



## Simulation of the forming of jet engine compressor spools by ring rolling process

Mojtaba Esmailian <sup>a\*</sup>, Farzad Boroumand <sup>a\*</sup>, Mehdi Dehghan <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Mechanical engineering, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

### Original Article

Use your device to scan  
and read the article online



**Citation:** Esmailian M, Boroumand F, Dehghan M. Simulation of the forming of jet engine compressor spools by ring rolling process. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023;3(2):216-235.

 <https://10.52547/masm.3.2.216>

### KEYWORDS

Finite Element Simulation,  
Ring Rolling Process,  
front and back spools.

### ABSTRACT

In recent years, ring rolling process is used to produce seamless rims in many industries, including the aviation and railway industries. The reason for this is the advantages of this process, such as saving money and materials, high quality and high efficiency. In this research, the shaping of the front and rear spools of an airplane engine compressor has been investigated using the ring rolling process. Due to the complexity of the internal and external surface shapes of these spools, it is difficult to simulate the ring rolling process for them. For the simulation, the stress applied to the main roller has been checked with the assumption of the shape of the rollers. Also, the forces acting on the main roller in the case where the rollers are assumed to be malleable have been extracted and compared with the previous results where all the rollers are rigid. In both spools, there are complex forms designed on the surface of the roller. If the concentration of stress created at the sharp points during meshing is ignored, the stresses created on other parts of the mold are around 400 MPa. Therefore, H13 steel can be used for the front and back spools to make all molds. However, it is suggested that the surface of the shell is as hard as possible and after making molds and using them for the mass production of shells, these surfaces should be constantly reviewed.

### Extended Abstract

#### 1. Introduction

One of the processes that is used today in many industries, especially the railway, military and aerospace industries, is the ring rolling process. This process has been used to produce seamless welding rings, and because of this feature, it has attracted the attention of various industries. Figure 1 schematically shows the ring rolling process and the mold components of the process.

Considering the importance and application of the ring rolling process method as mentioned above, many studies have been done on this process by researchers.

The front and rear spool of the airplane engine compressor is one of the parts of the aerospace industry with high manufacturing technology due to its shape and material, which is made by the ring rolling process in recent years. In most of the researches done on ring rolling, the parts are not very complicated. In this research, the ring rolling process for spools that have a complex shape and are made of titanium alloy is done and forming is done

\* Corresponding author. Tel.: +9809131094078

E-mail address: Mojtaba@mut-es.ac.ir

DOI: <https://10.52547/masm.3.2.216>

Received: August 11, 2023; Received in revised form: September 04, 2023; Accepted: September 19, 2023

© Author



at high temperature. Also, the stress analysis on the main roller during the process has been done by ABAQUS software, which is used to design the roller. Also, the forces acting on the main roller have been calculated and checked. It should be noted that in this study, the main roller is considered to be malleable and hence the simulation and analysis were closer to reality.

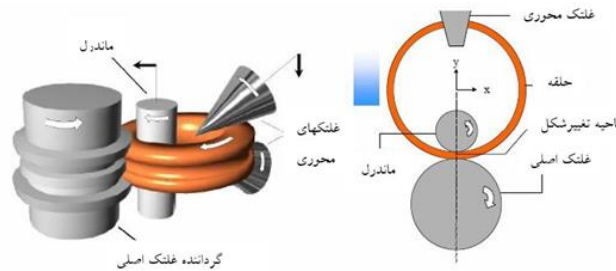


Figure 1. Schematic of ring rolling process

## 2. Simulating the ring rolling process of shaped parts

To implement the simulation of the circular rolling process of shaped parts in this research, first the parts are modeled in the software. The mold of the main roller and the workpiece are modeled in the software in a formable way, and then the analysis is done based on this. Due to the fact that the most forces are applied to the main roller, this malleable roller is chosen, and due to the long time it takes to solve the problem, there is no need for the other rollers to be malleable. In fact, the most critical state is related to the main roller, and by analyzing it, the obtained results can be used for other rollers as well.

The material of the back and front spool is Ti-6Al-4V titanium alloy. Also, considering the ability of H13 steel to withstand high stresses at high temperatures, the initial guess is that this steel has the ability to withstand the stresses imposed on the rollers of the ring rolling process. According to the condition of the roller due to the application of load at the end of the process, the suitability or lack of suitability of H13 steel for use in the ring rolling process roller will be checked. Therefore, the mechanical and thermal properties of Ti-6Al-4V and H13 materials are considered in the simulation for workpieces and rollers, respectively. Also, the stress-strain diagrams of these alloys at different temperatures and with different strain rates were entered in the material properties section of the ABAQUS software. The final assembled model for two spools is shown in Figure 2.

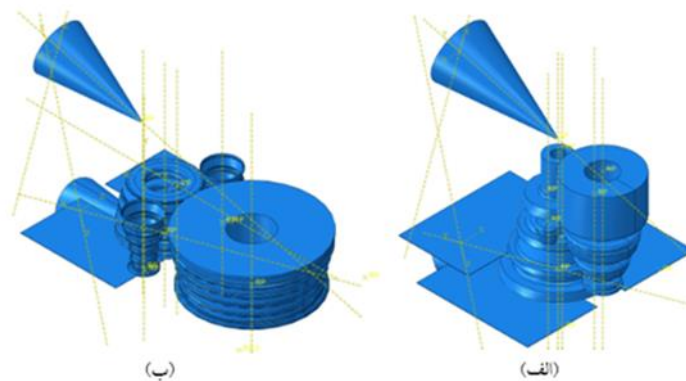


Figure 2. Assembled parts of aircraft engine spools (a) Front spool (b) Rear spool

## 3. Simulation results and discussion

As stated, the purpose of this research is to investigate the amount of stress applied to the roller in order to choose the right material for it. In the following, the results of the simulation about the stress of the main roller as well as the forces applied to the main roller and it is compared with previous simulations in which the main roller was considered rigid.

### 3.1 Design and analysis of power transmission parts

Figure 3 shows the von Mises stress distribution on the front spool (3-a) and the main roller (3-b). According to Figure (3-a), it can be seen that the whole shell has entered the yielding region and this is consistent with the prediction.

Figure 4 shows the von Mises stress distribution on the main roller by removing the sharp points (4-a) and the stress distribution in the main roller body (4-b). As it can be seen, the stress in the shaped parts is about 1300 megapascals by removing the sharp points, which of course, this amount of stress exists only in the shaped parts. According to the yield stress of heat-treated H13 steel, which is about 1900 megapascals, this amount of stress can be tolerated by the mold. Also, according to Figure (4-b), the von Mises stress distribution in the main roller body is in the range of 100 to 200 MPa, which is insignificant compared to the yield stress of H13 steel.

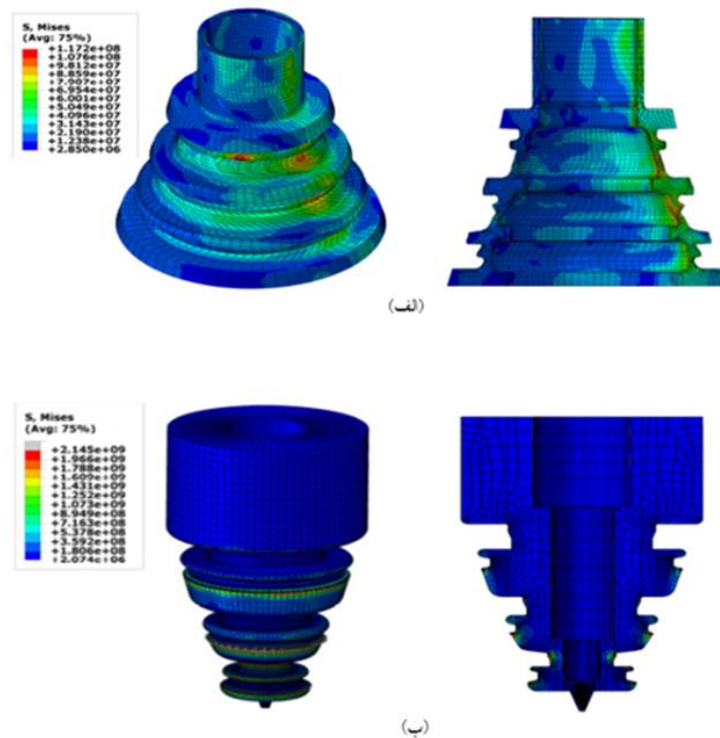


Figure 3. Von Mises stress distribution on (a) front spool (b) main roller

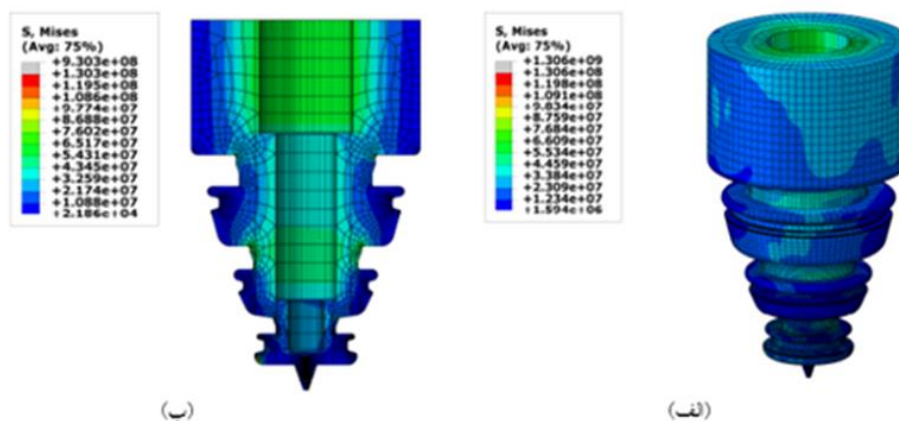


Figure 4. Von Mises stress distribution (a) on the main roller by removing the stress at the sharp points (b) on the body of the main roller

### 3.2 Design and analysis of power transmission parts

Figure 5 shows the von Mises stress distribution on the rear spool (5-a) and on the main roller of the rear spool (5-b). According to figure (5-a), it can be seen that the entire shell has entered the yielding region and this is consistent with the prediction.

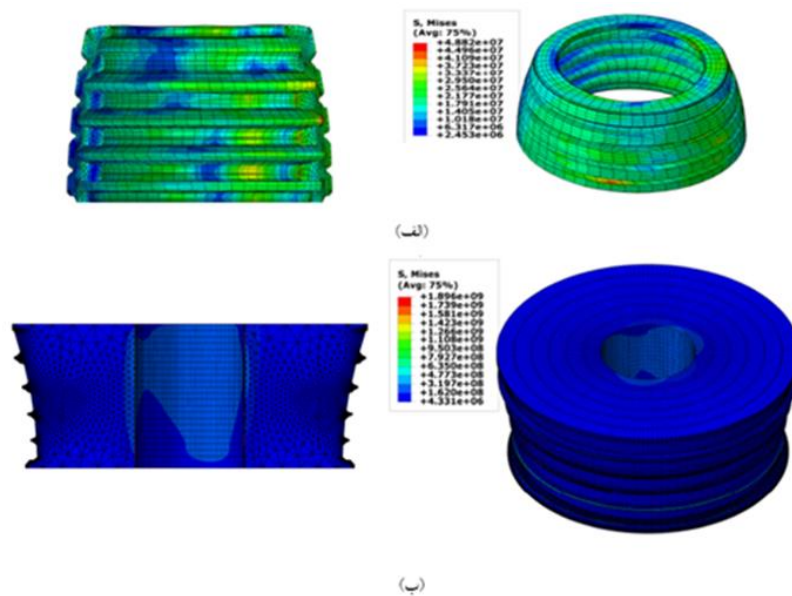


Figure 5. Von Mises stress distribution (a) on the rear spool (b) on the main roller

### 3.3 The forces on the front and back spool main roller

In order to obtain the forces on the main roller, the force-time diagrams obtained from the simulation of the ring rolling process have been drawn for the main roller of the front spool and the main roller of the rear spool in three directions X, Y and Z.

After extracting the forces acting on the main roller of the front and rear spool in different directions assuming that the roller is malleable in this research, the results were compared with the forces acting on the main roller assuming the rigidity of the main roller of the front and rear spool in the ring rolling process.

In the case of the front spool, the forces obtained in the case where the main roller is malleable is more than the case of the rigid roller, so that in the case of the rigid roller, the force applied to the main roller is 15, 13, and 56 tons were obtained in X, Y, and Z directions, respectively. While in the case of the main malleable roller, the amount of these forces was 40, 28 and 75 tons, respectively.

In the case of the rear spool, the forces obtained in the case where the main roller is considered malleable are more than the case of the rigid roller, so that in the case of the rigid roller, the forces entering the roller in the X direction, Y, Z were 68, 35, and 70 tons, respectively, and in the formable roller state, these values were 130, 40, and 100 tons, respectively. The obtained forces are used to design the necessary supports for the rollers on the machine.

## 4. Conclusion

In this research, one of the main and fundamental goals was to investigate the stresses applied to the main rollers of the front and rear spools of the aircraft engine, assuming that the main roller is malleable and performing modeling and simulation of the ring rolling process, the stress Applied to the shells were obtained based on the selection of H13 steel. Regarding these stresses, it is necessary to mention that in both spools, due to the presence of complex forms on the surface of the roller, and that with the meshing of the surface of the main rollers, the uniform surfaces with (r) are turned into surfaces with edges. becomes sharp and this causes concentration of stress in these points and makes the stress obtained from the software unreliable. The stresses created on other parts of the mold are insignificant and are around 400 MPa. Therefore, H13 steel can be used for the front and rear spool to make all molds, but it is suggested that the surface of the shell is hardened as much as possible and after making the molds and using them for production A lot of shells, these levels should be reviewed regularly.

Another issue that was examined in this research was the amount of forces applied to the main roller, so that the amount of these forces could be compared with the results obtained from the case where all the rollers were

considered rigid. In the case of the front spool, the forces obtained in the case where the main roller is considered malleable are more than the case of the rigid roller, so that in the case of the rigid roller, the force applied to the main roller in the direction X, Y, Z were 15, 13, and 56 tons, respectively, while in the form of the main roller, these forces were 40, 28, and 75 tons, respectively. In the case of the rear spool, the forces obtained in the case where the main roller is considered malleable are more than the case of the rigid roller, so that in the case of the rigid roller, the forces entering the main roller in the X direction, Y, Z were 68, 35, and 70 tons, respectively, and in the formable roller state, these values were 130, 40, and 100 tons, respectively.

According to these results, the obtained forces should be taken into consideration in designing the hydraulic system as well as choosing the engine. Of course, due to the fact that there is always some error in the simulations and it is also possible to change the amount of forces by reducing the mesh and also by meshing other rollers. Therefore, it is suggested to design the system based on a reliable safety factor.



## شبیه‌سازی شکل‌دهی اسپول‌های کمپرسور موتور جت توسط فرآیند نورد حلقوی

مجتبی اسماعیلیان<sup>الف\*</sup>، فرزاد برومند<sup>ب</sup>، مهدی دهقان<sup>ج</sup>

<sup>الف</sup> پژوهشگر، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران، [Mojtaba@mut-es.ac.ir](mailto:Mojtaba@mut-es.ac.ir)

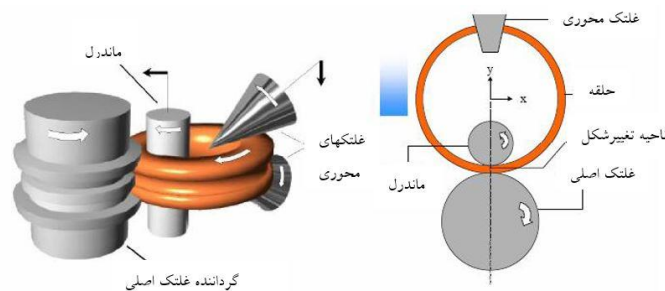
<sup>ب</sup> پژوهشگر، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران، [boroumandfarzad@birjand.ac.ir](mailto:boroumandfarzad@birjand.ac.ir)

<sup>ج</sup> پژوهشگر، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران، [M\\_dehghan@mut-es.ac.ir](mailto:M_dehghan@mut-es.ac.ir)

| چکیده  | واژگان کلیدی   |
|--|--|
| <p>در سال‌های اخیر در بسیاری از صنایع از جمله صنایع هوایی و ریلی، برای تولید رینگ‌های بدون درز از فرآیند نورد حلقوی استفاده می‌شود. علت این امر مزایای این فرآیند همچون صرفه‌جویی در هزینه و مواد، کیفیت بالا و بازدهی بالا می‌باشد. در این تحقیق شکل‌دهی اسپول جلو و عقب کمپرسور یک موتور هواپیما به کمک فرآیند نورد حلقوی مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل پیچیده بودن اشکال سطح داخلی و بیرونی این اسپول‌ها، شبیه‌سازی فرآیند نورد حلقوی برای آن‌ها دشوار می‌باشد. برای شبیه‌سازی انجام شده، بر روی تنش‌های اعمالی به غلتک اصلی با فرض شکل‌پذیر بودن غلتک‌ها انجام شده است. همچنین نیروهای وارد بر غلتک اصلی در حالتی که غلتک‌ها شکل‌پذیر فرض شده‌اند، استخراج و با نتایج قبلی که کلیه غلتک‌ها صلب می‌باشد مقایسه شده‌اند. در هر دو اسپول فرم‌های پیچیده بر روی سطح غلتک طراحی شده وجود دارد. اگر از تمرکز تنش‌هایی که در نقاط نوک تیز ایجاد شده در زمان المان‌بندی صرف‌نظر شود، تنش‌های ایجاد شده بر روی سایر قسمت‌های قالب در حدود ۴۰۰ مگاپاسکال می‌باشد. بنابراین برای اسپول جلو و عقب می‌توان از فولاد H13 جهت ساخت کلیه قالب‌ها استفاده نمود. اما پیشنهاد می‌گردد که تا حد امکان سطح پوسته سخت‌کاری شده و بعد از ساخت قالب‌ها و استفاده از آن‌ها جهت تولید انبوه پوسته‌ها، به‌طور مداوم این سطوح بازبینی گردد.</p> | <p>شبیه‌سازی المان محدود، فرآیند نورد حلقوی، اسپول جلو و عقب، کمپرسور.</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۰</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۳</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۸</p> |

### ۱- مقدمه

یکی از فرآیندهایی که امروزه در بسیاری از صنایع به‌ویژه صنایع ریلی، نظامی و هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرد فرآیند نورد حلقوی می‌باشد. این فرآیند به منظور تولید حلقه‌های بدون درز جوش کاربرد داشته و به دلیل همین خصوصیت مورد توجه انواع صنایع قرار گرفته است. البته مزایای دیگر این روش عبارت‌اند از: هزینه‌های بسیار پایین تولید، توانایی در تولید انواع مقاطع، کیفیت بهتر محصولات از لحاظ متالورژیکی و ریزساختار، ترانس بسته ابعاد و کاهش دور ریز ماده اولیه. این روش جهت تولید قطعات حلقوی بزرگ و کوچک که دارای تقارن محوری هستند، همچنین رینگ‌های با مقاطع خاص همچون رینگ بلبرینگ‌ها، قطعات دقیق موتورهای جت، توربین‌ها و حلقه‌های تقویت سازه به وزن ۳۰ تن به کار می‌رود [۱]. شکل ۱ به‌صورت شماتیک فرآیند نورد حلقوی و اجزای قالب فرآیند را نشان داده است.



شکل ۱ شماتیک فرآیند نورد حلقوی

با توجه به اهمیت و کاربرد روش فرآیند نورد حلقوی مطابق با آنچه که در بالا به آن اشاره شد، مطالعات زیادی بر روی این فرآیند توسط محققین صورت گرفته است. به عنوان نمونه پرویزی و همکارانش [۲] به تجزیه و تحلیل دوبعدی فرآیند نورد حلقوی به کمک روش حل کران بالایی پرداختند. آن‌ها با شبه‌سازی اجزای محدود فرآیند، نیرو و قدرت مورد نیاز غلتک در فرآیند را تعیین و با روش تجربی، اعتبارسنجی کردند. در نتیجه با صحت سنجی نتایج، شبه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس و حل کران بالا را، روشی مناسب برای تحلیل فرآیند نورد حلقوی و محاسبه نیروی غلتک معرفی نمودند. وانگ و همکارانش [۳] به شبه‌سازی عددی و مطالعه تجربی تغییرات هندسی و روش کنترل فرآیند نورد حلقوی داغ عمودی پرداختند. در این تحقیق، حالت‌های تعامل و قوانین بین حلقه و غلتک در فرآیند نورد حلقوی داغ عمودی تحلیل شده و قوانین تغییر هندسه حلقه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. آن‌ها اعلام داشتند که هندسه دقیق و کنترل مؤثر در طول فرآیند نورد حلقوی، پیش‌نیاز شکل‌دهی دقیق محصولات حلقه است و با توجه به اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبه‌سازی فرآیند در نرم‌افزار آباکوس با نتایج تجربی، نتایج تحقیق، برای هدایت تولید محصولات نورد حلقوی داغ، اهمیت عملی دارد. یو و همکارانش [۴] به تحلیل میدان تنش نورد حلقوی سرد نامتقارن برای حلقه داخلی بلبرینگ در خط آهن با سرعت بالا با استفاده از شبه‌سازی اجزاء محدود پرداختند. آن‌ها در این تحقیق از مدل المان محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس استفاده کرده و توزیع تنش محیطی، شعاعی و محوری بر روی حلقه داخلی بلبرینگ را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که تنش در هر جهت از حلقه ابتدا افزایش پیدا کرده و سپس با هر مرحله از نورد سرد، کاهش می‌یابد. یکی از روش‌های دیگر در شکل‌دهی لوله‌های فلزی نوزینگ است که طی این فرآیند یک پوسته یا لوله فلزی توسط دستگاه پرس به داخل قالبی که فرم قطعه نهایی را دارد هدایت می‌شود [۵]. منگ و همکارانش [۶] به بررسی اثرات پارامترهای کلیدی شبه‌سازی بر فرآیند نورد حلقه مخروطی پرداختند. آن‌ها اثرات پارامترهای کلیدی شبه‌سازی مانند ضریب مقیاس‌پذیری جرم، ضریب مقیاس‌پذیری زمانی و جابجایی‌های مجدد در هر افزایش بر زمان شبه‌سازی و تغییر حجم حلقه مخروطی را مورد بررسی و تحلیل قرار دادند. در نهایت نتیجه تحقیق آن‌ها، تعیین مقادیر معقول پارامترهای شبه‌سازی در فرآیند نورد حلقه مخروطی برای کاهش زمان شبه‌سازی و به‌طور هم‌زمان کاهش خطای شبه‌سازی اجزاء محدود بود. ال وی و همکاران [۷] بهینه‌سازی چند هدفه طراحی پارامتریک برای فرآیند نورد حلقوی پروفیل بر اساس کنترل تنش پسماند را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این تحقیق فرآیند نورد حلقوی آلیاژ TC4 که از آلیاژهای پرمصرف صنعت هوافضا می‌باشد را مدل‌سازی نموده و به کمک روش رویه پاسخ پارامترهای ورودی مؤثر بر ایجاد تنش پسماند را بهینه‌سازی نمودند. در انتها نیز نتایج به‌دست‌آمده از شبه‌سازی و مدل‌سازی المان محدود را با نتایج تجربی مقایسه کردند. نگهبان و همکارانش [۸] به پیش‌بینی شکست غلتک کار در فرآیند نورد حلقوی داغ پرداختند. به‌منظور پیش‌بینی شکست ناشی از تنش مکانیکی - حرارتی در غلتک‌های کاری، کد توسعه یافته در ABAQUS استفاده شد. مقایسه‌ای بین مدل‌های سه‌بعدی و دوبعدی ایجاد شده، انجام شد و همچنین پاسخ‌های حرارتی و ترمومکانیکی غلتک‌های کار با شرایط مرزی متغیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با اعمال بارهای مکانیکی و حرارتی به‌صورت جداگانه یا هم‌زمان، پاسخ غلتک‌های کار کاملاً متفاوت می‌باشد. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که محل بیشترین تنش در غلتک مندرل<sup>۱</sup> بر روی سطح است در حالی که محل بیشترین تنش برای غلتک اصلی در زیر سطح می‌باشد. آن‌ها همچنین در این تحقیق عمر خستگی مکانیکی - حرارتی را تخمین زدند و آسیب انباشته در سطح مندرل

<sup>1</sup> mandrel roller

و زیر سطح غلتک اصلی را عامل اصلی برای شروع ترک ناشی از خستگی مکانیکی - حرارتی در این نواحی معرفی نمودند. پرساس و همکارانش [۹] به ارزیابی عددی تغییر شکل الاستیک غلتک و اثرات انبساط حرارتی بر دقت ابعادی محصولات نورد حلقوی مسطح پرداختند. آن‌ها از طریق مدل‌های عددی، تغییر شکل‌های الاستیک و حرارتی غلتک‌ها را به‌طور کامل مورد مطالعه قرار داده و اثر تغییر شکل روی حلقه تولید شده را پیش‌بینی کردند. بر اساس تجزیه و تحلیل آن‌ها، مشخص شد که انحرافات تغییر شکل جزئی (تغییر شکل‌های حرارتی و الاستیک) از مقادیر هدف ممکن است در صورتی که غلتک‌ها نتوانند این تغییر شکل‌ها را جبران کنند، باعث ایجاد ناپایداری در فرآیند شود. همچنین در صورت نیاز به دقت بالا در محصول، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر شکل‌های ترموالاستیک ابزار با توجه به انحرافات ابعادی نهایی، قابل توجه است. تجا و همکارانش [۱۰] مطالعات شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند نورد حلقوی با استفاده از آلیاژهای فولاد و آلومینیوم را انجام دادند. آن‌ها با استفاده از ANSYS بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند نورد حلقوی مانند سرعت، تغذیه غلتک محوری و غلتک‌های محرک را انجام دادند. سطوح تنش و کرنش در سرعت‌ها و نیروهای مختلف ارزیابی شد و مقادیر بحرانی شکست تعیین شد. علاوه بر این، قسمت کار و استحکام خستگی غلتک بر اساس تعداد چرخه‌های قبل از شکست تعیین شد. جیورلو و همکارانش [۱۱] به بررسی سرعت در چرخش دور آرام در فرآیند نورد حلقوی پرداختند. آن‌ها دانش بهینه‌سازی قانون سرعت چرخش دور آرام غلتک در فرآیند نورد حلقوی را افزایش دادند: قوانین مختلف سرعت چرخش دور آرام طراحی و شبیه‌سازی شدند و نتایج به منظور شناسایی بهترین قانون سرعت که یک حلقه با کیفیت خوب با نیروهای کمتر و انرژی مورد نیاز کمتر برای تولید را تضمین می‌کند، مقایسه شدند. هان و همکارانش [۱۲] یک روش جدید نورد حلقوی چند ضلعی را مورد مطالعه قرار دادند. مطالعه آن‌ها یک روش نورد حلقوی چند ضلعی جدید را با استفاده از یک حلقه ساده چرخشی به‌عنوان قطعه کار حلقه پیشنهاد می‌کند. چهار مسیر نمونه تغذیه ابزار طراحی شده و حالت‌های تغییر شکل پلاستیک و تکامل هندسه حلقه چند ضلعی تحت این چهار مسیر ابزار تغذیه آشکار می‌شوند. در همین حال، چهار مسیر نمونه ابزار تغذیه مبتنی بر پایداری فرآیند نورد حلقوی چند ضلعی بهینه شده است. در نهایت، آزمایش‌های نورد حلقوی چند ضلعی انجام شده و نشان داده می‌شود که روش نورد حلقوی چند ضلعی پیشنهادی امکان پذیر است. همانند عیب گوشواره‌ای که در فرآیند کشش عمیق بررسی می‌شود [۱۳]، در فرآیند نورد حلقوی میزان عیب دم ماهی مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۴]. کیانگ و همکارانش [۱۵] به تجزیه و تحلیل و همگن‌سازی تنش پسماند در فرآیند نورد حلقوی آلیاژ آلومینیوم ۲۲۱۹ با استفاده از روش تنش‌زدایی حرارتی پرداختند. ابتدا، مدل مکانیکی برای فرآیند نورد برای تجزیه و تحلیل رفتارهای مکانیکی قطر و جهت‌های محوری ایجاد نمودند. دوم، یک مدل المان محدود برای شبیه‌سازی فرآیند نورد و فرآیند کاهش تنش حرارتی ایجاد کردند. این فرآیند به منظور بررسی و تأیید تأثیر درمان تنش‌زدایی حرارتی بر کاهش تنش پسماند و همگن‌سازی فرآیند نورد انجام شد. آزمایش‌های نورد و کاهش تنش حرارتی مربوطه برای تأیید نتایج شبیه‌سازی انجام شد. آن‌ها اعلام کردند که نتایج تجربی هنگامی با نتایج شبیه‌سازی مطابقت دارد که رفتار کاهش تنش حرارتی تغییر کند. کاهش تنش حرارتی حلقه نورد می‌تواند به‌طور مؤثر تنش پسماند را کاهش داده و همگن کند. این مطالعه برای کاهش و همگن‌سازی تنش پسماند بزرگ قابل توجه است. لی و همکارانش [۱۶] به بررسی یک روش کنترلی برای غلتک‌های راهنما در شبیه‌سازی فرآیند نورد حلقوی پرداختند. آن‌ها روش جدیدی جهت هدایت غلتک‌های راهنما بیان کردند. سپس با استفاده از روش اجزای محدود فرآیند نورد حلقه‌هایی با مقطع مستطیلی و T شکل را شبیه‌سازی نموده و نتایج حاصل را با نتایج تجربی مقایسه کردند. هوآ و همکارانش [۱۷] طراحی یک روش کنترلی برای نرخ تغذیه غلتک هرزگرد (مندرل) در نورد حلقوی سرد را انجام داده‌اند. آن‌ها چهار طرح برای نرخ تغذیه مورد بررسی ارائه کرده و با شبیه‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار ABAQUS مزایا و معایب هر یک را مشخص نموده‌اند. سان و همکارانش [۱۸] به بهینه‌سازی مسیر حرکت غلتک‌های راهنما در فرآیند نورد حلقوی سرد پرداختند. آن‌ها تأثیر موقعیت اولیه و مسیر حرکت غلتک‌های راهنما را بر پایداری فرآیند، گردی حلقه‌ی نهایی، نیروهای نورد و نوسانات بررسی کردند. اسماعیلیان [۱۹] به بررسی شبیه‌سازی عددی فرآیند نورد حلقوی پوسته موتور جت پرداخت. وی با فرض شکل پذیر بودن غلتک اصلی، مدل المان محدود فرآیند نورد حلقوی این پوسته‌ها را ارائه نمود.

اسپول جلو و عقب کمپرسور موتور هواپیما، از جمله قطعات صنایع هوافضا با تکنولوژی ساخت بالا به دلیل شکل و جنس آن می‌باشد که در سال‌های اخیر توسط فرآیند نورد حلقوی ساخته می‌شود. در بیشتر تحقیقات انجام‌گرفته بر روی نورد حلقوی،

قطعات دارای پیچیدگی زیاد نمی‌باشند. در این تحقیق، فرآیند نورد حلقوی برای اسپول‌ها که دارای شکل پیچیده و از جنس آلیاژ تیتانیوم هستند، انجام شده و شکل‌دهی در دمای بالا انجام می‌شود. همچنین تحلیل تنش بر روی غلتک اصلی در حین فرآیند توسط نرم‌افزار ABAQUS انجام گرفته است که به منظور طراحی غلتک از آن استفاده می‌شود. همچنین نیروهای وارد بر غلتک اصلی محاسبه و بررسی شده است. لازم به ذکر است که در این مطالعه، غلتک اصلی شکل‌پذیر در نظر گرفته شده است و از این‌رو شبه‌سازی و تحلیل‌ها به واقعیت نزدیک‌تر بوده است.

## ۲- شبه‌سازی فرآیند نورد حلقوی قطعات فرم‌دار

برای اجرای شبه‌سازی فرآیند نورد حلقوی قطعات فرم‌دار در این تحقیق، ابتدا قطعات در نرم‌افزار مدل‌سازی می‌گردد. قالب غلتک اصلی و قطعه‌کار در نرم‌افزار به صورت شکل‌پذیر مدل گردیده و سپس تحلیل‌ها بر این اساس صورت می‌پذیرد. با توجه به این‌که بیشترین نیروها بر روی غلتک اصلی وارد می‌شود لذا این غلتک شکل‌پذیر انتخاب می‌گردد و به دلیل زمان بسیار طولانی جهت حل مسئله نیازی به شکل‌پذیر بودن سایر غلتک‌ها نیست. در حقیقت بحرانی‌ترین حالت مربوط به غلتک اصلی می‌باشد که با تحلیل آن، نتایج به دست آمده برای سایر غلتک‌ها نیز قابل استفاده می‌باشد.

جنس اسپول عقب و جلو، آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V می‌باشد. همچنین با توجه به توانایی فولاد H13 در تحمل تنش‌های بالا در دماهای زیاد، حدس اولیه این است که این فولاد توانایی تحمل تنش‌های وارد بر غلتک‌های فرآیند نورد حلقوی را داشته باشد. با توجه به وضعیت غلتک بر اثر اعمال بار در انتهای فرآیند، مناسب یا عدم مناسب بودن فولاد H13 برای استفاده در غلتک فرآیند نورد حلقوی بررسی خواهد شد. بنابراین خواص مکانیکی و حرارتی مواد Ti-6Al-4V و H13 مطابق جداول ۱ تا ۴ در شبه‌سازی به ترتیب برای قطعه‌کار و غلتک‌ها لحاظ می‌گردد. همچنین نمودارهای تنش- کرنش این آلیاژها در دماهای مختلف و با نرخ کرنش‌های متفاوت در بخش خواص مواد نرم‌افزار ABAQUS وارد شد. مدل نهایی مونتاژ شده برای دو اسپول در شکل ۲ آورده شده است.

جدول ۱ هدایت حرارتی و گرمای ویژه وابسته به دما آلیاژ Ti-6Al-4V

| دما (°C) | هدایت حرارتی (W/mK) | گرمای ویژه (J/kg.K) |
|----------|---------------------|---------------------|
| ۱۷/۷۷    | ۶/۹۲                | ۳۸۷/۵۵              |
| ۹۳/۳۳    | ۷/۴۴                | ۴۰۶/۹۳              |
| ۲۰۴/۴    | ۸/۶۵                | ۴۲۶/۳۱              |
| ۴۲۶/۶    | ۱۱/۹۳               | ۴۷۴/۷۶              |
| ۵۳۷/۷    | ۱۳/۶۷               | ۵۱۷/۳۹              |
| ۹۵۸/۲۲   | ۱۷/۹                | ۶۹۷/۶               |

جدول ۲ ضریب پواسون، مدول یانگ، چگالی و ضریب انبساط حرارتی وابسته به دما آلیاژ Ti-6Al-4V

| دما (°C) | ضریب پواسون | مدول یانگ (GPa) | چگالی (kg/m <sup>3</sup> ) | ضریب انبساط حرارتی (μm/m°C) |
|----------|-------------|-----------------|----------------------------|-----------------------------|
| ۲۱/۱۱    | ۰/۳۱        | ۱۱۷/۲۱          | ۴۴۳۰                       | ۱۱/۳                        |
| ۲۰۴/۴۴   | ۰/۳۱        | ۱۰۶/۸۶          | ۴۴۳۰                       | ۱۱/۳                        |
| ۴۲۶/۶۶   | ۰/۳۱        | ۹۵/۱۴           | ۴۴۳۰                       | ۱۱/۳                        |
| ۶۴۸/۸۸   | ۰/۳۱        | ۸۲/۷۳           | ۴۴۳۰                       | ۱۱/۳                        |

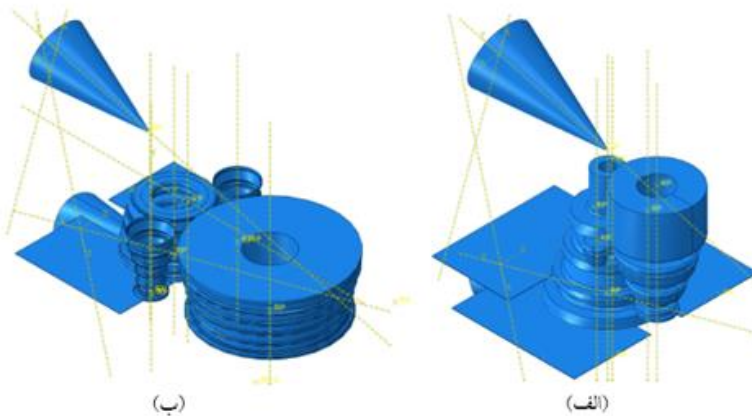
جدول ۳ گرمای ویژه و ضریب انبساط حرارتی وابسته به دما فولاد H13

| دما (°C) | ضریب انبساط حرارتی (μm/m°C) | گرمای ویژه (J/kg.K) |
|----------|-----------------------------|---------------------|
| ۲۱/۱۱    | ۱۱/۷                        | ۳۹۷                 |
| ۹۳/۳۳    | ۱۲/۰۶                       | ۴۰۱                 |
| ۲۰۴/۴    | ۱۲/۲۴                       | ۴۱۸                 |
| ۳۱۵/۵۵   | ۱۲/۴۲                       | ۴۳۱                 |
| ۴۲۶/۶۶   | ۱۲/۹۶                       | ۴۳۹                 |
| ۵۳۷/۷    | ۱۳/۱۴                       | ۴۵۲                 |

جدول ۴ ضریب پواسون، مدول یانگ و چگالی وابسته به دما فولاد H13

| چگالی (kg/m <sup>3</sup> ) | مدول یانگ (GPa) | ضریب پواسون | دما (°C) |
|----------------------------|-----------------|-------------|----------|
| ۷۸۱۰                       | ۲۱۰/۲۹          | ۰/۳         | ۲۱/۱۱    |
| ۷۸۱۰                       | ۱۹۱/۶۷          | ۰/۳         | ۱۴۸/۸۸   |
| ۷۸۱۰                       | ۱۷۹/۹           | ۰/۳         | ۲۶۰      |
| ۷۸۱۰                       | ۱۷۰/۹۱          | ۰/۳         | ۳۴۳/۳۳   |
| ۷۸۱۰                       | ۱۱۳/۷           | ۰/۳         | ۶۴۸/۸۸   |

زمان حل برای اسپول جلو، ۴۰ ثانیه و برای اسپول عقب، ۲۹ ثانیه تعریف می‌گردد. کلیه تنش‌ها (تنش میزز، تنش در راستاهای اصلی و تنش‌های برشی) و نیروهای اعمالی به غلتک‌ها در طول فرآیند به عنوان پارامترهای خروجی مشخص می‌گردد. همچنین در شبیه‌سازی به منظور افزایش سرعت حل، از مقیاس‌دهی جرمی استفاده شده است.



شکل ۲ قطعات مونتاژ شده اسپول‌های موتور هواپیما (الف) اسپول جلو (ب) اسپول عقب

پارامتر میزان مقیاس‌دهی جرمی در نظر گرفته شده جهت حل برای غلتک اصلی اسپول جلو ۱۰۰۰۰ و برای خود اسپول ۵۰۰۰ و برای غلتک اصلی اسپول عقب ۱۰۰۰۰ و برای خود اسپول ۴۰۰۰ در نظر گرفته می‌شود.

در ماژول Interaction کلیه سطوح تماس بین قطعات، مشخصات سطوح تماس و قیود لازم جهت حرکت غلتک‌ها و قطعه‌کار اعمال می‌گردد. یکی از مسائل مهم در این تحقیق نحوه اعمال چرخش به غلتک اصلی بود. توضیح، این‌که قید چرخش که در ماژول load وجود دارد مربوط به گره‌ها می‌باشد و اگر از این قید استفاده گردد غلتک اصلی نمی‌چرخد. بنابراین جهت اعمال چرخش به غلتک اصلی نیاز به یک ابتکار می‌باشد. ابتکاری که در این تحقیق از آن استفاده گردید استفاده از قید Coupling است. به این صورت که یک نقطه به‌عنوان Reference point تعریف می‌گردد و سطح داخلی به‌عنوان Surface انتخاب می‌گردد. سپس حالت Continuum distributing انتخاب می‌گردد. حال قید چرخش زاویه‌ای به این نقطه اعمال می‌شود و در نتیجه غلتک اصلی حول محور خود می‌چرخد. همچنین غلتک اصلی با سرعت زاویه‌ای  $6/2832 \text{ rad/s}$  و مندرل با سرعت خطی  $mm/s$   $0/333$  حرکت می‌کند. بین کلیه سطوح خارجی مندرل و قطعه‌کار و غلتک اصلی نیز قید تماس تعریف می‌گردد. روش حل دینامیکی صریح جابجایی-حرارتی و دمایی قطعه ۹۹۰ درجه سانتی‌گراد، دمایی غلتک اصلی ۵۰ درجه سانتی‌گراد و دمایی مندرل ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، تعریف شدند.

با توجه به این‌که فرآیند نورد حلقوی پوسته‌های موتور هواپیما، یک فرآیند نورد گرم بوده و ابتدا قطعه‌کار گرم می‌شود و سپس فرآیند نورد روی آن انجام می‌پذیرد، تنش‌های حرارتی نیز در این فرآیند وجود داشته و بایستی مدنظر قرار گیرد. بدین منظور المان در نظر گرفته‌شده برای غلتک اصلی و همچنین قطعه‌کار از نوع Coupled Temperature-Displacement در نظر گرفته می‌شود تا هم تنش‌های ناشی از نیرو و هم تنش ناشی از حرارت را در محاسبات در نظر بگیرد. برای مش‌ریزی از مش

C3D8RT استفاده می‌گردد. تعداد گره و المان در نظر گرفته شده جهت حل برای غلتک و قطعه کار در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵ تعداد المان‌ها و گره‌های در نظر گرفته شده برای قطعه کار و غلتک اصلی در شبهه‌سازی فرآیند نورد حلقوی

| اسپول جلو | غلتک اسپول جلو | اسپول عقب | غلتک اسپول عقب |
|-----------|----------------|-----------|----------------|
| ۸۸۶۴۰     | ۸۰۹۹۰          | ۴۷۹۰۵     | ۹۸۳۰۰          |
| ۷۷۵۲۰     | ۷۰۴۲۰          | ۴۲۴۶۰     | ۱۷۹۱۰۰         |

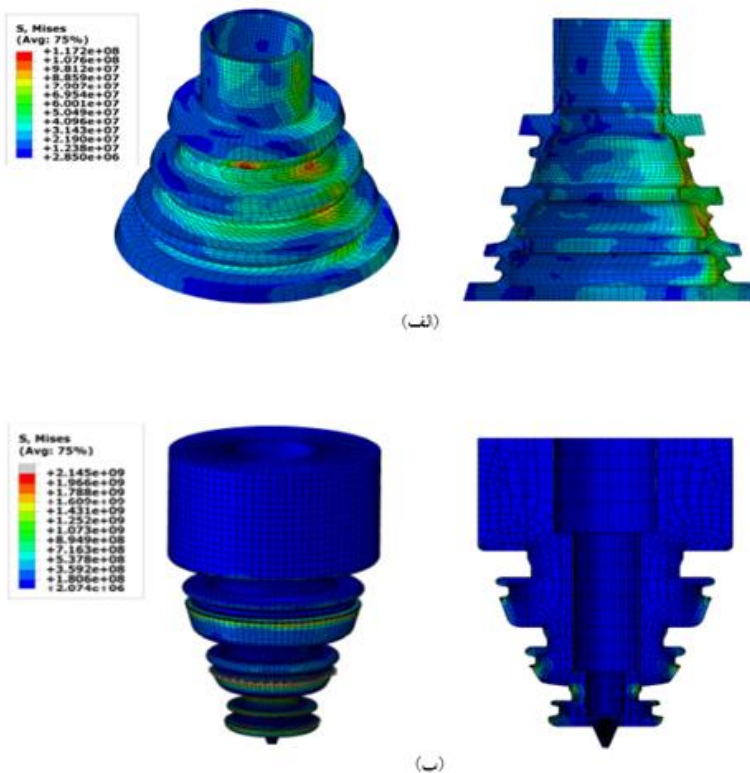
### ۳- نتایج شبهه‌سازی و بحث

همان‌گونه که بیان گردید هدف از این تحقیق بررسی میزان تنش‌های اعمالی به غلتک جهت انتخاب جنس مناسب برای آن می‌باشد در ادامه نتایج حاصل از شبهه‌سازی در مورد تنش‌های غلتک اصلی و همچنین نیروهای اعمالی به غلتک اصلی و مقایسه آن با شبهه‌سازی‌های قبلی که در آن‌ها غلتک اصلی صلب در نظر گرفته شده بود [۲۰] آورده می‌شود.

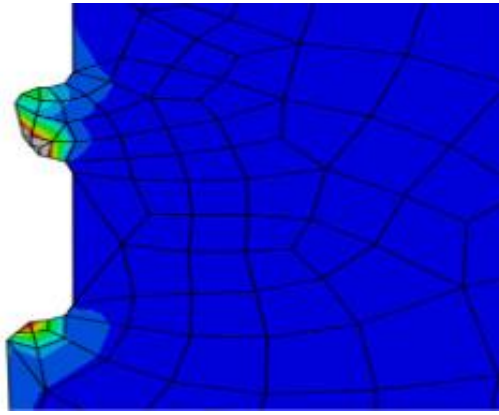
#### ۳-۱- طراحی و آنالیز قطعات انتقال‌دهنده قدرت

در شکل ۳ توزیع تنش فون میزز بر روی اسپول جلو (۳-الف) و غلتک اصلی (۳-ب) نشان داده شده است. مطابق با شکل (۳-الف) ملاحظه می‌گردد که کل پوسته وارد ناحیه تسلیم شده است و این با پیش‌بینی نیز سازگار است.

نکته‌ای که در مورد تنش روی غلتک اصلی باید مدنظر قرار گیرد این است که به دلیل فرم‌دار بودن غلتک و مدل کردن آن با المان، سطح گرد منطقه فرم‌دار، مطابق با شکل ۴ دارای نقاط نوک تیز می‌گردد و این امر باعث ایجاد تمرکز تنش در محاسبات گردیده و در نتیجه تنش در این نقاط بسیار بالا می‌رود که این مسئله صرفاً یک خطای محاسباتی می‌باشد و نمی‌توان به این اعداد اعتماد نمود. بنابراین این المان‌ها را از محاسبات باید خارج نمود.

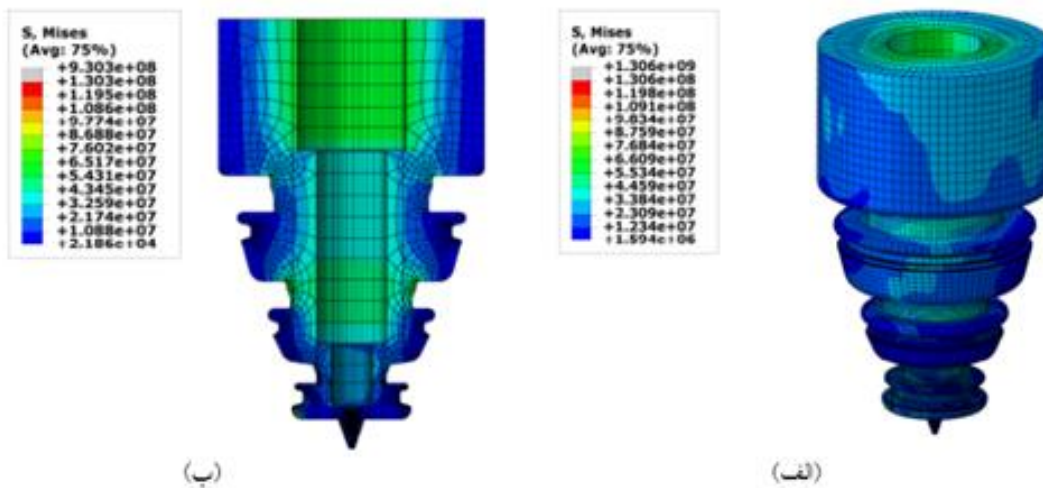


شکل ۳ توزیع تنش فون میزز بر روی (الف) اسپول جلو (ب) غلتک اصلی



شکل ۴ ایجاد نقاط نوک تیز در قسمت‌های فرم‌دار قالب به دلیل المان بندی

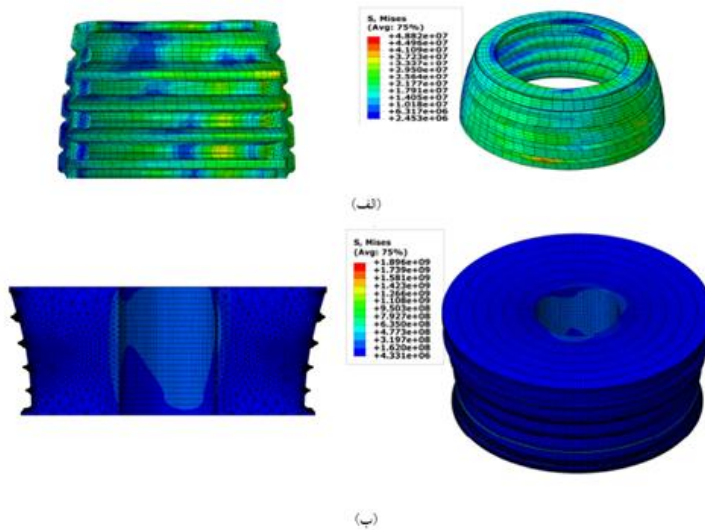
در شکل ۵ توزیع تنش فون میزز بر روی غلتک اصلی با حذف نقاط نوک تیز (۵-الف) و توزیع تنش در بدنه غلتک اصلی (۵-ب) نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌گردد تنش در قسمت‌های فرم‌دار با حذف نقاط نوک تیز حدود ۱۳۰۰ مگاپاسگال می‌گردد که البته این مقدار تنش، باز هم فقط در قسمت‌های فرم‌دار وجود دارد. با توجه به تنش تسلیم فولاد H13 عملیات حرارتی شده که حدود ۱۹۰۰ مگاپاسگال می‌باشد این مقدار تنش توسط قالب قابل تحمل می‌باشد. همچنین مطابق با شکل (۵-ب) توزیع تنش فون میزز در بدنه غلتک اصلی در محدوده ۱۰۰ تا ۲۰۰ مگاپاسگال می‌باشد که این مقدار تنش در مقایسه با تنش تسلیم فولاد H13 ناچیز می‌باشد.



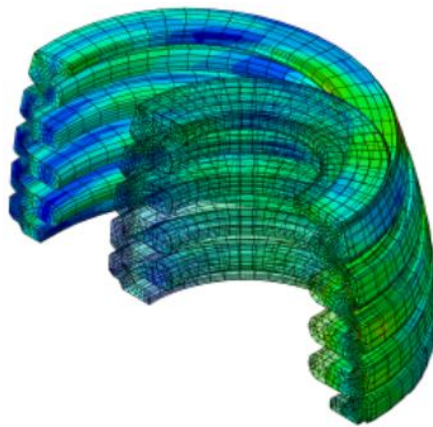
شکل ۵ توزیع تنش فون میزز (الف) بر روی غلتک اصلی با حذف تنش در نقاط نوک تیز (ب) بر روی بدنه غلتک اصلی

### ۲-۳- تنش‌های اعمالی به غلتک اصلی و قطعه کار اسپول عقب

در شکل ۶ توزیع تنش فون میزز بر روی اسپول عقب (۶-الف) و بر روی غلتک اصلی اسپول عقب (۶-ب) نشان داده شده است. مطابق با شکل (۶-الف) ملاحظه می‌گردد که کل پوسته وارد ناحیه تسلیم شده است و این با پیش‌بینی نیز سازگار است. در شکل ۷ قطعه کار در حالت اولیه و حالت فرم‌یافته نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌گردد قطعه کار بدون هیچ عیبی فرم مدنظر را گرفته است.

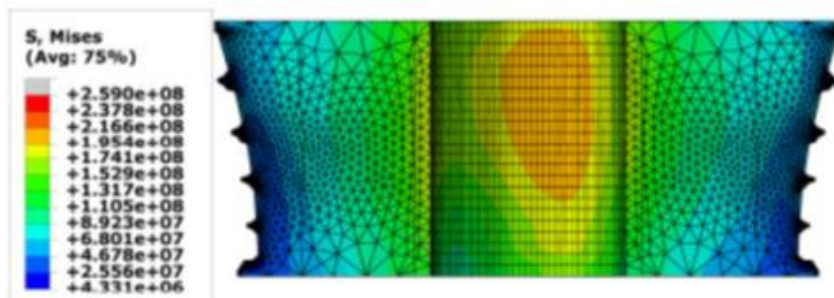


شکل ۶ توزیع تنش فون میزز (الف) بر روی اسپول عقب (ب) بر روی غلتک اصلی



شکل ۷ قطعه کار اسپول عقب در دو حالت پیش و پس از شکل‌دهی

همان‌گونه که در شکل (۶-ب) ملاحظه می‌گردد، در این قالب نیز به دلیل وجود لبه‌های تیز، تنش در این نقاط حدود ۱۹۰۰ مگاپاسکال می‌شود. در این حالت نیز با حذف نقاط نوک تیز تنش در بدنه قالب به صورت شکل ۸ می‌شود.

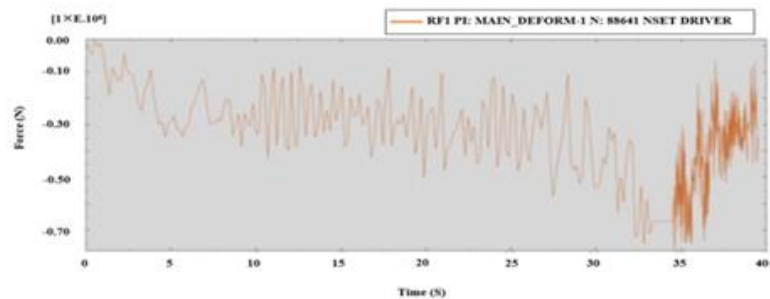


شکل ۸ تنش فون میزز بر روی غلتک اصلی اسپول عقب با حذف تنش نقاط نوک تیز

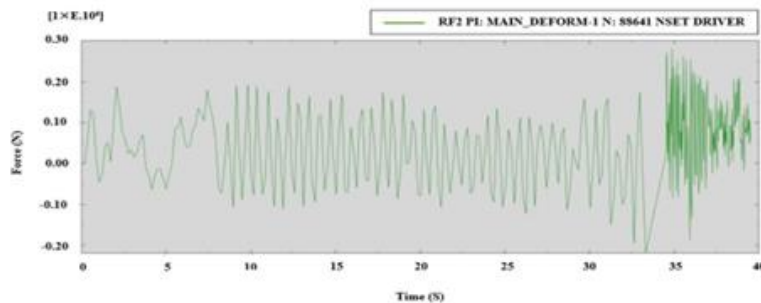
مطابق با شکل ۸ ملاحظه می‌گردد تنش اعمالی بر روی بدنه این غلتک در محدوده ۱۰۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال می‌باشد که تا تنش تسلیم H13 یعنی ۱۹۰۰ مگاپاسکال فاصله بسیار زیادی دارد. لذا می‌توان گفت که بدون هیچ مشکلی می‌توان از این نوع فولاد جهت قالب‌سازی استفاده نمود.

### ۳-۳- نیروهای وارد بر غلتک اصلی اسپول جلو و عقب

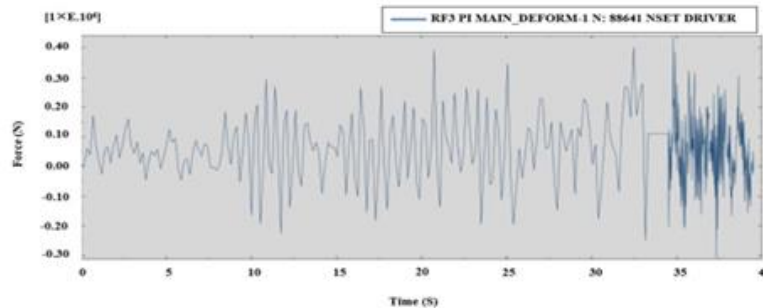
برای به دست آوردن نیروهای وارد بر غلتک اصلی، نمودارهای نیرو-زمان حاصل از شبیه‌سازی فرآیند نورد حلقوی ترسیم شده است. شکل ۹ و ۱۰ به ترتیب نمودارهای نیرو-زمان برای غلتک اصلی اسپول جلو و غلتک اصلی اسپول عقب در سه جهت X، Y و Z را نشان می‌دهند. در این نمودارها نیرو برحسب نیوتن و زمان برحسب ثانیه می‌باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

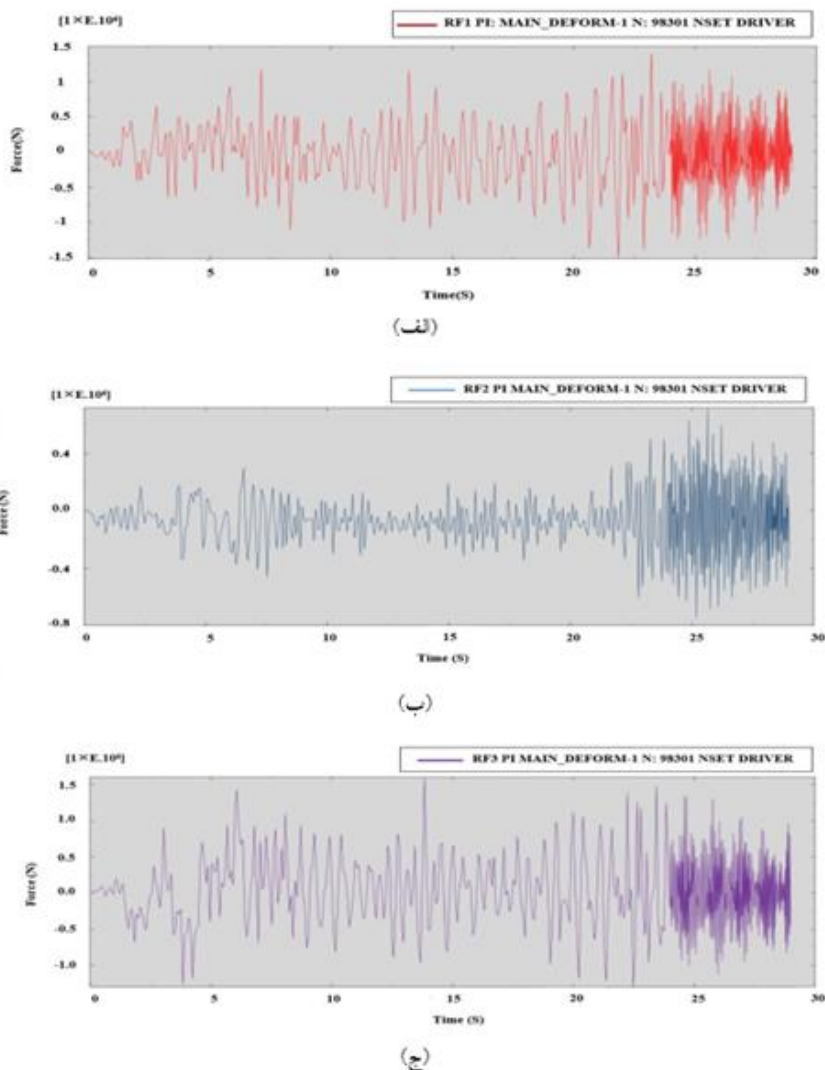
شکل ۹ نیروی واردشده به غلتک اصلی اسپول جلو (الف) در راستای X (ب) در راستای Y (ج) در راستای Z

مطابق با شکل (۹-الف)، نیروی در راستای X وارد بر غلتک اصلی برای اسپول جلو به‌طور متوسط به مقدار بیشینه ۷۵ تن می‌رسد که این نیرو به دلیل اصطکاک بین پوسته و غلتک اصلی می‌باشد که باید در طراحی‌ها در نظر گرفته شود.

همان‌طور که از شکل (۹-ب) مشخص می‌شود، نیرو در راستای Y به‌طور متوسط به بیشینه مقدار ۲۸ تن می‌رسد که این نیرو به دلیل فرم‌دار بودن غلتک و شیب‌دار بودن آن می‌باشد. نیروی در راستای Z، واردشده به غلتک اصلی، نیروی نورد شعاعی می‌باشد که همان‌طور که از شکل (۹-ج) مشخص است، این نیرو به‌طور متوسط به بیشینه مقدار ۴۰ تن می‌رسد.

همچنین مطابق با شکل (۱۰-الف)، نیروی در راستای X، واردشده بر غلتک اصلی، برای اسپول عقب به‌طور متوسط به مقدار بیشینه ۱۰۰ تن می‌رسد. مطابق با شکل (۱۰-ب) نیز، بیشینه نیروی وارد بر غلتک اصلی اسپول عقب در راستای Y به حدود ۴۰ تن می‌رسد و باید طراحی‌ها را بر اساس این عدد انجام داد. نیروی در راستای Z، واردشده به غلتک اصلی، نیز همان‌طور که

گفته شد، نیروی نورد شعاعی می‌باشد و همان‌گونه که در شکل (۱۰-ج) مشخص است، این نیرو برای غلتک اصلی اسپول عقب به‌طور متوسط به بیشینه مقدار ۱۳۰ تن می‌رسد.



شکل ۱۰ نیروی وارد شده به غلتک اصلی اسپول عقب (الف) در راستای X (ب) در راستای Y (ج) در راستای Z

پس از استخراج نیروهای وارد بر غلتک اصلی اسپول جلو و عقب در جهات مختلف با فرض شکل‌پذیر بودن غلتک در این تحقیق، نتایج با نیروهای وارد بر غلتک اصلی با فرض صلب بودن غلتک اصلی اسپول جلو و عقب در فرآیند نورد حلقوی مقایسه گردید. اعداد به‌دست‌آمده برای بیشینه نیروی وارد شده بر غلتک اصلی اسپول جلو در حالت شکل‌پذیر و صلب و همچنین نیروهای وارد شده بر غلتک اصلی اسپول عقب در حالت شکل‌پذیر و صلب به ترتیب در جدول‌های ۶ و ۷ آورده شده است.

جدول ۶ نیروهای وارد شده بر غلتک اصلی اسپول جلو در دو حالت شکل‌پذیر و صلب

| غلتک اصلی اسپول جلو | نیرو در راستای محور X (تن) | نیرو در راستای محور Y (تن) | نیرو در راستای محور Z (تن) |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| شکل‌پذیر            | ۷۵                         | ۲۸                         | ۴۰                         |
| صلب                 | ۵۶                         | ۱۳                         | ۱۵                         |

جدول ۷ نیروهای وارد شده بر غلتک اصلی اسپول عقب در دو حالت شکل‌پذیر و صلب

| غلتک اصلی اسپول عقب | نیرو در راستای محور X (تن) | نیرو در راستای محور Y (تن) | نیرو در راستای محور Z (تن) |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| شکل‌پذیر            | ۱۰۰                        | ۴۰                         | ۱۳۰                        |
| صلب                 | ۷۰                         | ۳۵                         | ۶۸                         |

مطابق با جدول ۶ در مورد اسپول جلو نیروهای به‌دست‌آمده در حالتی که غلتک اصلی شکل‌پذیر در نظر گرفته شده است

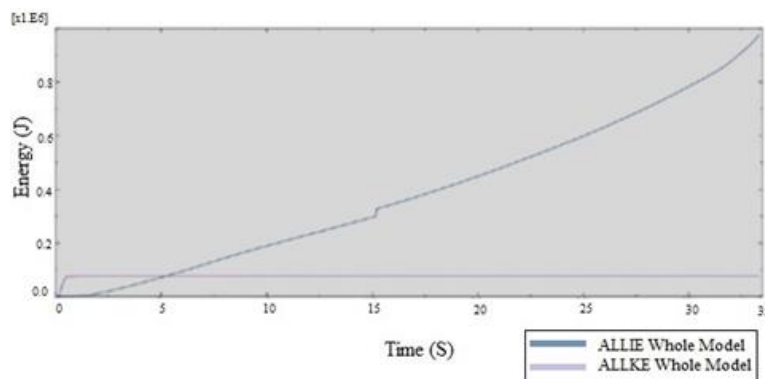
بیشتر از حالت غلتک صلب می‌باشد به این صورت که در حالت غلتک صلب، نیروی وارد شده به غلتک اصلی در راستای X, Y, Z به ترتیب ۱۵ و ۱۳ و ۵۶ تن به دست آمده بود. در حالی که در حالت غلتک اصلی شکل پذیر میزان این نیروها به ترتیب ۴۰ و ۲۸ و ۷۵ تن به دست آمد.

در مورد اسپول عقب نیز مطابق با جدول ۷ نیروهای به دست آمده در حالتی که غلتک اصلی شکل پذیر در نظر گرفته شده است بیشتر از حالت غلتک صلب می‌باشد به این صورت که در حالت غلتک صلب، نیروهای وارد به غلتک در راستای X, Y, Z به ترتیب ۶۸ و ۳۵ و ۷۰ تن به دست آمده بود که در حالت غلتک شکل پذیر این مقادیر به ترتیب ۱۳۰ و ۴۰ و ۱۰۰ تن به دست آمد. از نیروهای به دست آمده جهت طراحی تکیه‌گاه‌های مورد نیاز غلتک‌ها بر روی دستگاه استفاده می‌شود.

### ۳-۴- اعتبارسنجی نتایج

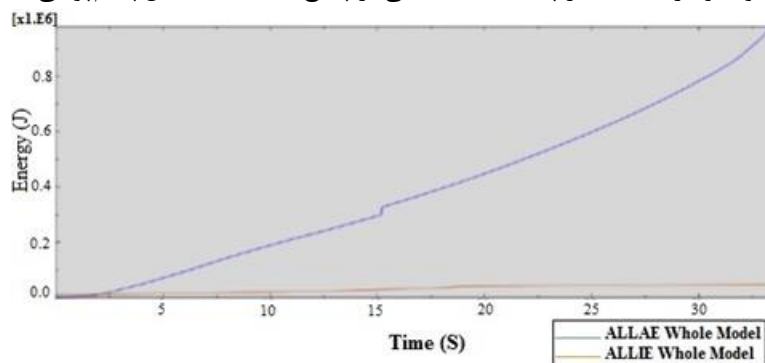
به منظور افزایش سرعت حل فرآیند توسط نرم‌افزار از تکنیک مقیاس‌دهی جرمی استفاده شده است. این تکنیک چگالی سیستم را به طور مجازی افزایش داده و در مواردی که ماده‌ی تحت شکل‌دهی حساس به نرخ کرنش بوده و یا اینکه فرآیند شامل پدیده‌های مکانیکی - حرارتی باشد، یک روش مرجع به منظور افزایش سرعت حل می‌باشد. میزان پارامتر مقیاس‌دهی جرمی باید به گونه‌ای انتخاب شود که منجر به پاسخی نادرست به دلیل تأثیر اینرسی‌های مجازی نگردد. بدین منظور انرژی جنبشی ماده تحت شکل‌دهی نباید از ۵ الی ۱۰ درصد از انرژی داخلی آن در طول فرآیند تجاوز نماید. شکل ۱۱ تاریخچه انرژی داخلی و انرژی جنبشی فرآیند را نشان می‌دهد. واضح است که میزان انرژی جنبشی کمتر از ۱۰ درصد انرژی داخلی بوده و در نتیجه نتایج حاصله با وجود استفاده از تکنیک مقیاس‌دهی جرمی صحیح می‌باشند.

به منظور اطمینان از عدم وجود خطا در پاسخ‌های به دست آمده انرژی مجازی ناشی از پدیده ساعت شنی نیز کنترل می‌گردد. انرژی فوق بایستی کمتر از ۵ الی ۱۰ درصد انرژی داخلی فرآیند باشد.



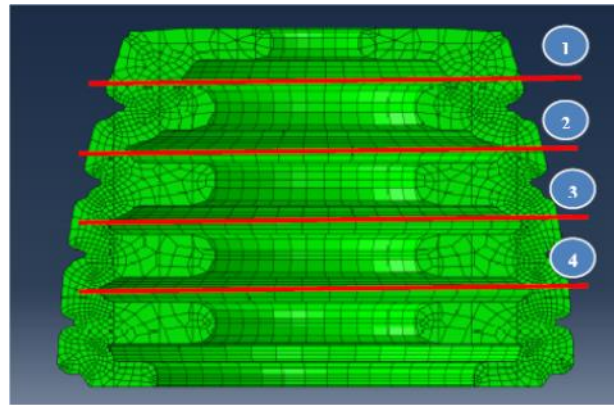
شکل ۱۱ تاریخچه انرژی داخلی و انرژی جنبشی فرآیند

شکل ۱۲ تاریخچه انرژی داخلی و مجازی فرآیند را نشان می‌دهد. واضح است که انرژی مجازی فرآیند کمتر از ۵ الی ۱۰ درصد انرژی داخلی فرآیند بوده و در نتیجه تأثیر پدیده ساعت شنی بر پاسخ‌های حاصله قابل چشم‌پوشی است.

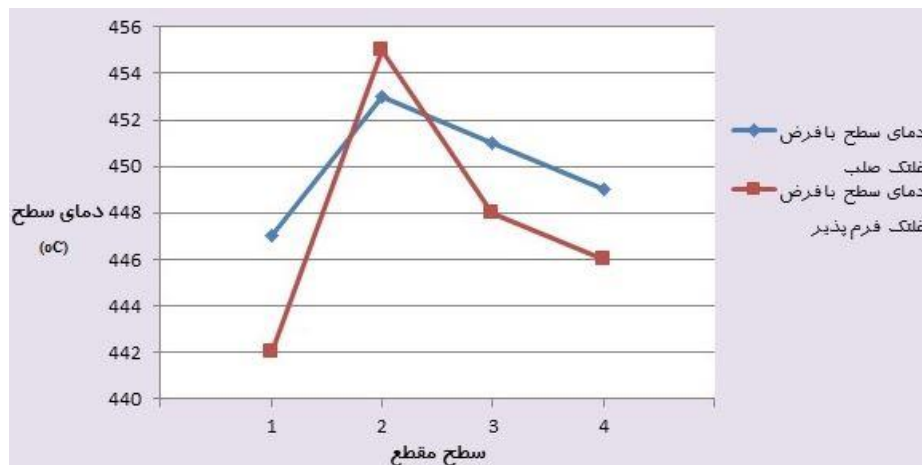


شکل ۱۲ تاریخچه انرژی داخلی و مجازی فرآیند

علاوه بر این به منظور صحت‌گذاری بر نتایج، توزیع دما در ۴ مقطع از قطعه نیز با پژوهشی که با فرض غلتک صلب در نظر گرفته شده بود [۲۰] مقایسه می‌گردد. به منظور مقایسه دمایی، ۴ مقطع مختلف که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، انتخاب می‌گردد و دمای سطح پوسته در یک نقطه خاص از این مقاطع با یکدیگر مقایسه می‌گردد. در نمودار شکل ۱۴ دمای ۴ نقطه در دو حالت غلتک صلب و غلتک فرم‌پذیر آورده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد اختلاف دمایی ناچیز بوده و جواب‌ها مناسب و قابل قبول می‌باشد.



شکل ۱۳ مقاطع انتخاب‌شده جهت مقایسه دما



شکل ۱۴ مقایسه دمایی ۴ مقطع با فرض غلتک صلب و غلتک فرم‌پذیر

نکته حائز اهمیت دیگر، استقلال پاسخ‌ها از اندازه مش می‌باشد. برای این منظور، با نصف کردن اندازه مش‌ها و انجام شبیه‌سازی، ملاحظه گردید که نتایج حاصله تقریباً ثابت می‌باشد و این امر حاکی از مستقل بودن پاسخ‌ها از اندازه مش‌ها (استقلال مش) می‌باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یکی از اهداف اصلی و اساسی بررسی تنش‌های اعمالی به غلتک‌های اصلی اسپول جلو و عقب موتور هواپیما بود که با فرض شکل‌پذیر بودن غلتک اصلی و انجام مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند نورد حلقوی، تنش‌های اعمالی به پوسته‌ها بر اساس انتخاب جنس فولاد H13 به دست آمد. در مورد این تنش‌ها ذکر این نکته لازم است که در هر دو اسپول به دلیل وجود فرم‌های پیچیده بر روی سطح غلتک، و این‌که با امان‌بندی سطح غلتک‌های اصلی، سطوح یکنواخت  $r$  دار به سطوحی با لبه‌های تیز تبدیل می‌گردد و این امر باعث ایجاد تمرکز تنش در این نقاط شده و تنش‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار را غیرقابل‌اعتماد می‌سازد. تنش‌های ایجادشده بر روی سایر قسمت‌های قالب ناچیز بوده و در حدود ۴۰۰ مگاپاسگال می‌باشد. لذا برای اسپول جلو

و عقب می‌توان از فولاد H13 جهت ساخت کلیه قالب‌ها استفاده نمود ولی پیشنهاد می‌گردد که تا حد امکان سطح پوسته سخت‌کاری شده و بعد از ساخت قالب‌ها و استفاده از آن‌ها جهت تولید انبوه پوسته‌ها، مرتباً این سطوح بازبینی گردد.

مسئله دیگری که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت، میزان نیروهای اعمالی به غلتک اصلی بود تا میزان این نیروها با نتایج حاصل از حالتی که کلیه غلتک‌ها صلب در نظر گرفته شده بود مقایسه گردد. در مورد اسپول جلو نیروهای به‌دست‌آمده در حالتی که غلتک اصلی شکل‌پذیر در نظر گرفته شده است بیشتر از حالت غلتک صلب می‌باشد به این صورت که در حالت غلتک اصلی، نیروی وارد شده به غلتک اصلی در راستای X, Y, Z به ترتیب ۱۵ و ۱۳ و ۵۶ تن به‌دست‌آمده بود درحالی‌که در حالت غلتک اصلی شکل‌پذیر، میزان این نیروها به ترتیب ۴۰ و ۲۸ و ۷۵ تن به دست آمد. در مورد اسپول عقب نیز نیروهای به‌دست‌آمده در حالتی که غلتک اصلی شکل‌پذیر در نظر گرفته شده است بیشتر از حالت غلتک صلب می‌باشد به این صورت که در حالت غلتک صلب، نیروهای وارد به غلتک اصلی در راستای X, Y, Z به ترتیب ۶۸ و ۳۵ و ۷۰ تن به‌دست‌آمده بود که در حالت غلتک شکل‌پذیر این مقادیر به ترتیب ۱۳۰ و ۴۰ و ۱۰۰ تن به دست آمد.

با توجه به این نتایج باید در طراحی سیستم هیدرولیکی و همچنین انتخاب موتور، نیروهای به‌دست‌آمده را مدنظر قرار داد. البته با توجه به این‌که در شبیه‌سازی‌ها همیشه مقداری خطا نیز وجود دارد و همچنین ممکن است با ریز نمودن مش و همچنین المان‌بندی سایر غلتک‌ها، مقدار نیروها تغییر کند. بنابراین پیشنهاد می‌گردد که طراحی سیستم بر اساس یک ضریب ایمنی مطمئن صورت پذیرد.

## Authorship Contribution Statement

Dr. Mojtaba Esmailian



**Biography:** Mojtaba Esmailian received his PhD in Manufacturing Engineering from Birjand University, in 2021. He has 15 years of research experience in advanced manufacturing and also more than 10 years of teaching experience in universities in this field. His current research interests are Finite Element Analysis, Material Forming, Nontraditional machining And Advanced Manufacturing.

**Contribution Statement:** Project administration, Software, Investigation

Farzad Boroumand



**Biography:** Farzad Boroumand received his PhD in Mechanical Engineering from Birjand University, in 2021. He does research in Manufacturing Engineering

**Contribution Statement:** Conceptualization, Resources, Writing – Review & editing.

Mehdi Dehghan



**Biography:** Mehdi Dehghan received his PhD in Mechanical Engineering from Yasouj University, in 2020. His current research interests are Finite Element Analysis, Structural Analysis, Structural Stability and Computational Mechanics

**Contribution Statement:** Resources, Software, Writing –Review & editing.

## ۵- مراجع

- [1] Szabo Z, Dittrich E. Manufacturing systems for the production of seamless-rolled rings. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996;60:67-72.
- [2] Parvizi A, Abrinia K. A two dimensional upper bound analysis of the ring rolling process with experimental and FEM verifications. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2014;79:176-81.
- [3] Wang X, Hua L, Han X, Wang X, Wang D, Liu Y. Numerical simulation and experimental study on geometry variations and process control method of vertical hot ring rolling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;73:389-98.
- [4] Xu J, Sun B. Analysis on Stress Field of Asymmetrical Cold Ring Rolling for High-speed Rail Bearing Inner Ring. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*: IOP Publishing; 2018. p. 012018.
- [5] Esmailian M. Optimization of the nosing process of metal pipe using genetic algorithm. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2022;2:188-201. (In Persian)
- [6] Meng W, Zhao G-q. Effects of key simulation parameters on conical ring rolling process. *Procedia Engineering*. 2014;81:286-91.
- [7] Lv N, Liu D, Hu Y, Yang Y, Wang J. Multi-objective optimization of parametric design for profile ring rolling process based on residual stress control. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;119:6613-31.
- [8] Negahban Boron A, Maracy A, Livani M, Nikouei S. Prediction of work-rolls failure in hot ring rolling process. *Scientia Iranica*. 2022;29:461-77.

- [9] Pressas IS, Papaefthymiou S, Manolakos DE. Evaluation of the roll elastic deformation and thermal expansion effects on the dimensional precision of flat ring rolling products: A numerical investigation. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2022;117:102499.
- [10] Teja P, Kumar M, Krishna R, Sreenivasan M. Simulation and optimization studies on the ring rolling process using steel and aluminum alloys. 2019.
- [11] Giorleo L, Ceretti E, Giardini C. Speed Idle Roll law optimization in a Ring Rolling process. *Key Engineering Materials*. 2015;651:248-53.
- [12] Han X, Hua L, Yang S. A novel polygonal ring rolling method. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020;59:389-402.
- [13] Chavoshi M, Amoochi A, Bayat Kazazi M, Najafizadeh MM. Numerical optimization of the blank shape in order to minimize the earring defect in the deep drawing process of square sections. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2023;3:67-82. (In Persian)
- [14] Gheisari AH, Forouzan M, Merasi A. Investigating the effect of friction coefficient on the amount of fishtail defect in the hot ring rolling process. *Solid Mechanics Engineering*. 1388;2:29-35. (In Persian)
- [15] Wu Q, Wu J, Zhang Y-D, Gao H-J, Hui D. Analysis and homogenization of residual stress in aerospace ring rolling process of 2219 aluminum alloy using thermal stress relief method. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019;157:111-8.
- [16] Li L, Yang H, Guo L, Sun Z. A control method of guide rolls in 3D-FE simulation of ring rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;205:99-110.
- [17] Hua L, Zuo Z, Lan J, Qian D. Control method design for feed rate of idle roller in cold ring rolling. *Zhongguo Jixie Gongcheng(China Mechanical Engineering)*. 2006;17:953-7.
- [18] Sun ZC, Yang H, Li LY. Determining and Optimizing of Guide Rolls Motion Track in Cold Ring Rolling Process. *Materials Science Forum: Trans Tech Publ*; 2006. p. 141-4.
- [19] Esmailian M. Numerical simulation of ring rolling process of jet engine shell. 20th international conference of iranian aerospace. 2022. (In Persian)
- [20] Gheisari AH. FE Analysis of Forming Process of Jet airplane s Compressor s Disks in Order to Design Ring Rolling Forming Stages. *Isfahan University of Technology*. 2010. (In Persian)