیچ تحت بارگذاری کششی در نظر گرفته شد. ملاحظه شد که تأثیر این مدل‌ها در رابطه بار-جابجایی ساختار قابل توجه نمی‌باشد. بررسی‌ها نشان داد که شبیه‌سازی عددی توان نمایش مکانیزم رفتاری شکست پیچ پرمقاومت ۸/۸ را دارد.

لهیدگی رزوه نوعی گسیختگی نامطلوب به حساب می‌آید و با تغییر شکل کوچک‌تری درمقایسه با گسیختگی پیچ در ناحیه کاهش یافته رزوه، اتفاق می‌افتد. لهیدگی زود هنگام رزوه، ممکن است هنگام پیش تنیده کردن پیچ نیز اتفاق بیافتد و نوعی گسیختگی بدون علائم ظاهری است. بعد از لهیدگی رزوه، پیچ در داخل سوراخ و روی اتصال باقی می‌ماند. طول درگیر رزوه‌های مهره و پیچ و رده مقاومتی پیچ و مهره عوامل مؤثر در لهیدگی رزوه می‌باشند. محل قرارگیری مهره در طول رزوه شده پیچ و تأثیر آن در لهیدگی رزوه در مطالعات کمتر مورد توجه قرار گرفته است. گریمزمو و همکاران [۱۲] آزمایش‌هایی بر روی پیچ نمره ۱۶ انجام دادند که در آن‌ها تأثیر محل قرارگیری مهره

در طول ناحیه رزوه مورد توجه قرار گرفت. در برخی از نمونه‌ها قراردادادن مهره در نزدیکی قسمت بدون رزوه پیچ، باعث لهیدگی رزوه شد؛ در حالی که قراردادادن مهره به اندازه کافی دور از قسمت بدون رزوه پیچ، منجر به گسیختگی پیچ شد. در این تحقیق جهت بررسی بیشتر مکانیزم گسیختگی پیچ، شبیه‌سازی عددی انجام شد.

در مورد عملکرد ساختار پیچ و مهره در دمای بالا، مطالعات زیادی در سال‌های اخیر انجام گرفته است. هو و همکاران [۱۱] آزمایش کشش بر روی تعدادی پیچ در دمای بالا انجام دادند. نتایج بدست آمده از این مطالعه، کاهش شدید مقاومت پیچ‌ها در دماهای بالا را نشان می‌دهد. پیچ‌ها در دماهای بین ۲۰ تا ۶۰۰ درجه سلسیوس تحت آزمایش کشش قرار گرفتند و در تمام پیچ‌ها، مکانیزم گسیختگی از نوع لهیدگی رزوه مشاهده شد. آزمایش در دمای محیط نشان داده بود که استفاده از مهره با یک رده مقاومتی بالاتر از پیچ، باعث می‌شود که خرابی پیچ به صورت گسیختگی در ناحیه کاهش یافته رزوه اتفاق بیافتد. با این وجود آزمایش هو و همکاران [۱۱] نشان داد که مهره با رده بالاتر از پیچ، همیشه نمی‌تواند مانع لهیدگی رزوه گردد.

شاهین و همکاران [۱۳] با مطالعه عددی، مکانیزم گسیختگی از نوع لهیدگی در ساختار پیچ و مهره را در دماهای بالا مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق عوامل موثر بر مکانیزم گسیختگی و رفتار ساختار پیچ و مهره در دمای محیط و دماهای بالا برای پیچ فولادی ضد زنگ و پیچ پرمقاومت بررسی شد. بررسی‌ها نشان داد که گسیختگی از نوع لهیدگی، به سختی ترکیبی مهره و پیچ بستگی دارد. با لهیدگی رزوه، شکل‌پذیری پیچ‌های پرمقاومت کاهش می‌یابد؛ در حالی که پیچ‌های فولادی ضد زنگ همچنان پاسخ شکل‌پذیری را نشان می‌دهند.

گریزمو و همکاران [۱۴] تاثیر استفاده از یک یا دو مهره را در رفتار شبه استاتیکی ساختار پیچ بررسی نمودند. آزمایش بر روی پیچ‌های M16 از رده مقاومتی ۸/۸ انجام شد. نتایج آزمایش نشان داد که وقتی پیچ با یک مهره آزمایش می‌گردد، گسیختگی پیچ به شکل لهیدگی رزوه اتفاق می‌افتد و در آزمایش با دو مهره، خرابی به صورت گسیختگی پیچ اتفاق می‌افتد.

پلایتانو و همکاران [۱۵] مکانیزم گسیختگی پیچ‌های پرمقاومت تحت بارگذاری ترکیبی خمش و کشش مورد بررسی قرار دادند. آزمایش آن‌ها، دو حالت گسیختگی مختلف، لهیدگی رزوه در بارگذاری از نوع کشش خالص و شکستگی ساقه پیچ تحت بارگذاری خمش و کشش همزمان را نشان داد.

در طراحی اتصالات پیچی به دلیل کم بودن ظرفیت تغییر شکل پیچ‌ها در مقایسه با صفحات اتصال، از گسیختگی کشش پیچ‌ها چشم‌پوشی می‌گردد؛ از این رو مطالعات کمتری در حوزه بررسی مکانیزم گسیختگی پیچ‌ها تحت بار کششی انجام گرفته است. بنابر این مطالعه تجربی رفتار گسیختگی پیچ‌ها برای استفاده و تعمیم نتایج تحلیل عناصر محدود در محاسبه شکل‌پذیری و مدل‌های گسیختگی اتصالات پیچی الزامی است [۱۶].

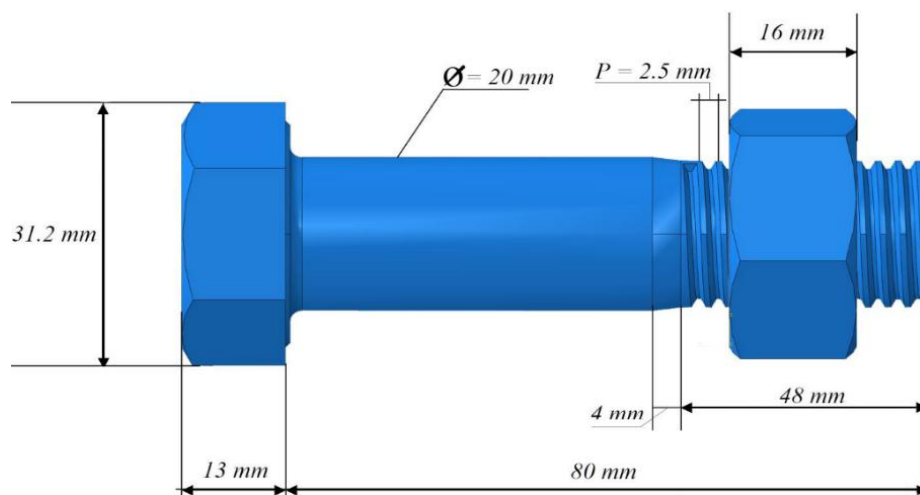
علیپور ساجدی و همکاران [۱۷] رفتار کششی پیچ در حالت ایجاد پدیده اهرمی شدن مطالعه نمودند. در مطالعه آن‌ها یک مدل تحلیلی ساده برای تعیین ظرفیت اتصالات پیچی با لحاظ نمودن پدیده اهرمی شدن پیشنهاد شده است.

در ارزیابی رفتار کششی پیچ‌ها، آزمایش بر روی ساختار پیچ و مهره، بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. از طرف دیگر، در پروژه‌های عمرانی از دو روش آزمایش ایزو یعنی استفاده از پیچ و ابزار ایزو و آزمایش روی ساختار پیچ و مهره استفاده می‌شود. در این پژوهش تاثیر روش آزمایش بر مقاومت کششی و مکانیزم گسیختگی پیچ‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور از آزمایش روی نمونه پیچ و جمع‌آوری داده‌های انجام گرفته در آزمایشگاه‌های مقاومت مصالح استفاده شده است. همچنین مدل اجزای محدود برای بررسی تحلیلی تاثیر روش آزمایش بر رفتار پیچ ایجاد شده است.

۲- روش تحقیق

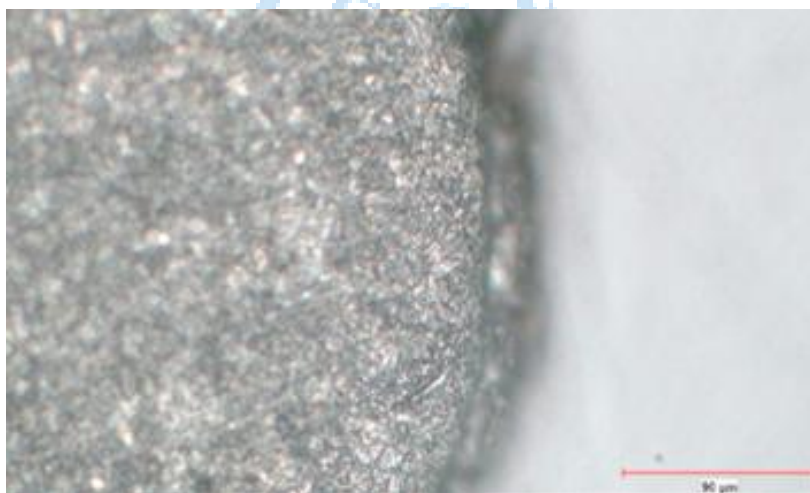
رفتار کششی ۱۰ نمونه پیچ و مهره نمره ۲۰ (M20) با گرید مقاومتی ۱۰/۹ در آزمایشگاه تعیین شد. ابعاد نمونه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. دو شیوه آزمایش تعیین ظرفیت کششی پیچ، یعنی روش آزمایش ISO 898-1 [۶] و آزمایش تعیین استحکام کششی

ساختار پیچ و مهره، مطابق توصیه آیین‌نامه اتصالات در سازه‌های فولادی (نشریه ۲۶۴) [۱۸]، مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌های پیچ و مهره مطابق توصیه استاندارد RCSC [۱۹]، از یک تولید کننده، تهیه شده است. تعداد نمونه‌ها بر اساس استاندارد ISO 3269 [۲۰] و شرط تهیه نمونه‌ها از کارخانه شناخته شده، پیشرفته، دارای کنترل‌های پیوسته در خط تولید و از یک عرضه کننده انتخاب شده است.



شکل ۱: ابعاد و مشخصات هندسی مجموعه پیچ و مهره M20

برای اطمینان از سلامت پیچ‌ها، سه ویژگی مهم مورد آزمایش قرار گرفت: آزمایش‌های دکرپوره^۱ استاندارد ISO 898-1 [۶]، آزمون شاریپی در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد استاندارد EN ISO 148-1 [۲۱] و بارگواه مهره استاندارد ISO 898-2 [۲۲]، روی نمونه‌های پیچ انجام و سلامت پیچ‌ها مورد تأیید قرار گرفت. بنابر این داده‌های آزمایش کشش و مکانیزم گسیختگی، متعلق به پیچ‌های استاندارد و بدون نقص می‌باشد. بر روی دو نمونه آزمایش دکرپورگی به روش میکروسکوپی انجام گردید. دکرپورگی در نمونه‌ها مشاهده نشد (شکل ۲). نتایج بدست آمده از آزمایش ضربه شاریپی بر روی دو نمونه تهیه شده از پیچ‌ها، در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج آزمایش طاقت قابل قبول پیچ‌ها را نشان می‌دهد. بار گواه مهره‌ها برابر ۲۵۹۷۰۰ نیوتن و در حد قابل قبول استاندارد ISO 898-2 تعیین شد.



شکل ۲: تصویر میکروسکوپی نمونه در آزمایش دکرپورگی

^۱ Decarburization

جدول ۱: داده‌های آزمون شاریبی روی دو نمونه ساخته شده از M20

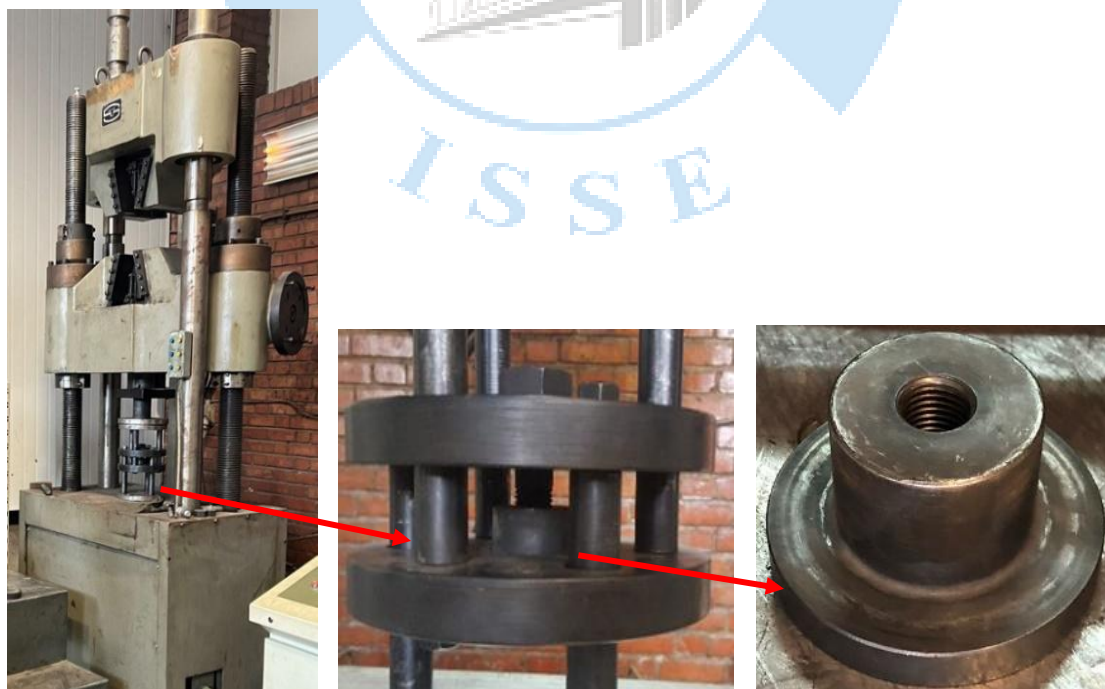
ردیف	معیار پذیرش J	طاقت J	نمونه	نتیجه
۱	۲۷	۵۷,۷۷	M ۲۰× ۸۰	قبول
۲	۲۷	۵۷,۷۷	M ۲۰× ۸۰	قبول

آزمایش به دو شیوه مورد مطالعه، در آزمایشگاه آرمان صنعت تدبیر اندیش انجام شده است. آزمایشگاه منتخب امکانات انجام آزمایش به هر دو روش رایج تعیین مقاومت کششی پیچ را در یک دستگاه واحد دارا می‌باشد. برای هر روش انتخابی، آزمون کشش بر روی پنج نمونه پیچ مورد آزمایش قرار گرفت. در این تحقیق با جمع‌آوری آمار مکانیزم‌های گسیختگی پیچ‌ها، از آزمایشگاه‌های مقاومت مصالح دانشگاه تبریز، تحلیل صنعت سهند، آرمان صنعت تدبیر اندیش، دانشگاه صنعتی امیرکبیر و آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان آذربایجان شرقی، مکانیزم‌های گسیختگی مشاهده شده بر اساس نوع آزمایش طبقه بندی و ارزیابی گردید. همچنین در این مطالعه از شبیه‌سازی عددی تحت نرم افزار Abaqus برای هر دو روش آزمایش کشش، جهت ارزیابی مکانیزم‌های گسیختگی، استفاده شد.

۳- آزمایش تعیین استحکام کششی پیچ

۳-۱- آزمایش کشش پیچ مطابق استاندارد ISO 898-1 (روش ایزو) [۶]

در روش ایزو، کشش پیچ با ابزار ایزو انجام می‌شود. این ابزار با ابعاد و شکل خاص و سختی ۴۵ راکول ساخته می‌شود و در آن جهت انجام آزمایش کشش، پیچ به جای مهره به قسمت رزوه شده ابزار بسته شده و تحت کشش قرار می‌گیرد. در این مطالعه مقاومت کششی پنج نمونه پیچ نمره ۲۰ با ابزار ایزو، مطابق شکل ۳، تعیین شد. تمام نمونه‌ها شرط استحکام کششی بیش از ۲۵۵ کیلونیوتن را مطابق استاندارد ایزو، احراز نمودند. مکانیزم گسیختگی همه نمونه‌ها از نوع گسیختگی پیچ از ناحیه رزوه پیچ بود (شکل ۴). در جدول ۲ داده‌های آزمایش ارائه شده است. نمودار بار-جابجایی پیچ‌ها در شکل ۵، نشان داده شده است.



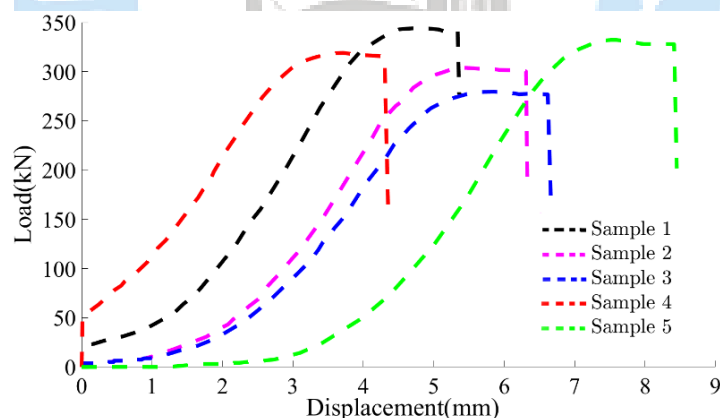
شکل ۳: آزمایش کشش پیچ به روش ایزو



شکل ۴: مکانیزم گسیختگی پنج نمونه پیچ M20 با رده مقاومتی ۱۰/۹، در آزمون کشش ایزو

جدول ۲: نتایج آزمون کشش پنج نمونه پیچ M20 با ابزار ایزو

ردیف	اندازه (mm)	حداقل نیروی کششی (kN)		نتیجه
		آزمایش	معیار پذیرش	
۱	۲۰×۸۰	۳۴۴،۵۰	۲۵۵	قابل قبول
۲	۲۰×۸۰	۳۰۳،۰۰	۲۵۵	قابل قبول
۳	۲۰×۸۰	۲۷۹،۸۵	۲۵۵	قابل قبول
۴	۲۰×۸۰	۳۱۹،۰۰	۲۵۵	قابل قبول
۵	۲۰×۸۰	۳۳۲،۱۴	۲۵۵	قابل قبول

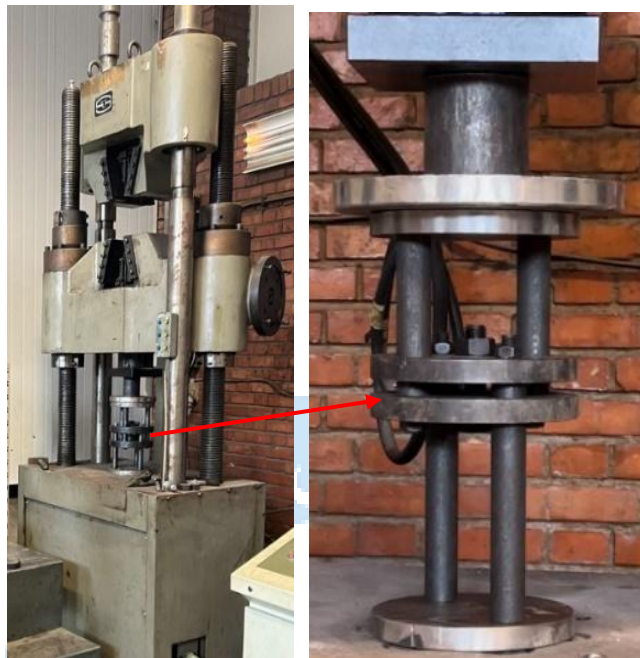


شکل ۵: منحنی بار-جابجایی نمونه‌های آزمایش در روش ایزو

۳-۲- آزمایش کشش ساختار پیچ با مهره

در روش آزمایش ساختار پیچ و مهره مطابق شکل ۶، مقاومت کششی پنج نمونه پیچ نمره ۲۰ در آزمون کشش با مهره تعیین شد. در این روش همه نمونه‌ها، شرط استحکام کششی بیش از ۲۵۵ کیلونیوتن را طبق استاندارد ISO 898-1 [۶]، کسب نمودند. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مکانیزم گسیختگی همه نمونه‌ها به شکل لهیدگی رزوه می‌باشد. داده‌های آزمایش در جدول ۳ و نمودارهای بار-جابجایی پیچ‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۹ مقایسه منحنی های بار-جابجایی هردو روش آزمایش و در شکل

۱۰. استحکام های کششی بدست آمده برای پیچ‌ها در آزمایش‌های کشش پیچ در مقایسه با ابزار ایزو و ساختار پیچ و مهره با حداقل مقدار استحکام کششی تعیین شده مطابق استاندارد ایزو (۲۵۵ کیلونیوتن) به صورت نمودار میله‌ای قابل مشاهده می‌باشد.



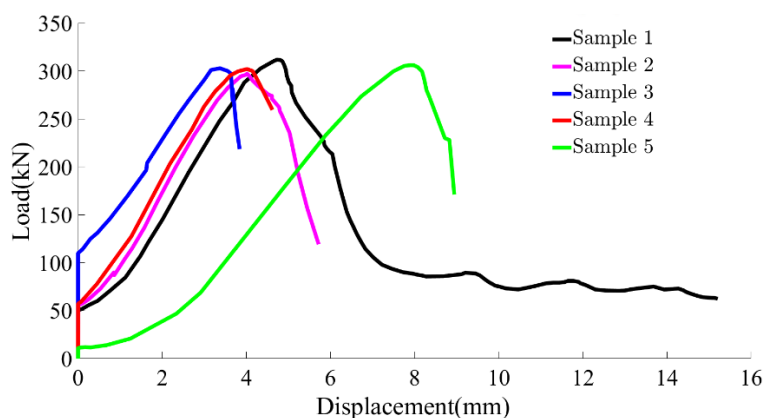
شکل ۶: آزمون تعیین استحکام کششی پیچ با مهره



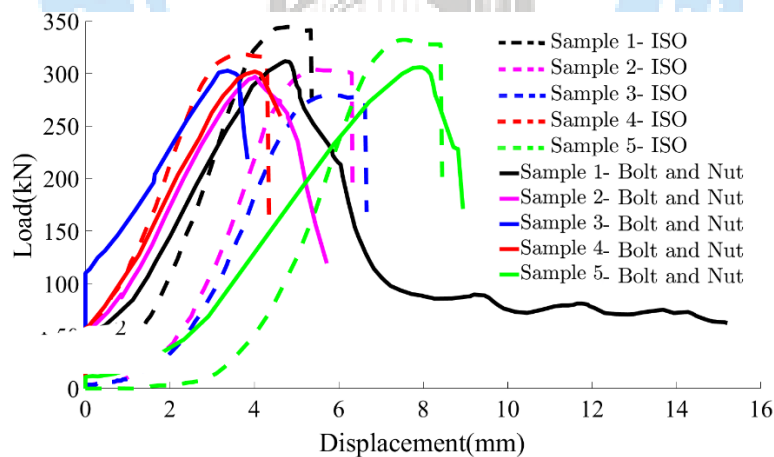
شکل ۷: مکانیزم گسیختگی نمونه‌های آزمایش در آزمون استحکام کششی ساختار پیچ و مهره

جدول ۳: نتایج آزمون استحکام کششی نمونه‌ها در آزمون ساختار پیچ و مهره

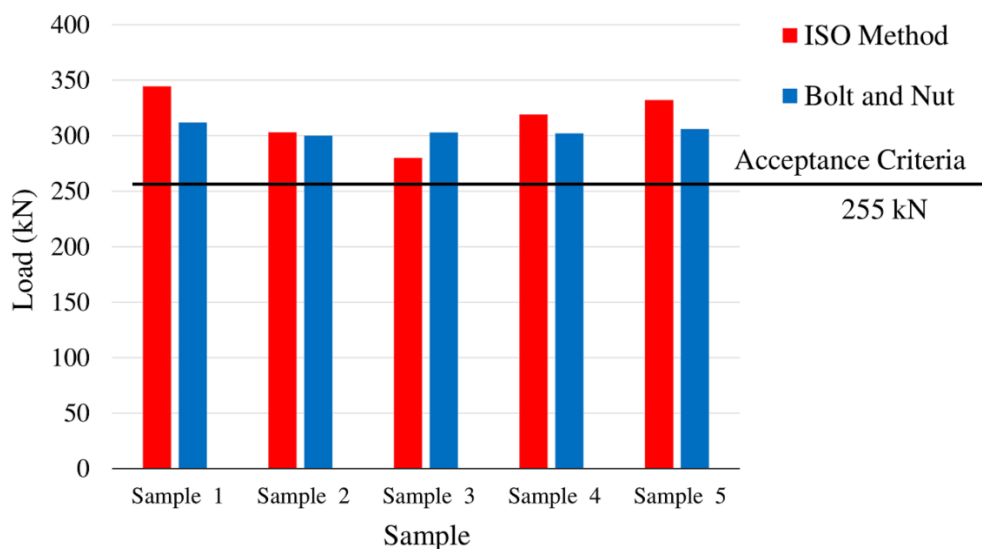
ردیف	اندازه (mm)	حداقل نیروی کششی (kN)		نتیجه
		آزمایش	معیار پذیرش	
۱	۲۰× ۸۰	۳۱۱/۸۰	۲۵۵	قابل قبول
۲	۲۰× ۸۰	۳۰۰/۰۰	۲۵۵	قابل قبول
۳	۲۰× ۸۰	۳۰۲/۸۰	۲۵۵	قابل قبول
۴	۲۰× ۸۰	۳۰۲/۰۰	۲۵۵	قابل قبول
۵	۲۰× ۸۰	۳۰۶/۰۰	۲۵۵	قابل قبول



شکل ۸: نمودار بار - جابجایی نمونه‌ها در آزمایش ساختار پیچ و مهره



شکل ۹: نمودار های بار - جابجایی نمونه‌ها در آزمایش تعیین استحکام کششی پیچ با ابزار ایزو و ساختار پیچ و مهره



شکل ۱۰: نمودار میله‌ای استحکام‌های کششی بدست آمده برای پیچ‌ها در آزمایش‌های کشش پیچ با ابزار ایزو و ساختار پیچ و مهره در مقایسه با حداقل مقدار استحکام کششی تعیین شده مطابق استاندارد ایزو (۲۵۵ کیلو نیوتن)

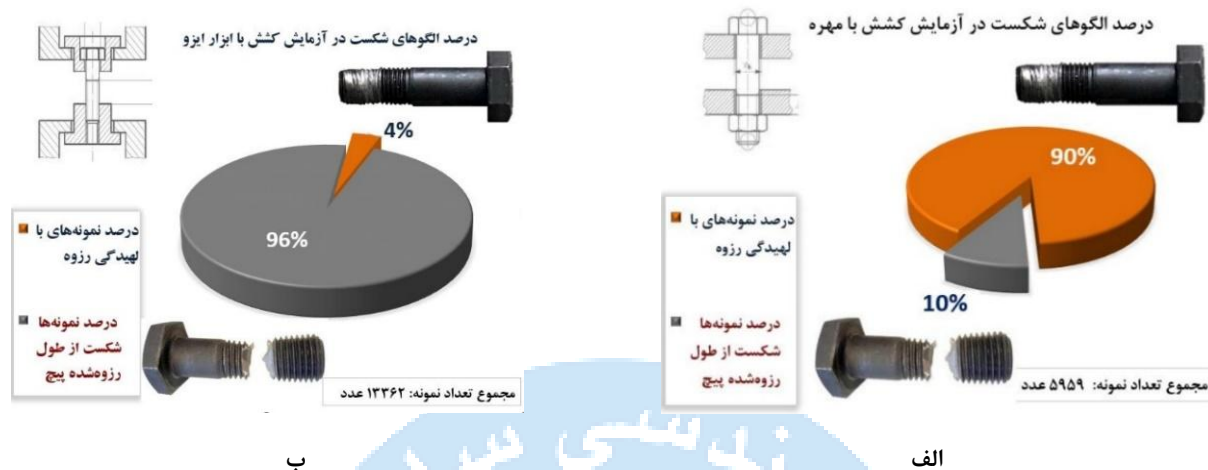
با توجه به مکانیزم گسیختگی متفاوت در روش‌های آزمایش به روش ایزو و کشش پیچ با مهره، نتیجه‌گیری می‌شود که در آزمایش کشش پیچ با ابزار ایزو، مقدار ظرفیت بدست آمده مربوط به مقاومت کششی مجموعه پیچ و مهره است. ولی در آزمایش کشش پیچ با ابزار ایزو منجر به تعیین ظرفیت کششی مصالح پیچ می‌گردد.

دلایلی که نادرست بودن استفاده از ابزار ایزو در آزمایش تعیین ظرفیت کششی پیچ را اثبات می‌نمایند، عبارتند از: عدم سازگاری با رفتار و کاربرد عملی پیچ در اتصالات سازه‌های فولادی، عدم تطابق با روش توصیه شده در آیین نامه اتصالات سازه‌های فولادی و نیز به دلیل تغییر مکانیزم گسیختگی از لهیدگی رزوه به گسیختگی پیچ از ناحیه ساقه پیچ، و در نتیجه ظرفیت کششی غیر واقعی و بیش از مقاومت کششی مجموعه پیچ و مهره بدست می‌آید. به عبارت دیگر پیچی که در بازرسی و آزمایش کشش پیچ با مهره، با اختلاف اندکی مردود شده‌است، اگر با روش کشش پیچ با ابزار ایزو مورد آزمایش قرار گیرد، به احتمال زیاد ممکن است وارد محدوده پذیرش گردد. لذا باید دقت نمود، که عدد استحکام کششی حاصل شده در روش کشش پیچ با ابزار ایزو، مربوط به ظرفیت کششی مجموعه پیچ و مهره نیست و عددی بیشتر و محافظه کارانه‌تر از ظرفیت کششی واقعی مجموعه پیچ و مهره می‌باشد. لذا با انتخاب آزمایش کشش به روش ایزو، خطایی در نتایج آزمایش استحکام کششی پیچ وارد می‌شود که ممکن است، باعث صدور تأییدیه و پذیرش نامه غلط برای محموله‌های بزرگ و تعداد زیادی از پیچ‌های معیوب و مردود شده از محدوده استاندارد پذیرش، در اتصالات سازه مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین به دلیل مطابقت عملکرد پیچ و مهره در سازه فولادی، این تحقیق انجام آزمایش کشش پیچ با مهره را، علاوه بر انجام سایر آزمایش‌ها پیشنهاد می‌نماید.

۴- مطالعه آماری و رده‌بندی مکانیزم‌های گسیختگی

برای بررسی فراوانی مکانیزم‌های گسیختگی در دو روش آزمایش، اطلاعات آماری مکانیزم گسیختگی در هر دو روش آزمایش، از آزمایشگاه‌های مقاومت مصالح دانشگاه تبریز، تحلیل صنعت سهند، جهاد تحقیقات سهند، دانشگاه صنعتی امیرکبیر و آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان آذربایجان شرقی، جمع آوری و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آمار مکانیزم‌های گسیختگی، به همراه، نتایج آزمایش انجام شده در این تحقیق، مطابق شکل ۱۱ می‌باشد. داده‌های دو روش آزمایش به تفکیک آمار فراوانی هر آزمایشگاه در جداول ۴ و ۵ آورده شده است.

نتایج مطالعه آماری نشان می‌دهد که، فراوانی مکانیزم گسیختگی از نوع لهیدگی رزوه، در آزمایش کشش پیچ با ابزار ایزو ۴ 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.



شکل ۱۱: درصد فراوانی مکانیزم گسیختگی پیچ‌های M20 با رده مقاومتی ۱۰۰۹ در آزمایش کشش پیچ
الف - آزمایش ساختار پیچ و مهره ب - به روش ایزو

جدول ۴: فراوانی مکانیزم‌های گسیختگی در روش آزمون کشش پیچ با ابزار ایزو

ردیف	آزمایشگاه	تعداد نمونه	لهیدگی رزوه	فراوانی مکانیزم گسیختگی در روش ایزو
۱	جهاد تحقیقات سپند	۱۲۲۴۸	٪۴	٪۹۶
۲	خاک آب تحلیل	-		
۳	مکانیک خاک استان آشرقی	۱۰۹	٪۰	٪۱۰۰
۴	دانشگاه تبریز	-		
۵	تحلیل صنعت سپند	۱۰۰۰	٪۱۰	٪۹۰
۶	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	-		
۷	آزمایش مقاله	۵	٪۰	٪۱۰۰
	جمع	۱۳۳۶۲		
	میانگین فراوانی		٪۴	٪۹۶

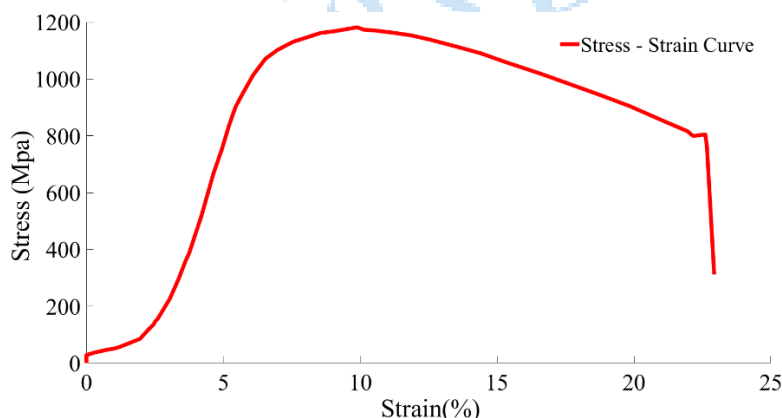
جدول ۵: فراوانی مکانیزم‌های گسیختگی در روش آزمون کشش پیچ با مهره

ردیف	آزمایشگاه	تعداد نمونه	فراوانی مکانیزم گسیختگی ساختار پیچ با مهره	لهیدگی رزوه	گسیختگی پیچ در ناحیه رزوه
۱	جهاد تحقیقات سهند	۴۰۶۰	%۹۵	%۵	
۲	خاک آب تحلیل	۴۷۵	%۸۵	%۱۵	
۳	مکانیک خاک استان آشرقی	۵۵	%۱۰۰	%۰	
۴	دانشگاه تبریز	۱۳۸	%۸۹	%۱۱	
۵	تحلیل صنعت سهند	۱۲۰۰	%۷۰	%۳۰	
۶	دانشگاه صنعتی امیر کبیر	۲۶	%۹۲	%۸	
۷	آزمایش انجام شده در این تحقیق (آرمان صنعت تدبیر اندیش)	۵	%۱۰۰	%۰	
جمع	۵۹۵۹				
میانگین فراوانی			%۹۰	%۱۰	

۵- مدل اجزای محدود

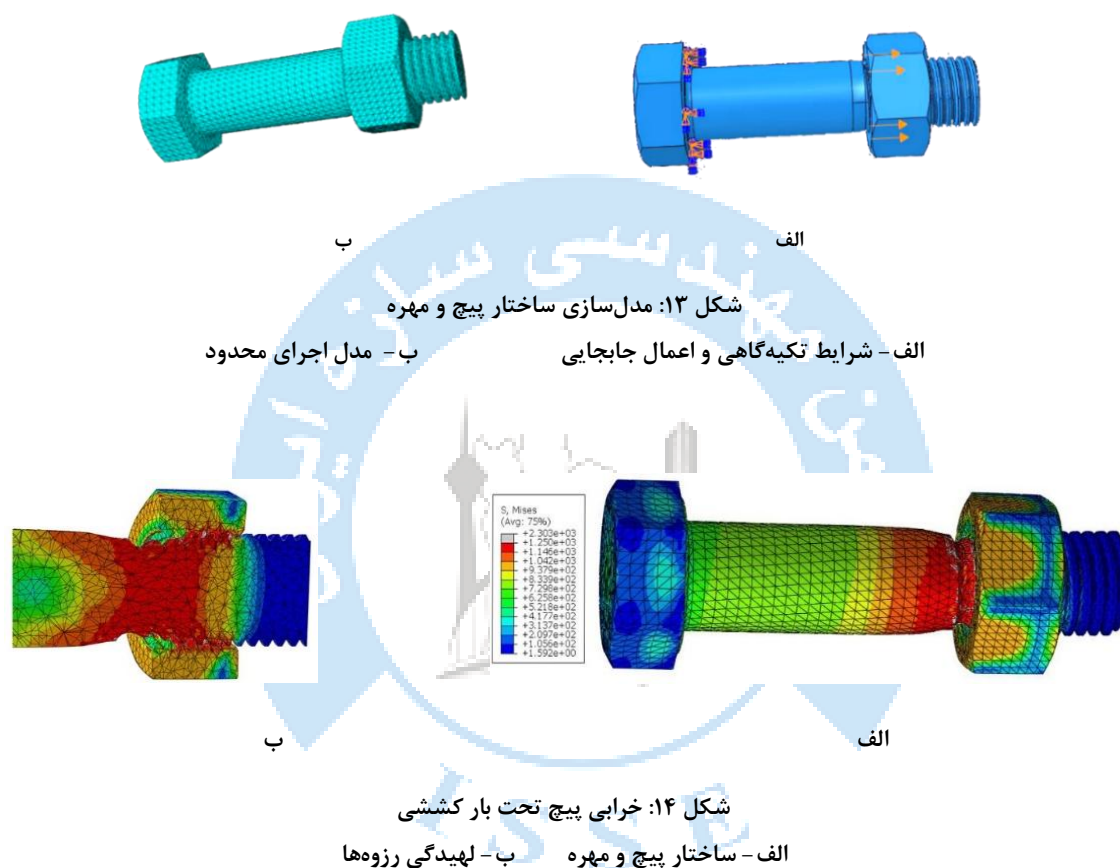
۵-۱- شبیه‌سازی و صحت‌سنجی آزمایش کشش ساختار پیچ با مهره

شبیه‌سازی آزمایش کشش پیچ با مهره در حوزه الاستو-پلاستیک و تحلیل استاتیکی، برای پیچ نمره ۲۰ با رده مقاومتی ۱۰/۹ و به طول ۸۰ میلی‌متر، با استفاده از نرم افزار Abaqus [۲۳] انجام گردید. نمودار تنش- کرنش یکی از پیچ‌های ۱۰/۹ نمره ۲۰ در شکل مطابق نمودار تنش-کرنش در شکل ۱۲، نشان داده شده است. بعد از حذف قسمت اولیه نمودار و ایده‌آل‌سازی آن به صورت دوخطی، مشخصات مکانیکی مهندسی مصالح پیچ، به دست آمد. مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگاپاسکال و تنش شروع محدوده پلاستیک ۱۰۰۰ مگاپاسکال با کرنش ۰/۰۵۷ و مقاومت نهایی ۱۱۵۰ مگاپاسکال با کرنش ۰/۰۷۸ تعیین گردید. تنش و کرنش‌های مهندسی به تنش-کرنش واقعی تبدیل و به نرم‌افزار معرفی شد.



شکل ۱۲: منحنی تنش-کرنش اسمی مصالح پیچ

برخورد قطعات از نوع سطح به سطح و تماس سطوح رزوه مهره و رزوه پیچ، برای جلوگیری از نفوذ به همدیگر، از نوع سخت و ضریب اصطکاک بین سطوح ۰/۱۹ معرفی شد. در این شبیه‌سازی، مطابق شکل ۱۳- الف، بارگذاری از نوع جابجایی کنترل بوده و نیز محل برخورد واقعی و اثر با انتهای شش وجهی پیچ به عنوان تکیه‌گاه گیردار کامل و قسمت روبروی آن بر روی مهره محل تماس و اثر با مهره محل اعمال جابجایی تعریف شده است. پیچ و مهره مطابق شکل ۱۳- ب با استفاده از المان ۱۰ گرهی، سه بعدی مرتبه دوم، مش‌بندی شد. مکانیزم گسیختگی پیچ مطابق شکل ۱۴ از نوع لهیدگی رزوه می‌باشد. شکل ۱۴ تغییر شکل رزوه‌ها و لهیدگی رزوه‌های پیچ و مهره را نشان می‌دهد. گلوبی شدن پیچ و کاهش قطر پیچ، سطح تماس مهره با پیچ را کاهش داده و لغزیدن مهره از روی پیچ را تسهیل می‌کند.

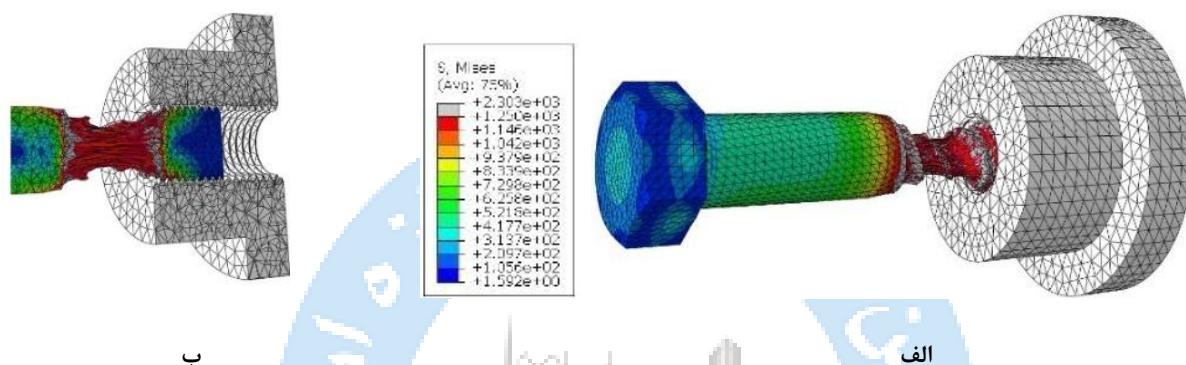


۵-۲- شبیه‌سازی و صحت‌سنجی آزمایش کشش پیچ در استاندارد ایزو

مشخصات پیچ و مدل اجزای محدود ساخته شده برای شبیه‌سازی شیوه آزمایش ایزو مشابه شیوه آزمایش ساختار پیچ و مهره است. در مدل اجزای محدود این روش، ابزار ایزو از نوع صلب و ابعاد رزوه داخلی ابزار، مشابه مهره در نظر گرفته شد. در شکل ۱۵، نحوه اعمال شرایط تکیه‌گاهی روی سطح سر پیچ و جابجایی افزایش‌یابنده ابزار ایزو نشان داده شده است. مکانیزم خرابی نمونه پیچ در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مکانیزم گسیختگی در شبیه‌سازی آزمایش کشش پیچ با ابزار استاندارد ISO 898-1، به صورت شکست ساقه پیچ ملاحظه شد. در حالی که مکانیزم گسیختگی پیچ در مدل‌سازی آزمایش کشش ساختار پیچ با مهره، به صورت لهیدگی رزوه بود؛ همچنین در آزمایش کشش ساختار پیچ با مهره، علاوه بر وقوع پدیده گلوبی شدن و لهیدگی رزوه‌های پیچ، در مهره نیز ازدیاد قطر و لهیده شدن رزوه‌های داخلی دیده شد. داده‌های شبیه‌سازی عددی آزمایش کشش پیچ با ابزار ایزو و ساختار پیچ و مهره در جدول ۶ و نمودار بار-جابجایی آن، در شکل ۱۷، جدول میانگین‌های مقاومت‌های کششی حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی عددی در جدول ۷، ارائه شده است.



شکل ۱۵: شرایط تکیه‌گاهی و اعمال جابجایی پیچ آزمایش‌شده با ابزار ایزو



ب

الف

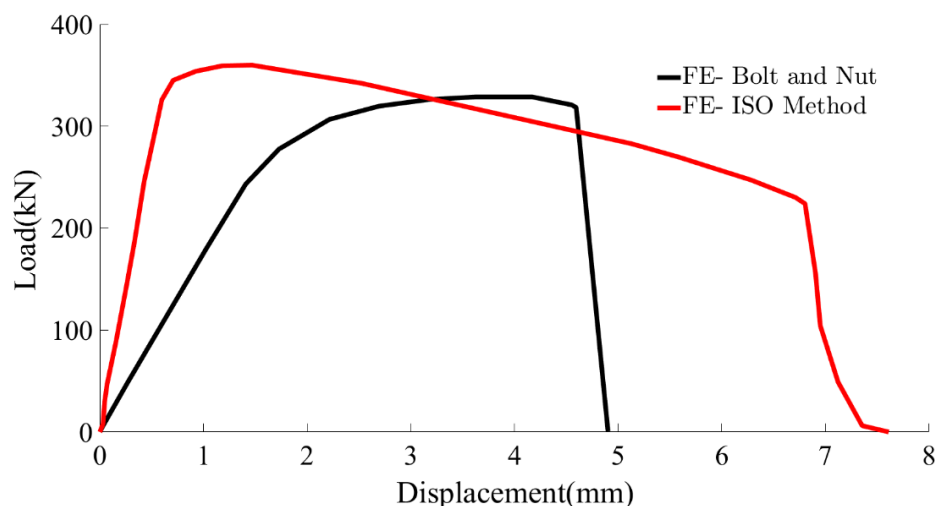
شکل ۱۶: مکانیزم خرابی پیچ در شیوه آزمایش ایزو

ب- مقطع پیچ و ابزار ایزو

الف- ساختار پیچ و ابزار ایزو

جدول ۶: نتایج شبیه‌سازی عددی آزمون کشش پیچ M20 با ابزار ایزو و ساختار پیچ و مهره

نتیجه	حداقل نیروی کششی (kN)		اندازه (mm)	ردیف
	معیار پذیرش	آزمایش		
قابل قبول	۲۵۵	۳۲۷/۶۵	۲۰×۸۰	روش مهره
قابل قبول	۲۵۵	۳۴۵/۴۹	۲۰×۸۰	روش ایزو



شکل ۱۷: نمودارهای بار-جابجایی شبیه سازی‌های آزمایش کشش پیچ M20 با ابزار ایزو و مهره

جدول ۷: میانگین مقاومت های کششی حاصل از آزمایش و شبیه سازی عددی آزمون کشش پیچ M20 با ابزار ایزو و ساختار پیچ و مهره

نتیجه	میانگین حداقل نیروی کششی (kN)		ردیف
	معیار پذیرش	آزمایش و تحلیل عددی	
قابل قبول	۲۵۵	۳۰۴/۵۲	ساختار پیچ و مهره (آزمایش)
قابل قبول	۲۵۵	۳۱۵/۶۹	روش ایزو (آزمایش)
قابل قبول	۲۵۵	۳۲۷/۶۵	ساختار پیچ و مهره (شبیه سازی عددی)
قابل قبول	۲۵۵	۳۴۵/۴۹	روش ایزو (شبیه سازی عددی)

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی تجربی، عددی و آماری مکانیزم‌های گسیختگی پیچ‌های پرمقاومت در آزمایش‌های رایج تعیین استحکام کششی پرداخته شده است. نتایج این مطالعه به شرح زیر می‌باشد.

در آزمایش کشش ساختار پیچ و مهره، فراوانی مکانیزم گسیختگی به صورت لهیدگی رزوه و گسیختگی کششی ناحیه رزوه به ترتیب ۹۰ و ۱۰ درصد می‌باشد. در حالی که در آزمایش کشش به روش ایزو، فراوانی مکانیزم گسیختگی به شکل لهیدگی رزوه و گسیختگی کششی ناحیه رزوه به ترتیب چهار و ۹۶ درصد می‌باشد. برای نمونه‌های تهیه شده از یک تامین کننده، در آزمایش کشش ساختار پیچ و ایزو، گسیختگی به ترتیب از نوع لهیدگی رزوه و گسیختگی ناحیه رزوه مشاهده شد. بنابر این، روش آزمایش کشش، در شکل مکانیزم گسیختگی و مقاومت حاصل از آزمایش، تعیین کننده می‌باشد. در روش ایزو، به دلیل استفاده از ابزار ایزو به جای مهره و درگیری رزوه‌های بیشتر در انتقال نیروی کششی، مکانیزم خرابی به صورت قابل توجه تغییر یافته و تاثیر مهره بر رفتار ساختار پیچ نادیده گرفته می‌شود.

ظرفیت کششی بدست آمده از آزمایش کشش به روش ایزو، به دلیل تغییر مکانیزم گسیختگی از نوع لهیدگی به مکانیزم خرابی از نوع گسیختگی رزوه، حدود چهار درصد بیشتر از ظرفیت تعیین شده در آزمایش کشش ساختار پیچ با مهره می‌باشد.

در اتصالات پیچی سازه‌های فولادی، از مهره هم رده مقاومتی با پیچ استفاده می‌شود. در نتیجه، رفتار پیچ در آزمایش تعیین استحکام کششی ساختار پیچ و مهره، سازگاری بیشتری با عملکرد و رفتار واقعی پیچ در اتصال خواهد داشت. از طرف دیگر مطابق توصیه آیین‌نامه اتصالات در سازه‌های فولادی (مرجع ذکر شود) به انجام آزمایش کشش پیچ با مهره الزام شده است. بنابر این، انجام آزمایش تعیین استحکام کششی ساختار پیچ با مهره، توصیه می‌شود.

در شبیه‌سازی عناصر محدود، مکانیزم گسیختگی در هر دو روش آزمایش تعیین مقاومت کششی، مطابقت خوبی با مکانیزم خرابی مشاهده شده در مطالعه تجربی دارد. ظرفیت کششی بدست آمده از تحلیل اجزای محدود پیچ در کشش به روش ایزو، به دلیل تغییر مکانیزم گسیختگی از نوع لهیدگی به مکانیزم خرابی از نوع گسیختگی رزوه، حدود پنج درصد بیشتر از ظرفیت تعیین شده در تحلیل اجزای محدود کشش ساختار پیچ با مهره می‌باشد.

مراجع

- Ahmadian, H. and H. Jalali, Identification of bolted lap joints parameters in assembled structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007. 21(2): p. 1041-1050.
- Ibrahim, R.A. and C. Pettit, Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners. *Journal of sound and Vibration*, 2005. 279(3-5): p. 857-936.
- Omar, R., M.A. Rani, and M. Yunus, Representation of bolted joints in a structure using finite element modelling and model updating. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2020. 14(3): p. 7141-7151.
- Zaman, I., et al. The effects of bolted joints on dynamic response of structures. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2013. IOP Publishing.
- Sakai, T., *Bolted joint engineering: fundamentals and applications*. 2008: Beuth Verlag.
- ISO, E., 898-1: 2013; *Mechanical Properties of Fasteners Made of Carbon Steel and Alloy Steel—Part 1: Bolts, Screws and Studs with Specified Property Classes—Coarse Thread and Fine Pitch Thread*. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2013.
- Davoodi, B. and M. Soleimani, Experimental study of changing of texture, Hardness and Strength of threads on tube made by thread rolling and Machining. *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING*, 2019. 49(1): p. 86.
- Hu, Y., et al., Performance of high strength structural bolts in tension: effects of tolerance classes. 2015.
- Kirby, B., The behaviour of high-strength grade 8.8 bolts in fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 1995. 33(1-2): p. 3-38.
- Hu, Y., et al. 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*. 2007.
- Hu, Y., et al., FE simulation and experimental tests of high-strength structural bolts under tension. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016. 126: p. 174-186.
- Grimsmo, E.L., et al., How placement of nut determines failure mode of bolt-and-nut assemblies. *Steel Construction*, 2017. 10(3): p. 241-247.
- Shaheen, M.A., et al. A numerical investigation into stripping failure of bolt assemblies at elevated temperatures. in *Structures*. 2020. Elsevier.
- Grimsmo, E.L., et al., An experimental study of static and dynamic behaviour of bolted end-plate joints of steel. *International Journal of Impact Engineering*, 2015. 85: p. 132-145.
- Plaitano, F., A. Stratan, and E. Nastri, Simplified modelling of failure in high strength bolts under combined tension and bending. *Journal of Composites Science*, 2022. 6(10): p. 302.
- Yang, F., M. Veljkovic, and Y. Liu, Fracture simulation of partially threaded bolts under tensile loading. *Engineering structures*, 2021. 226: p. 111373.
- Alipour Sajedi, S., M.R. Sheidaii, and Y. Hosseinzadeh, Analytical Model for Applying the Effect of Prying Force in the Design of Bolted Connections. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2022. 9(5): p. 39-57.
- Iran, P.a.B.O.o.I.R.o., *Code of Connections in Steel Structures 2006*, Plan and Budget Organization: Tehran.

19. RCSC, Specification for structural joints using high-strength bolts. 2014, RCSC Chicago.
20. Institution, B.S., ISO 3269, in Fasteners — Acceptance inspection. 2019, International Organization for Standardization: London, United Kingdom.
21. ISO, E., 148-1 (2016) Metallic materials—Charpy pendulum impact test part 1: test method. ISO, Geneva, Switzerland, 2016.
22. ISO, E., 898-2: 2013; Mechanical Properties of Fasteners Made of Carbon Steel and Alloy Steel—Part 2: Nuts with specified property classes —Coarse thread and fine pitch thread. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2013.
23. ABAQUS, U. S. M. (2013). Version 6.13, Dassault Systèmes Simulia Corp. Provi

