





# Experimental Study of the Effect of Conventional Manufacturing Geometric Deviation in the Fitted Cylindrical Joint on its Strength

Foad Faraji<sup>1</sup> , Kaveh Abbasi<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

## ARTICLE INFO

### Article Type:

Original Research

**Received:** 06.27.2021

**Revised:** 08.14.2021

**Accepted:** 09.13.2021

### Keyword:

Cylindrical Interference Fit  
Geometric Deviation  
3-lobe  
Oval  
Conical  
Extraction Strength

### \*Corresponding Author:

Kaveh Abbasi

**Email:** [kavehabasi@gmail.com](mailto:kavehabasi@gmail.com)

## ABSTRACT

Fit joints are widely used in industry to connect bush to shaft and its manufacturing process is always associated with geometric deviations similar to other processes. In a cylindrical fit connection, the geometrical deviation of the shaft and the bush is in order of one hundredth of millimeter, which is a common precision in manufacturing. This range of error seems to be significant compared to the required dimensional interference to make the connections and affects the strength of the interference fit joints. Usually, certain geometrical deviations will occur in the production process considering the selected manufacturing method. This research attempted to investigate the effect of common geometric deviations at the surface of interference of cylindrical interference fit on the experimental extraction strength. In this regard, 8 specimens of interference fit with same characteristic of dimensions, surface roughness and interference were produced. Furthermore, shafts with certain geometrical deviation (standard sample, two-lobes, three-lobes and conical) were made and fitted. Then, the extraction force of each part was extracted experimentally. Taking into consideration precise measurements of the parts dimension, the effect of shaft geometrical deviations on the strength of the joint was investigated. The results showed that the geometrical deviation affects the extraction strength. However, in the quality control process of these parts, by measuring the dimensions of the parts, the effects of these usual geometrical deviations on the joint strength could be predicted and the quality control process can be performed more effectively.



---

## EXTENDED ABSTRACT

---

### Introduction

Fit joints have been widely used in the industry to connect bush to shaft, and its construction is always associated with geometrical deviations like other manufacturing processes. In an adaptive connection, the dimensional deviation error of the shaft and bush is of the order of one-hundredths of a millimeter, which is very common in the manufacturing process. This amount of error is important compared to the interference required to establish connections and may affect the strength of the connection. Investigation shows that usually, according to the manufacturing method, a certain form of deviation will occur in the production of parts. In this research, an attempt was made to experimentally investigate the effect of common geometrical deviations on the interference level of cylindrical components and the strength of the connection.

### Methodology

In the present study, 8 samples of shafts and bushes with specified dimensions, surface roughness, and amount of interference were made. Due to the effects of mechanical properties, dimensions, and value of interference on the pressure and strength of connection, mechanical properties of parts were measured experimentally and the geometry of parts was measured by a coordinate measurement machine for further analysis. Then, shaft samples were made with specific form deviations (without defects, with ovality, 3-lob, and conical samples) and were assembled by heating the bushes and cooling the shafts. Then, the extraction force of each part was experimentally extracted. Using precise measured geometries of the parts, the effect of the form deviations of the shafts on the strength of the connection was investigated. The amount of interference pressure was calculated using the solution provided for thick-walled cylinders and its generalization for an interference connection with two different materials and thus by using Lamé's formulation for axisymmetric parts, the interference pressure could be calculated utilizing Equation (1).

The results of Table 4 represent the variation in interference due to the deviation of the form on the contact surface which affected the value of the extraction strength and reduced the average value of the interference. This reduced value of the interference decreased the extraction force and the strength of the joints. On the other hand, the effect of this variation on the strength of extraction was weaker. This meant that the reduction of approximately 50% of the average interference in the conical parts led to a 25% reduction in the strength of the joints. In the case of 3-lob parts, a 40% decrease in the average interference resulted in a 12% reduction in the joint extraction strength; and in the case of oval parts, a 54% reduction in the average of interference resulted in a 20% decrease in the extraction strength. Thus, in the parts with form deviations, the relationship between the average interference and the strength of the joints was not linear. Considering the effects of contact surface pressure and radius of contact surface curvature, this nonlinearity could be analyzed as the result of simultaneous variation of friction coefficient, the radius of contact surface curvature, and interference pressure.

## Conclusion

In this research, an attempt was made to investigate the effects of common geometric deviations in the production process in the form of 3-lobe, Oval, and conical on the strength of cylindrical interference fit-joints. The experiments were carried out according to the force-displacement diagrams and the results of the measurements with the coordinate measuring machine. The results can be summarized as follows:

- 1- Deviations of the 3-lob, ovality, and conical from standard geometry led to a reduction in the strength of the connection.
- 2- Considering the linear relationship between the amount of interference and the contact pressure and as a result, the strength of the joints, based on Lamé's solution, Lamé's formulation did not seem efficient in the case of form deviations, which of course can be caused by local variation of the friction coefficient. However, applying the average interference to estimate the strength of the joints overestimated the value of the strength. Therefore, in quality control processes, relying on this formulation alone does not guarantee the appropriate decision regarding rejecting or accepting a part.
- 3- The occurrence of geometrical deviations in the interference surface of the cylindrical interference fit joints led to an increase in damages and scratches on the interference surface and an increase in the extraction force in the continuation of the shaft extracted from the bush. This could guarantee the strength of the connection in the use of these connections under twisting. Although, the basis for design was the maximum visible force at the beginning of the relative movement of the shaft and the bush.



## بررسی تجربی تأثیر انحرافات هندسی معمول در ساخت اتصالات انطباقی استوانه‌ای بر استحکام آن‌ها

فواد فرجی<sup>۱</sup>، کاوه عباسی<sup>۲\*</sup>

- ۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

اتصالات انطباقی برای برقراری اتصال بوش به شفت در صنعت کاربرد فراوانی دارد و ساخت آن همچون دیگر فرایندهای ساخت، با انحرافات هندسی همراه است. در یک اتصال انطباقی، خطای انحراف ابعادی شفت و بوش از مرتبه صدم میلی‌متر می‌باشد که در فرایند ساخت، بسیار معمول است. این میزان خطا در مقایسه با تداخل موردنیاز برای برقراری اتصالات به نظر حائز اهمیت است و بر میزان استحکام اتصال مؤثر است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که معمولاً با توجه به روش ساخت، انحرافات فرم خاصی در تولید قطعات رخ خواهد داد. در این پژوهش تلاش شده است که تأثیر انحرافات هندسی معمول در سطح تداخل اجزای استوانه‌ای، بر استحکام اتصال به صورت تجربی بررسی گردد. در این راستا هشت نمونه شفت و بوش با ابعاد، زبری سطح و مقدار تداخل مشابه، ساخته شدند. همچنین شفت‌ها با انحراف فرم مشخص (نمونه‌های بدون عیب، دارای عیب دو پهنی، سه پهنی و مخروطی) ساخته و انطباق داده شد. سپس نیروی استخراج هریک از قطعات به صورت تجربی استخراج شد. در ادامه با استفاده از اندازه‌گیری‌های دقیق ابعاد قطعات، تأثیر انحرافات فرم شفت‌ها بر استحکام اتصال، بررسی شد. نتایج نشان داد انحراف هندسه بر میزان استحکام استخراج تأثیر خواهد داشت. اما در فرایند کنترل کیفی این قطعات می‌توان با اندازه‌گیری ابعاد قطعات، تأثیرات این انحرافات فرم معمول بر اتصال را پیش‌بینی کرد و به نحو مؤثرتری فرایند کنترل کیفی را به انجام رساند.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۲

کلید واژگان:

انطباقات تداخلی استوانه‌ای

انحرافات هندسی

سه پهنی

دو پهنی

مخروطی

استحکام استخراج

\*نویسنده مسئول: کاوه عباسی

پست الکترونیکی:

kavehabasi@gmail.com

## مقدمه

انطباقات در فرایند تولید صنعتی همواره مطرح بوده و میزان تolerانس و تداخل آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هنگام انطباق قطعات شفت و بوش در کنار هم و در صورت وجود تداخل، اتصالات انطباقی حاصل می‌گردد. چنین اتصالاتی، نیروها و تنش‌های تماسی بین سطوح را ارائه می‌دهند و لزوم استفاده از اتصالاتی مانند خار و پیچ و پرچ را حذف می‌کنند. حذف این نوع چفت‌وبست‌ها باعث حذف تأثیرات تمرکز تنش، کوچک شدن و زیبا شدن اتصالات می‌گردد. اتصالات تداخلی می‌توانند برای تحمل بارهای استاتیکی و دینامیکی به‌کار روند. امروزه این اتصالات، کاربردهای مهندسی فراوانی پیدا کرده‌اند و حتی در بازیابی و تعمیرات قطعات نیز قابل‌استفاده هستند [۱]. مطالعات بسیاری در راستای تحلیل این اتصالات از گذشته تا به امروز صورت گرفته است. روش معمول تئوری برای تحلیل این اتصالات، استفاده از تحلیل لایه برای مخازن جدار ضخیم است [۲]. در این تحلیل، فرض بر وجود یک استوانه کامل به‌عنوان شفت و یک استوانه ایده‌آل به‌عنوان بوش است اما روشن است که فرایند ساخت این اتصالات همواره با عیب و انحراف همراه است. بسیاری از پژوهشگران تلاش کرده‌اند تا تأثیرات انواع این عیوب را بر عملکرد اتصالات تداخلی بررسی کنند. فونتاین و همکارانش [۳] سعی در مدل‌سازی اتصالات تداخلی با در نظر گرفتن عیوب فرم سطحی کردند. ایشان چندین پارامتر عیب فرم معمول در فرایند تولید بوش را مورد توجه قرار دادند. سپس نتایج عددی و نتایج تئوری با نتایج تجربی مقایسه شد. ایشان برای انجام تحلیل تئوری از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده کردند. سوگالاد و همکاران [۴] به بررسی تأثیر سیلندریته و اصلاح سطح بر توانایی حمل بار اتصالات تداخلی پرداختند. آن‌ها در مقاله خود تأثیر پروفیل استوانه‌ای شفت‌ها با و بدون برآمدگی بر توانایی حمل بار توسط تحلیل تجربی و هارمونیک را بررسی کردند. تغییرات زبری در فرایند تولید قطعات استوانه‌ای، امری کاملاً معمول است که می‌تواند بر استحکام اتصالات تداخلی تأثیر بگذارد. در پژوهشی دیگر سیفی و عباسی [۵] با اندازه‌گیری دقیق هندسه سطح اتصالات تداخلی، تأثیر انحرافات ابعادی نامنظم را بر استحکام اتصالات، به‌صورت تجربی و تحلیلی مطالعه کردند. سیفی و همکاران [۶] در پژوهشی سعی کردند تا تأثیر زبری سطح را بر توانایی حمل بار اتصالات تداخلی بررسی کنند. آن‌ها تأثیر زبری سطح تداخل، بر ضریب اصطکاک این سطح را به‌صورت تجربی بررسی کردند. برای تعیین ضریب اصطکاک در سطح تداخل از روش پیشنهادی سیفی و عباسی [۷] استفاده کردند. سیفی و عباسی [۷] از تحلیل اجزای محدود به همراه نتایج تجربی برای استخراج ضریب اصطکاک استفاده کردند. عباسی و احساسی [۸] تأثیر فشار در سطح تماس و شعاع انحناى سطح تماس را بر ضریب اصطکاک اتصالات تداخلی بررسی کردند. در این پژوهش نیز از روش سیفی و عباسی [۷] برای استخراج ضریب اصطکاک استفاده گردید.

روشن است که اتصالات انطباقی استوانه‌ای معمولاً با استفاده از ماشین تراش و سنگ محور تولید می‌گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که معمولاً مقدار تداخل در سراسر استوانه بوش و شفت مقداری ثابت است یا در صورت وجود انحراف از مقدار اسمی، دارای الگوی مشخصی است. در این پژوهش تلاش می‌شود تا با استفاده از امکانات موجود، سه عیب هندسی دو پهنی، سه پهنی و مخروطی در قطعات موردبررسی تجربی قرار گیرد. انحراف فرم دو پهنی، سه پهنی و مخروطی از عیوب بسیار رایج، مشکل‌آفرین و هزینه‌ساز در صنعت هستند، اگر در فرایند ساخت قطعات استوانه‌ای در فاصله زاویه‌ای ۱۸۰ درجه‌ای، انحراف از شکل استوانه‌ای در سطح خارجی آن حادث گردد، ایراد به‌وجودآمده را دو پهنی و در صورتی که این انحراف در فواصل زاویه‌ای ۱۲۰ درجه‌ای باشد، سه پهنی نامیده می‌شود. از منابع ایجاد این عیوب می‌توان لقی بیرینگ‌های محور اسپیندل دستگاه، بالانس نبودن قطعه یا سنگ دستگاه، رعایت نشدن هم‌راستایی سوراخ مته مرغک‌های دو سر قطعه (در قطعاتی که از دو طرف توسط مرغک مهار می‌گردند)، لنگی و انحنا داشتن محور اسپیندل دستگاه یا لنگ بسته شدن قطعه در داخل سه‌نظام دستگاه، توزیع ناهمگن مواد ساینده و رزین به‌کار رفته در سنگ، یکنواخت نبودن سطح تماس سنگ با قطعه، نامناسب بودن فرایند خنک‌کاری و پاشش آب‌صابون، نامناسب بودن تعداد دوران محور اصلی و محور قطعه کار، نامناسب بودن سرعت برشی یا پیشروی

دستگاه، یکنواخت نبودن سختی سطح قطعه کار پس از عملیات سخت کاری را نام برد. همچنین اگر انحراف ابعادی قطر در طول قطعه و با شیب مشخص در سطح باشد، آن را انحراف مخروطی بودن می نامند. از عوامل اصلی به وجود آورنده انحراف مخروطی می توان به تنظیم ناصحیح زاویه قرارگیری سنگ دستگاه نسبت به قطعه کار و در قطعات با طول زیاد، ریزش زیاد سنگ، ساییده و کند شدن نوک ابزار و همچنین انجام اشتباه فرایند درسینگ (اصلاح کردن سطح خارجی سنگ پس از هر بار انجام کار) می باشد.

در این پژوهش تلاش گردیده است تا به صورت تجربی تأثیرات انحرافات هندسی معمول در تولید اتصالات انطباقی استوانه‌ای بر استحکام استخراج بررسی شود و با اندازه‌گیری‌های دقیق روشن گردد که برای کنترل کیفی قطعات تولید شده باید به چه نحو عمل کرد. بدین معنی که آیا یک قطعه تولید شده که دارای این انحرافات هندسی است، آیا به صرف دارا بودن این انحراف باید از دسته قطعات قابل پذیرش خارج شود یا می توان با بررسی و اندازه‌گیری‌های دقیق تر این قطعات را تحت شرایط خاص پذیرفت. نتایج این پژوهش می توان در چرخه کنترل کیفی تولید قطعات صنعتی، در کاهش هزینه‌های تولید و بالا بردن سرعت تولید مؤثر باشد.

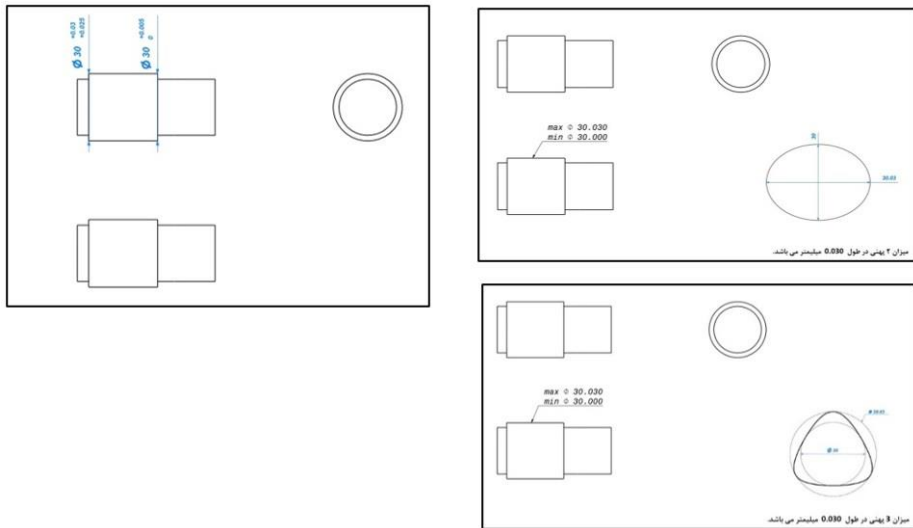
## مواد و روش‌ها

### ساخت اجزای اتصال

برای بررسی اتصالات انطباقی استوانه‌ای در این پژوهش ۸ نمونه شفت (۲ نمونه بدون عیب، ۲ نمونه دو پهن، ۲ نمونه سه پهن و ۲ نمونه مخروطی) ساخته شدند. برای ساخت شفت‌ها از فولاد با نام صنعتی VCN ۱۵۰ استفاده گردید. قطر منتخب تداخل در این پژوهش ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد که از شفت و بوش به طول تداخل ۳۰ میلی‌متر استفاده گردید. همچنین مقدار تداخل قطری ۲۵ میکرومتر در نظر گرفته و تولید شد. با توجه به محدوده رایج مقدار انحراف فرم به وجود آمده در فرایند سنگ‌زنی و قطر انتخابی (۳۰ میلی‌متر)، انطباق فشاری کوچک (HV/۲۶) انتخاب گردید؛ از این رو قطر نهایی شفت‌ها متناسب با این انطباق و همچنین قطر داخلی بوش‌ها که ۳۰ میلی‌متر می باشد، تعیین می گردد. از کنس داخلی یا تاقان‌های استاندارد غلتکی به شماره استاندارد NA۶۹۰۶ به عنوان بوش در اتصالات استفاده گردید. به منظور ساخت قطعات دو پهن و سه پهن، اقدام به ساخت دستگاه پولیش و فیکسچرهایی شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین برای تولید نمونه‌های مخروطی، از دستگاه سنگ محور و اعمال زاویه مناسب در میز دستگاه به منظور دستیابی به ابعاد نهایی مورد نظر استفاده شد. نقشه ساخت شفت‌های تولید شده برای بررسی‌های تجربی در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۱. دستگاه پولیش ساخته شده برای ساخت قطعات دو پهن و سه پهن.



شکل ۲. نقشه‌های مرحله سنگ‌زنی قطعات مخروطی، دو پهنی و سه پهنی.

### اندازه‌گیری ابعاد و خواص

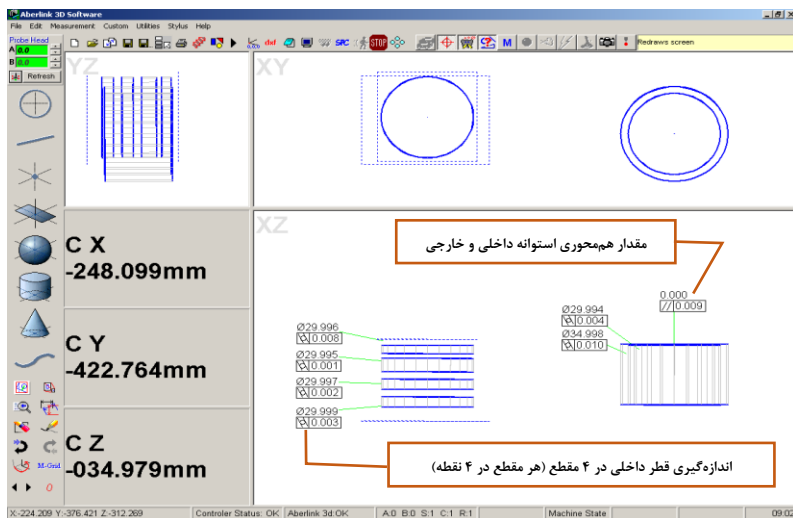
روشن است که خواص مکانیکی، ابعاد قطعات و انطباق آنها بر میزان فشار در سطح تداخل و استحکام اتصال مؤثر است. با توجه به اهمیت ابعاد و خواص اجزای اتصال در ادامه، اندازه‌گیری تجربی خواص مکانیکی و ابعاد قطعات با استفاده از ماشین اندازه‌گیری مختصات انجام شد. در مورد شفت، اندازه‌گیری‌ها در فواصل زاویه‌ای ۱۰ درجه‌ای در راستای محیطی و در ۵ مقطع به فواصل ۱، ۸، ۱۵، ۲۲ و ۲۹ میلی‌متر در راستای محوری از ابتدای قطعه شفت با استفاده از ماشین اندازه‌گیری مختصات انجام شد. مسیرهای محیطی به فواصل ۱ و ۸ و ۱۵ و ۲۲ و ۲۹ میلی‌متر به ترتیب با حروف C۱ و C۲ و C۳ و C۴ و C۵ مشخص و قطر متوسط آنها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. قطر اندازه‌گیری شده در پنج مقطع از طول شفت و قطر متوسط آن

نمونه	استاندارد		دو پهنی		سه پهنی		مخروطی	
C۱	۳۰/۰۲۵	۳۰/۰۲۴	۳۰/۰۱۲	۳۰/۰۱۱	۳۰/۰۱۵	۳۰/۰۱۶	۳۰/۰۲۳	۳۰/۰۲۴
C۲	۳۰/۰۲۵	۳۰/۰۲۳	۳۰/۰۱۲	۳۰/۰۱۱	۳۰/۰۱۵	۳۰/۰۱۵	۳۰/۰۱۶	۳۰/۰۱۷
C۳	۳۰/۰۲۴	۳۰/۰۲۲	۳۰/۰۱۱	۳۰/۰۱۱	۳۰/۰۱۴	۳۰/۰۱۵	۳۰/۰۱۰	۳۰/۰۱۲
C۴	۳۰/۰۲۶	۳۰/۰۲۴	۳۰/۰۱۲	۳۰/۰۱۲	۳۰/۰۱۴	۳۰/۰۱۵	۳۰/۰۰۵	۳۰/۰۰۶
C۵	۳۰/۰۲۷	۳۰/۰۲۴	۳۰/۰۱۲	۳۰/۰۱۲	۳۰/۰۱۵	۳۰/۰۱۶	۳۰/۰۰۱	۳۰/۰۰۱
متوسط کل	۳۰/۰۲۵۴	۳۰/۰۲۳۴	۳۰/۰۱۱۸	۳۰/۰۱۱۴	۳۰/۰۱۴۶	۳۰/۰۱۵۴	۳۰/۰۱۱	۳۰/۰۱۲
درصد تغییر تداخل نسبت به قطعه استاندارد	-	-۷/۸۷	-۵۳/۵۴	-۵۵/۱۲	-۴۲/۵۲	-۳۹/۳۷	-۵۶/۶۹	-۵۲/۷۶

لازم به یادآوری است که در فرایند ساخت قطعات دارای انحراف فرم، ابتدا قطعات استاندارد تولید شدند و در ادامه با روش‌های مشروح، انحرافات بر آنها اعمال گردید؛ بنابراین تمامی قطعات دارای انحراف فرم، مقادیر تداخلی کمتر از

قطعات استاندارد خواهند بود. همان طور که در جدول ۱ روشن است متوسط تداخل در تمامی قطعات کمتر از قطعات استاندارد است. مقادیر متوسط قطرها و تداخل در قطعات را می توان برای تحلیل های بعدی مورد استفاده قرار داد. همان طور که پیش از این بیان شد کنس داخلی یاتاقان های استاندارد غلتکی به شماره استاندارد NA۶۹۰۶ به عنوان بوش، با قطعات استوانه های شفت، انطباق داده شدند. علت این انتخاب، دستیابی به حداقل مقدار خطای ساخت و حداکثر اطمینان از دقت ابعادی این قطعات است. این موضوع پس از اندازه گیری تمامی بوش های یاتاقان های غلتکی، توسط ماشین اندازه گیری سه بعدی مختصات<sup>۱</sup> اعتبارسنجی شد (شکل ۳). نتایج اندازه گیری ها، با خطای یک میکرون، دقت ابعادی بوش ها را تأیید کرد. با اطمینان از اندازه بوش ها و با توجه به دقت بالای ساخت آن ها، بوش استوانه کامل و عاری از انحراف فرم در نظر گرفته شد و انحرافات هندسی تنها در شفت ها مورد توجه قرار گرفت. چند نمونه از اندازه گیری ابعاد بوش ها توسط ماشین اندازه گیری سه بعدی مختصات با دقت یک میکرومتر در شکل ۳ ارائه شده است. در شکل ۳ قطر داخلی بوش در ۴ مقطع و هر مقطع در ۴ نقطه اندازه گیری شده که نتایج آن در شکل مشخص گردیده است. همچنین مقدار هم محوری سطح استوانه داخلی نسبت به سطح استوانه ای خارجی اندازه گیری شد و روشن گردید که قطعه کاملاً هم محور می باشد.



شکل ۳. ابعاد استخراج شده قطعه بوش توسط ماشین اندازه گیری مختصات.

<sup>1</sup> Coordinate Measurement Machine (CMM)



شکل ۴. ماشین اندازه‌گیری سه‌بعدی مختصات.

برای تعیین خواص مکانیکی موادی که شفت و بوش از آن ساخته شده است، آزمون اسپکترومتری و آزمون کشش روی مواد اولیه شفت و بوش انجام شد. با توجه به تطابق آنالیز مواد با مواد صنعتی استاندارد و خروجی‌های استاندارد آزمون کشش، خواص مکانیکی اجزای تشکیل‌دهنده شفت و بوش مطابق با استانداردها در نظر گرفته شد که در جدول ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۲. خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده مواد شفت و بوش.

جرم حجمی (Kg/m <sup>3</sup> )	ضریب پواسون	ضریب کشسانی (Gpa)	استحکام تسلیم (Mpa)
۷۸۵۰	۰.۲۹	۲۰۵	۴۲۰
۷۸۱۰	۰.۳	۲۱۰	۷۰۰

### سرهم‌بندی قطعات شفت و بوش

برای سرهم کردن اجزای اتصال، قطعات بوش در داخل کوره صنعتی تا دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم شدند و قطعات شفت نیز در داخل ظرف نیتروژن مایع در برودت ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. قطعات با استفاده از فیکسچر طراحی شده سرهم شدند. در این مرحله باید بسیار دقت شود که شفت در حین اسمبل کردن، حتی‌الامکان با بوش تماس نیابد؛ زیرا انتقال حرارت بین این دو بسیار بالاست و دو قطعه می‌توانند به‌سرعت هم‌دمای شوند و ادامه کار را با مشکل روبه‌رو کنند.



شکل ۵. قطعات بوش و شفت سرهم‌بندی شده پیش از آزمون استخراج.

#### استحکام استخراج تجربی

در این مرحله با استفاده از فیکسچر طراحی شده و دستگاه یونیورسال سنتام، قطعات شفت از بوش خارج شدند. این فرایند تجربی را اصطلاحاً استخراج می‌نامند که طی آن نیروی موردنیاز برای خارج کردن شفت از بوش اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۶ فیکسچر ساخته‌شده، به همراه اتصالات را روی دستگاه سنتام نشان می‌دهد. برای انجام آزمایش از فک‌های فشاری استفاده شد؛ زیرا نیروی اعمالی فشاری بود.



شکل ۶. استخراج شفت از بوش با استفاده از دستگاه آزمون کشش یونیورسال سنتام.

در ادامه هشت نمونه سرهم شده مورد آزمون استخراج شدند. لازم به یادآوری است که با توجه به اهمیت زبری سطوح بر استحکام استخراج [۶]، اندازه‌گیری زبری سطوح روی اجزای اتصال انجام گرفت. اندازه‌گیری‌ها در سه خط به طول ۲ سانتیمتر و نقاط مختلف سطوح استوانه‌ای انجام گرفت. اندازه‌گیری برای تمامی نمونه‌های شفت و بوش انجام گرفت. زبری سطح مربوط به سطح داخلی بوش‌ها در هر ۸ نمونه، تقریباً یکسان و به مقدار  $0.23 \text{ Ra}$  میکرون اندازه‌گیری شد، همچنین زبری سطح خارجی شفت‌ها در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۳. مقدار زبری سطح خارجی شفت‌ها در مرحله نهایی.

مخروطی	سه پهنی	دو پهنی	استاندارد	نمونه
۰/۲۲۳	۰/۲۱۸	۰/۲۱۰	۰/۲۰۰	مقدار زبری

نتایج زبری عملاً افزایش جزئی در مقدار زبری قطعات داری انحراف فرم، نسبت به قطعات استاندارد را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد در عمل و در فرایندهای تولید صنعتی این مطلب نیز دور از انتظار نباشد؛ زیرا انحرافات هندسی معمولاً به واسطه افزایش دامنه لقی در دستگاه های تولید رخ می‌دهد و این مطلب منجر به افزایش دامنه ارتعاشات ابزار برش می‌گردد که در نهایت ممکن است منجر به افزایش زبری در سطوح تولید نیز گردد.

### حل تحلیلی

مقدار فشار تداخل را می‌توان با استفاده از حل ارائه شده برای استوانه‌های جدار ضخیم [۱] و تعمیم آن برای اتصال تداخلی با دو جنس متفاوت محاسبه کرد. با استفاده از تحلیل لامه برای قطعات متقارن محوری می‌توان فشار تداخل را از رابطه ۱ محاسبه کرد.

$$p = \frac{\delta/2}{c \left\{ \left( \frac{c^2 + a^2}{E_s(c^2 - a^2)} + \frac{b^2 + c^2}{E_b(b^2 - c^2)} \right) + \left( \frac{v_b}{E_b} - \frac{v_s}{E_s} \right) \right\}} \quad (1)$$

که در رابطه ۱ مقدار تداخل شعاعی در اجزا اتصال با  $\delta$  نشان داده شده است و برای قطعات استاندارد ۲۵ میکرومتر خواهد بود. همچنین مقادیر  $E_s$  و  $v_s$  و  $E_b$  و  $v_b$  به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر ضریب کشسانی و نسبت پواسون موادی است که شفت و بوش از آن ساخته شده‌اند. شعاع‌های داخلی شفت و خارجی بوش به ترتیب با حروف  $a$  و  $b$  نشان داده شود و شعاع تداخل با  $c$  مشخص می‌گردد، پس از جای‌گذاری خواص مکانیکی شفت و بوش در رابطه ۱ مقدار فشار تداخل در دسترس خواهد بود. برای نمونه در اتصال مطرح شده در این پژوهش و با توجه به ابعاد نامی و میزان تداخل قطری ۲۵ میکرومتر مقدار فشار تداخل با استفاده از حل لامه  $23/0.05$  مگاپاسکال خواهد بود. روشن است که این مقدار با فرض هندسه کاملاً استوانه قطعات و توزیع یکنواخت فشار در سطح تداخل است؛ به بیان دیگر در صورتی که اتصال موردبررسی در این پژوهش عاری از انحرافات فرم هندسه سطحی باشد، از نظر تئوری فشار تداخل آن معادل  $23/0.05$  مگاپاسکال بود. یادآور می‌گردد که مقدار مذکور برای فشار تداخل، در واقع متوسط تنش‌های شعاعی وارد بر سطح تداخل است. نکته قابل ذکر دیگر اینکه رابطه فشار با مقدار تداخل در معادله ۱ خطی است.

از طرف دیگر روشن است که انتگرال سطحی تنش‌های شعاعی بر سطح تداخل همان نیروی عمودی وارد بر سطح است که از حاصل ضرب متوسط فشار تداخل در سطح تداخل قابل استحصال است. یعنی در مورد متوسط نیروی عمود بر سطح تداخل می‌توان نوشت:

$$F_N = \int \sigma_r dA = p \times A = \frac{ES}{f} \quad (2)$$

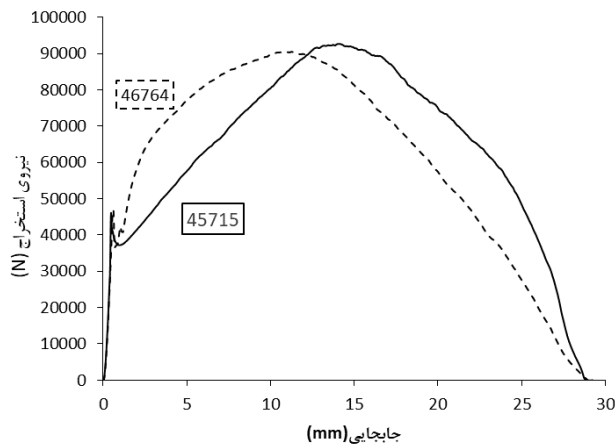
در نهایت از ضرب متوسط نیروی عمود بر سطح تداخل در ضریب اصطکاک، مقدار نیروی موردنیاز برای استخراج شفت از بوش حاصل می‌گردد. روشن است که نیروی استخراج، حاصل ضرب ضریب اصطکاک در نیروی عمودی است. یعنی:

$$ES = f \times F_N \quad (3)$$

البته روشن است که این رابطه با فرض ثابت بودن مقدار ضریب اصطکاک در سراسر سطح تداخل نوشته شده است و روشن است که ضریب اصطکاک به پارامترهایی نظیر زبری، شعاع انحناى سطح تداخل و فشار سطح تداخل وابسته است [۶؛ ۸]. با توجه به نتایج سیفی و عباسی [۵] به‌طور کلی با استفاده از متوسط تداخل می‌توان به تخمین کلی از متوسط فشار در سطح تداخل رسید. البته باید به این نکته توجه داشت که در این پژوهش تأثیرات انحرافات هندسی معمول بر فرایند تولید مورد توجه قرار گرفته و نه انحرافات شعاع از مقادیر اسمی که در محیط قطعات اندازه‌گیری شده است.

## نتایج و بحث

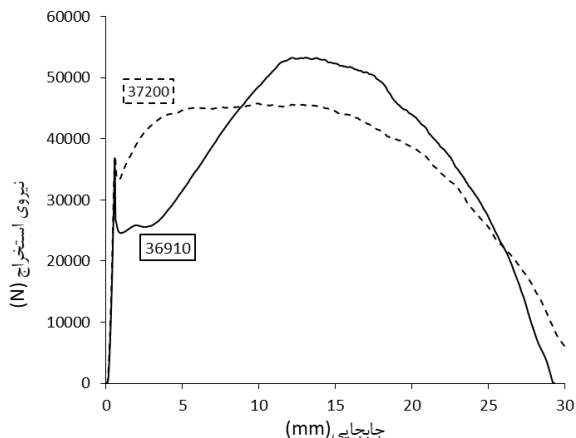
در ادامه، نتایج آزمون‌های تجربی استخراج ارائه و بررسی می‌شود. نتایج در قالب نمودارهای نیرو-جاب‌جایی ارائه می‌گردد. شکل ۷، نمودار نیرو-جاب‌جایی قطعات استاندارد (بدون انحراف هندسی) را نشان می‌دهد. مقدار بیشینه نیرو، استحکام استخراج را مشخص می‌کند که برای دو قطعه اتصال استاندارد با میزان تداخل قطری ۲۵ میکرومتر این نیروها معادل ۴۶۷۶۴ و ۴۵۷۱۵ نیوتن می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد نیروهای بیشینه تا حد زیادی به هم نزدیک هستند و تکرارپذیری نتایج را نشان می‌دهند. روند کلی نمودارها نیز تا حد زیادی مشابه هم هستند. از طرف دیگر افزایش مقادیر نیرو در ادامه و با کاهش سطح تماس به‌واسطه درگیری زبری سطوح با یکدیگر است که متناظر با تخریب سطح است [۶]. بررسی سطوح تداخل پس از استخراج به‌خوبی مؤکد میزان تخریب است.



شکل ۷. نمودار نیرو-جاب‌جایی استخراج شفت‌های استاندارد.

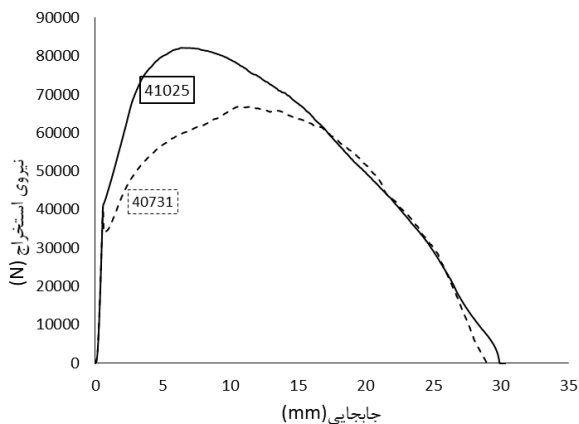
پیش از این بیان شد که قطعات معیوب به انحراف فرم دو پهنی یعنی قطعاتی که در نقاط برجسته‌تر با اختلاف‌افاز ۱۸۰ درجه حداکثر مقادیر قطر ۳۰/۰۲۵ میلی‌متر و در مقادیر قطر حداقل با اختلاف‌افاز ۹۰ درجه‌ای با قله‌ها، مقادیر قطر ۳۰ را نشان می‌دهند. نمودار نیرو-جاب‌جایی این اتصالات در نمودارهای شکل ۸ ارائه گردیده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مقادیر بیشینه نیرو دو اتصال به‌ترتیب ۳۷۲۰۰ و ۳۶۹۱۰ نیوتن ثبت شده است. هر دو نمودار در ادامه حرکت شفت در بوش افزایش نیرو نشان می‌دهند که البته با توجه به کاهش سطح تماس این افزایش دور از انتظار است. این افزایش‌ها می‌تواند به‌واسطه درگیری زبری سطوح باشد [۶]، به‌علاوه در این مورد نبود تعادل در نیروها در سطح تداخل می‌تواند نتایج متفاوتی را ایجاد کند. برای نمونه در نقاطی که قله‌های سطح تداخل حادث می‌گردد، روشن است که فشار تداخل افزایش می‌یابد و با توجه به تأثیر فشار بر ضریب اصطکاک در سطح تداخل [۸]، این امر در نهایت منجر به ایجاد

تغییرات غیرخطی نیروی اصطکاک به صورت موضعی می‌گردد. اگر این تغییرات منشأ تخریب سطح باشد می‌تواند یکی از منابع این افزایش نیرو باشد. با مقایسه این نمودارها با نمودار نیرو- جابه‌جایی قطعات بدون عیب، کاهش تقریبی ۱۰۰۰۰ نیوتنی، یعنی حدود ۲۰ درصد، در استحکام استخراج قطعات دو پهنی نسبت به قطعات بدون عیب که به واسطه انحراف فرم دوپهنی می‌باشد، مشهود است. قطعاً کاهش تداخل در کاهش نیروی استخراج مؤثر است.



شکل ۸. نمودار مربوط به نیرو- جابه‌جایی استخراج شفت‌های دو پهن.

شکل ۹ نمودارهای نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های معیوب به انحراف فرم سه پهن را ارائه می‌دهند. قطر اولیه این قطعات پیش از اعمال انحراف بر هندسه آن‌ها در حدود ۳۰/۰۲۵ میلی‌متر بوده است. با اعمال عیوب سه پهنی بر روی این قطعات، روشن است که کاهش قطرها یا بروز اصطلاحاً دره‌هایی در فواصل ۱۲۰ درجه‌ای بر قطعات بروز می‌یابد. در این حالت همواره در مقابل یک دره و به فاصله زاویه‌ای ۱۸۰ درجه از آن یک قله وجود دارد. در اندازه‌گیری قطعات معیوب مشاهده شد که قطر مربوط به این قله‌ها و دره‌های مقابل هم مقادیری حدود ۳۰/۰۱۵ میلی‌متر دارند.

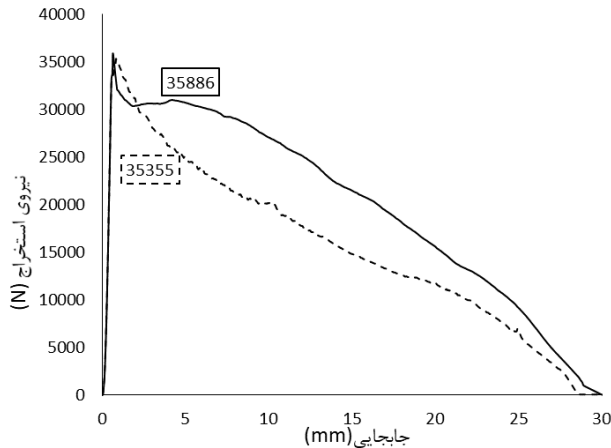


شکل ۹. نمودار نیرو- جابه‌جایی شفت‌های سه پهن.

مقادیر بیشینه نیروی استخراج قطعات دارای انحراف فرم سه پهنی به ترتیب ۴۰۷۳۱ و ۴۱۰۲۵ نیوتن است. مجدداً تقرب مقادیر استحکام استخراج به یکدیگر، به نحوی تکرارپذیری نتایج را نشان می‌دهند. در اینجا نیز افزایش نیرو با کاهش سطح تماس در هر دو نمونه این قطعات مشاهده گردید که دلیل این مسئله، ناهمگونی سطح تماس و درگیری زبری‌های سطح تماس است [۶] و البته خراشیدگی‌های عمیق‌تر در سطح تماس قطعات دارای انحراف فرم سه پهنی نسبت به دیگر قطعات، تأییدی بر این ادعاست.

از سوی دیگر، این مقادیر استحکام استخراج قطعات دارای انحراف فرم سه پهنی، نسبت به مقدار پایه استحکام استخراج قطعات استاندارد، کاهش در حدود ۵۰۰۰ نیوتنی یا ۱۲ درصد را نشان می‌دهد. از طرفی میانگین تداخل می‌تواند معیار مناسبی برای بررسی تأثیر انحرافات سطح تداخل بر استحکام استخراج باشد [۴]. بنابراین توجه به جدول ۱ می‌تواند برای بررسی کاهش نیروی تداخل در قطعات دارای انحراف فرم مؤثر باشد.

نمودار نیرو-جابجایی قطعات دارای انحراف فرم مخروطی در شکل ۱۰ ارائه گردیده است. اندازه‌گیری‌های دقیق نشان داد که هر دو قطعه دارای حداکثر و حداقل قطر ۳۰۰۲۵ و ۳۰ میلی‌متر می‌باشند. استخراج هر دو قطعه به‌نحوی انجام شد که انتهای با قطر بیشتر در قسمت پایین اتصال قرار گرفت و این بخش اولین مقطع شفت است که از بوش خارج می‌گردد.



شکل ۱۰. نمودار نیرو-جابجایی شفت‌های مخروطی.

با توجه به شکل ۱۰ مقادیر استحکام استخراج برای قطعات مخروطی به ترتیب ۳۵۳۵۵ و ۳۵۸۸۶ نیوتن ثبت شد که از نیروی استخراج مربوط به دیگر قطعات استاندارد، دو پهنی و سه پهنی کمتر می‌باشد و کاهش حدوداً ۲۵ درصدی در استحکام استخراج را نشان می‌دهد. مطلب قابل توجه دیگر مشاهده نشدن افزایش پس از استحکام استخراج اولیه در نمودار نیروی استخراج قطعات دارای انحراف فرم هندسی مخروطی است.

جدول ۴ مقادیر استحکام استخراج تجربی قطعات مورد بررسی و متوسط قطر آن‌ها که در جدول ۱ استخراج شده را نشان می‌دهد. یادآور می‌گردد که مقادیر متوسط قطر با استفاده از ماشین اندازه‌گیری سه‌بعدی مختصات حاصل شده است.

جدول ۴. مقادیر استحکام استخراج تجربی و متوسط قطر.

مخروطی	سه پهنی	دو پهنی	استاندارد	نمونه
-۲۴/۸۰	-۱۱/۲۸	-۲۱/۹۵	-۲/۲۴	درصد نسبی کاهش استحکام استخراج
۳۵۸۸۶	۴۱۰۲۵	۳۶۹۱۰	۴۵۷۱۵	استحکام استخراج N
۳۰/۰۱۲	۳۰/۰۱۵۴	۳۰/۰۱۱۴	۳۰/۰۲۳۴	متوسط قطر mm
-۵۲/۷۶	-۳۹/۳۷	-۵۵/۱۲	-۷/۸۷	درصد تغییر تداخل، نسبت به قطعه استاندارد

استخراج و بررسی ضریب اصطکاک [۷] به نظر منطقی نیست چون تمامی ویژگی‌های سطح در قطعات مشابه هستند و از طرفی توزیع فشار و شعاع انحنا در سطح تداخل قطعات دارای عیوب فرم یکنواخت نیست که خود می‌تواند بر مقادیر ضریب اصطکاک به صورت موضعی تأثیر گذارد [۸]؛ بنابراین برای بررسی تأثیر عیوب فرم در اینجا تنها از نتایج تجربی و اندازه‌گیری دقیق ابعاد با استفاده از ماشین اندازه‌گیری مختصات استفاده گردید.

نتایج جدول ۴ روشن می‌کند که تغییرات تداخل، به واسطه انحراف فرم در سطح تداخل، بر مقدار استحکام استخراج تأثیر می‌گذارد و کاهش مقدار متوسط تداخل باعث کاهش نیروی استخراج و استحکام اتصال خواهد شد. از طرف دیگر تأثیر این تغییرات بر استحکام استخراج، به نوعی کم‌رنگ‌تر شده است؛ به این معنی که کاهش حدود ۵۰ درصدی متوسط تداخل در قطعات همراه با انحراف فرم مخروطی منجر به کاهش ۲۵ درصدی در استحکام اتصال شده است. در مورد قطعات سه پهن، کاهش ۴۰ درصدی در متوسط تداخل منجر به کاهش ۱۲ درصدی در استحکام استخراج اتصال شده است و در مورد قطعات دوپهنی، کاهش ۵۴ درصدی در مقدار متوسط تداخل باعث کاهش ۲۰ درصدی استحکام استخراج شده است. از توجه دقیق‌تر به این مقادیر متوسط تداخل و استحکام استخراج قطعات روشن می‌گردد که در قطعات دارای انحرافات فرم رابطه بین متوسط تداخل و استحکام اتصال خطی نیست. با توجه به اثر فشار تداخل و شعاع انحنا [۸] می‌توان تغییرات غیرخطی را ناشی از تغییرات هم‌زمان و موضعی ضریب اصطکاک و شعاع انحنا و فشار تداخل دانست.

مطلب جالب توجه دیگر، تأثیر کم‌رنگ‌تر انحرافات هندسه دوپهن و سه پهن نسبت به انحراف مخروطی در استحکام استخراج است. در قطعات دوپهن کاهش ۵۴ درصدی در متوسط تداخل منجر به کاهش ۲۰ درصدی استحکام استخراج می‌گردد در حالی که در قطعات مخروطی همین مقدار کاهش در متوسط تداخل باعث کاهش ۲۵ درصدی در استحکام استخراج می‌گردد و در قطعات سه پهنی کاهش ۴۰ درصدی متوسط تداخل، منجر به کاهش حدود ۱۰ درصدی در مقدار استحکام استخراج شد. واضح است که این مطلب ناشی از نبود تعادل نیروی فشار در سطح تداخل است. جالب اینکه کاهش ۸ درصدی در متوسط تداخل قطعه استاندارد شماره ۲ منجر به ۲ درصد کاهش در استحکام استخراج گردید که اگر به تناسب اگر متوسط تداخل در قطعه استاندارد ۴۰ درصد کاهش یابد باید مقدار استحکام استخراج ۱۰ درصد کاهش یابد ولی در قطعه با انحراف سه پهنی کاهش ۴۰ درصدی متوسط تداخل باعث کاهش ۱۲ درصدی استحکام استخراج شده است. به همین شکل و با توجه به کاهش تناسب با کاهش تداخل در قطعه استاندارد، برای قطعه دوپهنی، کاهش تداخل ۵۴ درصدی باید منجر به کاهش ۱۲ درصدی در استحکام استخراج گردد، در حالی که این کاهش ۲۰ درصد می‌باشد. بنابراین در مورد قطعات دارای انحرافات، استفاده از متوسط تداخل معیاری مناسب برای پیش‌بینی استحکام اتصال نیست و می‌تواند مقدار استحکام را بیش تخمین کند.

از جهت دیگر، توجه به بیشینه حادث شده در ادامه فرایند تداخل، در قطعات استاندارد، دوپهن و سه پهن روشن می‌کند که مقدار این بیشینه در قطعه سه پهن، حتی با وجود کاهش تداخل می‌تواند به مقدار بیشینه دوم در قطعات استاندارد نزدیک گردد. در حقیقت این امر بیانگر این مطلب است که برهم خوردن تعادل فشار و نیروی فشاری، در سطح تداخل می‌تواند مقدار تخریب و البته نیروی استخراج وابسته به آن را افزایش دهد. البته روشن است مقدار استحکام استخراج مورد توجه در طراحی‌ها همان بیشینه اول است.

## نتیجه گیری

در این پژوهش تلاش گردید تا تأثیر انحرافات هندسی معمول در فرایند تولید دوپهن، سه پهن و مخروطی بر استحکام اتصالات انطباقی استوانه‌ای بررسی گردد. با توجه به نمودارهای نیرو- جابه‌جایی و نتایج حاصل از اندازه‌گیری با ماشین اندازه‌گیر مختصات بررسی‌ها انجام شد. نتایج حاصل را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- انحرافات هندسه استاندارد سه پهنی، دوپهنی و مخروطی، منجر به کاهش استحکام اتصال می‌شوند.
  - ۲- استفاده از رابطه تئوری مبتنی بر حل لامه که رابطه‌ای خطی بین مقدار تداخل و فشار تداخل و در نتیجه استحکام اتصال، ارائه می‌کند، در مورد انحرافات فرم، به نظر کارآمد نمی‌آید که البته این امر می‌تواند ناشی از تغییرات ضریب اصطکاک سطح تداخل، با تغییر فشار تداخل یا شعاع انحنا سطح باشد. به هر حال استفاده از متوسط تداخل و استفاده از آن برای تخمین استحکام اتصال، مقدار استحکام را بیش تخمین می‌کند؛ بنابراین در فرایندهای کنترل کیفیت، اتکا به این مقدار به‌تنهایی نمی‌تواند متضمن تصمیم درست در مورد رد یا قبول یک قطعه باشد.
  - ۳- وجود انحرافات هندسی در سطح تداخل انطباقات استوانه‌ای منجر به افزایش تخریب در سطح تداخل و افزایش نیروی استخراج در ادامه استخراج شفت از بوش می‌گردد. این امر در استفاده از این اتصالات تحت پیچش می‌تواند به شکلی متضمن حفظ استحکام اتصال باشد. البته روشن است که در طراحی‌ها مینا همان بیشینه نیروی مشهود در ابتدای حرکت نسبی شفت و بوش است.
- در انتها روشن است که در کنترل کیفیت انطباقات استوانه‌ای، استفاده از متوسط قطر، برای انحرافات فرم معمول، نمی‌تواند متضمن قبول یا رد یک قطعه باشد؛ زیرا در آن موارد، رابطه استحکام اتصال و متوسط تداخل خطی نیست. به نظر می‌رسد عامل این امر، تغییرات حاصل در ضریب اصطکاک سطح تداخل با توجه به تغییر شعاع انحنا و فشار تداخل به صورت موضعی باشد؛ بنابراین در صورت بروز عیوب سه پهنی و دو پهنی، به نحوی که باعث کاهش مقدار تداخل از مقادیر اسمی گردد، بهتر است سریعاً نسبت به رفع عوامل ایجاد این عیوب در خط تولید اقدام گردد و قطعات معیوب از چرخه تولید و استفاده خارج گردند.

## References

- [1] Jafari, M., & Abbasi, K. (2018). 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), 51-56. <https://doi.org/10.1007/s40997-017-0076-2>
- [2] Timoshenko, S. (1956). *Strength of Materials. Part II Advanced Theory and Problems* (3 ed.). David Van Nostrand Company. <https://www.amazon.com/Strength-Materials-Advanced-Theory-Problems/dp/B00NP3IQ5U>
- [3] Boutoutaou, H., Bouaziz, M., & Fontaine, J. F. (2011). Modeling of interference fits taking form defects of the surfaces in contact into account. *Materials & Design*, 32(7), 3692-3701. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.059>

- [4] Sogalad, I., Ashoka, H. N., & Udupa, N. G. S. (2012). Influence of cylindricity and surface modification on load bearing ability of interference fitted assemblies. *Precision Engineering*, 36(4), 629-640. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.05.005>
- [5] Seifi, R., & Abbasi, K. (2018). 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*, 48(1), 215-224. [https://journals.tabrizu.ac.ir/article\\_7520\\_31543a02a88acf84619b9f5ef5c5b88d.pdf](https://journals.tabrizu.ac.ir/article_7520_31543a02a88acf84619b9f5ef5c5b88d.pdf)
- [6] Seifi, R., Abbasi, K., & Asayesh, M. (2018). 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), 279-292. <https://doi.org/10.1007/s40997-017-0082-4>
- [7] Seifi, R., & Abbasi, K. (2015). Friction coefficient estimation in shaft/bush interference using finite element model updating. *Engineering Failure Analysis*, 57, 310-322. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.08.006>
- [8] Abbasi, K., & Ehsasi, H. (2019). Investigation on the Effect of Pressure and Radius of Contact Surface Curvature on the Friction Coefficient in Contact Surfaces of Interference Fit Joints. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 52(8), 2123-2134. <https://doi.org/10.22060/mej.2019.15509.6143>