



بررسی تأثیر فشار و شعاع انحنای سطح بر ضریب اصطکاک در سطح تماس اتصالات

کاوه عباسی^{۱*}، هژیراحساسی^۲

^۱ دانشکده فنی و مهندسی، واحد اسلام آباد غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلام آباد غرب، کرمانشاه، ایران
^۲ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت:
بازنگری:
پذیرش:
ارائه آنلاین:

کلمات کلیدی:

اتصال تداخلی
ضریب اصطکاک
میزان تداخل
فشار
مدل سازی اجزا محدود

خلاصه: اتصالات تداخلی به صورت گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. این اتصالات در معرض بارهای استاتیکی و دینامیکی پاسخگوی نیازهای طراحی هستند. اتصالات تداخلی همواره با عیوبی همراه هستند که بر کارکرد آن‌ها اثر مستقیم دارند. برای نمونه در هر اتصالی سطح تماس اجزا ایده‌آل و استوانه‌ای کامل نیست و انحراف وجود دارد. این پارامترها از این جهت حائز اهمیت هستند که تغییراتشان بر روی کارایی و استحکام اتصالات تداخلی تأثیر می‌گذارد. از جمله پارامترهای مؤثر بر استحکام اتصالات تداخلی ضریب اصطکاک، زبری، خواص مواد، ابعاد فیزیکی و نامنظمی‌های هندسی سطح‌های در تماس را می‌توان بیان نمود. در این پژوهش با تغییر قطر و مقدار تداخل و در نتیجه آن، فشار در سطح تداخل، اثر این پارامترها بر استحکام اتصال و ضریب اصطکاک در سطح تداخل مورد بررسی قرار گرفته است. برای استخراج ضریب اصطکاک از ترکیب نتایج تجربی و المان محدود استفاده شد. روش‌های بررسی آماری فاکتوریل مورد استفاده قرار گرفت و اثرات فشار و قطر بر ضریب اصطکاک و استحکام اتصال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که رابطه قطر با ضریب اصطکاک در سطح تداخل اتصالات تداخلی معکوس است و افزایش تداخل و متعاقب آن فشار، باعث افزایش ضریب اصطکاک خواهد شد.

۱- مقدمه

اتصالات اجزا محدود را با توجه به عیوب فرم در آن‌ها بررسی نمودند و در این راه تلاش نمودند تا با استفاده از تحلیل اجزا محدود اثرات انحراف از پروفیل استوانه‌ای در سطح تداخل اتصالات را بر میدان تنش بررسی نمایند. در پژوهشی دیگر بوتوتائو و همکاران [۴] با استفاده از المان‌های همگن شده تأثیرات زبری سطح در اتصالات تداخلی را مورد بررسی قرار دادند. جکسون و گرین [۵] در پژوهشی دیگر سطوح تماس زبر را با استفاده از مدل تماس ارتجاعی و تحلیل فوریه پستی بلندی‌های سطح تماس، مورد بررسی قرار دادند. بنابراین استفاده از روش اجزا محدود در تحلیل اتصالات تداخلی تا به امروز معمول و توانایی آن اثبات شده است.

امروزه اتصالات در صنعت از درجه اهمیت بالایی برخوردار است و نیاز به ایجاد اتصال در جای جای صنعت روزافزون است. در این بین اتصالات تداخلی که از انطباق بین قطعات دوار حاصل می‌گردد از جنبه‌های متعدد اهمیت دوچندان یافته است. این اتصالات به واسطه ساختار دوار، به سادگی قابل بالانس کردن هستند و می‌توان به راحتی از آن‌ها در کنار سیستم محرکه دوار در صنایع استفاده نمود. همچنین اتصالات تداخلی می‌تواند برای تعمیر قطعات دوار و احیا سطوح دوار معیوب در قطعات نیز استفاده گردد [۱]. این اتصالات تا به امروز از دیدگاه‌های متعدد مورد بررسی قرار گرفته است. فعالیت‌های فراوانی در راستای بررسی اثرات انحراف از هندسه بر اتصالات تداخلی صورت گرفته و بسیاری تلاش کرده‌اند تا در این راه از تحلیل اجزا محدود یاری بگیرند. به عنوان نمونه بوتوتائو و همکاران [۲] اثرات عیوب فرم در سطح اتصال بر روی مشخصه‌های استحکام اتصالات تداخلی را بررسی نمودند و سوگالاد و همکاران [۳] توانایی حمل بار

از طرف دیگر در برخی از پژوهش‌های دیگر استحکام اتصالات تداخلی با حضور چسب‌ها مورد بررسی قرار گرفت. گالیلو و همکاران [۶] اثر چسب در استحکام اتصالات تداخلی و اثرات پارامترهای تریبولوژی سطح تداخل بر آن را مورد بررسی قرار دادند. ایشان نشان دادند که اثرات حضور چسب در سطح تداخل را می‌توان در تغییرات ضریب اصطکاک سطح تداخل جستجو نمود. همچنین کوروکولوو

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: k.abbasi@iauo.ac.ir

نموده‌اند و به نظر می‌رسد این بررسی در اصطکاک کولمب و بدون روانکاری در سطوح تماس مغفول مانده است. که در این پژوهش تلاش می‌گردد اثر فشار و قطر بر نیروی استخراج و ضریب اصطکاک در سطح تماس اتصالات تداخلی بررسی گردد.

همچنین از جمله دیگر پارامترهای تأثیرگذار بر ضریب اصطکاک در سطح تماس می‌توان زبری سطح را نام برد. بسیاری از پژوهش‌های پیشین به شیوه‌های مختلف به بررسی اثر زبری بر اصطکاک پرداخته‌اند. به عنوان نمونه ژیاو و همکاران [۱۵] اثر زبری و توزیع فشار تماس در سطح بر اصطکاکی غلتشی/ لغزشی بررسی نموده‌اند.

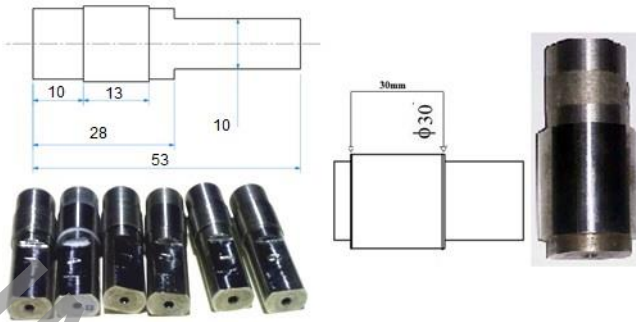
با توجه به پژوهش‌های پیشین به نظر می‌رسد که فشار بر ضریب اصطکاک مؤثر است. از طرف دیگر در بررسی‌های پیشین در رابطه با اتصالات تداخلی ضریب اصطکاک مستقل از فشار سطح تداخل فرض شده است. بررسی صحت و سقم این فرض هدف این پژوهش است. همچنین تلاش می‌گردد اثرات تغییر در اندازه قطر سطح تداخل بر مقدار ضریب اصطکاک مورد توجه قرار گیرد. نتایج آزمایش‌های طراحی شده با استفاده از بررسی‌های آماری تجزیه و تحلیل گردیده و در این پژوهش گزارش شده است.

روش سنتی برای محاسبه میدان تنش در سطح تداخل اتصالات تداخلی مبتنی بر حل ارائه شده لامه^۱ برای استوانه‌های جدار ضخیم و با فرض قطعات متقارن محوری بدون عیوب سطح است [۱۶]. با استفاده از حل لامه می‌توان اثر تغییرات مقدار تداخل بر نیروی عمود بر سطح را محاسبه نمود، اما برای اصطکاک مقدار پیش فرض و مستقل از فشار در نظر گرفته می‌شود و ظرفیت انتقال گشتاور اتصالات با استفاده از این مقادیر قابل تخمین است [۱۷]. در اغلب پژوهش‌های پیشین مقدار این ضریب با توجه به تجربیات قبلی و مستقل از فشار تداخل لحاظ می‌گردید. یک دیدگاه جدید برای اعمال اثرات سطح در محاسبات، تغییر مقدار ضریب اصطکاک سطح تداخل با توجه به ویژگی‌های آن سطوح خاص است. سیفی و عباسی [۱۸] در پژوهش خود روشی ارائه نمودند تا بتوان ضریب اصطکاک سطح تماس اتصالات تداخلی را مبتنی بر شرایط آن سطح تخمین زد؛ در این روش مقدار ضریب اصطکاک با توجه به شرایط سطح محاسبه می‌گردد.

در این پژوهش تلاش می‌گردد تا با استفاده از نمونه‌های

همکاران [۷] روشی عمومی برای محاسبه ضریب اصطکاک در سطح تماس قطعات مدور پیشنهاد نمودند. این روش برای محاسبه ضریب اصطکاک در سطح تماس سیستم تعلیق موجود در دوشاخه جلوی موتورسیکلت استفاده شد. در پژوهشی دیگر کوروکولو و همکاران [۸] امکان ابقای استحکام اتصالات تداخلی با جایگزینی مواد چسبنده با کاهش مقدار تداخل را بررسی نمودند. آن‌ها از روش پیشین پیشنهاد شده برای محاسبه ضریب اصطکاک در بررسی چند مطالعه موردی اتصالات هیبریدی استفاده نمودند و بررسی خستگی اتصالات هیبرید را نیز به انجام رساندند [۹]. کوروکولو و همکاران [۱۰] اثر نسبت طول تداخل به قطر تداخل بر استحکام برشی اتصالات تداخلی را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که این نسبت تأثیر ناچیزی بر استحکام برشی چسب دارد. همچنین مسجدی و خوانساری [۱۱] در یک مطالعه جامع تجربی اثرات زبری سطح بر تماس را مورد مطالعه قرار دادند. در بسیاری از این تحقیقات تلاش شده است که بتوان به انحاء مختلف با کاهش تداخل استحکام اتصال تداخلی را حفظ نمود. در این مسیر، همواره توجه به تریبولوژی سطح یکی از جنبه‌های اثرگذار بوده است.

بطور کلی، دو عنصر فشار ناشی از تداخل و اصطکاک سطوح تماس شفت و بوش عامل ایجاد ارتباط بین قطعات و انتقال گشتاور و نیرو در اتصالات تداخلی بوده است. در استانداردها و روابط صنعتی ارائه شده برای طراحی این اتصالات، فارغ از خواص مواد، پارامتر تعیین کننده مقدار تداخل مطرح شده است. بررسی‌های دقیق و پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که نحوه ایجاد اتصال در بین سطوح دارای تماس تابع پارامترهای بسیاری است. به عنوان نمونه ضریب اصطکاک در سطح تماس می‌تواند تابع پارامترهایی نظیر زبری و فشار باشد. استمبالسکی و همکاران [۱۲] در پژوهشی تلاش نمودند تا اندرکنش فشار و ضریب اصطکاک در سطح تماس را به صورت تابعی از فشار و سرعت لغزش تعیین کنند. همچنین کیم و همکاران [۱۳] در پژوهشی اصطکاک وابسته به فشار را تعیین نمودند و بیان نمودند که توزیع فشار نیز می‌تواند بر مقدار ضریب اصطکاک اثر بگذارد و در حقیقت اثر نحوه توزیع فشار بر ضریب اصطکاک را نیز مورد توجه قرار دادند. همچنین باور و زیسمان [۱۴] اثر فشار بر اصطکاک در سطح تماس روانکاری شده را بررسی نموده‌اند. غالب پژوهش‌های مذکور ضریب اصطکاک متأثر از فشار را در سطوح روانکاری شده بررسی



شکل ۱: ابعاد و هندسه قطعه شفت

Fig. 1. Dimensions and the geometry of shaft

شفت را نیز نشان داد. جهت ارزیابی دقت ابعادی قطعه بوش از ماشین اندازه‌گیری سه‌بعدی مختصات استفاده شد و اندازه‌گیری‌ها با دقت ۱/۰ میکرون، صحت ابعادی این قطعات را تأیید نمود. با اطمینان از اندازه این قطعه در تحلیل‌های عددی این قطعه به صورت استوانه کامل و بدون عیوب هندسه در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری قطر داخلی بوش در ۳ مقطع و در هر مقطع در ۵ نقطه انجام گرفت. بنابراین برای استحصال هندسه دقیق شفت‌ها از ابزار اسکن دقیق نوری استفاده گردید. در این گام از هر جفت نمونه شفت‌ها یک نمونه اسکن گردید و مدل ابر نقاط قطعه، استخراج شد. با استفاده از اسکن نوری هندسه سطح تماس شفت‌ها برداشت شد. مدل‌های ابر نقاط حدوداً از تعداد ۱۰۰۰۰۰ نقطه تشکیل شده است. در ادامه با استفاده از مدل ابر نقاط و نرم‌افزار ژئومجیک استدیو^۳ تلاش شد تا سطح تداخل با دقت میکرومتر مدل گردد. هدف از این فعالیت استحصال هندسه مدل جهت تحلیل‌های اجزا محدود با حداکثر دقت بود. در این پژوهش نرم‌افزار آباکوس جهت انجام تحلیل اجزا محدود مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مدل‌های دقیق شفت با مدل ایده‌آل و بدون انحرافات ابعادی بوش تداخل داده شد و جهت انجام تحلیل‌های اجزا محدود بعدی مورد استفاده قرار گرفت. هندسه حاصل از مدل‌های ابر نقاط و ژئومجیک در ادامه برای تحلیل در نرم‌افزار آباکوس مورد استفاده قرار گرفت و هدف حذف منابع خطای ناشی از عدم دقت در هندسه مدل، از خروجی‌های تحلیل اجزا محدود بود. همچنین جهت اعمال خواص مواد در نرم‌افزار تحلیل اجزا محدود آزمون کشش بر روی نمونه‌های استاندارد ساخته شده از مواد اولیه شفت و بوش انجام شد و خواص مواد استخراج شده به نرم‌افزار اعمال گردید. البته آزمون طیف‌سنجی و تطابق آلیاژها با ترکیب استاندارد نیز در این قسمت صورت پذیرفت. خواص تجربی

جدول ۱: خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده مواد شفت و بوش

Table 1. Mechanical properties measured of bushing and shaft

استحکام تسلیم (MPa)	ضریب کشسانی (GPa)	ضریب پواسون	جرم حجمی (kg/m ³)	
420	205	0/29	7850	شفت
700	210	0/3	7810	بوش

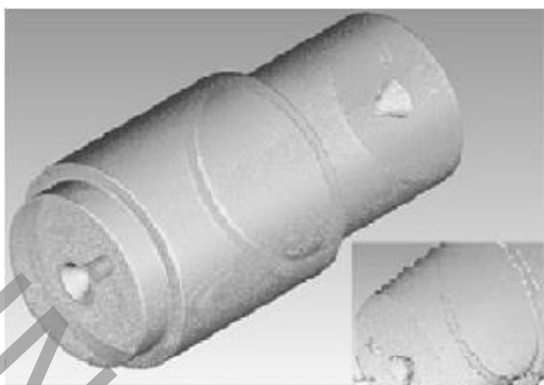
آزمایشگاهی با قطرهای و میزان تداخل متفاوت و با استفاده از نتایج تجربی و اجزا محدود، اثر فشار و قطر سطح تداخل بر ضریب اصطکاک در سطح تداخل مورد تحلیل آماری قرار گیرد.

۲- ساخت قطعات و فعالیت‌های تجربی

جهت بررسی اتصالات تداخلی در این پژوهش اتصالات تداخلی بین شفت و بوش انتخاب گردید که در صنعت به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای ساخت شفت‌ها از فولاد استاندارد ۴۱۴۰ AISI^۱ استفاده گردید. قطعات شفت با استفاده از عملیات تراشکاری و در دو قطر ۳۰ و ۱۵ میلیمتر و با میزان طول تداخل به ترتیب ۳۰ و ۱۳ میلیمتر ساخته شدند. با توجه به اینکه طول تداخل تنها در افزایش سطح تماس مؤثر است، در پژوهش حاضر فرض بر آن قرار گرفت که این طول تأثیری بر ضریب اصطکاک ندارد و از طرف دیگر بر نیروی استخراج قطعاً تأثیر مستقیم خواهد گذاشت. ذکر این نکته ضروری است که تغییر قطر علاوه بر تأثیر در افزایش سطح تماس، ممکن است با تغییر در شعاع انحنا سطح تماس بر پارامترهای مؤثر در استحکام اتصال مؤثر واقع شود. در هر قطر دو جفت نمونه شفت با میزان تداخل قطری ۰/۰۲ میلیمتر و ۰/۰۳ میلیمتر تهیه شد. برای ایجاد تداخل با دقت میکرومتر قطعات شفت با استفاده از سنگ محور ساخته شدند. در نهایت تعداد چهار جفت شفت با استفاده از فرآیندهای تراشکاری و سنگ فرز تولید شدند. همچنین از رینگ داخلی یاتاقان‌های استاندارد غلتکی به شماره استاندارد NA ۶۹۰۶ و NA ۴۹۰۲ برای ایجاد اتصالات تداخلی استفاده گردید. ابعاد این رینگ‌ها به ترتیب به قطر داخلی ۳۰ و ۱۵ میلیمتر و قطر خارجی ۳۵ و ۲۰ میلیمتر بود. بررسی اولیه ابعاد قطعات با ماشین اندازه‌گیری سه‌بعدی مختصات^۲ نشان از دقت ابعادی قطعات بوش در محدوده میکرومتر داشت و انحرافات ابعادی در قطعه

1 VCN 150

2 Coordinate Measurement Machine (CMM)



شکل ۲: مدل ابر نقاط استخراج شده از دوربین اسکن نوری

Fig. 2. Point cloud model extracted from optical scanning camera



شکل ۳: (الف) قطعات سرهم شده. (ب) استخراج قطعات توسط فیکسچر طراحی شده

Fig. 3. A assembled parts – B Component extraction by designed Fixture



شکل ۴: فیکسچر مورد استفاده برای استخراج قطعات کوچکتر

Fig. 4. Fixture used for extracting smaller parts

شده، شفت‌ها از بوش‌ها خارج شده و نیروی مورد نیاز برای استخراج آن‌ها اندازه‌گیری شد. متذکر می‌گردد برای استخراج اتصالات با قطرهای متفاوت دو فیکسچر متفاوت طراحی و ساخته شد. شکل ۳ قطعات سرهم شده و فرآیند استخراج یک نمونه اتصال و یک نمونه از فیکسچرهای استخراج را نشان می‌دهد. شکل ۴ نیز فیکسچر مورد استفاده برای استخراج قطعات کوچکتر را نشان می‌دهد.

در ادامه و در شکل‌های ۵ تا ۸ نیروهای استخراج تجربی هر یک از جفت اتصالات مشابه در نمودارهای نیرو و جابجایی ارائه شده است.

مواد مورد استفاده در تحلیل اجزا محدود در جدول ۱ ارائه گردیده است.

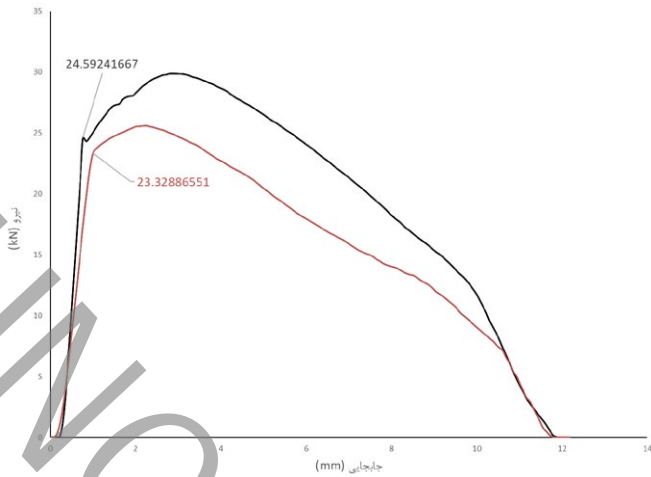
شکل ۱ نشان‌دهنده ابعاد و هندسه قطعات شفت است. شکل ۲ نشان‌دهنده یک نمونه ابر نقاط استخراج شده در محیط نرم‌افزار ژئومجیک است. با توجه به مشابهت فرآیند تولید شفت‌ها، به نظر زبری آن‌ها نیز می‌بایست مشابه و یکسان باشد. اندازه‌گیری زبری سطح قطعات شفت نشان داد که مقدار این پارامتر بر روی سطح تمامی قطعات در حدود 0.2 میکرومتر می‌باشد. زبری توسط یک دستگاه پرتابل تماسی با دقت 0.1 میکرومتر اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری زبری در پنج مرتبه و در مسیرهایی در راستای محور شفت و به طول 1 سانتیمتر انجام شد و از نتایج میانگین‌گیری شد. نتایج با دقت مناسبی همگی در محدوده 0.2 میکرومتر قرار گرفتند و با توجه به انحراف معیار نتایج و البته یکی بودن فرآیند تولید قطعات این مقدار در تمامی قطعات یکسان در نظر گرفته شد [۱۹].

با توجه به اهمیت صحت و دقت خواص مکانیکی مواد و هندسه قطعات در نتیجه تحلیل‌ها، در این پژوهش تلاش گردید تا خواص مکانیکی و هندسه شفت و بوش به صورت دقیق استخراج گردد. در حل اجزاء محدود، نیاز است که خواص مکانیکی مواد تشکیل دهنده شفت و بوش در دسترس باشد و در روابط و نرم‌افزار وارد گردد.

برای سرهم کردن اجزاء اتصال، بدون ایجاد تخریب در سطح تداخل، دمای شفت‌ها با استفاده از نیروژن مایع پایین آمد و بوش‌ها نیز در یک کوره صنعتی گرم شدند و در نهایت بدون اعمال نیروی خارجی، قطعات سرهم شدند. با توجه به این که در فرآیند تجربی سرهم کردن اتصال، قطعات بوش گرم شدند، پیش از انجام آزمایش کشش بر روی نمونه‌های بوش، این قطعات نیز تحت دمای مشابه با آنچه که در فرآیند سرهم کردن رخ می‌دهد، قرار گرفتند و در ادامه تست کشش بر روی نمونه‌های گرم‌شده انجام گرفت. همچنین متذکر می‌گردد که در هنگام انجام تست کشش بر روی قطعات، ناحیه پلاستیک نمودار تنش- کرنش نمونه‌ها، پس از تبدیل مقادیر مهندسی به حقیقی برای اعمال رفتار پلاستیک در تحلیل اجزا محدود، مورد استفاده قرار گرفتند.

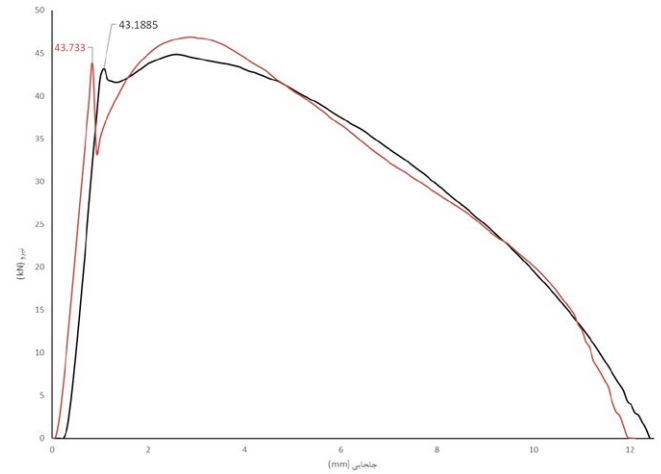
۱-۲- نیروی استخراج تجربی

با استفاده از ماشین تست یونیورسال سنتام و فیکسچر طراحی



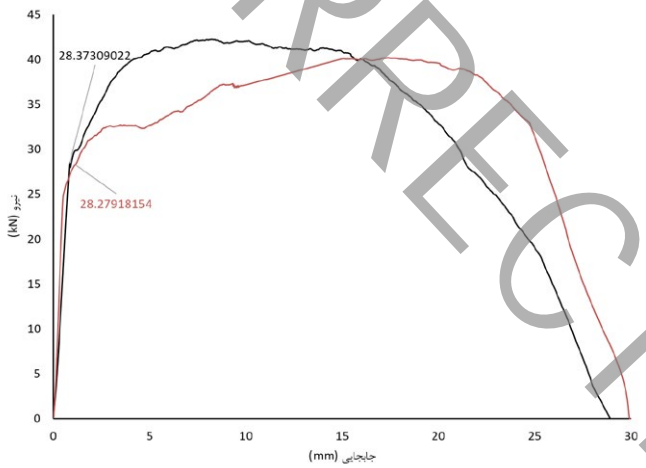
شکل ۶: نمودار نیرو و جابجایی نمونه C و D با تداخل شعاعی ۰/۰۱ میلیمتر و قطر ۱۵ میلیمتر

Fig. 6. Diagram of force – movement of C and D sample by radial interface 0.01 and 15mm Diameter



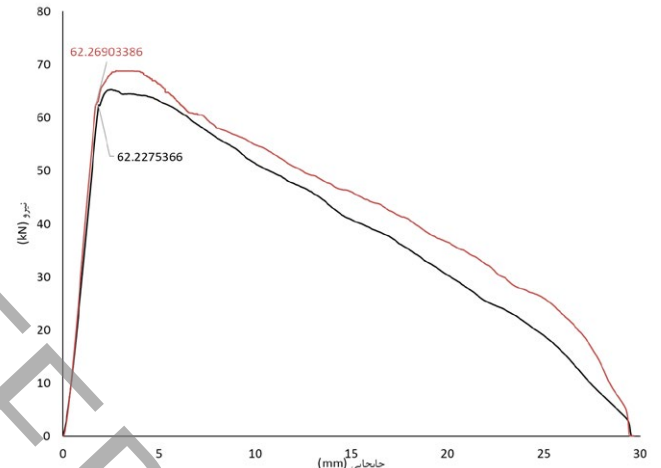
شکل ۵: نمودار نیرو و جابجایی نمونه A و B با تداخل شعاعی ۰/۰۱۵ میلیمتر و قطر ۱۵ میلیمتر

Fig. 5. Diagram of force – movement of A and B sample by radial interface 0.015 and 15mm Diameter



شکل ۸: نمودار نیرو و جابجایی نمونه H و G با تداخل شعاعی ۰/۰۱ میلیمتر و قطر ۳۰ میلیمتر

Fig. 8. Diagram of force – movement of H and G sample by radial interface 0.01 and 30mm Diameter



شکل ۷: نمودار نیرو و جابجایی نمونه E و F با تداخل شعاعی ۰/۰۱۵ میلیمتر و قطر ۳۰ میلیمتر

Fig. 7. Diagram of force – movement of E and F sample by radial interface 0.015 and 30mm Diameter

همان‌طور که روشن است نیروی استخراج جفت نمونه به قطر ۱۵ میلیمتر و با میزان تداخل شعاعی ۱۵ میکرومتر، یعنی نمونه‌های A و B عبارتست از ۴۳۱۸۸/۵ و ۴۳۷۳۳ نیوتن. نتایج در این جفت نمونه به هم نزدیک بوده و تکرارپذیری آن‌ها مشهود است. همچنین این نتایج در مورد جفت شفت C و D با قطر ۱۵ میلیمتر و میزان تداخل شعاعی ۱۰ میکرومتر به ترتیب ۲۴۵۹۲/۴ و ۲۳۳۲۸/۹ می‌باشد. کاهش در نیروی استخراج با توجه به کاهش میزان تداخل بدیهی و قابل انتظار است؛ همچنین نزدیکی نتایج تجربی تکرارپذیری آن‌ها را تأیید می‌نماید. شکل ۸ نمودار نیروی استخراج مربوط به جفت

نمونه E و F با قطر ۳۰ میلیمتر و تداخل شعاعی ۰/۰۱ میکرومتر را نشان می‌دهد. نمودارها نیروی استخراج برای این قطعات را ۶۲۲۶۹ و ۶۲۲۲۷/۵ نیوتن ارائه می‌دهند. نمودار شکل ۸ نیروی استخراج قطعات H و G با قطر ۳۰ میلیمتر و تداخل شعاعی ۱۰ میکرومتر را ارائه می‌دهد. مقادیر نیروی استخراج برای این قطعات نیز به ترتیب ۲۸۲۷۹/۲ و ۲۸۳۷۳/۱ می‌باشد. نقطه قابل ذکر در مقایسه کلی نمودارها وجود قله و در ادامه کاهش با شیب نسبتاً یکنواخت در سه نمودار اول و البته روند متفاوت در نمودار شکل ۸ است. علت این رفتار متفاوت را می‌توان در سایش در سطح تداخل قطعات جستجو کرد. در

در صورتی که اتصال مورد بررسی در این پژوهش بدون عیوب فرم سطحی در نظر گرفته می‌شد، از نقطه نظر تئوری فشار تداخل آن معادل ۱۸/۵ مگاپاسکال بود.

$$P = \frac{10^{-3}}{1.5 \left(\frac{15^2}{205 \times 10^9 \times 15^2} + \frac{17.5^2 + 15^2}{210 \times 10^9 (17.5^2 - 15^2)} \right)} + \frac{10^{-3}}{1.5 \left(\frac{0.3}{210} - \frac{0.29}{205} \right) \times 10^{-9}} = 18504374.39 \text{ Pa} \quad (2)$$

همچنین مقدار فشار تداخل برای قطعه با قطر ۳۰ میلیمتر و مقدار تداخل ۱۵ میکرومتر معادل ۲۷/۷۵ مگاپاسکال خواهد بود. از محاسبه فشار تداخل با استفاده از حل لامه برای قطعات با قطر ۱۵ میلیمتر و مقدار تداخل ۱۰ و ۱۵ میکرومتر، مقدار فشار تداخل بترتیب برابر مقادیر ۶۱/۰۲ و ۹۱/۵۳ مگاپاسکال به دست آمد. نکته جالب در این رابطه افزایش فشار تداخل با کاهش قطر تداخل و البته ثابت ماندن مقدار تداخل است. همان‌طور که روشن است در قطعات با تداخل شعاعی ۱۰ میکرومتر، با کاهش شعاع تداخل از ۱۵ میلیمتر به ۷/۵ میلیمتر، مقدار فشار تداخل از ۱۸/۵ مگاپاسکال به ۶۱/۰۲ افزایش می‌یابد.

۴- تحلیل اجزاء محدود

۴-۱- مدل‌سازی تداخل اجزاء اتصال

در این پژوهش برای انجام تحلیل اجزاء محدود از نرم‌افزار تجاری آباکوس استفاده شد. همان‌طور که بیان گردید هندسه دقیق قطعات شفت با استفاده از اسکن نوری و با دقت یک میکرومتر مدل شد. همچنین با توجه به اندازه‌گیری‌های اولیه توسط ماشین اندازه‌گیری مختصات و با دقت میکرومتر، روشن شد که قطعه بوش از استوانه کامل انحراف ناچیزی دارد و می‌توان آن را به صورت استوانه کامل در فرآیند مدل‌سازی وارد نمود. سپس قطعات شفت و بوش سرهم شدند و فشار تداخل بین آن‌ها با استفاده از تحلیل اجزاء محدود اعمال گردید. با توجه به روش مطرح شده در پژوهش سیفی و عباسی [۱۸] برای استخراج ضریب اصطکاک لازم است تا با استفاده از تحلیل اجزاء محدود نیروی عمود بر سطح تداخل استخراج گردد. مقدار این نیرو از رابطه زیر قابل استحصال است:

بررسی چشمی سطح قطعات مربوط به نمودار ۸ مشاهده گردید که سطح سایش و عمق شدت بروز خراش‌ها در سطح سایش به نسبت دیگر قطعات بیشتر و عمیق‌تر است، بنابراین می‌توان استنباط نمود که عدم کاهش با شیب شدید در نمودار ۸ و بالا ماندن سطح نیرو به نسبت دیگر نمودارهای استخراج، ناشی از ادامه درگیری در سطح تداخل و به تبع آن سایش و خراشیدگی در سطح تداخل است [۱۹].

۳- حل تئوری

اکنون با استفاده از حل ارائه شده برای استوانه‌های جدار ضخیم [۱۶] و تعمیم آن برای اتصال تداخلی با دو جنس متفاوت می‌توان فشار تداخل را محاسبه نمود.

$$P = \frac{\delta}{c \left\{ \left[\frac{c^2 + a^2}{E_s (c^2 - a^2)} + \frac{b^2 + c^2}{E_b (b^2 - c^2)} \right] + \left(\frac{\nu_b}{E_b} - \frac{\nu_s}{E_s} \right) \right\}} \quad (1)$$

که در آن δ مقدار تداخل شعاعی در اجزای اتصال، E_s ضریب کشسانی شفت، ν_s نسبت پواسون شفت، E_b ضریب کشسانی بوش و ν_b نسبت پواسون بوش است؛ شعاع‌های داخلی شفت و خارجی بوش به ترتیب با حروف a و b نشان داده شده‌اند. شعاع تداخل با c مشخص شده است. حال با استفاده از تحلیل لامه برای قطعات متقارن محوری، می‌توان فشار تداخل را از رابطه (۱) محاسبه نمود. پس از جایگذاری خواص مکانیکی شفت و بوش در روابط فوق مقدار فشار تداخل در دسترس خواهد بود. مقادیر محاسبه شده از حل لامه می‌تواند تا حد زیادی قابل اتکا باشد؛ سیفی و عباسی [۲۰] در مقاله خود بیان نموده‌اند که استفاده از میانگین تداخل در سطح تداخل با عیوب فرم به همراه حل لامه می‌تواند منجر به نتایج قابل قبولی جهت محاسبه فشار تداخل گردد.

در اینجا با فرض قطعات بدون عیب مشابه با نمونه‌های آزمایشگاهی مقدار فشار تداخل با استفاده از حل لامه محاسبه می‌گردد. بعنوان نمونه برای شفت کامل و با مقدار تداخل شعاعی ثابت ۱۰ میکرومتر مقدار فشار تداخل معادل ۱۸/۵ مگاپاسکال خواهد بود. لازم به یادآوری است که مقدار فشار تداخل مذکور متناظر با اتصالی است که عاری از عیوب فرم است. به بیان دیگر

Table 2. Mechanical properties measured of bushing and shaft

جدول ۲: مطالعه همگرایی شبکه‌بندی یک نمونه قطعه شفت به قطر ۱۵ میلی‌متر

مدلسازی هفتم	مدلسازی ششم	مدلسازی پنجم	مدلسازی چهارم	مدلسازی سوم	مدلسازی دوم	مدلسازی اول	
79563	76345	71954	69726	66257	61438	30816	تعداد المان‌های مدل شفت
11237	11198	10996	10526	9875	9168	7594	استحکام استخراج اجزا محدود
0/347	1/804	4/274	6/185	7/159	17/168		خطای نسبی (%)

- برای مدل‌سازی اجزاء محدود تداخل، از تماس با لغزش کوچک استفاده گردید.

- خواص مواد بر مبنای نتایج آزمون‌های تجربی اندازه‌گیری و به تحلیل اجزاء محدود اعمال گردید. رفتار پلاستیک مواد، پیش از فرآیند گلولی شدن نیز، اندازه‌گیری و به تحلیل اعمال گردید.

رفتار اصطکاکی در سطح تماس با مدل کولمب شبیه‌سازی گردید. فرض بر این قرار گرفت که ضریب اصطکاک مستقل از سرعت لغزش است. مقدار ضریب اصطکاک در تحلیل اولیه اجزاء محدود ۲/۰ در نظر گرفته شد. شفت و بوش با استفاده از المان‌های ۱۰ گره‌ای

چهاروجهی^۱ شبکه‌بندی شدند. استقلال نتایج از اندازه شبکه‌بندی نیز بررسی گردید و اندازه مناسب برای شبکه‌بندی انتخاب شد. یک نمونه از فرآیند صحت‌سنجی شبکه‌بندی و استقلال نتایج از تعداد المان‌ها

برای قطعات کوچک نیز در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به یادآوری است که قسمت انتهایی اضافه شده به مدل شفت، جهت اعمال قیدها و شرایط مرزی به سیستم مورد استفاده قرار گرفت و روشن است

که میدان تنش در این بخش تأثیری بر نتایج ندارد. متوسط تعداد المان‌های مورد استفاده برای شبکه‌بندی شفت با قطر ۳۰ میلی‌متر در حدود ۷۵۰۰۰ المان و برای قطعه به قطر ۱۵ میلی‌متر ۸۰۰۰۰ بوده

است. متذکر می‌گردد که دلیل وجود تعداد مش بالاتر در قطعه با ابعاد کوچک‌تر، وجود صفحات برآزش شده بیشتر در این قطعات جهت تولید هندسه آن‌ها بود. توانایی مدل‌سازی دقیق قطعات و تحلیل

آن‌ها در آباکوس پیش از این و توسط سیفی و عباسی [۱۸] بررسی شده است. یک نمونه قطعه شفت مش‌بندی شده به همراه شرایط

$$F_N = \int \sigma_r dA \quad (3)$$

که در عبارت فوق F_N نیروی عمود بر سطح تماس تداخل و σ_r تنش شعاعی است و dA المان سطح است. در این پژوهش برای استخراج نیروهای عمود بر سطح، ابتدا نیروی عمودی مورد نیاز برای خارج کردن شفت از بوش (استحکام استخراج) به دست می‌آید و با توجه به این که مقدار استحکام استخراج در تحلیل اجزاء محدود از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$ES = \mu \times F_N = \mu \int \sigma_r dA \quad (4)$$

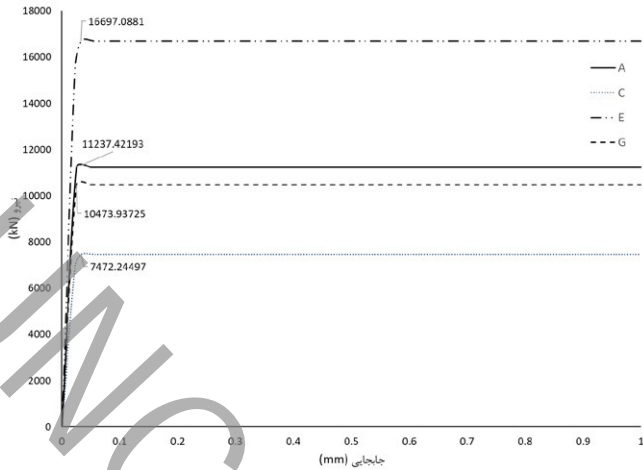
می‌توان با تقسیم نیروی استخراج بر ضریب اصطکاک پیش‌فرض، مقدار نیروی عمود بر سطح F_N را به دست آورد. برای افزایش دقت مدل‌سازی اجزاء محدود تلاش گردید که هندسه قطعات با دقت

میکرومتر مدل‌سازی شود و خواص مکانیکی مواد اولیه به صورت تجربی اندازه‌گیری شد. بنابراین می‌توان استنباط نمود که مقدار نیروی عمودی در سطح تداخل قابل اتکا و اطمینان است و از دقت لازم برخوردار است. جزئیات فرضیات تحلیل اجزاء محدود شفت و

بوش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:
- بوش‌ها به صورت قطعات استوانه کامل و بدون عیب مدل شدند.

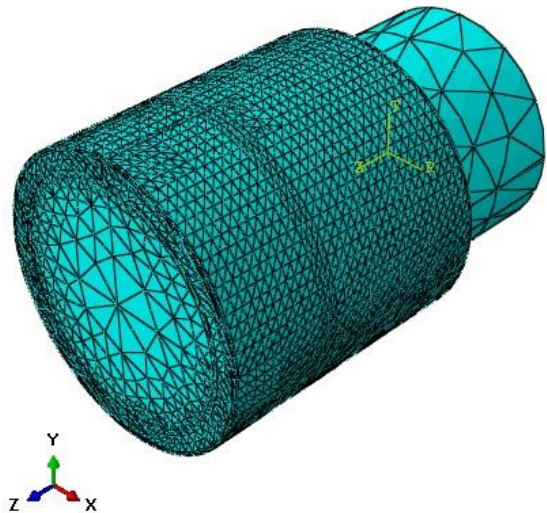
- اثرات احتمالی تغییرات دما در خلال فرآیند مونتاژ، ناچیز در نظر گرفته شد. البته در آزمون کشش مواد بوش، نمونه‌ها، پیش از آزمون

در شرایط حرارتی مشابهی قرار گرفتند.



شکل ۱۰: نمودار نیرو - جابجایی حاصل از تحلیل اجزاء محدود استخراج 4 نمونه شفت A, C, E و G

Fig. 10. Diagram of force – movement of finite element for extracting of A, B, C, D shaft



شکل ۹: نمونه شبکه‌بندی شده مدل اسکن شده با دقت بالا

Fig. 9. Meshed model scanned with high accuracy

Table 2. Comparison of numerical and experimental results of extraction strength and estimated friction coefficient of shaft

جدول ۳: مقایسه نتایج عددی و تجربی مقادیر استحکام استخراج و اندازه ضریب اصطکاک نخمینی برای شفت

قطعه G	قطعه E	قطعه C	قطعه A	
30	30	15	15	قطر شفت
10	15	10	15	مقدار تداخل شعاعی بوش و شفت (μm)
28279	62228	23329	43733	نیروی استخراج تجربی (N)
10473/937	16697/088	7472/245	11237/422	نیروی استخراج اجزا محدود اولیه (N)
52369/685	83485/44	37361/225	56187/11	نیروی عمود بر سطح تداخل اولیه (N)
10/77	21/09	30/65	59/12	فشار سطح تداخل حاصل از تحلیل اجزا محدود (MPa)
0/538	0/743	0/622	0/775	ضریب اصطکاک محاسبه شده

محور شفت و بوش به اندازه ۱ میلی‌متر حرکت داده شد. با توجه به این‌که در این پژوهش استحکام استخراج معادل بیشینه نیروی مورد نیاز برای حرکت شفت در بوش در نظر گرفته می‌شود، با حرکت کوچک شفت در بوش می‌توان این مقدار را به دست آورد. همچنین با توجه به محدودیت‌های مدل‌سازی تماس در سطح تداخل مدل لغزش کوچک انتخاب شد و حرکت شفت در خلال شبیه‌سازی فرآیند استخراج، مقدار محدود یک میلی‌متر انتخاب گردید [۱۸].

در ادامه نمودار نیرو-جابجایی حاصل از تحلیل اجزاء محدود استخراج چهار نمونه شفت A, C, E و G با میزان تداخل شعاعی و قطرهای مذکور حاصل گردید که در شکل ۱۰ ارائه گردیده است.

مرزی اعمالی به آن در شکل ۹ ارائه گردیده است. یاد آور می‌گرد که قطعه رینگ دارای هندسه کامل و منظم بوده و شبکه‌بندی آن نیز منظم خواهد بود.

۴-۲- فرآیند استخراج اتصال

برای مدل‌سازی اجزاء محدود استخراج شفت از بوش و استحصال استحکام و نیروی استخراج تلاش می‌گردد تا قیودی شبیه به آنچه که در فرآیند تجربی رخ می‌دهد، به قطعات اعمال شود. برای این مهم سطح فوقانی شفت و سطح تحتانی بوش به یک نقطه مرجع وابسته می‌گردند و شرایط مرزی مورد نظر برای قطعات به آن‌ها اعمال می‌شود. قطعه بوش در تمامی جهات بسته شد و شفت در راستای

اثرگذاری بارز پارامترهای تداخل و قطر بر استحکام اتصال و ضریب اصطکاک روشن گردید. در گام اول بررسی بر روی استحکام استخراج به عنوان فاکتور پاسخ انجام گرفت و پاسخ‌های در دسترس امکان ارائه دو پاسخ در هر آزمایش را فراهم نمود. بررسی‌ها نشان داد که اثرگذاری پارامتر تداخل در رتبه اول بوده و قطر و اندرکنش دو پارامتر تداخل و قطر در مرحله‌های بعدی به لحاظ اثرگذاری بر پاسخ‌های این پژوهش قرار داشتند. این مطلب از نمودارهای نرمال پلات و پرتو قابل استنباط بود. همچنین نمودارهای اثرات پارامترها بر پاسخ نشان داد که قرار گرفتن پارامترهای مورد بررسی بر روی کران بالای آن‌ها باعث افزایش پاسخ خواهد شد. مقادیر P^1 صفر نشان می‌دهد که پارامترهای مورد بررسی همگی بر پاسخ‌ها اثرگذاری بارزی دارند. همچنین رابطه استخراج شده بین قطر و مقدار تداخل و استحکام استخراج حاصل از تحلیل فاکتوریل در نرم‌افزار مینی‌تب به صورت زیر ارائه شد:

$$ES = 9439 - 1632 \times D + 1015613\delta + 192294D\delta \quad (5)$$

همچنین تکرار تحلیل آماری فاکتوریل برای بررسی اثرگذاری پارامترهای قطر و تداخل بر ضریب اصطکاک در سطح تداخل نیز صورت گرفت. از بررسی نمودارهای پرتو و نرمال پلات و مقادیر P روشن گردید که پارامتر قطر و تداخل به صورت بارزی بر ضریب اصطکاک اثرگذار هستند. با استفاده از تحلیل آماری، رابطه ارائه شده بین مقدار ضریب اصطکاک و دو پارامتر قطر و تداخل به صورت زیر ارائه گردید:

$$f = 0.504 - 0.01253D + 20.20\delta + 0.6933D\delta \quad (6)$$

در روابط فوق δ میزان تداخل شعاعی بر حسب میلی‌متر و D قطر شفت را بر حسب میلی‌متر نشان می‌دهد. در نهایت برای بررسی صحت نتایج حاصل از تحلیل آماری فاکتوریل و رابطه‌هایی که برای تخمین ضریب اصطکاک و استحکام استخراج ارائه گردید، قدرت روابط ارائه شده در پیش‌بینی پاسخ یک آزمایش را ارزیابی می‌گردد.

مقدار پیش‌بینی شده توسط رابطه (۴) برای استحکام استخراج قطعه‌ای به قطر ۳۰ میلی‌متر و میزان تداخل شعاعی ۲۰ میکرومتر

با توجه به اعمال ضریب اصطکاک پیش فرض ۲/۰ از تقسیم نیروی استخراج بر ضریب اصطکاک مقدار نیروی عمود بر سطح تداخل حاصل شد. متذکر می‌گردد که تمام تلاش‌ها در راستای اعمال خواص مواد با استفاده از تحلیل‌های تجربی و مدل‌سازی دقیق هندسه قطعات، در راستای محاسبه نیروی عمود بر سطح تداخل با دقت هرچه بالاتر صورت گرفت. بنابراین می‌توان ادعا نمود که تنها دلیل تفاوت بین استحکام استخراج حاصل از تحلیل اجزا محدود و تجربی، اعمال ضریب اصطکاک نادرست در مدل اجزا محدود است.

۴- استخراج ضریب اصطکاک

روشن است که از تقسیم استحکام استخراج تجربی بر نیروی عمودی حاصل از تحلیل اجزا محدود تخمین جدیدی برای ضریب اصطکاک به دست آورد. در ادامه پس از جایگذاری تخمین جدید ضریب اصطکاک در تحلیل اجزاء محدود، مجدداً می‌توان مقدار ضریب اصطکاک را اصلاح نمود و فرآیند تکرار را تا همگرایی به یک مقدار ضریب اصطکاک ادامه داد. با استفاده از این روش در اینجا ۴ ضریب اصطکاک برای نمونه‌های با قطر متفاوت و تداخل متفاوت به دست آمد. جدول ۳ مقادیر نیروی استخراج تجربی، نیروی استخراج اجزاء محدود اولیه، نیروی عمود بر سطح حاصل از تحلیل اجزاء محدود، فشار در سطح تداخل و ضریب اصطکاک تخمینی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد برای قطعات با قطر ۱۵ میلی‌متر و تداخل ۱۰ و ۵ میکرومتر، مقدار ضریب اصطکاک به ترتیب ۰/۱۸ و ۰/۳۹ و ۰/۳۸ در سطح تداخل حاصل آمد و برای قطعات با قطر ۳۰ میلی‌متر و تداخل ۱۰ و ۵ میکرومتر، مقدار ضریب اصطکاک ۰/۳۹ و ۰/۳۸ در سطح تداخل اتصالات به دست آمد. در ادامه و با بررسی آماری به روش تاگوچی می‌توان تأثیر هر یک از پارامترهای تداخل و قطر را بر استحکام استخراج تجربی و ضریب اصطکاک سطح تداخل به صورت آماری مورد بررسی قرار داد.

۵- بررسی آماری نتایج

همان‌طور که گفته شد برای بررسی اثر پارامترهای قطر و میزان تداخل بر استحکام استخراج و ضریب اصطکاک، روش‌های آماری استفاده گردید. برای بررسی اثرگذاری پارامترهای تداخل بر استحکام اتصال و ضریب اصطکاک، با استفاده از روش غربال‌گری فاکتوریل،

سطح تداخل، اثر فشار بر ضریب اصطکاک بارزتر خواهد بود. همچنین با استفاده از تحلیل آماری فاکتوریل روشن گردید که پارامترهای شعاع انحنای سطح تماس (قطر) و فشار (تداخل) تأثیر بارزی بر ضریب اصطکاک و نیروی استخراج دارند. این مطلب از مقادیر P استخراج شده، استنباط می‌گردد. تمامی این مقادیر کمتر از 0.05 بوده و نشان از اثرگذاری بیش از 95 درصد این پارامترها بر متغیرهای ضریب اصطکاک و نیروی استخراج هستند. تحلیل آماری ارائه شده با استفاده از نتایج تجربی دو رابطه برای استحکام استخراج و ضریب اصطکاک در سطح تداخل ارائه نمودند. رابطه ارائه شده برای استحکام استخراج، با استفاده از یک آزمایش تجربی دیگر اعتبارسنجی گردید که نتیجه تجربی، با دقت مناسبی پیش‌بینی حاصل از رابطه استخراج شده را تأیید نمود. جهت اعتبارسنجی رابطه ارائه شده برای ضریب اصطکاک در این پژوهش، با توجه به عدم دسترسی به مدل هندسی دقیق قطعه آخر، امکان بررسی بیشتر وجود نداشت.

در پایان نتیجه قابل توجه حاصل از این پژوهش را می‌توان در رابطه مستقیم فشار بر ضریب اصطکاک در سطح تداخل اتصالات تداخلی و البته رابطه معکوس شعاع انحنای سطح تداخل بر ضریب اصطکاک در سطح تداخل، خلاصه نمود.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

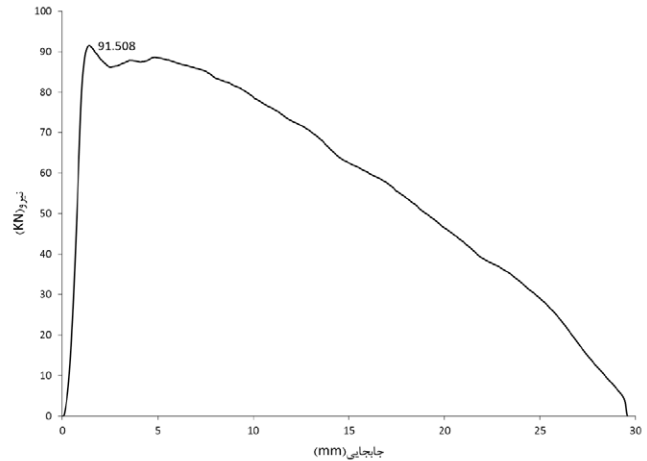
A	مساحت، m^2
P	فشار در سطح تداخل، $kgm^{-1}s^{-2}$
E	ضریب کشسانی
ν	نسبت پواسون
ES	استحکام استخراج، $kgms^{-2}$
F	نیرو، $kgms^{-2}$
f	ضریب اصطکاک
D	قطر شفت، mm

علائم یونانی

σ	تنش، $kgm^{-1}s^{-2}$
δ	مقدار تداخل شعاعی، mm

زیرنویس

N	عمودی
r	شعاعی
s	شفت
b	بوش



شکل ۱۰: نمودار نیرو و جابجایی تجربی نمونه با تداخل شعاعی 0.015 mm و قطر 15 mm

Fig. 5. Diagram of force – movement of A and B sample by radial interface 0.015 and 15mm Diameter

معادل $96167/66$ نیوتن است و نتایج تجربی مقداری معادل 915.08 را برای این نمونه نشان می‌دهد (شکل ۱۱). خطای نسبی پیش‌بینی رابطه ارائه شده توسط تحلیل آماری، مقداری در حدود $0.09/5$ درصد می‌باشد که به نظر توانایی پیش‌بینی رابطه ارائه شده را معقول و قابل توجه نشان می‌دهد. ارزیابی پیش‌بینی ارائه شده برای رابطه اصطکاک با مقدار تداخل و قطر، بدلیل عدم دسترسی به مدل هندسی دقیق نمونه مورد آزمایش و ضریب اصطکاک آن در این‌جا امکان‌پذیر نبود.

۶- بحث و نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان چند مورد را استنباط نمود. در اتصالات تداخلی که دارای زبری سطح یکسان هستند روشن است که با افزایش تداخل میزان فشار در سطح تداخل و نیروی استخراج و متعاقب آن ظرفیت انتقال گشتاور اتصال افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به نتایج، افزایش نیروی استخراج با افزایش قطر روشن است. این روند با مقایسه نمودارهای شکل‌های ۵ و ۷ و شکل‌های ۶ و ۸ قابل استنباط است. همچنین با توجه به ضرایب اصطکاک استخراج شده، استنباط می‌گردد که افزایش قطر باعث کاهش ضریب اصطکاک می‌گردد، یعنی رابطه قطر با ضریب اصطکاک در سطح تداخل اتصالات تداخلی معکوس است. همچنین نکته مهم دیگر این‌که افزایش تداخل و متعاقب آن فشار، باعث افزایش ضریب اصطکاک خواهد شد. بنابراین رابطه فشار با ضریب اصطکاک مستقیم است. نکته قابل توجه دیگر این‌که در قطرهای پایین‌تر اثر فشار بر ضریب اصطکاک بارزتر است. به بیان دیگر با افزایش شعاع انحنا در

- 80-88.
- [11] M. Masjedi, M.M. Khonsari, On the effect of surface roughness in point-contact EHL: Formulas for film thickness and asperity load, *Tribology International*, 82 (2015) 228-244.
- [12] M. Stembalski, P. Preś, W. Skoczyński, Determination of the friction coefficient as a function of sliding speed and normal pressure for steel C45 and steel 40HM, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 13(4) (2013) 444-448.
- [13] Y.S. Kim, M.K. Jain, D.R. Metzger, Determination of pressure-dependent friction coefficient from draw-bend test and its application to cup drawing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 56 (2012) 69-78.
- [14] R.C. Bowers, W.A. Zisman, Pressure Effects on the Friction Coefficient of Thin-Film Solid Lubricants, *Journal of Applied Physics*, 39(12) (1968) 5385-5395.
- [15] L. Xiao, S. Björklund, B.G. Rosén, The influence of surface roughness and the contact pressure distribution on friction in rolling/sliding contacts, *Tribology International*, 40(4) (2007) 694-698.
- [16] S. Timoshenko, *Strength of Materials, Part II: Advanced theory and problems*, Van Nostrand Reinhold, 1958.
- [17] S.W. Lee, D.G. Lee, Torque transmission capability of composite-metal interference fit joints, *Composite Structures*, 78(4) (2007) 584-595.
- [18] R. Seifi, K. Abbasi, Friction coefficient estimation in shaft/bush interference using finite element model updating, *Engineering Failure Analysis*, 57 (2015) 310-322.
- [19] R. Seifi, K. Abbasi, M. Asayesh, Effects of Contact Surface Roughness of Interference Shaft/Bush Joints on its Characteristics, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 42(3) (2018) 279-292.
- [20] R. Seifi, K. Abbasi, Experimental and Numerical Investigation on the Effect of form Defects in Contact Surface of Interference Fit Joints on the Strength of Joint, *Journal of Mechanical Engineering of Tabriz University*, 48(1) (2018) 215-224 (In Persian).
- [1] M. Jafari, K. Abbasi, Restoring Scrapped Turbine Bearing Supports of GM Turbochargers Through Optimized Press-Fit Interference Bushing, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 42(1) (2018) 51-56.
- [2] H. Boutoutaou, M. Bouaziz, J. Fontaine, Modeling of interference fits taking form defects of the surfaces in contact into account, *Materials & Design*, 32(7) (2011) 3692-3701.
- [3] I. Sogalad, H. Ashoka, N.S. Udupa, Influence of cylindricity and surface modification on load bearing ability of interference fitted assemblies, *Precision Engineering*, 36(4) (2012) 629-640.
- [4] H. Boutoutaou, M. Bouaziz, J.-F. Fontaine, Modelling of interference fits with taking into account surfaces roughness with homogenization technique, *International journal of mechanical sciences*, 69 (2013) 21-31.
- [5] R.L. Jackson, I. Green, On the modeling of elastic contact between rough surfaces, *Tribology Transactions*, 54(2) (2011) 300-314.
- [6] G. Gallio, G. Marcuccio, E. Bonisoli, S. Tornincasa, D. Pezzini, D. Ugues, M. Lombardi, D. Rovarino, P. Fino, L. Montanaro, Study of the interference contribution on the performance of an adhesive bonded press-fitted cylindrical joint, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 53 (2014) 89-96.
- [7] D. Croccolo, R. Cuppini, N. Vincenzi, Friction Coefficient Definition in Compression-fit Couplings Applying the DOE Method, *Strain*, 44(2) (2008) 170-179.
- [8] D. Croccolo, M. De Agostinis, N. Vincenzi, Static and dynamic strength evaluation of interference fit and adhesively bonded cylindrical joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30(5) (2010) 359-366.
- [9] D. Croccolo, M. De Agostinis, N. Vincenzi, Experimental analysis of static and fatigue strength properties in press-fitted and adhesively bonded steel-aluminium components, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25(18) (2011) 2521-2538.
- [10] D. Croccolo, M. De Agostinis, P. Mauri, G. Olmi, Influence of the engagement ratio on the joint strength of press fitted and adhesively bonded specimens, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 53 (2014)