



## Estimation of Necessary Force for Isothermal Forging of Disc Piece of Aluminum Alloy 7075 by Slip Line Field Method

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Kiani P.<sup>1\*</sup>  
Ghoreishi M,<sup>1</sup>  
Jalali A,<sup>1</sup>

#### How to cite this article

Kiani P, Ghoreishi M, Jalali A. Estimation of Necessary Force for Isothermal Forging of Disc Piece of Aluminum Alloy 7075 by Slip Line Field Method. Modares Mechanical Engineering, 2022;22(12):737-745.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, P.O.B. 1651765117  
p.kiani.2014.pk@gmail.com

#### Article History

Received: May 17, 2022  
Accepted: August 15, 2022  
ePublished: December 13, 2022

### ABSTRACT

In this Study, the necessary force of the isothermal forging process of disc piece of aluminum alloy AA7075 was analyzed and calculated by theoretical methods and finite elements method. In the simulation of the isothermal forging process in Deform software, were selected the temperature of 400 °C, the speed of top mold of 0.1 mm/s and the shear friction coefficient of 0.075 as process parameters. The necessary force of isothermal forging was obtained 80 tons in 6.18 mm Motion Course for disc piece by analyzing the simulation results of finite element method in DEFORM software. The axisymmetric slip line field method was used to estimate the forming force of the isothermal forging of the closed die before of the flash filling, which obtained 23.54 tons. The comparison forming force of isothermal forging of disc piece by theory method with the results obtained from finite element simulation showed that the forming force corresponds very well with the force-displacement diagram is compatible. The geometry of billet, the final top and bottom dies and assembly drawing of isothermal forging process of disc piece of aluminum 7075 dies were calculated by assuming a constant volume in plastic deformation.

**Keywords** Isothermal Forging, Slip line field method, disc piece of Aluminum Alloy 7075, Finite Element

### CITATION LINKS

1- Handbook AM. Forming and Forging, v. 14. 2- Preform design for closed die forgings: experimental basis for computer aided design. 3- Comparative study of forging parameters on microstructures and properties between Aluminum alloys Al6063 and AA7075. 4- EVALUATION OF FORGING PARAMETERS ON AL-7075 AIRCRAFT DOOR BRACKET BY SIMULATION. 5- Effects of friction laws on metal forming processes. 6- Analysis of isothermal forging process and mechanical properties of complex aluminum forging for aviation. 7- Application of the slip-line field method to the analysis of die cavity filling. 8- Slip line model for forces estimation in the radial-axial ring rolling process. 9- Properties and Selection: Nonferrous alloys and Special-Purpose Materials 10- Research into water-based colloidal-graphite lubricants for forging of carbon steels and Ni-based alloys. 11- Characterisation of different lubricants concerning the friction coefficient in forging of AA26. 12- Metal forming: mechanics and metallurgy. 13- A general numerical method of construction of axisymmetric slip-line fields.

## برآورد نیروی لازم برای فورجینگ هم‌دما قطعه دیسکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به روش میدان خطوط لغزش

پژمان کیانی<sup>۱\*</sup>، مجید قریشی<sup>۱</sup>، عبدالحسین جلالی آقچای<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### چکیده

در این پژوهش به کمک روش تئوری و روش اجزاء محدود به تحلیل و محاسبه نیروی لازم برای فورج هم‌دما قطعه دیسکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ پرداخته شد. در شبیه‌سازی فرآیند فورج هم‌دما در نرم‌افزار دیفرم، دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس، سرعت کفه بالای قالب ۰/۱ میلی‌متر بر ثانیه و ضریب اصطکاک برشی برابر ۰/۰۷۵ به عنوان پارامترهای فرآیند انتخاب گردید. با تحلیل نتایج شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود به کمک نرم‌افزار دیفرم، نیروی لازم شکل‌دهی فورج هم‌دما با کورس حرکتی ۶/۱۸ میلی‌متر برابر با ۸۰ تن برای قطعه دیسکی به دست آمد. از روش میدان خطوط لغزش متقارن محوری برای برآورد نیروی شکل‌دهی فورج هم‌دما قطعه دیسکی پیش از پرس شدن قالب استفاده گردید که نیروی ۲۳/۵۴ تن بدست آمد. مقایسه نیروی شکل‌دهی فورج هم‌دما قطعه دیسکی به روش تئوری، با نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود، نشان داد که نیروی شکل‌دهی با دقت بسیار خوبی با نمودار نیرو - جابه‌جایی منطبق می‌باشد. با فرض حجم ثابت در تغییر شکل پلاستیک، نقشه ماده خام، قالب‌های نهایی بالا و پایین و نقشه مونتاژی فرآیند فورج هم‌دما قطعه دیسکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ ارائه گردید.

**کلیدواژه‌ها:** فورج هم‌دما، روش میدان خطوط لغزش، قطعه دیسکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، اجزاء محدود

تاریخ دریافت: \*\*\*/\*\*/\*\*

تاریخ پذیرش: \*\*\*/\*\*/\*\*

\*نویسنده مسئول: p.kiani.2014.pk@gmail.com

### ۱- مقدمه

آلیاژهای آلومینیوم قابلیت فورج و تبدیل به قطعات مختلف را با بهره‌گیری از انواع روش‌های فورج دارند. فشار لازم فورج بستگی به ترکیب شیمیایی آلیاژ، نوع فرآیند فورج، نرخ کرنش، شرایط اصطکاک و دمای قالب و قطعه دارد. برای آلیاژهای آلومینیوم با استحکام کم تا متوسط نظیر آلیاژهای ۱۱۰۰ و ۶۰۶۱ تنش‌های جریان کمتر از این میزان برای فولادهای کربنی است. این درحالی است که برای آلیاژهای آلومینیوم با استحکام بالا نظیر آلیاژهای سری ۷۰۰۰ (۷۰۷۵، ۷۰۱۰، ۷۰۴۹، ۷۰۵۰) تنش‌های جریان و در نتیجه آن فشار لازم فورج بیشتر از مقادیر فولادهای کربنی می‌باشند. فورج آلیاژهای آلومینیوم به مراتب مشکل‌تر از فورج فولادهای کربنی و بسیاری از فولادهای آلیاژی است<sup>[1]</sup>. آهنگری قالب بسته به لحاظ مکانیک تغییر شکل، یک فرآیند بسیار پیچیده است. ماهیت غیر پایدار فرآیند، جریان غیر یکنواخت مواد، وجود اصطکاک قابل ملاحظه بین ماده و قالب، استفاده از روانکار، انتقال حرارت بین ماده تحت تغییر شکل و قالب و کار سختی در حال

تغییر شکل از جمله علت‌ها برای فقدان یک روش تحلیل جامع و دقیق برای این فرآیند می‌باشد<sup>[2]</sup>. سופا (Sopha) و همکاران با انجام فرآیند فورج ایزوترمال دریافتند که با افزایش دما، سختی آلومینیوم افزایش می‌یابد و میانگین بیشترین سختی نمونه در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس برابر با ۱۱۱/۵۲۳ برینل می‌باشد. سופا و همکاران همچنین دریافتند نیروی لازم شکل‌دهی با افزایش دما کاهش می‌یابد<sup>[3]</sup>. براتی و همکاران به منظور دستیابی به پارامترهای بهینه فورج، سرعت را به عنوان فاکتور اصلی در شکل‌دهی در نظر گرفتند. آنها با استفاده از نرم افزار سه بعدی دیفرم (DEFORM\_3D) و شبیه‌سازی فیزیکی با بررسی نرخ کرنش موثر، کرنش موثر و دما، سرعت لازم شکل‌دهی را بدست آورده و نیروی لازم شکل‌دهی را در سرعت بهینه فورج محاسبه نمودند. نتایج حاکی از این بود که با افزایش سرعت، مقادیر نرخ کرنش موثر، تنش موثر و نیروی لازم شکل‌دهی افزایش می‌یابند<sup>[4]</sup>. جون (Joun) و همکاران اثر استفاده از دو قانون اصطکاک را بر جریان ماده در فورج گرم دیسک بررسی کردند. آنان دریافتند که که قانون اصطکاک کلمب، نیروی لازم را ۳۰٪ بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده از قانون اصطکاک ثابت برشی نشان می‌دهد<sup>[5]</sup>. هو و همکاران اثر فورج هم‌دما و فورج معمولی را بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ با یکدیگر مقایسه کردند. آنان نشان دادند که در فرآیند غیر هم‌دما با توجه به اثر سردی قالب، بازیابی دینامیکی به آرامی در حین تغییر شکل رخ می‌دهد. همچنین نشان دادند که در فورج هم‌دما، میدان دما و تنش در فرآیند فورج یکنواخت‌تر شده و به دنبال آن جریان ماده بهتر می‌شود. مشاهده گردید که استحکام کششی در فورج هم‌دما در راستای طولی ۱۵٪ بیشتر از استحکام آن در حالت غیر هم‌دما بوده و چقرمگی شکست (Fracture Toughness) در فورج هم‌دما ۴۶٪ بیشتر از فورج غیر هم‌دما است. همچنین استحکام کششی در سه جهت تقریباً یکسان است که نشان می‌دهد ساختار همگن‌تر می‌باشد. بنابراین آنان نتیجه گرفتند که فورج هم‌دما علاوه بر این که کارایی را بهبود می‌بخشد، خصوصیات مکانیکی را نیز یکنواخت‌تر می‌کند<sup>[6]</sup>. سامولیک و پاتر (Samolyk & Pater) در سال ۲۰۰۴ به کمک روش خطوط لغزش به طراحی فلاش و محاسبه نیروی لازم جهت فورج قطعه و اطمینان از پرشدگی قالب پرداختند. همچنین آنها نتایج به دست آمده از روش تئوری را با نتایج شبیه‌سازی به روش المان محدود مورد بررسی قرار دادند<sup>[7]</sup>. کوگلیاتو (Quagliato) و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی تخمین نیروی محوری و شعاعی جهت انجام فرآیند نورد یک قطعه رینگ به کمک روش میدان خطوط لغزش پرداختند. نتایج نشان داد که میانگین تغییرات مقدار نیروی شعاعی و محوری به کمک روش میدان خطوط لغزش در مقایسه با نتایج تجربی به ترتیب ۱/۸۶٪ و ۴/۵۵٪ و با بهره از روش المان محدود ۶/۸۶٪ و ۰/۸۸٪ می‌باشد<sup>[8]</sup>.



شکل ۱) نمونه آزمون کشش برای ارزیابی خواص مکانیکی

جهت انجام آنالیز سختی نمونه به طور دلخواه ۵ نقطه از سطح نمونه جهت انجام آزمون سختی انتخاب گردید، که میزان سختی نمونه به طور میانگین برابر ۱۴۵ برینل اندازه‌گیری شد. نمونه‌های آزمون فشار طبق استاندارد ASTM-E209 با بهره‌گیری از دستگاه وایرکات و ماشین‌کاری از گرده اولیه تهیه شدند که در شکل ۲ گرده اولیه و نمونه‌های برش خورده نشان داده شده است. نمونه‌های اولیه آزمون فشار توسط دستگاه ۱۰۰ تن گوتک (Gotech) به همراه کوره در دما و نرخ کرنش‌های مختلف آزمایش شدند.



شکل ۲) گرده اولیه و نمونه‌های برش خورده با وایرکات

## ۲-۲- روند آزمایش

### ۲-۲-۱- تعیین خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵

جهت دستیابی به منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی برای آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، آزمون‌های فشار گرم در دماهای مختلف (۳۸۰، ۴۱۰ و ۴۴۰ درجه سلسیوس) و نرخ کرنش‌های متفاوت (۰/۰۸، ۰/۰۰۸ و ۰/۰۰۰۸ بر ثانیه) با توجه به تجهیزات و امکانات موجود، مطابق جدول ۳ انجام شد.

برای نمونه در شکل ۳، نمودار تنش - کرنش آزمایش فشار در نرخ کرنش ۰/۰۰۰۸ و در دماهای مختلف نشان داده شده است.

اگرچه کارهای ارزشمندی تاکنون در این زمینه انجام شده است ولی تاکنون به محاسبه نیرو به روش خطوط میدان لغزش متقارن محوری و مقایسه آن با روش اجزا محدود به کمک نرم‌افزار دیفرم، جهت فورج هم‌دما قطعه دیسکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ پرداخته نشده است. در این پژوهش از روش میدان خطوط لغزش متقارن محوری برای برآورد نیروی شکل‌دهی فورج هم‌دما قطعه دیسکی پیش از پر شدن قالب استفاده گردید و در شبیه‌سازی فرآیند فورج هم‌دما به کمک نرم‌افزار دیفرم، دمای انجام فرآیند، سرعت کفه بالای قالب و ضریب اصطکاک به عنوان پارامترهای فرآیند انتخاب گردید. خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ از انجام فرآیند فورج قالب باز در دما و نرخ کرنش‌های مختلف و انجام آزمون کشش استخراج شد. هدف اصلی از انجام این پژوهش مقایسه نیروی فورج هم‌دما به دست آمده از روش تئوری و المان محدود و ارائه هندسه مناسب ماده خام و قالب‌ها جهت فورج هم‌دمای قطعه دیسکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ می‌باشد.

## ۲- کارهای تجربی

### ۲-۱- مواد و تجهیزات

آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ یکی از پرکاربردترین آلیاژهای کارشده‌ی آلومینیوم است که علاوه بر سبکی، مقاومت به خوردگی خوب و رسانایی الکتریکی بالا که مشخصه‌ی عمومی آلیاژهای آلومینیوم است، از استحکام بالایی نیز برخوردار است. این مجموعه خواص، سبب شده تا گستره‌ی کاربردی آلیاژ آلومینیوم بسیار وسیع باشد<sup>[۹]</sup>. در این پژوهش از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ اروپایی برای ساخت قطعه مورد نظر استفاده شد که ترکیب شیمیایی آلیاژ در جدول ۱ نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ مصرفی، طبق استاندارد ASTM B221 استخراج گردید که ترکیب شیمیایی به دست آمده با نمونه استاندارد آن مطابقت کامل دارد. شکل ۱ تصویر نمونه آزمون کشش جهت ارزیابی خواص مکانیکی و محاسبه استحکام برشی نمونه در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس و نرخ کرنش ۰/۱ مطابق استاندارد ASTM-E209 نشان داده شده است.

مطابق جدول ۲ خواص مکانیکی نمونه آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ از آزمون کشش استخراج شد.

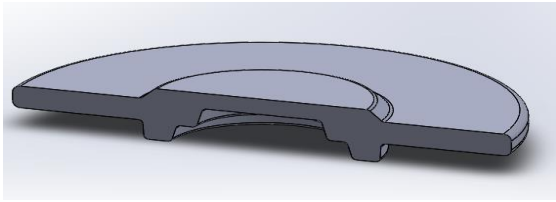
جدول ۱) ترکیب شیمیایی آلیاژ ۷۰۷۵ مورد استفاده

عنصر	مس	منیزیم	منگنز	سیلیسیم	روی	آهن
درصد وزنی	۱/۴	۲/۴۲	۰/۰۷	۰/۱۵	۵/۴۸	۰/۲۸
عنصر	کروم	تیتانیوم	وانادیوم	زیرکونیوم	سایر	آلومینیوم
درصد وزنی	۰/۱۹	۰/۰۷۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۶	پایه

جدول ۲) نتایج آزمون کشش آلیاژ ۷۰۷۵ مورد استفاده

نام آلیاژ	تنش تسلیم (مگا پاسکال)	تنش کششی (مگا پاسکال)	درصد ازدیاد طول
آلومینیوم ۷۰۷۵	۴۰۰	۴۶۵/۳	۹/۷

نرم افزار سالیدورکس، بهترین منحنی سه بعدی از نقاط وارد شده عبور داده شد.



شکل ۴) مدل سه بعدی پیش‌فرم قطعه دیسکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵

برای هم حجم کردن ماده خام با پیش‌فرم ابتدا حجم پیش‌فرم از سالیدورکس استخراج شد. سپس حجم ماده خام با اختلاف حجم مناسب به جهت ایجاد فلش در محیط سالیدورکس محاسبه و طراحی شد. ماده خام اولیه با در نظر گرفتن نحوه پرشدن قالب به صورت گرده‌ای اکستروژده شده از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ به قطر ۳۶/۸ میلی‌متر و ارتفاع ۶/۸ میلی‌متر محاسبه گردید.

### ۳-۲- روش اجزاء محدود فورج هم‌دما

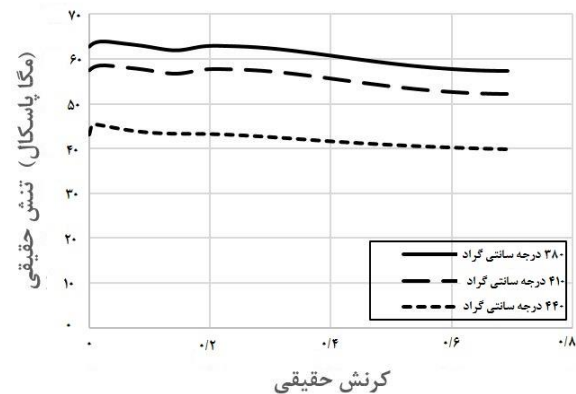
برای مدل‌سازی قطعات در نرم‌افزار دیفرم، ابتدا مدل دو بعدی استخراج شده از مدل سه بعدی مربوط به ماده خام، قالب بالایی و قالب پایینی در نرم‌افزار سالیدورکس با پسوند (Dxf) ذخیره شد. از آنجایی که مسئله دارای تقارن محوری است، قطعات به صورت متقارن محور تعریف شده و برای قطعه، نوع شکل‌پذیر و برای قالب‌ها، نوع صلب انتخاب گردید. خواص الاستیک و پلاستیک با توجه به نتایج آزمون‌های فشار و همچنین چگالی ماده قطعه کار به نرم‌افزار داده شد. چگالی آلومینیوم ۷۰۷۵ در دماهای مختلف از مراجع استخراج شد. از آنجایی که فرآیند فورج در شرایط هم‌دما انجام می‌پذیرد، بدین جهت خواص ماده با توجه به نتایج آزمون‌های فشار و کشش در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس استخراج گردید. همچنین از آنجایی که قالب صلب در نظر گرفته شده است، فقط سطحی از قالب که با قطعه در تماس است در شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته شد. کورس حرکتی قالب بالا تا پایان فرآیند شکل‌دهی ۶/۱۸ میلی‌متر می‌باشد. جدول ۴ مشخصات فرآیند فورج هم‌دما در نرم‌افزار دیفرم را نشان می‌دهد.

جدول ۴) شرایط هندسی و فرآیندی فورج هم‌دما در نرم‌افزار دیفرم

نوع فرآیند	دمای فرآیند (سلسیوس)	سرعت رم پایینی قالب (میلی‌متر بر ثانیه)	ضریب اصطکاک	جنس ماده خام
فرج هم دما	۴۰۰	۰	۰/۰۷۵	آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵
کورس حرکتی قالب (میلی‌متر)	شرایط دمایی	سرعت رم بالایی قالب (میلی‌متر بر ثانیه)	ضریب انتقال حرارت	۶/۱۸
دما	دما ثابت	۰/۱	۵	

جدول ۳) شرایط هندسی و فرآیندی آزمون‌های تجربی انجام شده

نمونه	قطر نمونه (میلی‌متر)	طول نمونه (میلی‌متر)	دما (سلسیوس)	نرخ کرنش (یک بر ثانیه)	سرعت فرآیند (میلی‌متر بر دقیقه)
۱	۱۲/۷۶	۱۸/۱	۴۱۰	۰/۰۰۸	۸/۶۸۸
۲	۱۲/۷۶	۱۸/۱	۴۱۰	۰/۰۸	۸۶/۸۸
۳	۱۲/۷	۱۷/۹	۴۱۰	۰/۰۰۰۸	۰/۸۵۹۲
۴	۱۲/۷۴	۱۸	۳۸۰	۰/۰۰۸	۸/۶۴
۵	۱۲/۷	۱۸/۱	۳۸۰	۰/۰۸	۸۶/۸۸
۶	۱۲/۷۵	۱۸/۰۵	۳۸۰	۰/۰۰۰۸	۰/۸۶۶۴
۷	۱۲/۷۴	۱۶/۹	۴۴۰	۰/۰۰۸	۸/۱۱۲
۸	۱۲/۷۵	۱۸	۴۴۰	۰/۰۸	۸۶/۴
۹	۱۲/۷۳	۱۸/۰۵	۴۴۰	۰/۰۰۰۸	۰/۸۶۶۴
۱۰	۱۲/۷۹	۱۷/۹۴	۳۸۰	۰/۰۰۸	۸/۶۱۱۲
۱۱	۱۲/۷۵	۱۷/۹۰	۳۸۰	۰/۰۸	۸۵/۹۲



شکل ۳) نمودارهای تنش - کرنش در نرخ کرنش ۰/۰۰۰۸

### ۳-۲- روش تحقیق

#### ۳-۱- محاسبه ماده خام جهت فورج

با به‌کارگیری محاسبات مناسب ماده خام، از استفاده بیش از مقدار مورد نیاز مواد اولیه جلوگیری شده و عمر قالب افزایش می‌یابد. به طوری که به لحاظ اقتصادی صرفه جویی بیشتری در هزینه‌های فورج خواهد داشت. انتخاب مناسب ماده خام، توزیع مواد مناسبی را در طول شعاع قطعات مدور ایجاد می‌نماید. بدین جهت ماده خام دارای هندسه‌ی استوانه‌ای بوده که شعاع و ارتفاع آن متناسب با هندسه پیش‌فرم محاسبه می‌شود. شعاع لبه‌ها و گوشه‌های ماده خام و ابعاد هندسی آن و همچنین رعایت حجم مناسبی از مواد در محاسبات پیش‌فرم حائز اهمیت است.

ماده خام با توجه به هندسه قالب‌ها (متناسب به نحوه پرشدن قالب) و فرض ثابت ماندن حجم در تغییر شکل پلاستیک به کمک نرم‌افزار سالیدورکس محاسبه شد. سپس پیش‌فرم فورج در نرم‌افزار سالیدورکس مدل‌سازی شد و قالب‌های بالایی و پایینی متناظر با آن طراحی گردید. شکل ۴ مدل سه بعدی پیش‌فرم قطعه دیسکی در محیط سالیدورکس را نشان می‌دهد. با ابزارهای موجود در

بیشتری بین قطعه کار و قالب ایجاد می شود به همین جهت بیشینه نیرو در انتهای فرآیند اعمال می گردد. این مسأله از یک طرف سهم اصطکاک را در مقاومت در برابر تغییر فرم افزایش می دهد و از طرف دیگر تماس بین قطعه کار و حفره قالب موجب ممانعت از تغییر فرم آزاد می شود. از این رو برای تعیین نیروی مورد نیاز، شرایط انتهایی فرآیند پیش از پرسدن قالب (قبل از ورود ماده به کانال پلیسه) مورد بررسی گرفته شد.

### ۳-۳-۱- روابط پایه میدان خطوط لغزش متقارن محوری

روش کلاسیک میدان خطوط لغزش برای مسائل کرنش صفحه ای توسعه داده شده است. در این پروژه از روش میدان خطوط لغزش متقارن محوری که در مرجع [13] معرفی گردیده، استفاده شده است. روابط تنش ها مطابق روابط ذیل می باشند.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -p + k \sin 2\theta \\ \sigma_z &= -p - k \sin 2\theta \\ \sigma_\theta &= -p - k \\ \tau_{rz} &= k \cos 2\theta \end{aligned} \quad (1)$$

با جایگذاری روابط فوق در معادلات تعادل استاتیکی، روابط زیر حاصل گردید.

$$(1/k)(p_2 - p_1) + 2(\theta_2 - \theta_1) = -\frac{2(r_2 - r_1 + z_2 - z_1)}{(r_2 + r_1)} \quad (2)$$

$$(1/k)(p_2 - p_1) - 2(\theta_2 - \theta_1) = -\frac{2(r_2 - r_1 + z_2 + z_1)}{(r_2 + r_1)} \quad (3)$$

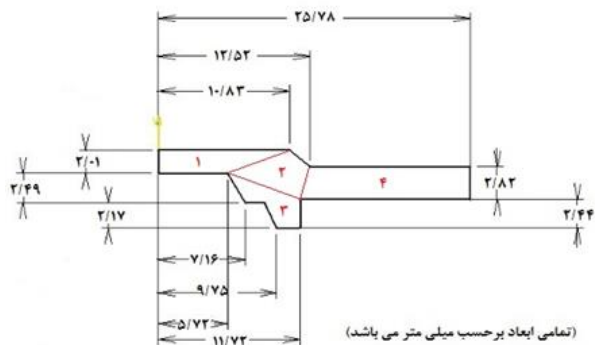
رابطه (۲) روی خط لغزش آلفا و رابطه (۳) روی خط لغزش بتا قرار دارند.

### ۳-۳-۲- ترسیم خطوط میدان لغزش

در روش میدان خطوط لغزش، جهت ساده سازی هندسه قطعه کار، طرح ساده سازی شده مقطع قطعه کار در شکل ۶ نشان داده شده است.

مقطع قطعه کار را از نظر کیفیت جریان ماده به چهار ناحیه تقسیم بندی گردید. این چهار ناحیه در شکل ۶ نمایش داده شده اند. برای تخمین نیروی فورج لحظات آخر فرآیند در نظر گرفته شد. در چهار ناحیه شکل ۶ وضعیت های زیر برقرار هستند:

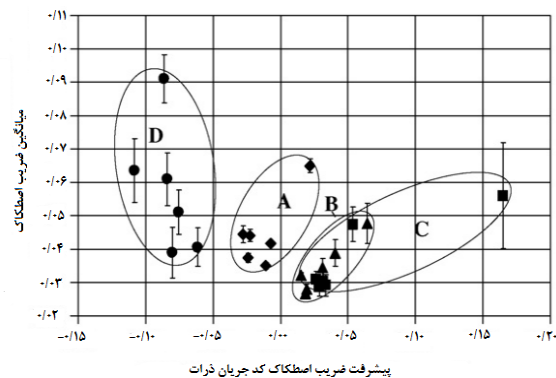
- در ناحیه ۱: همراه با حرکت رو به پائین قالب بالایی، مواد در جهت شعاعی جریان می یابد.



شکل ۶ طرح ساده سازی شده مقطع قطعه کار

از آنجایی که کفه های قالب دچار تغییر شکل نمی شوند، قالب ها بصورت صلب تعریف شده، مش بندی برای قالب در نظر گرفته نشد. برای مش بندی ماده خام، با توجه به هندسه قالب و آنالیز حساسیت انجام شده و مستقل بودن نتایج از نوع مش، تعداد ۵۰۰۰ المان در نرم افزار دیفرم، استفاده شد.

انتخاب ضریب اصطکاک مناسب در محاسبه نیروی لازم شکل دهی بسیار حائز اهمیت می باشد. ضریب اصطکاک برای روانکاری از نوع گرافیت و آب، در مراجع عددی بین ۰/۱۵ و ۰/۳ برای فرآیند فورج قطعات فولادی اعلام گردیده است [10] که برای آلومینیوم، این ضریب بسیار کمتر است. بوچنر و همکاران بر روی ضریب اصطکاک در فورج گرم قطعات فولادی با قالب آلومینیومی تحقیقاتی انجام دادند و ضرایب اصطکاک برای روانکاری های مختلف را بدست آوردند [11]. شکل ۵ مقدار ضریب اصطکاک برای روانکاری های مختلف را نشان می دهد. در این شکل، A و B ضریب اصطکاک با روانکار گرافیت و آب در حالت های مختلف را نشان می دهد. مطابق شکل ۵، ضریب اصطکاک برای روانکار از نوع گرافیک و آب از ۰/۰۷۵ کمتر می باشد، بدین جهت ضریب اصطکاک ۰/۰۷۵ جهت فورج آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ قطعه دیسکی انتخاب گردید.



شکل ۵ نمودار ضریب اصطکاک در فرآیند فورج آلومینیوم با قالب فولادی برای روانکاری های مختلف [11]

### ۳-۳-۳- روش خطوط میدان لغزش فورج هم دما

روش میدان خطوط لغزش به عنوان روش اصلی و پایه، برای تحلیل تئوری فرآیندهای شکل دهی فلزات می باشد. در این روش از روابط و اصول پایه و متقن علم مکانیک برای تبدیلات تنش و رفتار تنش-کرنش استفاده می شود. روش میدان خطوط لغزش برای تحلیل مسائل دو بعدی توسعه یافته است. دو نوع اصلی مسائل دو بعدی که توسط این روش قابل تحلیل هستند، عبارتند از مسائل کرنش صفحه ای و مسائل متقارن محوری [12]. در این پژوهش از روش میدان خطوط لغزش متقارن محوری برای برآورد نیروی مورد نیاز یک فرآیند فورج هم دمای قالب بسته استفاده شد. از آنجا که در انتهای فرآیند فورج قالب بسته، قطعه کار بیشتر فضای حفره داخل قالب را پر می کند، لذا سطوح اصطکاک

## ۳-۳-۳- محاسبات در میدان خطوط لغزش

در حین تغییر فرم، به دلیل ایجاد کرنش سختی، استحکام جنس قطعه کار بالا می‌رود. البته در این پژوهش، فرآیند فورج به صورت هم‌دما انجام می‌شود و به همین دلیل دمای بالا، بخش قابل توجهی از اثرات کرنش سختی را از بین می‌برد. بدیهی است که پس از خاتمه فرآیند، مقدار استحکام ماده در نقاط مختلف قطعه کار تا حدودی با هم متفاوت خواهد بود. در روش میدان خطوط لغزش، مقدار  $k$  (استحکام برشی جنس قطعه کار که طبق تئوری ترسکا برابر نصف استحکام کششی است) را تقریباً برابر با میانگین استحکام برشی ماده در حجم قطعه کار در نظر گرفته می‌شود. نرخ کرنش در فرآیند فورج با توجه به چندین جهت بودن اعمال نیرو و پیچیدگی فرآیند نسبت به نرخ کرنش‌های استفاده شده در آزمایش‌های تک محوری فشار یا کشش، مقدار و اندازه‌ای به مراتب بزرگتری دارد. بنابراین آزمون‌های کشش یا فشار در نرخ کرنش‌های پایین‌تری، انجام پذیرفت. بدین جهت نرخ کرنش  $0.5$  جهت برآورد دقیق‌تر نیرو، تحلیل و تعریف مناسب نواحی در روش میدان خطوط لغزش، انتخاب گردید. استحکام برشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ را برای نرخ کرنش  $0.1$  در دمای  $400$  درجه سلسیوس، حدود  $80$  مگا پاسکال محاسبه گردید. با توجه به اینکه استحکام برشی طبق نظریه ترسکا برابر نصف استحکام عمودی است، لذا استحکام برشی برابر  $40$  مگا پاسکال در نظر گرفته شد. محاسبات را از نقطه A به ترتیب به نقاط B، C، D و E انجام شد.

نقطه A:

$$\begin{aligned} \tau_{rz} = 0 &\Rightarrow \theta = 45^\circ \\ \sigma_r &= 0 \\ \sigma_z &= -2k \sin 2\theta \\ \sigma_\theta &= k(\sin 2\theta - 1) \\ p &= k \end{aligned}$$

حرکت از نقطه A به نقطه B بر روی خط آلفا:

$$\begin{aligned} r_A &= 22.8 \text{ (mm)} \\ r_B &= 22.5 \text{ (mm)} \\ p_A &= k \text{ (Pa)} \\ \theta_A &= -45^\circ \\ \theta_B &= -90^\circ \\ z_A &= -1.1 \text{ (mm)} \\ z_B &= 0.33 \text{ (mm)} \\ \Rightarrow p_B &= 100.8 \text{ (MPa)} \\ \Rightarrow \sigma_z^B &= -100.8 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

حرکت از نقطه B به نقطه C بر روی خط بتا:

تمامی نقاط بین خط BC روی خط بتا قرار دارند که بدین جهت از روابط خطوط لغزش روی خط بتا استفاده شده است.

$$\begin{aligned} r_B &= 22.5 \text{ (mm)} \\ r_C &= 12.5 \text{ (mm)} \\ p_B &= 100.8 \text{ (MPa)} \\ \theta_B &= -90^\circ \\ \theta_C &= -90^\circ \\ z_B &= 0.33 \text{ (mm)} \\ z_C &= 0.33 \text{ (mm)} \\ \Rightarrow p_C &= 123.58 \text{ (MPa)} \\ \Rightarrow \sigma_z^C &= -123.58 \text{ (MPa)}, \tau_{rz}^C = -40 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

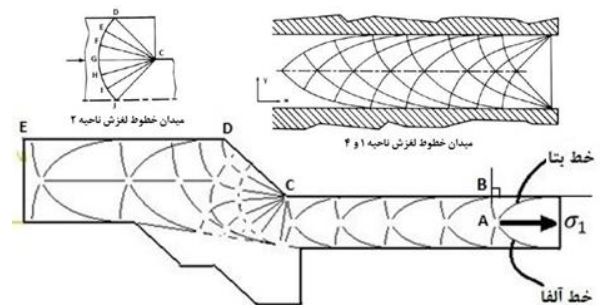
حرکت از نقطه C به نقطه D بر روی خط بتا:

- در ناحیه ۲: مواد از خروجی ناحیه ۱ به سمت ورودی ناحیه ۴ حرکت می‌کند.

- در ناحیه ۳: مواد به حالت سکون در آمده و متوقف شده‌اند. اصطلاحاً این ناحیه را مرده می‌نامند. کانتور توزیع نرخ کرنش مؤثر و نمایسز که از نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود استخراج شد، وجود نرخ کرنش صفر در این ناحیه را تأیید نمود. بدین جهت نرخ کرنش صفر به معنای توقف و عدم جریان مواد می‌باشد.

- در ناحیه ۴: همراه با حرکت رو به پائین قالب بالایی، مواد در جهت شعاعی جریان می‌یابد.

میدان خطوط لغزش برای نواحی ۱ و ۴ مشابه می‌باشد. میدان خطوط لغزش در مقطع قطعه کار، با توجه به نواحی مشخص شده، مطابق شکل ۷ ترسیم گردید.



شکل ۷) میدان خطوط لغزش برای مقطع برش خورده قطعه کار

طبق شکل ۷ مشاهده می‌شود که خطوط بتا و آلفا بر خط BC در ناحیه ۴ به ترتیب مماس و عمود می‌باشند. شکل ۷ لحظه‌ای از فرآیند را نشان می‌دهد که مواد به انتهای سمت راست ناحیه ۴ رسیده اما هنوز تماس مؤثری با دیواره قالب پیدا نکرده است که موجب کاهش چشم‌گیر اثر اصطکاک بر نیروی لازم شکل‌دهی شده است. در انتهای ناحیه ۴، شرایط مرزی سطح آزاد برقرار است. لذا در این سطح تنش عمودی در راستای افقی و تنش برشی برابر صفر هستند. بنابراین خواهیم داشت:

$$\tau_{rz} = k \cos 2\theta = 0 \Rightarrow \theta = 45^\circ$$

$$\sigma_r = 0 \Rightarrow \sigma_r = -p + k \sin 2\theta = 0$$

$$p = k \sin 2\theta \Rightarrow \sigma_z = -p - k \sin 2\theta = -2k \sin 2\theta < 0$$

$$\sigma_\theta = -p - k = k \sin 2\theta - k = k(\sin 2\theta - 1) < 0$$

$$\Rightarrow p = k$$

ملاحظه گردید که بزرگترین تنش عمودی در این قسمت، تنش  $\sigma_r$  است که همین مؤلفه تنش در واقع تنش اصلی اول است. با توجه به الگوی نمایش داده شده در مرجع [13] و با مطابقت قرار دادن خطوط لغزش ناحیه سمت راست شکل ۷، خطوط آلفا و بتا در سطح مقطع قطعه مورد نظر مشخص گردید. سپس جهت تکمیل محاسبات میدان خطوط لغزش، نقاط A تا E در شکل ۷ نام‌گذاری شدند.

در شکل ۸ نشان داده شده است که دو مؤلفه تنش  $\sigma_z$  و  $\tau_{rz}$  در نیروی عمودی وارد بر این مرز سهم دارند. به همین دلیل روابط توزیع این دو تنش استخراج گردید و با انتگرالگیری از آنها، نیروی وارد بر این سطح محاسبه شد. در روش میدان خطوط لغزش با اصطکاک چسبنده هر دو تنش یاد شده توزیع خطی دارند. لذا رابطه توزیع تنش  $\tau_{rz}$  بر روی مرز CD به صورت تابع خطی از  $r$  و  $z$  در نظر گرفته شد. از طرفی در مرز CD رابطه زیر بین دو مختصه  $r$  و  $z$  برقرار است:

$$\frac{z - z_C}{r - r_C} = \frac{z_D - z_C}{r_D - r_C} \quad (7)$$

$$\Rightarrow z = z_C + \left( \frac{z_D - z_C}{r_D - r_C} \right) (r - r_C)$$

بنابراین مختصه  $z$  به مختصه  $r$  وابسته می‌باشد. در نتیجه می‌توان تنش  $\tau_{rz}$  را به صورت فقط تابعی از  $r$  بیان نمود. لذا خواهیم داشت:

$$\tau_{rz}^{CD} = a_2 + b_2 r \quad (8)$$

$$\Rightarrow b_2 = \frac{\tau_{rz}^C - \tau_{rz}^D}{r_C - r_D} \Rightarrow a_2 = \tau_{rz}^D - b_2 r_D$$

$$F_{CD}^1 = \int_{r_D}^{r_C} \tau_{rz}^{CD} 2\pi r \tan\theta dr \Rightarrow F_{CD}^1 \quad (9)$$

$$= 2\pi \tan\theta \left[ \frac{a_2 r^2}{2} + \frac{b_2 r^3}{3} \right]_{r_D}^{r_C}$$

$$\Rightarrow F_{CD}^1 = 0.253 \text{ (ton)}$$

به همین ترتیب می‌توان تنش  $\sigma_z$  را نیز به صورت تابعی از فقط  $r$  بیان نمود. بنابراین خواهیم داشت:

$$\sigma_z^{CD} = a_3 + b_3 r$$

$$\Rightarrow b_3 = \frac{\sigma_z^C - \sigma_z^D}{r_C - r_D} \quad (10)$$

$$\Rightarrow a_3 = \sigma_z^C - b_3 r_C$$

$$F_{CD}^2 = \int_{r_D}^{r_C} \sigma_z^{CD} 2\pi r \tan\theta dr \Rightarrow F_{CD}^2 \quad (11)$$

$$= 2\pi \tan\theta \left[ \frac{a_3 r^2}{2} + \frac{b_3 r^3}{3} \right]_{r_D}^{r_C}$$

$$\Rightarrow F_{CD}^2 = 1.84 \text{ (ton)}$$

$$F_{CD} = F_{CD}^1 + F_{CD}^2 = 2.09 \text{ (ton)}$$

#### ۳-۱-۴ - محاسبه نیروی $F_{DE}$

$$P_{DE} = -\sigma_{DE} = a_4 + b_4 r \Rightarrow b_4 = \frac{\sigma_z^D - \sigma_z^E}{r_D - r_E} \quad (12)$$

$$\Rightarrow a_4 = -\sigma_z^D - b_4 r_D$$

$$F_{DE} = \int_{r_D}^{r_E} P_{DE} 2\pi r dr \Rightarrow F_{DE} = 2\pi \left[ \frac{a_4 r^2}{2} + \frac{b_4 r^3}{3} \right]_{r_D}^{r_E} \quad (13)$$

$$\Rightarrow F_{DE} = 9.25 \text{ (ton)}$$

بنابراین کل نیروی فرآیند برابر خواهد بود با:

$$F_{total} = F_{BC} + F_{CD} + F_{DE} = 23.54 \text{ (ton)}$$

$$r_C = 12.5 \text{ (mm)}$$

$$r_D = 10.8 \text{ (mm)}$$

$$p_C = 123.58 \text{ (MPa)}$$

$$\phi_C = 45^\circ$$

$$\phi_D = 45^\circ$$

$$z_C = 0.33 \text{ (mm)}$$

$$z_D = 2.01 \text{ (mm)}$$

$$\stackrel{(3)}{\Rightarrow} p_D = 135.13 \text{ (MPa)}$$

$$\stackrel{(1)}{\Rightarrow} \sigma_z^D = -175.13 \text{ (MPa)}, \tau_{rz}^D \approx 0 \text{ (MPa)}$$

حرکت از نقطه D به نقطه E بر روی خط بتا:

$$r_D = 10.8 \text{ (mm)}$$

$$r_E = 0 \text{ (mm)}$$

$$p_D = 135.13 \text{ (MPa)}$$

$$\phi_D = 45^\circ$$

$$\phi_E = -90^\circ$$

$$z_D = 2.01 \text{ (mm)}$$

$$z_E = 2.01 \text{ (mm)}$$

$$\stackrel{(3)}{\Rightarrow} p_E = 403.63 \text{ (MPa)}$$

$$\stackrel{(1)}{\Rightarrow} \sigma_z^E = -403.63 \text{ (MPa)}$$

#### ۴- بحث و نتایج

##### ۴-۱- محاسبه نیروی لازم شکل‌دهی به روش خطوط میدان لغزش

##### ۴-۱-۱- محاسبه نیروی $F_{BC}$

نیروی فرآیند را در مرزهای BC، CD و DE به طور جداگانه محاسبه گردید:

$$F_{total} = F_{BC} + F_{CD} + F_{DE} \quad (4)$$

در رابطه (۴) نیروی کل فرآیند آهنگری است.

در تحلیل میدان خطوط لغزش با اصطکاک چسبنده، تغییرات فشار در سطح تماس قالب با قطعه کار خطی است. لذا می‌توان رابطه توزیع فشار بر روی مرز BC را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$P_{BC} = -\sigma_{BC} = -\sigma_z = a_1 + b_1 r \stackrel{(5)}{\Rightarrow} b_1 = \frac{\sigma_z^C - \sigma_z^B}{r_B - r_C} \quad (5)$$

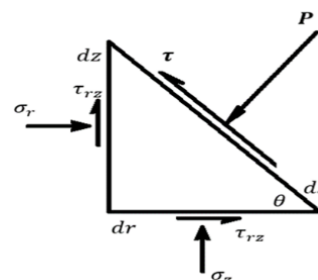
$$\stackrel{(5)}{\Rightarrow} a_1 = -\sigma_z^B - b_1 r_B$$

$$F_{BC} = \int_{r_C}^{r_B} P_{BC} 2\pi r dr \Rightarrow F_{BC} = 2\pi \left[ \frac{a_1 r^2}{2} + \frac{b_1 r^3}{3} \right]_{r_C}^{r_B} \quad (6)$$

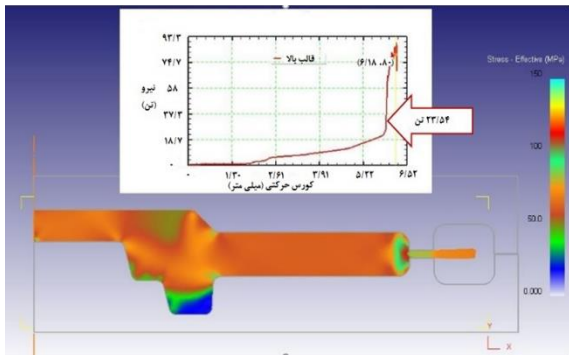
$$\stackrel{(6)}{\Rightarrow} F_{BC} = 12.18 \text{ (ton)}$$

##### ۴-۱-۲ - محاسبه نیروی $F_{CD}$

با توجه به اینکه مرز CD نسبت به سطح افق زاویه دارد، ابتدا یک المان برش خورده از آن را مطابق شکل ۸ در نظر گرفته شد.



شکل ۸) یک المان برش خورده از مرز CD



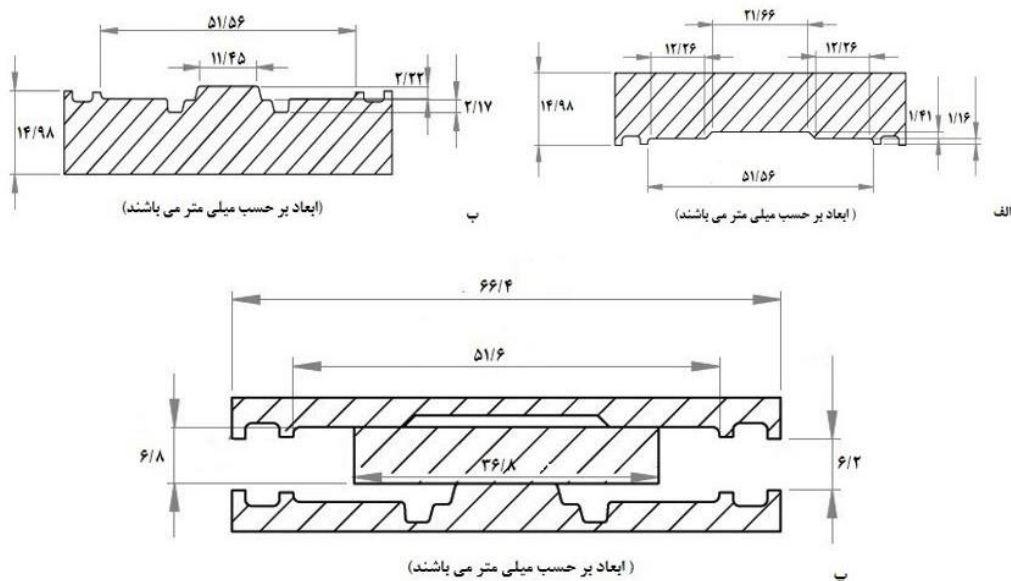
شکل ۹) نمودار تغییرات نیرو - جابه‌جایی فرآیند فورج همدمای قطعه دیسکی از روش اجزاء محدود

#### ۴-۴- ارائه طرح قالب‌های مورد نیاز جهت فورج قطعه

نقشه دو بعدی دو قالب بالا و پایین فورج همدمای قطعه دیسکی آلایژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به همراه نقشه مونتاژی آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش میدان خطوط لغزش متقارن محوری برای برآورد نیروی شکل‌دهی فورج همدمای قطعه دیسکی آلایژ آلومینیوم ۷۰۷۵ پیش از پر شدن قالب استفاده گردید و در شبیه‌سازی فرآیند فورج همدمای به کمک نرم‌افزار دیفرم، دمای انجام فرآیند ۴۰۰ درجه سلسیوس، سرعت کفه بالای قالب ۰/۱ میلی‌متر بر ثانیه و ضریب اصطکاک ۰/۰۷۵ به عنوان پارامترهای فرآیند انتخاب گردید. نیروی محاسبه شده به روش تئوری و اجزاء محدود مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت که چکیده‌ای از نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر می‌باشد.



شکل ۱۰) الف: نقشه دو بعدی قالب بالا ب: نقشه دو بعدی قالب پایین پ: نقشه مونتاژی فرآیند فورج همدمای

#### ۲-۴- مقایسه روش تئوری و اجزاء محدود

در شکل ۹ نمودار تغییرات نیروی فرآیند فورج همدمای قطعه دیسکی آلایژ آلومینیوم ۷۰۷۵ حاصل از نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود به کمک نرم‌افزار دیفرم از ابتدا تا لحظه بسته شدن کامل قالب را نشان داده شده است. قالب‌های فورج جهت شکل‌دهی ماده خام به روش اجزاء محدود با طی نمودن کورس حرکتی ۶/۱۸ میلی‌متر و بسته شدن کامل قالب، به تناژ ۸۰ تن رسید.

فرآیند فورج همدمای مورد نظر توسط نرم‌افزار دیفرم شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از آن با نیروی به دست آمده از روش خطوط میدان لغزش متقارن محوری مورد مقایسه قرار گرفت که نمودار تغییرات نیرو - جابه‌جایی فورج همدمای قطعه دیسکی که از شبیه‌سازی اجزاء محدود استخراج شده، نشان می‌دهد که نیروی به دست آمده از روش تئوری با دقت بسیار خوبی با بخشی از نمودار نیرو - جابه‌جایی حاصل از روش اجزاء محدود، منطبق می‌باشد. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است نیروی ۲۳/۵۴ تن به دست آمده از روش تئوری پیش از ورود مواد به کانال پلیسه بر نمودار نیرو - جابه‌جایی حاصل از روش اجزاء محدود کاملاً منطبق می‌باشد. نیروی محاسبه شده از روش تئوری بر نقطه ای از نمودار نیرو - جابه‌جایی حاصل از روش اجزاء محدود اشاره دارد که قالب بالا به طور کامل بر روی قالب پایین قرار نگرفته است و مواد هنوز وارد کانال پلیسه نشده است که نشان‌دهنده آن است برآورد نیرو به روش میدان خطوط لغزش متقارن محوری با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده، از دقت بالایی برخوردار می‌باشد.



- 9- Properties and Selection: Nonferrous alloys and Special-Purpose Materials, Vol. 2. ASM International, 2005.
- 10- Petrov A, Petrov P, Petrov M. Research into water-based colloidal-graphite lubricants for forging of carbon steels and Ni-based alloys. *International Journal of Material Forming*. 2010;3(1):311-4.
- 11- Buchner B, Maderthoner G, Buchmayr B. Characterisation of different lubricants concerning the friction coefficient in forging of AA2618. *Journal of materials processing technology*. 2008;198(1-3):41-7.
- 12- Hosford WF, Caddell RM. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. Cambridge university press; 2011.
- 13- Chitkara NR, Butt MA. A general numerical method of construction of axisymmetric slip-line fields. *International journal of mechanical sciences*. 1992;34(11):833-48.

با تحلیل نتایج شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود نیروی لازم شکل‌دهی فورج هم‌دما قطعه دیسکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ با طی نمودن کورس حرکتی ۶/۱۸ میلی‌متر برابر ۸۰ تن به دست آمد. مقایسه نتایج حاصل از روش تئوری با اجزا محدود نشان داد که جهت برآورد نیروی فورجینگ قطعه دیسکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ روش میدان خطوط لغزش متقارن محوری از دقت بسیار خوبی برخوردار است و نیروی ۲۳/۵۴ تن محاسبه شده به کمک روش میدان خطوط لغزش متقارن محوری بر نمودار نیرو - جابه‌جایی حاصل از روش اجزا محدود کاملاً منطبق می‌باشد.

با فرض حجم ثابت در تغییر شکل پلاستیک، هندسه ماده خام و نقشه دو قالب بالا و پایین و نقشه مونتاژی فرآیند فورج هم‌دما قطعه دیسکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ ارائه گردید. هندسه ماده خام اولیه با در نظر گرفتن نحوه‌ی پرشدن قالب به صورت گرده‌ای اکستروژن شده از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ به قطر ۳۶/۸ میلی‌متر و ارتفاع ۶/۸ میلی‌متر محاسبه گردید.

**تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده‌اند.

**تعارض منافع:** تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

**منابع مالی:** تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

## منابع

- 1- Handbook AM. Forming and Forging. v. 14.
- 2- Biswas SK, Knight WA. Preform design for closed die forgings: experimental basis for computer aided design. *International Journal of Machine Tool Design and Research*. 1975;15(3):179-93.
- 3- Sopha S. N. S, "Comparative study of forging parameters on microstructures and properties between Aluminum alloys Al6063 and AA7075," Dep. Prod. Technol. Educ. King Mongkut's Univ. Technol. Thonburi 126, 2007.
- 4- Barati E, Farmanesh K. EVALUATION OF FORGING PARAMETERS ON AL-7075 AIRCRAFT DOOR BRACKET BY SIMULATION.
- 5- Joun MS, Moon HG, Choi IS, Lee MC, Jun DB. Effects of friction laws on metal forming processes. *Tribology International*. 2009;42(2):311-9.
- 6- Hu JL, Yi YP, Huang SQ. Analysis of isothermal forging process and mechanical properties of complex aluminum forging for aviation. *Journal of Central South University*. 2014;21(7):2612-6.
- 7- Samolyk G, Pater Z. Application of the slip-line field method to the analysis of die cavity filling. *Journal of materials processing technology*. 2004;153:729-35.
- 8- Quagliato L, Berti GA, Kim D, Kim N. Slip line model for forces estimation in the radial-axial ring rolling process. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018;138:17-33.