

بررسی عددی و تجربی اثر عیوب هندسه در سطح تماس اتصالات تداخلی بر استحکام اتصال

دانشیار، گروه مکانیک مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
دانشیار، گروه مکانیک مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

رحمن سیفی*
کاوه عباسی

چکیده

اتصالات تداخلی در صنعت کاربرد گسترده‌ای دارند. ساخت این اتصالات همواره مستلزم دقت بالا و محدودیت‌های فراوانی است. برای کاهش هزینه‌های تولید مطالعه اثر عیوب بر استحکام اتصال ضروری می‌نماید. استانداردهای مربوط به اتصالات تداخلی بر مبنای وجود تداخل یکنواخت و ثابت در سرتاسر اتصال است. اما تغییر در مقدار تداخل، در سطح تداخل به صورت معمول و در فرآیندهای تولید این اتصالات به وجود خواهند آمد. در این پژوهش تلاش می‌گردد تا با پیشنهاد تعریف متوسط تداخل برای قطعات داری عیوب هندسه بتوان مقدار استحکام تداخل را به نحو موافی پیش‌بینی نمود. در ادامه با استفاده از حل لامه و با استفاده از متوسط تداخل، استحکام اتصال محاسبه می‌گردد. همچنین مدل واقعی اتصال تداخلی با استفاده از روش اجزاء محدود تحلیل می‌گردد. برای اعتبارسنجی، نتایج تئوری با نتایج تجربی مقایسه می‌گردند. نتایج تئوری حاصل تطابق خوبی با نتایج نیروی استخراج تجربی محور نشان می‌دهند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در قطعات دارای عیوب هندسه، در صورت برابری متوسط تداخل با مقدار مورد نظر در طراحی، می‌توان به نحو موافی از اتصال استفاده نمود. **واژه‌های کلیدی:** اتصال تداخلی، عیوب هندسه، تحلیل اجزاء محدود، نیروی استخراج محور.

Experimental and Numerical Investigation on the Effect of form Defects in Contact Surface of Interference Fit Joints on the Strength of Joint

R. Seifi Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran
K. Abbasi Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

Abstract

Interference fitting widely uses in industry. These joints manufacturing are always associated with limitations and high precision. To reduce manufacturing costs, it is essential to study the influence of form defects on the assembly strength. Standards are limited to simple cylindrical parts. But, variation in interference are common in manufacturing process of these parts. In this article, it has been tried to predict strength of interference joints successfully, by proposing of new definition of mean interference for parts with form defects. Then, strength of interference joints were calculated using traditional Lamé approach and mean interference value. Also, real model of interference fit with form defects were analyzed by finite element method. Theoretical results were compared with experimental results for validation. Theoretical results correlate well with those obtained through experiments. Results show that for defected interference fit joints, mean interference can be considered as reliable criterion for evaluation of joint strength.

Keywords: Interference fit joint, Finite element analysis, Extraction force.

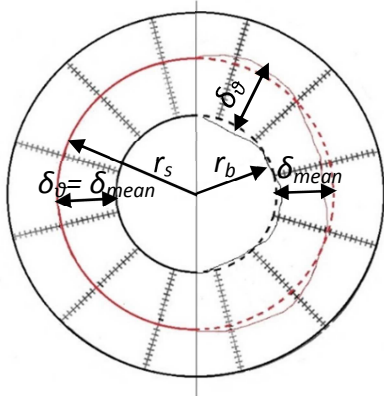
است از لحاظ ابعادی مردود در نظر گرفته شوند. در تحقیقات پیشین تلاش شده است تا بتوان اثر عیوب هندسه بر مشخصه‌های اتصالات تداخلی تعیین گردد. فونتاین و سیالا در سال ۱۹۹۸ [۲] مطالعه‌ای در رابطه با عیوب هندسه در اتصالات شریک فیت ارائه نمودند. در این مطالعه، هدف مدلسازی Shrink fit و فراهم آوردن حل تحلیلی برای آن بود. آنها روشی برای حل سه‌بعدی تماس دو قطعه استوانه‌ای ارائه نمودند و آزمایشی برای اعتبارسنجی نتایج خود ارائه نمودند. تجربیات تطابق قابل قبولی با نظریه ارائه شده بروز داد.

بوتوتانو و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۳] سعی کردند اتصالات تداخلی را با در نظر گرفتن عیوب هندسه سطحی مدل‌سازی کنند. ایشان دو تعریف برای تداخل پیشنهاد نمودند و با اعمال کنترل شده عیوب هندسه در سطح تداخل اتصالات تداخلی و تحلیل اجزاء محدود، تلاش نمودند تا اعتبار این تعاریف را بررسی نمایند. آنها بیان کردند که متوسط فشار تداخل در قطعات دارای عیوب هندسه نزدیک به فشار تداخل در قطعات بدون عیب است. در نهایت با استفاده از نتایج تجربی اعتبار فعالیت‌های نظری خود را بررسی نمودند. در پژوهش مذکور تحلیل‌های تئوری و اجزاء محدود بر روی قطعاتی صورت گرفت که دارای عیوب هندسی با الگویی مشخص بودند در حالی که در عمل و در خلال فرآیند

۱- مقدمه

انطباق‌های تداخلی به صورت گسترده در صنعت برای ایجاد اتصالات محکم و زیبا مورد استفاده قرار می‌گیرند. چنین اتصالاتی نیروها و تنش‌های تماسی بین سطوح ارائه می‌دهند و امکان انتقال نیرو و گشتاور را فراهم می‌آورند. اتصالات تداخلی می‌توانند برای تحمل بارهای استاتیکی و دینامیکی مورد استفاده قرار گیرند. این انطباقات لزوم استفاده از اتصالاتی نظیر خار و پیچ و ... را حذف می‌کنند. حذف این نوع چفت و بست‌ها باعث حذف اثرات تمرکز تنش، کوچک شدن و زیبا شدن اتصالات می‌گردد. همچنین وجود این اتصالات باعث کم شدن نگرانی‌های مربوط به بالانس اجزاء دوار در تجهیزات مکانیکی شد. روش سنتی برای طراحی اتصالات تداخلی مبتنی بر حل ارائه شده برای استوانه‌های جدار ضخیم و با فرض قطعات متقارن محوری با تداخل ثابت است [۱]. بر مبنای استانداردهای موجود و روش کلاسیک محاسبات، برای ایجاد موفق اتصالات تداخلی، به کیفیت و دقت ابعادی بالا در ساخت اجزاء اتصال نیاز است. عدم توانایی در اعمال اثر عیوب هندسی در طراحی اتصالات تداخلی، منجر به تحمیل دقت بالا در ساخت اجزاء اتصالات تداخلی می‌گردد. تولید قطعات با دقت بالا، هزینه بالایی را به فرآیند تولید تحمیل می‌کند. فرآیند تولید اجزاء این اتصالات همراه با عیوب هندسه در سطح تداخل است و بسیاری از اجزاء اتصال ممکن

تداخل محاسبه گردید. برای اعتبارسنجی فشار تداخل از متوسط تداخل هندسه واقعی اجزاء اتصال، متوسط فشار با استفاده از تحلیل اجزاء محدود محاسبه گردید. جهت شبیه‌سازی دقیق هندسه محور از اسکن نوری و روش پیشنهاد شده توسط سیفی و عباسی [۷] استفاده گردید. اعتبار این روش مدلسازی پیش از این و در مقاله مذکور تأیید گردیده است. نتایج حاصل از متوسط تداخل با تحلیل اجزاء محدود و بررسی‌های تجربی همبستگی مناسبی را نشان داد.



شکل ۱- تعریف متوسط تداخل برای محور و بوش (سمت چپ بدون عیب و سمت راست همراه با عیوب هندسه)

۲- ساخت اجزاء اتصال و مدلسازی هندسه دقیق آنها

برای مطالعه اثر عیوب هندسه منطبق بر واقعیت، بر مشخصه‌های اتصالات تداخلی ابتدا لازم است که اجزاء اتصال تولید شوند. برای ساخت محور از فولاد با نام صنعتی VCN 150 استفاده گردید. محور توپر به قطر و طول تداخل ۳۰/۰۳ و ۳۰ میلی‌متر ساخته شدند. شکل ۲ نشان دهنده ابعاد اسمی و هندسه قطعات محور است. همچنین از حلقه داخلی یاتاقان‌های استاندارد غلتکی به شماره استاندارد NA6906 نیز به عنوان بوش استفاده گردید. علت این انتخاب، دستیابی به مقدار خطای ساخت حداقل و حداکثر اطمینان از دقت ابعادی قطعات بوش است. قطر داخلی و خارجی و طول تداخل قطعه بوش به ترتیب ۳۰، ۳۵ و ۳۰ میلی‌متر است. دقت ابعادی و عدم وجود عیوب هندسه در قطعه بوش، پس از اندازه‌گیری قطر آنها توسط ماشین اندازه‌گیری سه‌بعدی مختصات^۲ (CMM) اعتبارسنجی شد. نتایج اندازه‌گیری‌ها با دقت ۰/۱ میکرون، روشن نمود که انحراف ابعادی بوش کمتر از یک میکرومتر است و می‌توان آن را به صورت استوانه کامل در نظر گرفت. با اطمینان از اندازه بوش و با توجه به دقت بالای تولید آنها، در تحلیل‌های بعدی بوش به صورت استوانه کامل در نظر گرفته شد و عیب هندسه تنها در محور مورد توجه قرار گرفت. شکل ۳ نمای از فرآیند اندازه‌گیری ابعاد بوش‌ها توسط ماشین اندازه‌گیری سه‌بعدی مختصات را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری قطر داخلی بوش در ۳ مقطع و در هر مقطع در ۶ نقطه انجام گرفت.

تولید قطعات، معمولاً عیوب هندسی دارای الگوی منظم و مشخصی نیست.

سوگالاد و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۴] به بررسی تأثیر لاغری و اصلاح سطح بر توانایی حمل بار اتصالات تداخلی پرداختند. آنها به صورت تجربی اثر برآمدگی موضعی در پروفیل سطح تداخل بر مشخصه‌های اتصال را بررسی نمودند. آنها در پژوهش خود محورهایی با پروفیل استوانه‌ای کامل و دارای برآمدگی موضعی ساختند و با آزمون‌های تجربی توانایی حمل بار توسط اتصالات را بررسی نمودند.

بوتوتانو و همکاران در پژوهشی در سال ۲۰۱۳ [۵] با ارائه الگوریتمی برای شبکه‌بندی سطح تداخل جهت تحلیل اجزاء محدود، تلاش نمودند تا روشی ارائه دهند که طی آن بتوان اثر زبری سطح تداخل را در تحلیل اتصالات تداخلی به حساب آورد. ایشان روش پیشنهادی را به عنوان تکنیک همگن‌سازی^۱ مطرح نمودند.

بوتوتانو و فونتاین در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۵ [۶] روشی برای طراحی اتصالات تداخلی به کمک کامپیوتر ارائه نمودند. آنها تلاش نمودند تا با استفاده از روش خود امکانی را فراهم آورند که بتوان اثر زبری سطح و عیوب هندسه معمول در فرآیندهای تولید اتصالات تداخلی را در طراحی به کمک کامپیوتر در نظر گرفت.

با توجه به تحقیقات مطرح شده اهمیت ارائه روشی ساده برای بررسی دقیق‌تر اتصالات تداخلی همراه با عیوب هندسه روشن می‌گردد. طراحی اتصالات تداخلی با در نظر گرفتن عیوب هندسی می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های تولید گردد. بدین معنا که پیش از خارج کردن قطعات دارای عیوب هندسی از چرخه کار، با روش‌های ساده‌ای بتوان امکان ورود قطعات دارای عیب به چرخه کار را بررسی نمود. پژوهش مطرح شده توسط بوتوتانو و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۳]، مبتنی بر تحقیقات پیشین فونتاین، روشی ساده برای طراحی با حضور عیوب هندسه را مطرح نموده است. در این پژوهش برای اعتبارسنجی روش مطرح شده، عیوب هندسه به صورت منظم و با الگوی خاص در تحلیل اجزاء محدود اعمال شده است. این امر مطابق با واقعیت نیست و در عمل قطعات تولید شده دارای عیوب هندسه غیرمنظم هستند. بنابراین به نظر می‌رسد که بررسی قطعات دارای عیوب غیرمنظم و واقعی نیاز به بازبینی مجدد دارد.

هدف این پژوهش تحلیل اثر عیوب هندسی واقعی و کنترل نشده بر روی نیروی جدایش اتصالات تداخلی است. در اینجا تلاش می‌گردد تا عیوب هندسی مطابق با آنچه که در عمل و در فرآیندهای تولید رخ می‌دهد، مورد تحلیل قرار گیرد. برای معرفی اثر عیوب هندسی در طراحی و تحلیل، متوسط تداخل تعریف و مورد توجه قرار گرفت. با توجه به شکل ۱ متوسط تداخل را می‌توان با استفاده از رابطه (۱) تعریف نمود.

$$\delta_{mean} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_s - r_b) \quad (1)$$

در این تعریف متوسط‌گیری به صورت گسسته و در فواصل زاویه‌ای مشخص انجام گرفت. فاصله زاویه‌ای منتخب برای میانگین‌گیری، بسته به قطر سطح تداخل می‌تواند تغییر کند. در ادامه و با توجه به میانگین تداخل در مسیرهای محیطی و طولی و با استفاده از حل لامه، فشار

^۲ Coordinate Measurement Machine

^۱ Homogenization technique

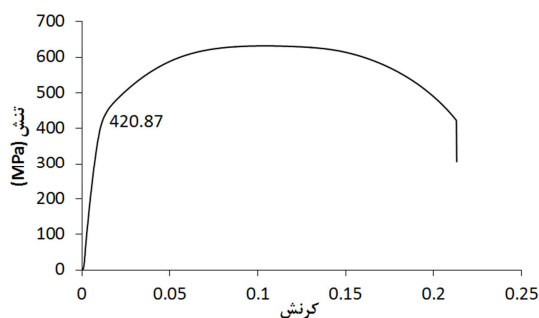
برازش صفحات بر نقاط مدل، انحراف‌های زیر یک میکرومتر را نشان داد. با توجه به این مطلب می‌توان ادعا نمود که دقت ابعادی مدل حاصل از فرآیند برازش ۱ میکرومتر است. هندسه دقیق قطعه محور در کنار مدل کامل بوش در گام‌های بعدی آماده تحلیل تئوری و اجزاء محدود هستند.

۳- اندازه‌گیری خواص مکانیکی محور و بوش

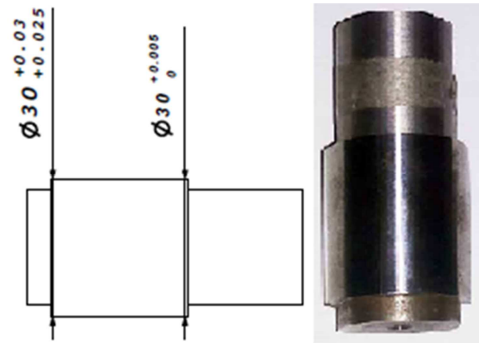
با توجه به اهمیت خواص مکانیکی مواد در نتیجه تحلیل‌ها، در این پژوهش تلاش گردید تا خواص مکانیکی محور و بوش به صورت دقیق استخراج گردد. در حل نظری و حل به روش اجزاء محدود، نیاز است تا خواص مکانیکی مواد تشکیل دهنده محور و بوش در دسترس باشد و در تحلیل‌ها وارد گردد. صحت خواص مکانیکی مورد استفاده در تحلیل‌ها مستقیماً بر خروجی‌ها تأثیر می‌گذارد. بنابراین بدون اطمینان از صحت این مقادیر، نمی‌توان با اطمینان به نتایج حاصل از حل تحلیلی و اجزاء محدود تکیه نمود. در این راستا آزمون طیف‌سنجی و کشش استاندارد بر روی مواد محور و بوش انجام گردید. نمودارهای حاصل از تست کشش نمونه‌های محور و بوش نیز به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه گردیده‌اند. لازم به یادآوری است که با توجه به عدم استفاده از طول سنج برای تست نمونه‌های کشش، امکان اندازه‌گیری دقیق ضریب کشسانی مواد از نمودار تنش-کرنش تجربی وجود نداشت و با توجه به مشابهت استحکام تسلیم با آنچه که در منابع ذکر شده بود، ضریب کشسانی با توجه به تست طیف‌سنجی و خواص ذکر شده در کلید فولاد اعمال گردید. نتایج حاصل به صورت خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده مواد محور و بوش

استحکام	ضریب	ضریب	جرم	
تسلیم	کشسانی	پواسون	حجمی	
(Mpa)	(Gpa)		(Kg/m ³)	
۴۲۰	۲۰۵	۰٫۲۹	۷۸۵۰	محور
۷۰۰	۲۱۰	۰٫۳	۷۸۱۰	بوش



شکل ۵- نمودار تنش-کرنش آلیاژ محور

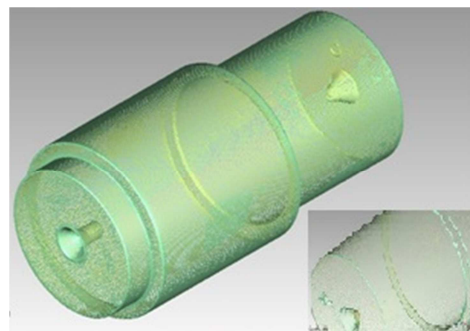


شکل ۲- ابعاد و هندسه قطعه محور



شکل ۳- اندازه‌گیری ابعاد بوش توسط ماشین اندازه‌گیری مختصات

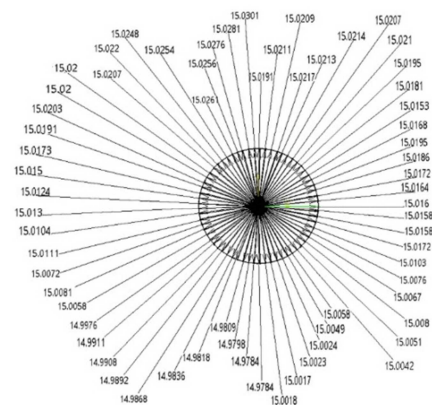
در ادامه قطعه محور با استفاده از دستگاه تراش تولید شد و با سنگ محور تلرانس ابعادی دلخواه بر آن اعمال شد. این روش تولید برای ساخت قطعات محور دقیق، کاملاً معمول می‌باشد. اندازه‌گیری زبری سطح محور نیز عدد $Ra=0.8\mu m$ را نشان داد. تکرار فرآیند اندازه‌گیری محور توسط ماشین اندازه‌گیری مختصات، نشان‌دهنده انحراف ± 10 میکرومتر، این قطعه از استوانه کامل بود. برای استحصال هندسه دقیق محورها از ابزار اندازه‌گیری دقیق نوری استفاده گردید. در این گام محور اسکن گردید و مدل ابر نقاط آن استخراج گردید. در شکل ۴ مدل ابر نقاط استحصال شده از دوربین اسکن نوری مشاهده می‌گردد. این مدل از تعداد ۱۰۴۸۲۱ نقطه تشکیل شده است. همچنین در فرآیند استحصال مدل ابر نقاط با استفاده از اسکن نوری، لنز منتخب دستگاه دارای دقت اندازه‌گیری ۰/۱ میکرومتر بود.



شکل ۴- مدل ابر نقاط استحصال شده از دوربین اسکن نوری

در ادامه با استفاده از نرم‌افزار ژئو مجیک Geomagic Studio بر مدل ابر نقاط محور و در سطح تداخل آن، صفحاتی برازش شده و هندسه سه‌بعدی قطعه محور ایجاد گردید. نمودار دقت حاصل از فرآیند

استفاده از مدل نوری و اطلاعات حاصل از ماشین اندازه‌گیری سه‌بعدی مختصات در سه مسیر محیطی انجام گرفت. در انتها میانگین این سه مقدار نیز محاسبه گردید.



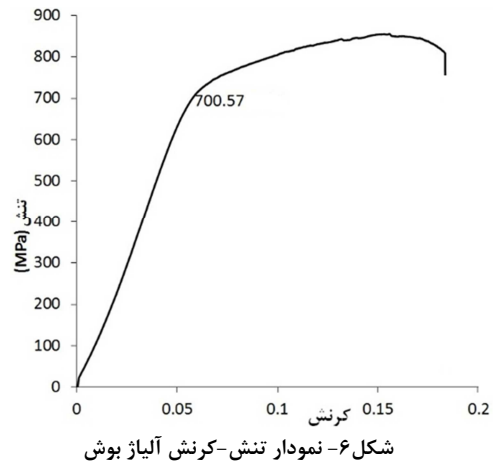
شکل ۷- شعاع‌های اندازه‌گیری شده محور توسط نرم افزار Catia و در مسیره‌های C1

اکنون با استفاده از حل ارائه شده برای استوانه‌های جدار ضخیم [۱] و تعمیم آن برای اتصال تداخلی با دو جنس متفاوت می‌توان فشار تداخل را محاسبه نمود. با استفاده از تحلیل لایه برای قطعات متقارن محوری، می‌توان فشار تداخل را از رابطه (۲) محاسبه نمود.

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

که در رابطه (۲) مقدار تداخل شعاعی در اجزاء اتصال با δ نشان داده شده است و مقادیر E_s و v_s و E_b و v_b به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر ضریب کشسانی و نسبت پواسون مواد تشکیل دهنده محور و بوش باشد. شعاع‌های داخلی محور 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 محور و بوش در رابطه (۲) مقدار فشار تداخل در دسترس خواهد بود. به عنوان نمونه برای محور و بوشی با خواص ابعاد اسمی معادل با نمونه مطرح در این پژوهش مقدار فشار تداخل معادل ۲۷٫۷۶ مگاپاسکال خواهد بود. بررسی در این پژوهش دارد که البته عاری از عیوب هندسه است. به بیان دیگر در صورتی که اتصال مورد بررسی در این پژوهش عاری از عیوب هندسه سطحی باشد، دیدگاه نظری فشار تداخل آن معادل ۲۷٫۷۶ مگاپاسکال بود. همچنین توزیع تنش‌های شعاعی و محیطی در سطح تداخل معادل منفی فشار تداخل خواهد بود.

با توجه به اینکه اندازه‌گیری‌های اولیه نشان از عدم وجود عیوب هندسه در سطح تداخل بوش بود، برای محاسبه متوسط تداخل شعاعی اتصال کافی است که تنها تفاضل بین مقادیر میانگین شعاع محور با شعاع داخلی بوش یعنی ۱۵ میلی‌متر محاسبه گردد. بنابراین با میانگین-گیری از شعاع‌های محور می‌توان متوسط تداخل اتصال را بدست آورد. مقادیر متوسط تداخل در کنار متوسط فشار تداخل نظری در جدول ۲ ارائه شده است. از مقایسه نتایج جدول ۲ روشن می‌گردد که مقدار متوسط تداخل حاصل از مدل نوری در برخی مقاطع با مقدار حاصل از



شکل ۶- نمودار تنش-کرنش آلیاژ بوش

یادآور می‌گردد که برای تعیین خواص مکانیکی مواد ابتدا آنالیز مواد صورت گرفت و خواص مکانیکی ذکر شده برای مواد مورد نظر استخراج گردید. در ادامه آزمون کشش روی نمونه‌های استاندارد انجام شد و خواص مکانیکی استخراج گردید. مقایسه نتایج نشان داد که خواص حاصل از آزمون کشش تا حد زیادی مطابق با خواص مکانیکی مذکور برای مواد تشکیل دهنده محور و بوش است. در ادامه کار خواص حاصل مبنای بررسی‌های تحلیلی و عددی قرار گرفت.

همچنین با توجه به اینکه در فرآیند تجربی سرهم کردن اتصال قطعات بوش گرم شدند، پیش از انجام آزمایش آزمون کشش بر روی نمونه‌های کشش بوش، این قطعات تحت دما و شرایطی مشابه با آنچه که در فرآیند سرهم کردن رخ می‌دهد قرار گرفتند و در ادامه آزمون کشش بر روی نمونه‌های گرم‌داده انجام و خواص استخراج گردید. 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 در تحلیل اجزاء محدود مورد استفاده قرار گرفتند.

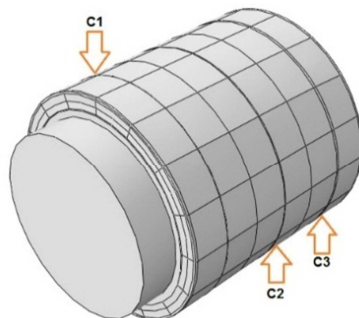
۴- حل نظری با استفاده از متوسط تداخل

در ادامه با استفاده از حل لایه و تعریف ارائه شده برای متوسط تداخل، اتصال تداخلی متناظر با قطعات ساخته شده مورد تحلیل نظری قرار گرفت. ابتدا مقدار متوسط تداخل محاسبه گردید. مدل نوری دقیق محور در ۳ مقطع به فواصل ۵ و ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر از ابتدای قطعه و در نرم‌افزار Catia برش خورد و شعاع نقاط محیطی در فواصل زاویه‌ای ۶ درجه‌ای ثبت شد. مسیره‌های محیطی به فواصل ۵، ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر به ترتیب با حروف C1، C2 و C3 مشخص شدند. یک نمونه از نتایج حاصل در شکل ۷ نشان داده شده است.

از طرف دیگر ابعاد ثبت شده با استفاده از ماشین اندازه‌گیری سه-بعدی مختصات در سه مقطع مذکور و البته در ۱۰ نقطه محیطی انجام گرفت. این فرآیند جهت مقایسه با ابعاد حاصل از مدل نوری و به نحوی اعتبارسنجی آنها انجام شد. که با توجه به کمتر بودن تعداد نقاط ثبت شده توسط ماشین اندازه‌گیری سه‌بعدی مختصات، دقت میانگین حاصل کمتر از میانگین حاصل از مدل نوری خواهد بود. مقادیر میانگین شعاع‌ها در مسیره‌های محیطی و میانگین این سه مقدار در راستای طولی و برای هر دو روش اندازه‌گیری محاسبه شده است. میانگین‌گیری ابعادی با

ماشین اندازه‌گیری سه‌بعدی مختصات اختلاف قابل توجهی دارد. به تبع آن، این اختلافات در مقدار متوسط فشار تداخل نیز قابل مشاهده است. با توجه به رابطه خطی بین متوسط تداخل و متوسط فشار تداخل، این درصد اختلافها در مقادیر متوسط فشار تداخل نیز تکرار خواهد شد. البته با توجه به ۶ برابر بودن نقاط مورد استفاده در میانگین‌گیری از مدل نوری، مقادیر قابل اعتمادتر، همان مقادیر حاصل از مدل نوری خواهند بود. همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد، مقادیر حاصل از ماشین اندازه‌گیری سه‌بعدی مختصات جهت اعتبارسنجی روش مدلسازی قطعات با استفاده از اسکن نوری مطرح شده است. البته توانایی این روش پیش از این نیز بررسی و به تأیید رسیده است [۷].

قبلاً بیان گردید که فشار تداخل برای قطعه بدون عیوب هندسی معادل ۲۷/۷۶ مگاپاسکال است. با مقایسه ستون آخر جدول ۲ با این مقدار، مشاهده می‌شود که متوسط فشار تداخل محاسبه شده به دو روش مطروحه، تا حد زیادی نزدیک به مقادیر متناظر قطعه بدون عیب هستند. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که انحرافهای ساخت موجود در سطح تداخل تأثیر بارزی بر متوسط فشار تداخل ندارند و تنها تغییراتی موضعی بر توزیع فشار تداخل و تنش‌های سطح تداخل خواهند گذاشت. البته این مطلب منوط به آن است که متوسط این انحرافات نزدیک به تداخل اسمی باشد. در ادامه تلاش می‌گردد تا با استفاده از تحلیل اجزاء محدود مدل نوری محور، تحلیلی دقیق‌تر از اتصالات تداخلی ارائه گردد.



شکل ۸- مسیرهای محیطی C1، C2 و C3

برای اطمینان از اینکه مقادیر تنش‌های اجزاء محدود در مسیرهای متناظر با مسیرهای اندازه‌گیری ابعاد محور استخراج می‌گردند، پیش از شبکه‌بندی قطعه محور، مسیرهای مورد نظر قسمت‌بندی شدند؛ بدین ترتیب می‌توان اطمینان یافت که گره‌ها بر روی مسیرهایی در فاصله ۵، ۱۵ و ۲۵ میلیمتری از ابتدای محور قرار گرفته‌اند. همچنین مدلسازی اجزاء محدود برای قطعات بدون عیب و کامل نیز تکرار گردید و فشار متوسط تداخل در محور معادل ۲۷/۸ مگاپاسکال ثبت گردید. نتایج حاصل در جدول ۳ و در کنار هم آمده‌اند.

شکل‌های ۹ و ۱۰ توزیع تنش‌های شعاعی بر روی سطح تداخل محورهای بدون عیب و معیوب را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰ می‌توان تغییرات محلی تنش شعاعی بر روی سطح تداخل محور را مشاهده کرد این تغییرات ناشی از تغییرات موضعی شعاع در سطح تداخل است.

۵- مدلسازی اجزاء محدود

۵-۱- مدلسازی تداخل اجزاء اتصال

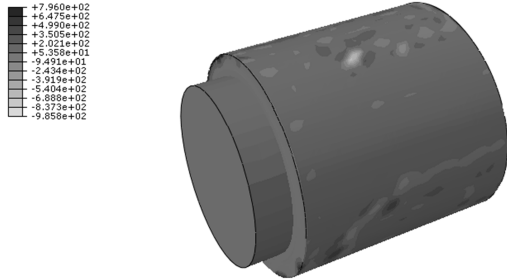
استفاده از تحلیل اجزاء محدود برای بررسی میدان تنش در اتصالات تداخلی در بسیار از پژوهش‌های پیشین مطرح بوده است. به عنوان نمونه جیانگ و همکاران [۸] اعتبار نتایج تحلیل اجزاء محدود اتصالات تداخلی را با استفاده از نتایج تجربی بررسی و تأیید نمودند. اریتن و همکاران [۹] تلاش نمودند تا با استفاده از تحلیل اجزاء محدود، اثر زبری بر ضریب اصطکاک استاتیکی در سطح تداخل را بررسی نمایند. در این پژوهش نیز تلاش می‌گردد تا با استفاده از تحلیل اجزاء محدود، اثر عیوب هندسه بر میدان تنش و مشخصه‌های اتصال تداخلی بررسی گردد. لازم به یادآوری است که اندازه‌گیری تجربی میدان تنش در سطح تداخل اتصالات تداخلی، هدفی سخت و حتی دور از دسترس است. روشن است که نتایج تحلیل اجزاء محدود بسیار وابسته به صحت پارامترهای ورودی به تحلیل است. بنابراین هندسه و خواص مکانیکی اجزاء اتصال به صورت دقیق به تحلیل اجزاء محدود اعمال گردید.

برای تحلیل اتصال از نرم‌افزار تحلیل اجزاء محدود ABAQUS استفاده می‌گردد. در مدلسازی اجزاء محدود اتصالات تداخلی با استفاده از کدهای تجاری، اغلب فرض بر ثابت بودن میزان تداخل در سرتاسر سطح تداخل است؛ اما در قطعات واقعی مقدار تداخلی به صورت محلی و در نقاط مختلف سطح تداخل تغییر می‌کند. خوشبختانه در نرم‌افزار ABAQUS امکان تحلیل اتصالات تداخلی با مقدار تداخل متغیر وجود دارد. بنابراین مدل دقیق قطعات وارد نرم‌افزار ABAQUS شد و خواص مکانیکی مطابق با اندازه‌گیری‌های تجربی، به اجزاء اتصال اعمال گردید. همچنین مدل سخت‌شدگی به صورت پیش‌فرض، مدل سخت‌شدگی

جدول ۲- میانگین شعاع اندازه‌گیری شده توسط نرم‌افزار Catia و ماشین اندازه‌گیری سه‌بعدی و فشار متوسط متناظر آنها

میانگین	مسیر C3	مسیر C2	مسیر C1	
۱۳,۳۶۶	۱۸,۴۹۶۹۷	۱۱,۶۱۶۶۷	۹,۴۷۶۳۴	متوسط تداخل مدل نوری (μm)
۲۴,۷۳۲۹۴۷	۳۴,۲۲۷۵۴۸۵	۲۱,۴۹۵۹۲۱	۱۸,۹۸۵۶۸۰	متوسط فشار تداخل مدل نوری (MPa)
۱۳/۳۳	۱۷	۱۲	۱۱	متوسط تداخل حاصل از CMM (μm)
۲۴,۶۶۶۳۳۱	۳۱,۴۵۷۴۳۶	۲۲,۲۰۵۲۴۹	۲۰,۳۵۴۸۱۱	متوسط فشار تداخل حاصل از CMM (MPa)
% -۰,۲۷	% -۸,۰۹۳	% ۳,۳	% ۱۶,۰۸	اختلاف نسبی متوسط تداخل CMM با مدل نوری

S, S11 (ASSEMBLY_P1-1_ORI-4)
(Avg: 75%)

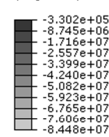


شکل ۱۰- میدان تنش شعاعی برحسب مگاپاسکال بر روی سطح تداخل محور همراه با عیوب هندسه

با مقایسه مقادیر متوسط فشار تداخل اجزاء محدود و نتایج حاصل از حل نظری مشخص می‌گردد که مقادیر فشار تداخل اجزاء در لبه‌های اتصال و در مسیرهای C1 و C3 نسبت به مقادیر تئوری کمتر هستند و این در حالی است که مقادیر اجزاء محدود و تحلیلی در مسیر میانی C2 به نسبت دارای اختلاف کمتری هستند. کروکولو و همکاران [۱۳] به بررسی اثرات پخ در لبه محور، در توزیع تنش محور پرداخته‌اند و تلاش نموده‌اند تا اثرات پارامترهای مختلف بر تمرکز تنش در لبه‌های اتصالات تداخلی را بررسی نمایند. روشن است که حل تئوری لامه راهکاری برای دریافت اثرات تمرکز تنش و تغییر هندسه در لبه‌ها ندارد. این موضوع می‌تواند یکی از نقاط ضعف مدل نظری در پیش‌بینی مقادیر موضعی تنش باشد. شکل ۱۱ نمودار مقادیر فشار تداخل بر روی یک مسیر طولی از محور دارای عیوب هندسه را نشان می‌دهد. این مسیر از ابتدا تا انتهای لبه محور و در راستای محور طولی آن قرار گرفته است و محل انتخاب آن کاملاً دلخواه است.

نکته قابل توجه دیگر، یادآوری اثرات لبه و تمرکز تنش در لبه‌های اتصالات تداخلی است. در این مدل‌سازی‌ها افزایش ناشی از اثرات لبه مشاهده نگردید، اما از طرف دیگر توانایی تحلیل اجزاء محدود در دریافت تمرکز تنش پیش از این بیان شده است. بسیاری از پژوهش‌های پیشین به اثرات لبه در مقدار فشار تداخل اتصالات تداخلی پرداخته‌اند. فونتاین و سیالا [۱۰] به صورت تئوری نشان دادند که می‌توان با ایجاد فیلته مناسب تمرکز تنش ناشی از اثرات لبه‌ای را در اتصالات تداخلی حذف نمود. در عمل ایجاد این فیلته به دلیل ملاحظات تولید و نیاز به دقت بالا، مشکل می‌نماید. دلیل عدم بروز اثرات تمرکز تنش در این مدل‌سازی‌ها را می‌توان به دو دلیل توجیه نمود، اول آنکه این اثرات در مواردی که طول محور بیش از بوش است بارزتر است و البته هندسه قطعه محور تولید شده دارای لبه پخ شده است. همچنین مسیرهای C2 و C3 دارای فاصله زیادی از لبه محور هستند که می‌تواند باعث حذف این اثرات گردد. به هرحال اهمیت افزایش تنش در لبه اتصالات تداخلی کاملاً روشن است. دوپرومیسکی و اسمیت [۱۱] به اهمیت این افزایش در خستگی سایشی در اتصالات تداخلی پرداخته‌اند. البته همان‌طور که گفته شد، توانایی تحلیل اجزاء محدود در دریافت این اثرات نیز پیش از این اعتبارسنجی شده است. لاتیو و همکاران [۱۲] با استفاده از تحلیل اجزاء محدود تلاش نمودند تا خستگی سایشی ناشی از اثرات تمرکز تنش در لبه اتصالات تداخلی بررسی کنند.

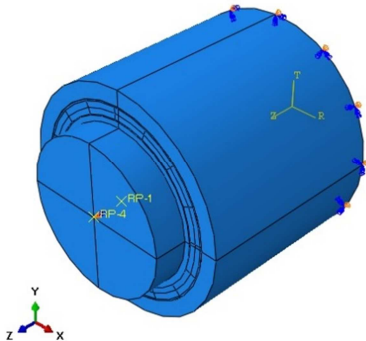
S, S11
(Avg: 75%)



شکل ۹- میدان تنش شعاعی برحسب پاسکال بر روی سطح تداخل محور بدون عیب

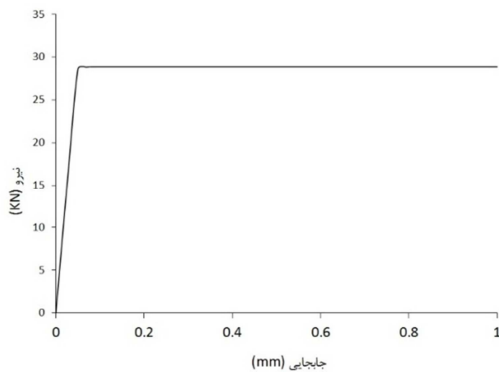
جدول ۳- متوسط فشار تداخل حاصل از تحلیل اجزاء محدود برای محور دارای عیوب هندسه و بدون عیب

مسیر C3	مسیر C2	مسیر C1	میانگین
۳۱,۰۲	۲۰,۳۱	۱۶,۵۸	۲۲,۶۴
۲۷,۸	۲۷,۸	۲۷,۸	۲۷,۸



شکل ۱۲- قیود اعمالی برای مدلسازی استخراج محور از بوش

شکل ۱۳ اطلاعات حاصل از تحلیل اجزاء محدود استخراج محور از بوش را در قالب نمودار نیرو-جابجایی ارائه می‌دهد. مجدداً یادآوری می‌گردد که به واسطه استفاده از تماس از نوع لغزش کوچک جابجایی محور در بوش، تنها یک میلیمتر است. همانطور که در شکل مشهود است مقدار نیروی استخراج محور معادل ۲۸۸۵۹,۴ نیوتن است که البته با تنظیم ضریب اصطکاک تلاش شده است تا این مقدار نزدیک به مقدار تجربی باشد.



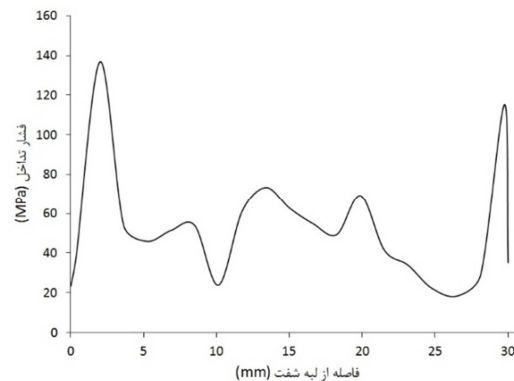
شکل ۱۳- نیروی استخراج محور حاصل از تحلیل اجزاء محدود

از تقسیم نیروی استخراج محور بر ضریب اصطکاک اعمالی در مدل نیز می‌توان مقدار مجموع نیروهای عمودی اعمالی بر سطح تداخل را بدست آورد. به بیان ریاضی می‌توان انتگرال نیروهای عمود بر سطح تداخل را به صورت رابطه (۳) بسط داد.

$$F_N = \int \sigma_r dA = \frac{ES}{f} \quad (3)$$

که در رابطه ۳، ES بیانگر نیروی استخراج محور حاصل از تحلیل اجزاء محدود و f ضریب اصطکاک سطح تداخل است و F_N معادل انتگرال نیروهای عمود بر سطح تداخل است. از تقسیم انتگرال نیروهای عمود بر سطح تداخل به سطح اسمی تداخل، می‌توان به یک فشار متوسط دست یافت. این مقدار را می‌توان متوسط سرتاسری فشار نامید. لذا مقدار آن برابر است با:

با توجه به مطالبی که پیش از این بیان شد، به نظر می‌رسد افزایش مقادیر فشار در لبه‌های محور، تنها ناشی از تغییرات هندسه محور باشد و اثرات لبه‌ای تأثیری در این افزایش مقادیر در کناره‌ها نداشته است.



شکل ۱۱- تغییرات فشار تداخل در یک مسیر طولی نمونه در راستای محور محور دارای عیوب هندسه

۲-۵- مدلسازی اجزاء محدود استخراج اتصال

برای مدلسازی اجزاء محدود استخراج محور از بوش و استحصال نیروی مورد نیاز، می‌بایست قیود بر قطعات اعمال گردد. این مهم پس از ایجاد تداخل در گام نخست انجام می‌گیرد. برای مدلسازی استخراج تلاش می‌گردد تا قیود مشابه آنچه که در فرآیند تجربی اعمال می‌گردد شبیه‌سازی شود. سطح بالای بوش در راستای Z بدون حرکت گردید. تمامی نقاط سطح بالای بخش افزوده محور با نقطه مرجعی در مرکز آن کوپل و قفل شدند. سپس این نقطه در تمامی درجات آزادی بسته گردید و در گام دیگری در راستای Z به اندازه ۱ میلیمتر حرکت داده شد. برای اعمال اصطکاک از مدل کولمب استفاده گردید. همچنین برای فرمولاسیون لغزش از لغزش‌های کوچک استفاده گردید. استفاده از این نوع لغزش، ناشی از محدودیت‌های مدلسازی در نرم افزار ABAQUS است. با توجه به اعمال این نوع لغزش حرکت محور در خلال شبیه‌سازی فرآیند استخراج، مقدار محدود یک میلیمتر انتخاب گردید. بنابراین، طی این جابجایی تنها می‌توان قله حرکتی نیرو به واسطه لغزش و اصطکاک را ملاحظه نمود و کاهش نیرو به واسطه ادامه استخراج و کاهش سطح تماس را نمی‌توان از مدل‌سازی دریافت کرد. با استفاده از روش پیشنهاد شده توسط سیفی و عباسی [۷] مقدار ضریب اصطکاک معادل ۰,۴ استخراج و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. روشن است که نیروی استخراج حاصل از تحلیل اجزاء محدود کاملاً وابسته به خواص مکانیکی و ضریب اصطکاک است اما فشار و تنش‌ها در سطح تماس و پیش از استخراج مستقل از ضریب اصطکاک است [۷]. بنابراین بهنگام‌سازی مدل و استخراج ضریب اصطکاک تأثیری بر مقادیر فشار در سطح تداخل و پیش از استخراج محور ندارد. شکل ۱۲ نحوه اعمال قیود به مدل اجزاء محدود، جهت مدل‌سازی استخراج اتصال را نشان می‌دهد.

عمودی بر مساحت ناحیه تداخل، متوسط سرتاسری فشار تداخل در دسترس خواهد بود.

برای استحصال نیروی استخراج تجربی محور از بوش، ابتدا می‌بایست اجزاء اتصال را سرهم نمود. جهت جلوگیری از تخریب و تغییر سطح تداخل، برای سرهم نمودن اتصال، بوش تا دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد و در درون کوره گرما داده شد و محور نیز در نیتروژن مایع تا دمای ۱۹۷- درجه سلسیوس سرد شد. سپس قطعات بدون نیروی خارجی و تنها با نیروی گرانش و با استفاد از فیکسچر طراحی شده سرهم شدند. سپس اتصال سرهم‌بندی شده با استفاده از پرس یونیورسال و فیکسچر طراحی شده استخراج گردید (شکل ۱۴).



شکل ۱۴- محور و بوش سرهم بندی شده و فیکسچر مورد استفاده جهت اندازه گیری تجربی نیروی استخراج محور به همراه پرس یونیورسال

نمودار نیرو جابجایی نیروی استخراج محور در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل ۱۵ نیروی استخراج تجربی محور معادل ۲۸،۸۵۸ کیلونیوتن است. همانطور که بیان شد در بخش مدلسازی اجزاء محدود، جهت شناسایی ضریب اصطکاک سطح تداخل تلاش شد تا نتایج تحلیل اجزاء محدود به نیروی استخراج تجربی محور نزدیک گردد [۷]. در بررسی دقیق‌تر نمودار نیروی استخراج محور، پس از تبدیل اصطکاک ایستایی در سطح تداخل به اصطکاک جنبشی، مجدداً یک رشد در نیروی استخراج مشاهده می‌گردد. بررسی‌های پیشین نشان داده است که این قله دوم نیروی استخراج به واسطه تجمع تخریب در سطح تداخل می‌باشد. بررسی سطح تداخل پس از استخراج محور نیز مؤید این ادعا است. همچنین در اینجا نیز می‌توان این نیروی استخراج محور را با یک متوسط فشار تداخل سرتاسری و متوسط تداخل معادل نمود که البته با توجه به معادل‌سازی نتایج نیروی استخراج اجزاء محدود با نتایج تجربی، نتایج مشابه با تحلیل اجزاء محدود حاصل خواهد شد. در ادامه تمامی نتایج حاصل، در کنار هم بررسی خواهند شد.

$$MGP = \frac{F_N}{A_n} \quad (۴)$$

که در آن، MGP^1 متوسط سرتاسری فشار و A_n سطح تداخل اسمی است. در صورتی که در یک اتصال بدون عیب، مقدار فشار تداخل، معادل متوسط سرتاسری فشار ایجاد شده در یک اتصال دارای عیب هندسه باشد، از نقطه نظر تئوری، نیروی استخراج محور دارای عیب با نیروی استخراج اتصال بدون عیب مورد نظر معادل خواهد بود. بنابراین اتصال بدون عیب، معادل با اتصال دارای عیب است و تداخل آن نیز معادل تداخل قطعه بدون عیب است.

با استفاده از رابطه لانه ارائه شده در معادله (۱) و مقدار متوسط سرتاسری فشار تداخل می‌توان مقدار تداخل معادل قطعات دارای عیب را استحصال نمود. در ادامه و در جدول ۴، این اطلاعات، برای نمونه مورد توجه در این پژوهش، ارائه می‌گردد. با توجه به جدول ۴ روشن می‌گردد که مقدار تداخل معادل برای اتصال دارای عیب هندسه، ۱۷ میکرومتر است. لازم به یادآوری است که پیش از ساخت، تداخل اسمی مورد نظر برای این اتصال معادل ۱۵ میکرومتر شعاعی بود. اما در فرآیند میانگین‌گیری از تداخل‌ها بر روی مدل هندسی دقیق قطعه، مقدار متوسط تداخل شعاعی ۱۴،۷ میکرومتر بدست آمد و در میانگین‌گیری از اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری‌های ماشین اندازه‌گیری مختصات این مقدار معادل با ۱۳،۸ میکرومتر بدست آمد. روشن است که تفاوت این مقادیر و درصد اختلاف آنها کاملاً وابسته به نقاط برداشت اطلاعات است و در صورتی که ابعاد برداشت اطلاعات با توجه به سطح تداخل به نحو مناسبی انتخاب شده باشد، اطلاعات حاصل از سه روش به هم نزدیک‌تر خواهند بود.

جدول ۴- مقادیر حاصل از تحلیل اجزاء محدود.

تداخل شعاعی معادل	متوسط سرتاسری فشار تداخل	انتگرال نیروهای عمود بر سطح تداخل (N)	نیروی استخراج محور (N)
۱۳،۷۹ (μm)	۲۵،۵۲ (KPa)	۷۲۱۴۷	۲۸۸۵۹

۶- مطالعات تجربی

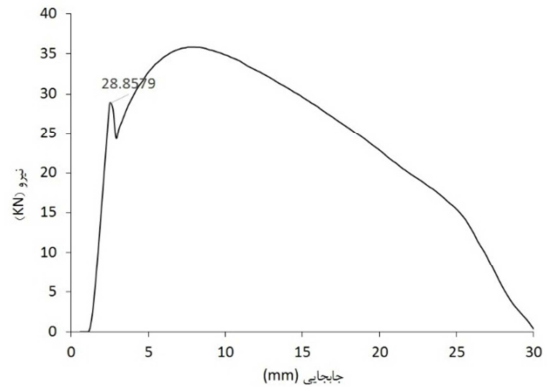
تا به اینجا، یک اتصال تداخلی که به صورت واقعی تولید شده است مورد تحلیل قرار گرفت. در ادامه تلاش می‌گردد تا با استفاده از نتایج تجربی مربوط به اتصال مورد بررسی، بررسی‌های تحلیلی و اجزاء محدود اعتبارسنجی گردند. در اینجا جهت بررسی اعتبار نتایج تئوری، قطعات محور و بوش سرهم شدند و نیروی استخراج آنها به صورت تجربی اندازه‌گیری شد. روشن است که اندازه‌گیری تجربی مقادیر تنش در سطح تداخل بسیار مشکل است. بنابراین در اینجا تنها نیروی استخراج محور به صورت تجربی اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از نیروی استخراج محور و تقسیم آن بر ضریب اصطکاک استخراجی برای دو قطعه محور و بوش با زبری مشخص، می‌توان یک متوسط سرتاسری از مقدار نیروهای عمودی در سطح تداخل بدست آورد، همچنین از تقسیم نیروهای

¹ Mean Global Pressure (MGP)

سطح تداخل را محاسبه نمود. تقسیم این نیروها بر سطح تداخل اسمی، یک متوسط سرتاسری و پیوسته از متوسط فشار تداخل را ارائه می‌دهد. به این معنی، که در این متوسط، تمامی نیروهای عمود بر سطح تماس در نظر گرفته شده است؛ در حالی که در دیگر روش‌های متوسط‌گیری، تنها تنش‌ها و تداخل‌ها بر روی سه مسیر مشخص در نظر گرفته شده است.

فشار تداخل اجزاء محدود برای اتصال بدون عیب معادل ۲۷/۸ مگا پاسکال ارائه داد که حل تحلیل لامه این مقدار را در حدود ۲۷/۷۵۷ مگا پاسکال بود. این نتایج نیز خبر از نزدیکی نتایج حل تحلیلی به حل اجزاء محدود می‌دهد. به نظر می‌رسد برای بررسی نتایج حاصل مناسب است که تمامی نتایج در کنار یکدیگر مورد بررسی قرار گیرند. نتایج حاصل از تمامی محاسبات در جدول ۵ ارائه شده است.

ستون اول جدول ۵ نتایج مربوط به متوسط تداخل حاصل از دو روش اندازه‌گیری هندسه و البته تحلیل اجزاء محدود را نشان می‌دهد. نگاه کلی به نتایج نشان‌دهنده نزدیکی مقادیر متوسط تداخل به یکدیگر است. نکته قابل توجه دیگر این است که تمامی مقادیر از مقدار تداخل اسمی اتصال یعنی ۱۵ میکرون کمترند. پس از یک دید کلی، عیوب هندسه باعث کاهش مقدار استحکام اتصال خواهد شد. نکته قابل توجه دیگر بیشتر بودن متوسط تداخل معادل حاصل از تحلیل اجزاء محدود است. در تحلیل‌های بعدی و محاسبه درصد خطای نسبی نتایج، مبنای بررسی این مقدار قرار گرفته است. زیرا این مقدار با مقادیر تجربی تنظیم شده است و به نوعی متوسط تمامی فشارهای موضعی در سطح تداخل است. بنابراین این مقدار را می‌توان نزدیک‌ترین مقدار به واقعیت تصور نمود. با توجه به نمودار ۱۱ و شکل ۱۰ توانایی تحلیل اجزاء محدود در دریافت تنش‌های موضعی روشن می‌گردد. نکته قابل توجه دیگر عدم توانایی محاسبات مبتنی بر متوسط تداخل در دریافت تنش‌های موضعی است. به بیان دیگر به نظر می‌رسد که روش‌های مطرح شده استفاده از متوسط تداخل، در پیش‌بینی متوسط فشار تداخل و استحکام اتصال می‌تواند موفق عمل کند؛ اما در پیش‌بینی مقادیر موضعی تنش، ناتوان است. برای نیل به مقادیر موضعی تنش، روش پیشنهاد شده برای مدلسازی اجزا محدود و بهنگام‌سازی ضریب اصطکاک می‌تواند روشی کارآمدتر باشد. البته لازم به یادآوری است که تعیین تنش‌های موضعی در سطح تداخل با توجه به زبری سطح و پیش‌بینی تمامی مؤلفه‌های تنش، در حال حاضر نیز موضوع بسیاری از پژوهش‌ها است. به عنوان نمونه بوکزکوفسکی و کلیبر اخیراً در مقاله‌ای [۱۴] تلاش نمودند تا اثر



شکل ۱۵- نمودار نیرو-جابجایی فرآیند استخراج محور دارای عیوب هندسه

۷- نتایج و بحث

ساخت و تولید اجزاء اتصالات تداخلی همواره همراه با عیوب هندسه در سطح تداخل است. روشن است که عیوب هندسه می‌تواند به صورت موضوع بر روی میدان تنش در سطح تداخل تأثیر بگذارد. در این پژوهش ابتدا اجزاء یک اتصال تداخلی ساخته شد. در ادامه خواص مکانیکی مواد تشکیل‌دهنده محور و بوش به صورت تجربی استخراج گردید تا از این موضوع اطمینان حاصل گردد که مقادیر خواص مکانیکی هیچ گونه انحرافی در نتایج محاسبات ایجاد نخواهند نمود. در ادامه اجزاء اتصال مورد بررسی ابعادی قرار گرفت. بررسی‌های اولیه نشان داد که قطعه بوش را می‌توان به صورت استوانه کامل در نظر گرفت. اما قطعه محور همراه با عیوب هندسه بود. بنابراین مدل دقیق هندسه محور استخراج گردید. سپس با استفاده از این مدل و استخراج ابعاد دقیق آن در سه مقطع محیطی، در طول محور، تلاش شد تا متوسط تداخل محور اندازه‌گیری شود. ابعاد دقیق هندسه محور در نقاط متناظر با مدل هندسی، با استفاده از ماشین اندازه‌گیری سه‌بعدی مختصات (CMM) نیز اندازه‌گیری و متوسط تداخل به این روش نیز استخراج گردید.

هندسه دقیق محور تحت تحلیل اجزاء محدود نیز قرار گرفت. در این مرحله نیز تلاش شد تا متوسط فشار بر روی مسیرهای متناظر با مسیرهای اندازه‌گیری‌های ابعادی محاسبه گردد. نیروی مورد نیاز برای استخراج محور از بوش نیز، با استفاده از تحلیل اجزاء محدود محاسبه گردید.

در نهایت نیروی استخراج اتصال به صورت تجربی اندازه‌گیری شد. با استفاده از روش مطرح شده توسط سیفی و عباسی [۷] ضریب اصطکاک در سطح تداخل محاسبه شد. از تقسیم نیروی استخراج محور بر ضریب اصطکاک سطح تداخل می‌توان، انتگرال نیروهای عمود بر

جدول ۵- مقایسه نتایج حاصل از حل نظری و اجزاء محدود و خطای نسبی نتایج با نتایج حاصل از حل اجزاء محدود بهنگام شده.

اختلاف نسبی نتایج با نتایج حاصل از نیروی استخراج محور اجزاء محدود	متوسط فشار (KPa)	متوسط تداخل (μm)	
-۳،۰۷	۲۴،۷۳	۱۳،۳۷	نتایج حاصل از مدل نوری
-۳،۳۴	۲۴،۶۷	۱۳،۳۳	نتایج حاصل از CMM
-۱۱،۲۷	۲۲،۶۴	۱۲،۲۳	نتایج حاصل از متوسط تنش اجزاء محدود بر روی مسیرهای C1 تا C3
۰	۲۵،۵۲	۱۳،۷۹	نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود استخراج محور

v	ضریب پواسون
زیر نویس‌ها	
b	بوش
$mean$	متوسط
n	اسمی
N	عمودی
n	اسمی
r	شعاعی
s	محور
θ	موقعیت زاویه ای

۱۰-مراجع

[1] Timoshenko S.P., Strength of materials part II: advanced theory and problems, third edition, pp. 213-214, Krieger Publication Co, 1956.

[2] Fontaine J. F., and Siala I. E., Form defect influence on the shrinkage fit characteristics, European Journal of Mechanics-A/Solids, Vol. 17, pp. 107-119, 1998.

[3] Boutoutaou H., Bouaziz M., Fontaine J. F., Modeling of interference fits taking form defects of the surfaces in contact into account, Materials and Design, Vol. 32, pp. 3692-3701, 2011.

[4] Sogalad I., Ashoka H.N., Subramanya Udupa N.G., Influence of cylindricity and surface modification on load bearing ability of interference fitted assemblies", Precision Engineering, Vol. 36, pp. 629- 640, 2012.

[5] Boutoutaou H., Bouaziz M., Fontaine J.F., Modeling of interference fits with taking into account surface roughness with homogenization technique, International journal of mechanical sciences, Vol. 69, pp. 21-31, 2013.

[6] Boutoutaou H., and Fontaine J.F., Methodology for a computer-aided design of shrink fits that considers the roughness and form defects of the manufacturing process, Journal of mechanical science and technology, Vol. 29, pp. 2097-2103, 2015.

[7] Seifi R., and Abbasi K., Friction coefficient estimation in shaft/bush interference using finite element model updating, engineering failure analysis, Vol. 57, pp. 310-322, 2015.

[8] Jiang J., Bi Y., Dong H., Ke Y., Fan X., Du K., Influence of stress in hi-lock bolt insertion, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 228, pp. 3296-3305, 2014.

[9] Patil D. B., and Eriten M., Effects of interfacial strength and roughness on the static friction coefficient", Tribology letters, Vol. 56, pp. 355-374, 2014.

[10] Fontaine J. F., and Siala I. E., Optimization of the cylindrical interface shape of a shrinkage fit, Journal of Material Processing and Technology, Vol. 74, pp. 96-103, 1998.

[11] Dobromirski J., and Smith I. O., "A stress analysis of a shaft with a press-fitted hub subjected to cyclic axial loading", International journal of Mechanical Sciences, Vol 28, pp. 41-52, 1986.

[12] Lanoue F., Vadean A., Sanschagrin B., Finite element analysis and contact modelling considerations of interference fits for fretting fatigue strength calculations, Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 17, pp. 1587-1602, 2009.

[13] Croccolo D., De Agostinis M., Vincenzi N., Normalization of the stress concentrations at the rounded edges of a shaft-hub interference fit: extension to the case of a hollow shaft, The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol. 47, pp. 131-139, 2012.

[14] Buczkowski R., and Kleiber M., A study of the surface roughness in elasto-plastic shrink fitted joint, Tribology International, Vol. 98, pp. 125-132, 2016.

زبری سطح را در اتصالات تداخلی و با تحلیل اجزاء محدود بررسی و مطالعه کنند. نکته قابل توجه دیگر در مورد تنش‌های سطحی، اهمیت و اثرگذاری تمامی مؤلفه‌های میدان تنش در پلاستیک شدن یا عدم رخداد آن در سطح تداخل است [۳]. به هر حال متوسط تداخل قادر به شناسایی مقادیر موضعی تداخل و تنش متناظر آن نیست.

همچنین بررسی ستون‌های دوم و سوم و خطاهای نسبی نشان می‌دهد که نتایج حاصل از متوسط تداخل و با استفاده از مدل نوری از تمامی موارد دیگر به نتایج تجربی و تحلیل اجزاء محدود نزدیک‌تر است. با توجه به اینکه در استفاده از مدل نوری تعداد نقاط اندازه‌گیری بیشتر است. روشن است که متوسط‌گیری در این روش از دیگر روش‌ها دقیق‌تر خواهد بود.

۸- نتیجه گیری

به طور کلی می‌توان گفت که استفاده از متوسط تداخل جهت احتساب عیوب هندسه در استحکام اتصال و محاسبه متوسط فشار تداخل روشی مناسب است. این روش با نتایج بوتوتائو و همکاران [۳] برای قطعات با عیب هندسه غیرمنظم واقعی همخوانی دارد. دقت نتایج وابسته به تعداد نقاط مورد استفاده جهت میانگین‌گیری است. انتخاب نقاط بیشتر جهت متوسط‌گیری و البته انتخاب مناسب نقاط می‌تواند نتایج بهتری ارائه دهد. به هر حال اندازه‌گیری‌های سرانگشتی نیز می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه دهد. همچنین توجه به این نکته مهم است که استفاده از متوسط تداخل توانایی استخراج مقادیر موضعی تنش را ندارد و البته قادر به پیش‌گویی اثراتی از قبیل تمرکز تنش در قله‌های زبری و یا افزایش تنش در لبه‌های اتصال نیست. از طرف دیگر مدلسازی اجزاء محدود با استفاده از مدل‌های دقیق می‌تواند روشی مناسب جهت پیش‌بینی مقادیر موضعی تنش باشد. البته در استفاده از تحلیل اجزاء محدود می‌بایست به این نکته نیز توجه داشت که محدوده اعتبار نتایج حاصل وابسته به اندازه شبکه‌بندی است. به عنوان نمونه دریافت مقادیر موضعی تنش‌ها در قله‌های زبری‌هایی با دامنه زیر یک میکرون خارج از دسترس چنین تحلیل اجزاء محدود حاضر است. نکته مهم دیگر در استفاده از تحلیل اجزاء محدود، استفاده از ضریب اصطکاک مناسب جهت دسترسی به نتایج قابل اطمینان است. این مهم می‌تواند با استفاده از نتایج تجربی میسر گردد.

۹- نمادها

A	مساحت (m^2)
E	ضریب کشسانی ($kgm^{-1}s^{-2}$)
ES	نیروی استخراج محور ($kgms^{-2}$)
f	ضریب اصطکاک
F	نیرو ($kgms^{-2}$)
MGP	متوسط سرتاسری فشار تداخل ($kgm^{-1}s^{-2}$)
p	فشار (Nm^{-2})
r	شعاع (m)
علایم یونانی	
δ	تداخل شعاعی (m)
σ	تنش ($kgm^{-1}s^{-2}$)