



# طراحی و بهینه‌سازی فرایند فورج پره فن ژنراتور زیمنس آلیاژ AI-2024

رضا سعیدی<sup>۱</sup>، محمد حسین صادقی<sup>۲\*</sup>، آناهیتا رضایی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- کارشناس ارشد مهندسی مواد، شرکت مینا ژنراتور، کرج

\* تهران، صندوق پستی ۳۶۳-۱۴۱۱۵، sadeghim@modares.ac.ir

**چکیده-** فرایند فورج پره به دلیل هندسه پیچیده و دقت ابعادی بالا، نحوه جریان ماده پیچیده و ضخامت‌های متغیر و در بعضی موارد بسیار کم، فرایندی پیچیده است. امروزه شبیه‌سازی المان محدود به عنوان یک روش قدامتند، به طور گسترده در فرایندهای شکل‌دهی فلزات استفاده می‌شود. از مهمترین پارامترهای ورودی شبیه‌سازی عددی، رفتار ماده و شرایط اصطکاکی می‌باشند. آزمایش‌های عملی فشار استوانه و حلقه (رینگ) برای به دست آوردن این پارامترها برای آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ که برای تولید پره فن ژنراتور ۲۰۲ مگا ولت آمپر زیمنس استفاده می‌شود، اجرا گردید. برای ارزیابی نتایج آزمایش‌ها و صحت شبیه‌سازی‌هایی که انجام می‌شود آزمایش‌های عملی اجرا شده است. به این ترتیب با توجه به هزینه‌های بسیار بالای ساخت نمونه اصلی پره، از آزمایش پرس جانبی استوانه استفاده شد. نتایج آزمایش عملی و شبیه‌سازی عددی تطابق بسیار خوبی با هم دارند. حفره قالب نهایی و سپس پیش‌فرم‌های مورد نیاز برای دستیابی به پره فن ژنراتور زیمنس، طراحی شده است. این مراحل شامل اکستروژن، خم، آپستینگ و مرحله نهایی برای به دست آوردن یک قطعه سالم و شرایط نیرویی مناسب می‌باشد. فرایند نهایی در دماهای قالب و قطعه‌کار و نرخ کرنش‌های مختلف شبیه‌سازی شد و با بررسی نتایج، شرایط بهینه فورج ارائه شد.

**کلیدواژگان:** فورج پره آلومینیومی، آلیاژ AI-2024، شبیه‌سازی عددی.

## Design and optimization of AI-2024 Siemens generator fan blade forging process

R. Saedi<sup>1</sup>, M. H. Sadeghi<sup>2\*</sup>, A. Rezaei<sup>3</sup>

1- MSc of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

2- Prof. of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

3- MSc. of Mat. Eng., Generator Eng. Co., Karaj, Iran

\* P.O.B. 14115-363 Tehran, Iran. sadeghim@modares.ac.ir

**Abstract-** Blade forging is an intricate process due to complicated geometry, high dimensional accuracy, complicated material flow, varying and sometimes very thin thicknesses. As a powerful tool, numerical simulation is used in different steps of designing process. Mechanical properties (stress-strain curves) of the material and friction factor of contact surface are of the most important inputs of the simulation. Thus, cylinder and ring compression experiments were conducted to obtain these inputs for AI-2024 used in forging of 202 MVA Siemens generator fan blade. Because of high costs of blade forging and suitability of cylinder side-pressing this experiments were used to evaluate the compression tests and simulations. Good accordance was observed between simulation and experiment. Final forging die cavity and then preforms needed to produce a sound part are modeled. Designed preforming steps include extrusion, bending and upsetting. Blade final forging step was simulated in different temperatures of die and workpiece and strain rates and the optimum condition was determined.

**Keywords:** Aluminum Blade Forging, AI-2024 Alloy, Numerical Simulation.

## ۱- مقدمه

قبل از آن که قالب‌های فورج در تولید استفاده شوند، مورد آزمایش واقع می‌شوند تا قابلیت پر شدن مناسب حفره‌های قالب تایید گردد. به دلیل هزینه‌های بالای ماشین ابزار و کاهش بهره‌وری که در استفاده از تجهیزات تولید در آزمایش فرایندهای جدید صورت می‌گیرد، شبیه‌سازی المان محدود یک ابزار بسیار مهم برای توسعه فرایندهای جدید یا پیشرفته‌تر به حساب می‌آید [۲،۱].

برای ساخت پره با خواص مکانیکی و شکل هندسی مناسب، شناسایی جریان ماده، کرنش، نرخ کرنش، نیروی فورج و تاریخچه دمایی در طی تغییر شکل، به صورت علمی ضروری است [۳].

روش المان محدود یک روش دقیق و مهم برای مطالعه نحوه تغییر شکل ماده و شرایط فرایند تغییر شکل در شکل‌دهی فلزات می‌باشد و برای طراحی و پیش‌بینی فرایند فورج به طور گسترده از آن استفاده می‌شود. تحلیل المان محدود دارای یک سری پارامتر ورودی می‌باشد و با تحلیل این پارامترها خروجی فرایند ارائه می‌شود [۴].

پارک و وانگ (۲۰۰۷) پیش‌فرمی را برای فورج دقیق یک قطعه از نوع دیواره-راهگاهی نامتقارن به صورت سیستماتیک و با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود با نرم‌افزار دیفرم طراحی کردند [۵]. بوم سو و همکاران (۱۹۹۰) فورج قالب بسته یک مقطع پره را به صورت مسئله کرنش - صفحه‌ای دو بعدی در نظر گرفتند. تعدادی شبیه‌سازی اولیه با پیش‌فرم‌های مربعی برای تعیین شیب خط جدایش قالب انجام شد [۶]. بالندرا و همکاران (۱۹۹۸) تأثیر پیش‌فرم دایره‌ای، بیضوی و یک پیش-فرم را بر تنش‌های وارد به قالب بررسی کردند. پیش‌فرم بیضی شکل از لحاظ تغییر شکل و نیروهای وارد بر قالب یک حالت بینابین پیش‌فرم دایره‌ای و پیش‌فرم ایجاد می‌کند. از نتایج دیگر این پژوهش این بود که با تغییر وضعیت سطح جدایش قالب می‌توان نیروهای جانبی تغییر شکل را کاهش داد و به مقدار قابل قبولی رساند [۷]. ژان و همکاران (۲۰۰۲) تأثیر شکل و موقعیت اولیه بیلته را در فورج دقیق پره کمپرسور با استفاده از مدل المان محدود سه بعدی و به صورت صلب ویسکوپلاستیک مورد مطالعه قرار دادند. آنها بیان نمودند که بیلته بلند و باریک در هنگام تغییر شکل منجر به خمیدگی در

قسمت ایرفویل و نزدیکی ریشه می‌شود. که با در نظر گرفتن یک خم در جهت جبران آن می‌توان محصولی بدون پلیسه و قابل قبول تولید نمود [۸]. ژانگ و همکاران (۲۰۰۹) خطوط جریان یک دیسک با شکل پیچیده را در فرایند فورج همدم مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود دو بعدی جریان ماده بررسی شد و نقاطی از قطعه‌کار را که دارای عیوب جریان ماده مانند تاخوردگی و پیچش جریان ماده<sup>۱</sup> و برش داخلی<sup>۲</sup> بود با ایجاد تغییراتی در طراحی فرایند فورج و ابعاد بیلته اولیه بهبود دادند [۹]. چنگ و همکاران (۲۰۰۸) شبیه‌سازی سه بعدی مراحل فورج پره کمپرسور توربین گازی را انجام دادند. در این تحقیق مراحل فورج پره از بیلته اولیه تا پره نهایی به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی و بررسی شد. جنس پره کمپرسور از فولاد ضد زنگ بود و برای شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار دیفرم تری‌دی<sup>۳</sup> استفاده شد. مراحل فورج به ترتیب یک مرحله آپستینگ، کله‌زنی، باستینگ و مرحله فورج نهایی انتخاب شد [۱۰]. او و همکاران (۲۰۱۲) مدل‌سازی المان محدود و بهینه‌سازی فرایند شکل‌دهی به شکل نهایی با عدم قطعیت را انجام دادند. در این مطالعه شبیه‌سازی مونت کارلو<sup>۴</sup> و روش سطوح پاسخ و آنالیز نقطه محتمل<sup>۵</sup> به منظور کمی‌سازی خواص احتمالاتی خطاهای ابعادی و هندسی در فرایندهای شکل‌دهی به شکل نهایی استفاده شد. دو مطالعه‌ی موردی پایه صنعتی، فورج دوبعدی ایرفویل و اکستروژن مستقیم استوانه، نیز با نتایج خوب برای بهبود دقت انجام شد [۱۱]. در زمینه فورج قطعات با شکل هندسی پیچیده نیز فعالیت‌های زیادی صورت گرفته است. محمدحسین صادقی و علی خسروی (۱۳۸۷) با استفاده از طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر، قالب‌های فورج دقیق چرخ‌دنده هرزگرد پژو ۴۰۵ را به صورت پارامتری، طراحی کردند [۱۲]. ساخت چرخ‌دنده به دلیل وجود کانتورهای پیچیده و دقت بالایی که دندان‌های آن نیاز دارند بسیار تخصصی است. طراحی و تولید این چرخ‌دنده‌ها با استفاده از فرایند فورج دقیق در مقایسه با روش‌های سنتی، باعث صرفه‌جویی در مواد اولیه، زمان تولید و نیز بهبود خواص مکانیکی می‌شود. در این تحقیق، پارامترها و

1. Vortex  
2. Fiber Breaking  
3. Deform-3D  
4. Monte Carlo  
5. Probable point analysis

مراجع انتخاب گردید. نمونه های استوانه‌ای آزمایش فشار با شیارهای هم‌مرکز روی دو پیشانی آن برای نگهداری روان‌کار جهت کاهش اصطکاک، در شکل ۲ نشان داده شده است. نسبت قطر/ارتفاع نمونه‌ها ۱/۵ انتخاب شد [۱۳،۷،۲].

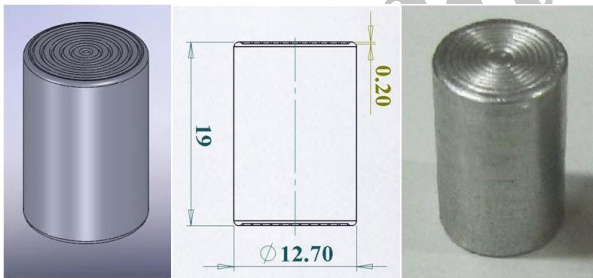
شکل ۳ نمونه های آزمایش حلقه استفاده شده را نشان می‌دهد. نسبت ارتفاع/ قطر داخلی/ قطر خارجی استفاده شده در این نمونه ها ۶/۳/۲ انتخاب شد.

### ۲-۳- تجهیزات آزمایش

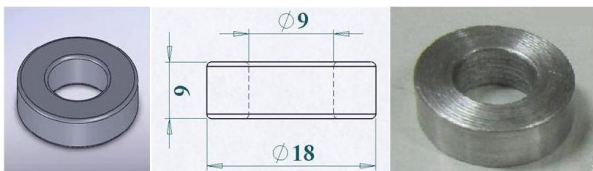
برای این که آزمایش‌های دقیق صورت گیرد باید دمای نمونه و فک‌ها کنترل شود و فرایند به صورت ایزوترمال باشد. برای این منظور نمونه در داخل کوره که بر روی پرس قرار دارد گرم شده و سپس تغییرشکل انجام می‌شود. لذا نمونه به همراه فک‌ها با یکدیگر گرم می‌شوند و در دمای یکسانی قرار می‌گیرند. برای این منظور کوره‌ای طراحی و ساخته شد. فک‌ها از جنس فولاد H13 انتخاب شد که مطابق با جنس قالب برای فورج آلیاژهای آلومینیم می‌باشد. به این منظور از دستگاه پرس ۲۰ تن مدل اینسترون 6027 استفاده شد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ مورد استفاده (%)

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti
۴/۱۲	۱/۲۳	۰/۶۶	۰/۲۳	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۰۱



شکل ۲ الف- نمونه استفاده شده برای آزمایش فشار ب- ابعاد نمونه استاندارد



شکل ۳ الف- نمونه استفاده شده برای آزمایش حلقه ب- ابعاد نمونه استاندارد

متغیرهای مختلف طراحی و فورج چرخ‌دنده بررسی شده و نمونه‌ای از چرخ‌دنده هرزگرد ساده، به صورت پارامتری طراحی، تحلیل و ساخته شد. در تحقیقی دیگر یوسف پارسه و محمد حسین صادقی (۱۳۸۹) فرایند فورج دقیق قطعه گردویی پلوس را که شکل هندسی پیچیده‌ای دارد با شبیه‌سازی عددی و مدل‌سازی فیزیکی توسط پلاستیسین بررسی کردند [۱۳].

با توجه به پیشینه پژوهشی که ارائه گردید مشاهده می‌شود که مطالعات زیادی در مورد فورج پره‌های توربین و کمپرسور و نیز قطعات با شکل هندسی پیچیده‌ی آلومینیمی انجام شده است ولی با این حال تاکنون فورج پره (فن ژنراتور) آلومینیمی با پیچیدگی هندسی بسیار بالا که در مطالعه حاضر مورد بررسی است گزارش نشده است. البته فرایند عملی آن صورت گرفته و پره موجود می‌باشد ولی نحوه مطالعه و اجرای آن گزارش نشده است.

ژنراتورها عموماً دارای فنی می‌باشند که برای خنک‌کاری محیط رتور و هسته آن استفاده می‌شود. این فن برای ژنراتور ۲۰۲ مگاوات آمپر زمینس دارای پره‌هایی از جنس آلومینیم ۲۰۲۴ می‌باشد. همان طور که در شکل ۱ دیده می‌شود شکل هندسی پره بسیار پیچیده می‌باشد و هیچ گونه عملیات ماشین‌کاری و پرداختی در قسمت بدنه پره صورت نمی‌گیرد.

### ۲- مواد و روش‌های آزمایش

#### ۲-۱- ماده

آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ تهیه گردید و روش کوانتومتری برای تعیین درصد ترکیب شیمیایی این آلیاژ بکار گرفته شد. در جدول ۱ ترکیب ماده استفاده شده نشان داده شده است.



شکل ۱ پره فن ژنراتور زمینس، قطعه فورج و نهایی

#### ۲-۲- نمونه‌های آزمایش

ابعاد نمونه‌های آزمایش فشار و حلقه مطابق استانداردها و

## ۲-۴- روش انجام آزمایش‌ها

## ۲-۴-۱- آزمایش فشار

آزمایش‌های فشار برای به دست آوردن خواص مکانیکی آلومینیم ۲۰۲۴ انجام شد. محدوده دمایی فورج داغ ۳۰۰ تا °C ۵۰۰ با فاصله دمایی °C ۵۰ و نرخ کرنش‌های ۰/۵ ، ۰/۱ و ۰/۱ (S<sup>-1</sup>) برای هر دما در نظر گرفته شد. بازه دمایی و نرخ کرنش‌ها با توجه به محدوده‌ای که در فرایند عملی فورج احتمال مواجه شدن وجود دارد انتخاب گردید.

شکل ۴ نمونه‌های آزمایش‌را نشان می‌دهد. بازشدگی حلقه‌های شیار روان‌کار در انتهای نمونه مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده عملکرد خوب نمونه، روان‌کار و اجرای مناسب آزمایش است. نمونه با کاهش ارتفاع ۶۳٪ (کرنش ۱) برای اعمال تصحیحات اصطکاک با توجه به میزان بشکته‌ای شدن آن است.

## ۲-۴-۲- آزمایش حلقه

آزمایش حلقه برای به دست آوردن ضریب اصطکاک سطوح تماس بین آلومینیم ۲۰۲۴ و قالب فولاد H13 مطابق شرایط ذکر شده در [۲۱] اجرا شد. این آزمایش‌ها در سه وضعیت از کاهش ارتفاع ۳۰٪ ، ۵۰٪ و ۷۰٪ و در دماهای ۳۵۰ ، ۴۰۰ ، ۴۵۰ و ۵۰۰ C با روان‌کار محلول گرافیت در روغن انجام شد. در شکل ۵ نمونه‌های حلقه شکل داده شده در کاهش ارتفاع‌های مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که قطر داخلی حلقه‌ها به دلیل وجود اصطکاک در سطح تماس فک-نمونه با کاهش ارتفاع بیشتر، کوچک‌تر می‌شود.



شکل ۴ نمونه‌های فشار (از راست به چپ): کاهش ارتفاع ۶۳٪ ، ۵۰٪ و قبل از تغییر شکل



شکل ۵ تغییر شکل نمونه‌های حلقه

## ۳- طراحی مراحل فورج

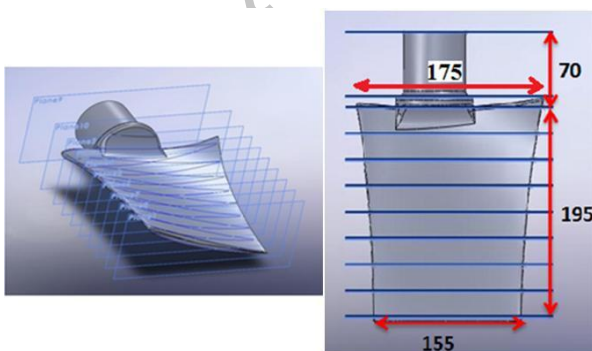
## ۳-۱- مدل قالب نهایی

از ورودی‌های شبیه‌سازی عددی فرایند، پارامترهای هندسی در این قسمت بررسی گردید. ابعاد قطعه‌کار فورج شده نهایی در شکل ۶- الف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ابعاد پره بزرگ می‌باشند، گوشه‌های بدنه در فاصله بسیار زیادی از مرکز پره قرار دارند و پیچش پره نیز زیاد است که نشان از پیچیدگی هندسی بسیار بالای این پره دارد. پروفیل بدنه پره در ۹ سطح مقطع عرضی و با ۷۲۹ نقطه موجود می‌باشد (شکل ۶- ب).

مدل اولیه قالب نهایی برای استفاده در شبیه‌سازی‌ها از روی قطعه کار نهایی پس از در نظر گرفتن پلیسه به دست می‌آید .

## ۳-۲- منحنی توزیع جرم

منحنی توزیع جرم از روی مدل نهایی به همراه پلیسه، برای استفاده در مراحل پیش شکل‌دهی رسم شد. در ناحیه مربوط به بدنه پره تغییرات مساحت سطح مقطع ملایم است. با در نظر گرفتن بیلت اولیه با سطح مقطع گرد که ماده اولیه معمولاً به این صورت می‌باشد، تغییرات قطر بیلت به صورت نمودار شکل ۷ می‌شود. یا توجه به تعداد تولید کم این قطعه کار تلاش برای رسیدن به شکل نهایی با کمترین مراحل شکل‌دهی ممکن و کم هزینه‌ترین شکل قالب‌ها می‌باشد. به این ترتیب تغییرات قطر بیلت به صورت خطی تقریب زده شد. در شکل ۷ رگرسیون خطی و معادله خط تغییرات قطر بیلت نشان داده شده است. مقدار  $R^2$  برابر با ۰/۹۴۱۵ می‌باشد.

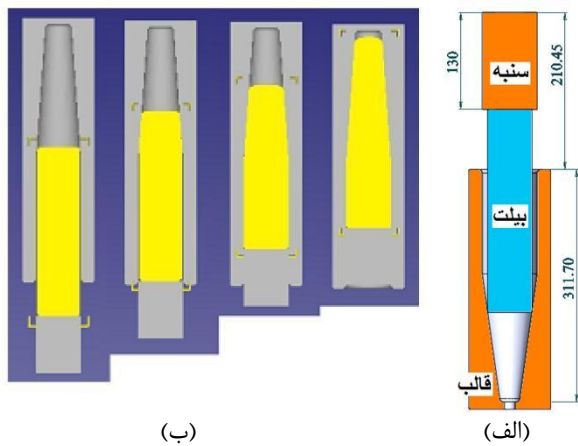


(ب)

(الف)

شکل ۶ الف- ابعاد پره فورج نهایی (mm) ب- سطوح مقطع

قطر بیلت ۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.



شکل ۸ الف- قالب اکستروژن ب- مراحل تغییرشکل

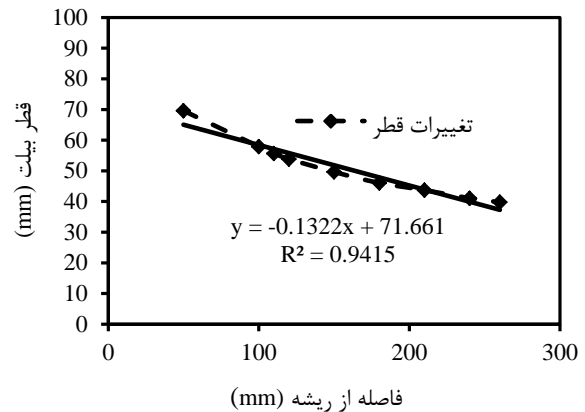
#### ۳-۴-۲- موقعیت اولیه بیلت

در فرایند فورج پره، موقعیت بیلت معمولاً با استفاده از شبیه‌سازی‌های المان محدود دو بعدی انجام می‌شود [۱۵، ۸، ۶]. به این ترتیب مراحل تغییرشکل بیلت اولیه در سطح مقطع ۱ بدنه پره به صورت دو بعدی شبیه‌سازی شد.

شکل ۹ مراحل تغییرشکل را نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رفت و در شبیه‌سازی سه بعدی مشاهده شد؛ یک طرف سطح مقطع زودتر پر شده و پلیسه ایجاد می‌شود و طرف دیگر قالب پر نمی‌شود که نشان می‌دهد موقعیت بیلت مناسب نیست (شکل ۹- الف). موقعیت بیلت تغییر داده شد و شبیه‌سازی مجدداً صورت گرفت ولی به دلیل انحنای زیاد سطح مقطع و تغییر ضخامت قابل توجه در طول سطح مقطع، بیلت سر خورده و به جای اول خود باز می‌گردد. این مورد برای بیلت با سطح مقطع مستطیلی هم صورت گرفت. شکل ۹- ب تغییر شکل بیلت با سطح مقطع مستطیلی را نشان می‌دهد.

#### ۳-۴-۳- فرایند خم‌کاری

برای به دست آوردن موقعیت مناسب بیلت اولیه از شبیه‌سازی المان محدود سه بعدی استفاده شد. از آنجا که بدنه پره با ریشه آن هم‌محور نیست و موجب تفاوت جریان ماده در دو طرف بدنه می‌شود، فرایند در نظر گرفته شده یک مرحله خم می‌باشد. به این ترتیب قالب خم طراحی شد. در شکل ۱۰ مراحل تغییر شکل برای مرحله خم نشان داده شده است.



شکل ۷ تغییرات قطر بیلت

#### ۳-۳-۳- ارزیابی مدل اولیه

تغییرشکل مدل اولیه با انتهای مخروطی شکل برای مطالعه و بررسی اشکالات موجود، با قالب نهایی شبیه‌سازی شد. مرحله نهایی فورج به صورت فرایند هم‌دما در نظر گرفته شد؛ زیرا در مرحله نهایی ضخامت قطعه‌کار بسیار کم و میزان تغییرشکل زیاد است؛ با استفاده از فرایند هم‌دما، افت دما در قطعه‌کار کاهش می‌یابد و سرعت تغییرشکل کم انتخاب می‌شود تا پلاستیسیته ماده بالا باشد در نتیجه جریان ماده راحت‌تر شده و نیروی فورج نیز به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. با بررسی این فرایند مشاهده شد که تغییرشکل در بدنه پره یک طرفه است و یک سمت پر شده و پلیسه زیادی ایجاد می‌شود؛ گوشه‌های نوک و انتهای بدنه نیز تا پر شدن فاصله زیادی دارند در حالی که ماده زیادی در نوک پره به کانال پلیسه رفته است. توضیحات بیشتر در این زمینه در [۱۴] آمده است.

با بررسی نیروهای قالب مشاهده شد که نیروی جانبی بسیار بالا می‌باشد. این نیروی جانبی برای فرایند فورج منطقی نیست و باید بهینه شود.

#### ۳-۴-۴- مراحل فورج

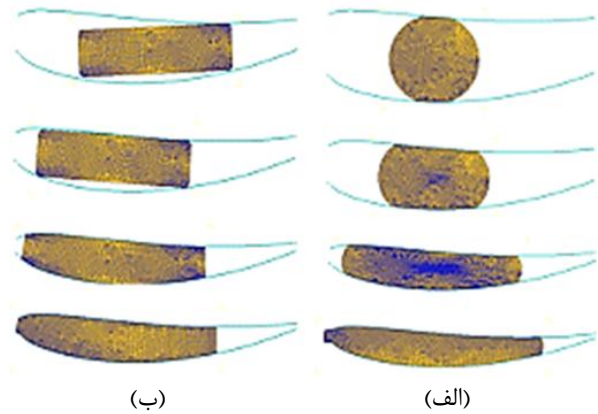
##### ۳-۴-۳-۱- اکستروژن

برای به دست آوردن توزیع جرم مورد نظر فرایند اکستروژن در نظر گرفته شد؛ به طوری که قسمت مخروطی شکل حاصل شود. قطر بیلت اولیه باید به گونه‌ای انتخاب شود که در آن کماتش اتفاق نیفتد و در حد امکان فرایند سطح افزایی باشد تا نیرو کمتر شود. برای این منظور نسبت طول به قطر بیلت باید کمتر از ۵ و قطر بیلت تا حد امکان کوچکتر باشد. در نتیجه

همان طور که دیده می‌شود قسمت مربوط به بدنه پره در پیش‌فرم نسبت به ریشه آن جابجا شده و به این ترتیب موقعیت اولیه آن بر روی بدنه پره تنظیم می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در این پره نمی‌توان از شبیه‌سازی دو بعدی برای تعیین موقعیت بیلت استفاده کرد.

### ۳-۴-۴- فرایند سطح افزایی

در نهایت برای این که پیش‌فرم در داخل قالب نهایی، به راحتی و در موقعیت معینی قرار بگیرد و نیز میزان تغییر شکل در قالب نهایی کمتر شود تا از ساییش قالب و نیرو در مرحله نهایی کاسته شود، یک مرحله سطح افزایی در نظر گرفته شد.



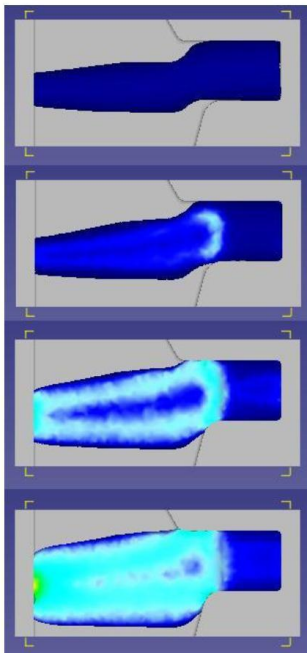
شکل ۹ مراحل تغییرشکل الف- بیلت گرد با موقعیت پیش‌فرض ب- بیلت با سطح مقطع مستطیلی

### ۳-۴-۵- زاویه سطح جدایش

با استفاده از شبیه‌سازی مرحله نهایی نیروهای جانبی وارد بر قالب مجدداً بررسی شد. تغییرات نیروهای عمودی و جانبی در مرحله نهایی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. اندازه نیروی جانبی حدود ۲۰۰ تن است. این نیرو بسیار بالاست و قابل تحمل برای قالب و پرس نیست.

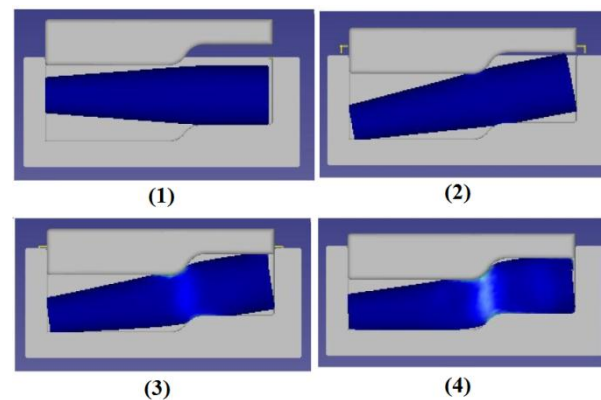
### ۳-۴-۶- حذف نیروی جانبی

معمولاً برای حذف نیروی جانبی زاویه سطح جدایش به صورت آزمون و خطی انتخاب می‌شود و با شبیه‌سازی‌های مقادیر پیش‌فرض، این مقدار طوری تعیین می‌شود که نیروی جانبی به مقدار قابل قبولی برسد [۶، ۷]. در این پژوهش از روش جدیدی استفاده شد که در ادامه توضیح داده می‌شود. نیروهای وارد بر پره در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



(ب)

شکل ۱۱ الف- A و B نواحی بحرانی پره ب- مراحل آپستینگ



شکل ۱۰ مراحل تغییرشکل در پیش‌فرم خم

شعاع محل اتصال بدنه و ریشه در این پیش‌فرم ۲۵ mm انتخاب شد که از شعاع قطعه نهایی بزرگ‌تر است. زاویه  $\alpha$  در این مرحله بسیار مهم است و اندازه آن تعیین کننده پر شدن

نیروها در جهت حرکت رم پرس قرار بگیرد، نیروی عمودی ( $F_z$ ) تبدیل به برآیند نیروها ( $F_R$ ) خواهد شد و نیروی افقی ( $F_x$ ) (نیروی جانبی) حذف خواهد شد. به این ترتیب زاویه  $\theta$  در این مورد از (۱) برابر با  $9/79^\circ$  درجه به دست می‌آید:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{206}{1194} = 9.79^\circ$$

به این ترتیب زاویه سطح جدایش به اندازه  $\theta$  تغییر داده شد و شبیه‌سازی تکرار شد تا روش بیان شده ارزیابی شود.

### ۳-۴-۷- مرحله نهایی فورج پره

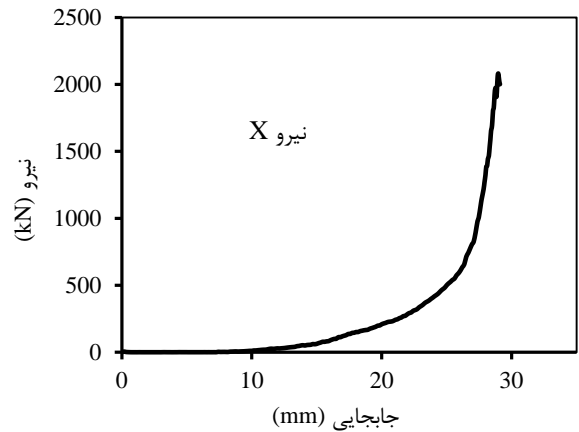
در این قسمت تغییرشکل پیش‌فرم به دست آمده از مرحله سطح افزایی، شبیه‌سازی شد. زاویه سطح جدایش قالب به اندازه  $9/79^\circ$  درجه تغییر داده شد. مراحل تغییر شکل در شکل ۱۴ نشان داده شده است. تغییر شکل در دو طرف بدنه پره تقریباً یکسان بوده و دو طرف با هم پر می‌شوند که نشان می‌دهد موقعیت اولیه بیلت مناسب است (فرایند خم). همچنین تغییرشکل در بدنه پره بسیار مناسب و همانند فرایند سطح افزایی است که تأثیر حذف کانال پلیسه انتهای نوک پره را نشان می‌دهد و گوشه نوک پره به راحتی پر می‌شود.

نیروهای وارد بر قالب در شکل ۱۵ نشان داده شده است. نیروی فورج نسبت به حالت قبل کمتر شده که دلیل این امر حذف پلیسه نوک پره و همچنین استفاده از پیش‌فرم سطح افزایی می‌باشد. تغییرات نیروی جانبی وارد بر قالب در شکل ۱۵-ب نشان داده شده است. این نیرو به صورت نوسانی تغییر می‌کند و بازه نوسانات محدود به  $20$  تن است یعنی نیروی جانبی تقریباً حذف شده و زاویه سطح جدایش ایده‌آل است.

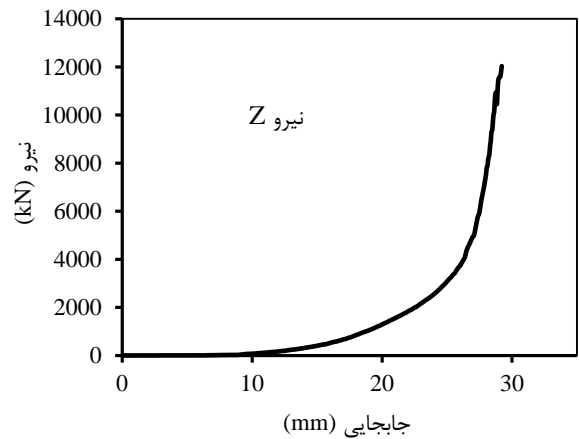
### ۴- بهینه‌سازی فرایند فورج هم‌دمای پره

پس از به دست آوردن شکل بهینه پیش‌فرم‌ها که با استفاده از آن شکل نهایی قطعه‌کار بدون عیب به دست می‌آید، انتخاب شرایط فورج نهایی پره بسیار مهم است.

در این پژوهش تاکنون شرایط فرضی رایج که برای فورج آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ استفاده می‌شود، برای شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است. در این قسمت مقادیر بهینه‌ی دمای قالب، قطعه‌کار و سرعت رم بالایی پرس برای مرحله نهایی فورج تعیین می‌شود.

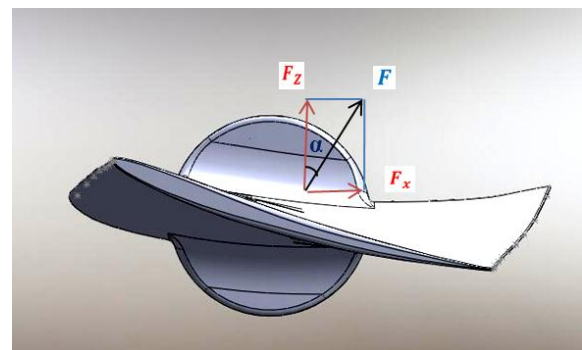


(الف)



(ب)

شکل ۱۲ تغییرات نیروهای الف- عمودی و ب- افقی



شکل ۱۳ نیروهای وارد بر پره

برآیند نیروها،  $F_R$  با نیروی  $F_z$  که در جهت حرکت پرس است زاویه  $\theta$  را می‌سازد. زاویه  $\theta$  از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{F_x}{F_z} \quad (1)$$

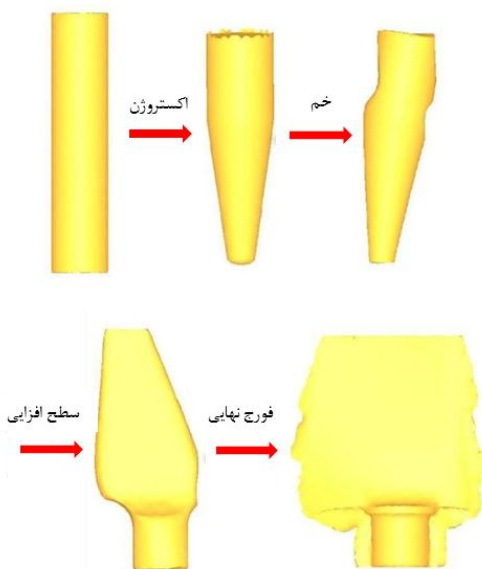
حال اگر زاویه سطح جدایش طوری تغییر یابد که برآیند

شکل و ابعاد مناسب پیش‌فرم‌ها در مراحل پیشین به دست آمد. به این ترتیب مرحله نهایی فورج با پیش‌فرمی که مراحل اکستروژن، خم و آپستینگ روی آن صورت گرفته است انجام می‌شود. در شکل ۱۶ مراحل تغییرشکل برای این پیش‌فرم از یک بیلت خام به همراه مرحله نهایی برای به دست آوردن قطعه فورج مورد نظر نشان داده شده است.

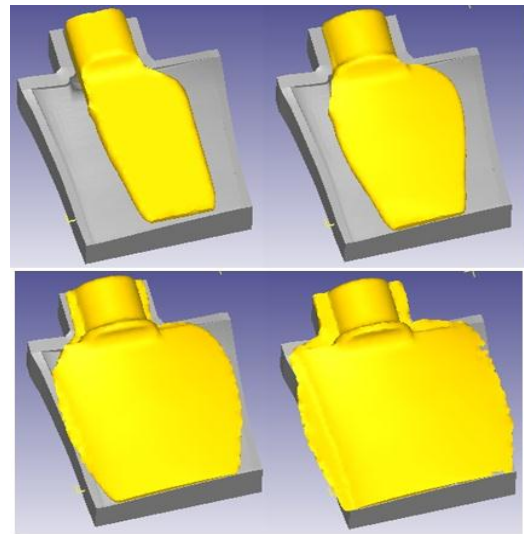
مراحل پیش‌فرم بررسی شد و شرایط و ابعاد مناسب به دست آمد. با این حال مرحله نهایی که مهمترین و پیچیده‌ترین گام در رسیدن به قطعه کار فورج می‌باشد، هنوز به طور کامل بررسی نشده و شرایط بهینه به دست نیامده است.

برای به دست آوردن شرایط مناسب مرحله نهایی، یک سری شبیه‌سازی در شرایط مختلف انجام شد. این شبیه‌سازی‌ها به تعداد ۲۷ مورد و به صورت فول فاکتوریل<sup>۱</sup> انجام شد. برای دمای قالب سه سطح ۳۸۰، ۴۰۰ و ۴۲۰°C در نظر گرفته شد.

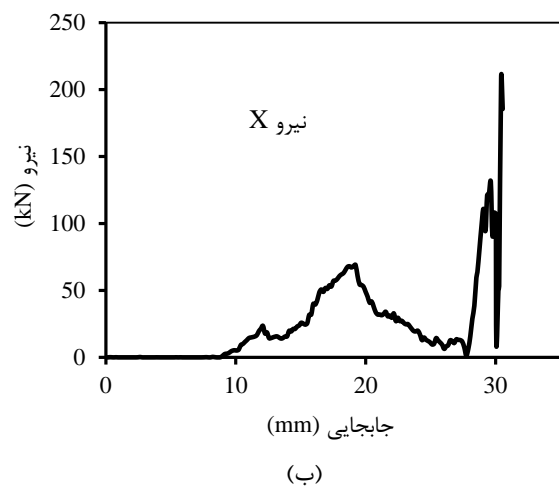
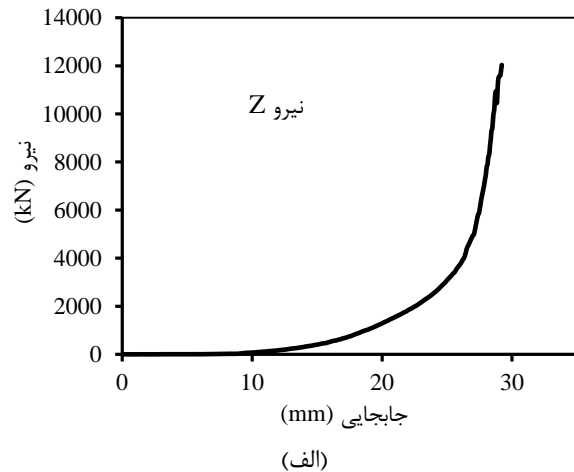
دمای قالب نزدیک به دمای قطعه کار انتخاب می‌شود تا سردشوندگی حاصل از قالب کاهش یابد. برای اینکه سختی قالب پایین نیاید دما تا حد امکان پایین نگه داشته می‌شود. سختی قالب H13 در دماهای بالاتر از ۴۲۵°C به شدت کاهش می‌یابد [۲۱،۱۶]. به این ترتیب دمای قالب بیشینه ۴۲۰°C انتخاب شد.



شکل ۱۶ مراحل تغییرشکل از یک بیلت خام تا قطعه نهایی



شکل ۱۴ مراحل تغییرشکل بعد از اعمال تغییرات



شکل ۱۵ نیروهای وارد بر قالب بالایی بعد از تغییر زاویه سطح جدایش الف- نیروی عمودی ب- نیروی افقی

1. Full Factorial



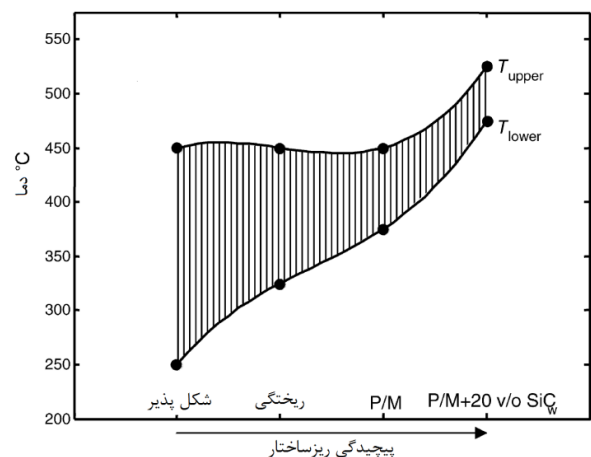
همان طور که در شکل مشاهده می‌شود بازه دمایی  $250-450^{\circ}\text{C}$  یک بازه ایمن برای فورج آلومینیم ۲۰۲۴ می‌باشد. قطعات شکل‌داده شده در این بازه دارای دانه‌های ریز می‌باشند [۱۹، ۱۷]. به این ترتیب برای به دست آوردن ریزساختار ریز و همچنین نیروی شکل‌دهی کمتر برای دمای قطعه‌کار سه سطح ۴۲۰، ۴۳۵ و  $450^{\circ}\text{C}$  در نظر گرفته شده است. سرعت پرس که از نوع هیدرولیک می‌باشد با توجه به ویژگی این پرس‌ها در سه سطح ۰/۵، ۱ و ۲ (mm/s) انتخاب شد. مقادیر ضریب اصطکاک با توجه به نتایج آزمایش‌های حلقه و با استفاده از میانمایی به صورت نشان داده شده در جدول ۲ انتخاب شد. پارامترهای مشخص شده برای شبیه‌سازی‌های ذکر شده در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲ پارامترهای مشخص شده برای طراحی شبیه‌سازی

ردیف	سرعت پرس دمای قطعه‌کار (mm/s)	دمای قالب (°C)	ضریب اصطکاک (m)
۱	۰/۵	۴۲۰	۰/۲۷
۲	۱	۴۲۰	۰/۲۷
۳	۲	۴۲۰	۰/۲۷
۴	۰/۵	۴۳۵	۰/۲۷
۵	۱	۴۳۵	۰/۲۷
۶	۲	۴۳۵	۰/۲۷
۷	۰/۵	۴۵۰	۰/۲۷
۸	۱	۴۵۰	۰/۲۷
۹	۲	۴۵۰	۰/۲۷
۱۰	۰/۵	۴۲۰	۰/۲۷
۱۱	۱	۴۲۰	۰/۲۷
۱۲	۲	۴۲۰	۰/۲۷
۱۳	۰/۵	۴۳۵	۰/۲۷
۱۴	۱	۴۳۵	۰/۲۷
۱۵	۲	۴۳۵	۰/۲۷
۱۶	۰/۵	۴۵۰	۰/۲۷
۱۷	۱	۴۵۰	۰/۲۷
۱۸	۲	۴۵۰	۰/۲۷
۱۹	۰/۵	۴۲۰	۰/۲۵
۲۰	۱	۴۲۰	۰/۲۵
۲۱	۲	۴۲۰	۰/۲۵
۲۲	۰/۵	۴۳۵	۰/۲۵
۲۳	۱	۴۳۵	۰/۲۵
۲۴	۲	۴۳۵	۰/۲۵
۲۵	۰/۵	۴۵۰	۰/۲۵
۲۶	۱	۴۵۰	۰/۲۵
۲۷	۲	۴۵۰	۰/۲۵

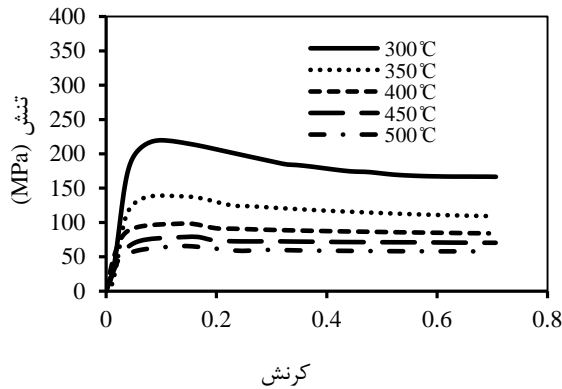
چارپنتیر و همکاران (۱۹۸۶) بررسی‌های گسترده‌ای روی رفتار سیلان تحت فشار آلومینیم ۲۰۲۴ شکل‌پذیر در محدوده دمایی  $145-482^{\circ}\text{C}$  و محدوده نرخ کرنش  $10^{-3}-12/5\text{ S}^{-1}$  انجام دادند. آنها گزارش کردند که آلومینیم ۲۰۲۴ شکل‌پذیر در دماهای بالای  $250^{\circ}\text{C}$  بر اثر بازیابی دینامیکی، کارنرمی<sup>۱</sup> نشان می‌دهد و مقادیر انرژی فعال سازی ظاهری در محدوده  $90-200\text{ kJ mol}^{-1}$  می‌باشد. ریزساختار نمونه‌های شکل داده شده در دمای  $425^{\circ}\text{C}$  وجود دانه‌های هم‌محور ریز در نزدیکی ذرات (Cu, Al) و تعداد زیادی جوانه را نشان می‌دهد که بیان‌کننده تبلور مجدد دینامیکی / استاتیکی در این دما می‌باشد. در دماهای بالای  $482^{\circ}\text{C}$ ، انحلال رسوب، ساختار نواری و رشد دانه غیر عادی ثبت شده است که نشان‌دهنده ناپایداری ریزساختاری می‌باشد. بنابراین آلومینیم ۲۰۲۴ شکل-پذیر می‌تواند در محدوده دمایی  $250-450^{\circ}\text{C}$  و محدوده نرخ کرنش  $10^{-3}-12/5\text{ S}^{-1}$  به طور ایده‌آل شکل داده شود [۱۷].

ملاس و همکاران (۲۰۰۴) رفتار تغییر شکل داغ آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ به شکل‌های مختلف را بررسی و با نتایج حالت شکل‌پذیر آن که چارپنتیر و همکاران (۱۹۸۶) انجام دادند، مقایسه کردند. بررسی‌ها در دماها و نرخ کرنش‌های مختلف انجام شد و نقشه فرایند برای هر کدام به دست آمد. با مقایسه نقشه فرایند بازه دمایی شکل‌دهی داغ امن برای هر کدام مشخص شد. این بازه در شکل ۱۷ نشان داده شده است [۱۸].



شکل ۱۷ تأثیر پیچیدگی ریزساختار بر روی ناحیه امن تغییر شکل داغ برای آلومینیم ۲۰۲۴ [۱۸]

## 1. Work Softening



شکل ۲۰ منحنی‌های تنش-کرنش در نرخ کرنش ۰/۵

با افزایش نرخ کرنش، تنش سیلان ماده بالا می‌رود. همچنین تأثیر نرخ کرنش در تنش سیلان ماده با افزایش دمای نمونه افزایش می‌یابد. در نتیجه نیروی لازم برای فورج با کاهش نرخ کرنش کاهش می‌یابد و این کاهش نیرو در دماهای بالاتر شدیدتر است. در نرخ کرنش‌های زیاد ( $0.5 S^{-1}$ ) بدون توجه به دما کار نرمی در ماده صورت می‌گیرد.

نمودارهای تنش-کرنش حقیقی به دست آمده ورودی نرم‌افزار المان محدود به عنوان خواص مکانیکی ماده می‌باشد.

#### ۵-۲- آزمایشات حلقه

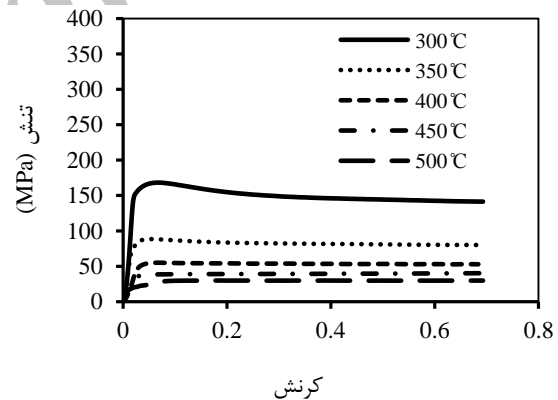
منحنی‌های کالیبراسیون در دماهای مورد بررسی رسم گردید. این منحنی‌ها برای دمای  $400^{\circ}C$  در شکل ۲۱ نشان داده شده است. در کاهش‌های کم، قطر داخلی حلقه آزمایش اندکی بزرگتر از نتایج شبیه‌سازی به دست آمد. این پدیده در اثر زیاد بودن روان‌کار در ابتدای فرایند است که با افزایش تغییرشکل و گسترش سطح نمونه، مقدار روان‌کار روی سطح کاهش می‌یابد. با توجه به نمودارها، نتایج آزمایش‌های حلقه برای فاکتور اصطکاکی به دست آمد که در جدول ۳ نشان داده شده است. مقادیر به دست آمده برای فاکتور اصطکاکی یک افت اندک در دمای  $450^{\circ}C$  نسبت به  $350^{\circ}C$  و  $400^{\circ}C$  نشان می‌دهد که دلیل بهبود خواص روان‌کاری گرافیت می‌باشد؛ ولی با افزایش دما تا  $500^{\circ}C$  افزایش می‌یابد که به دلیل افت خواص روان‌کاری گرافیت در دماهای بالاتر از  $450^{\circ}C$  می‌باشد. کیفیت سطح نمونه‌ها در  $500^{\circ}C$  نیز شدیداً پایین آمده است؛ لذا این عامل نیز می‌تواند شرایط اصطکاکی را تحت تأثیر قرار دهد و دلیل دیگری برای افزایش اصطکاک در این دما باشد.

در شبیه‌سازی‌ها، المان‌ها به شکل هرمی چهار وجهی بوده و بدین ترتیب استفاده از قابلیت مش‌بندی مجدد نرم‌افزار برای این فرایند که میزان تغییرشکل و اعوجاج المان‌ها در آن زیاد است امکان‌پذیر می‌باشد. نسبت اندازه (نسبت اندازه بزرگترین المان به کوچک‌ترین) ۲ انتخاب شد. تعداد المان‌ها با چند نمونه شبیه‌سازی آزمایشی ۳۰۰۰۰ انتخاب گردید.

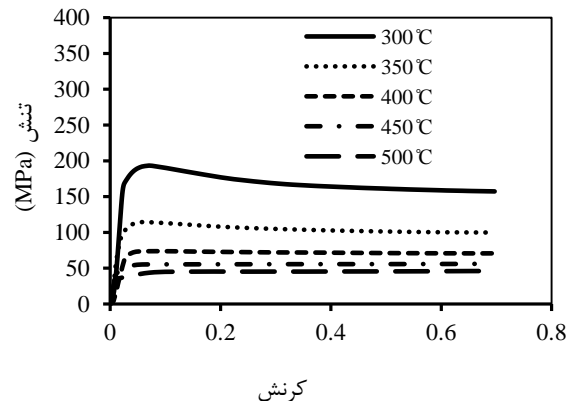
#### ۵- بحث و نتیجه‌گیری

##### ۵-۱- منحنی‌های تنش-کرنش

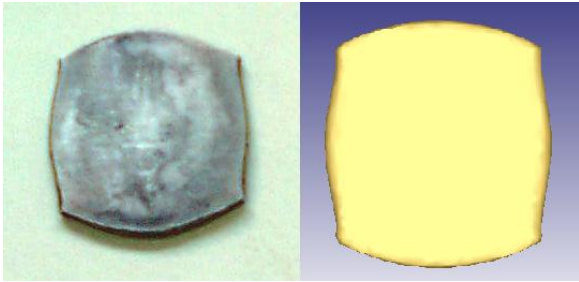
شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ نمودارهای تنش-کرنش حقیقی را در هر یک از نرخ کرنش‌های  $0.1 S^{-1}$  تا  $0.5 S^{-1}$  و دماهای مختلف نشان می‌دهند. دیده می‌شود که در هر کدام از این نرخ کرنش‌ها با افزایش دمای  $100^{\circ}C$  تنش سیلان تقریباً نصف می‌شود که نشان دهنده تأثیر زیاد دمای فورج در میزان نیروی لازم برای شکل دهی و نیز قابلیت فورج ماده می‌باشد.



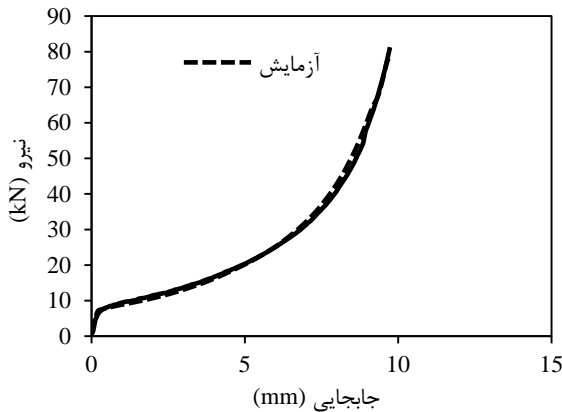
شکل ۱۸ منحنی‌های تنش-کرنش در نرخ کرنش ۰/۱



شکل ۱۹ منحنی‌های تنش-کرنش در نرخ کرنش ۰/۱



شکل ۲۲ نمونه بعد از تغییر شکل، شبیه‌سازی و آزمایش



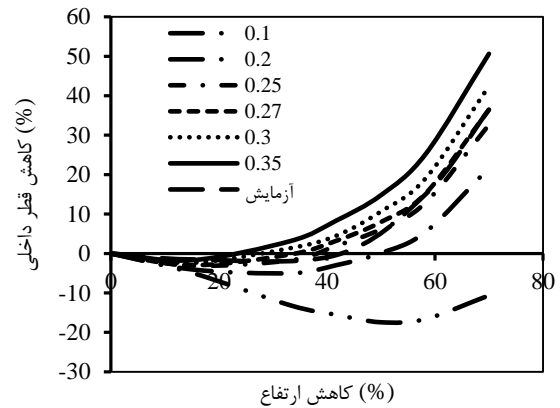
شکل ۲۳ نتایج نیرو-جابجایی شبیه‌سازی و آزمایش

منحنی‌ها در ابتدا، تقریباً بر هم منطبق می‌باشند و با پیشرفت فرایند نیروی حاصل از شبیه‌سازی اندکی کمتر از مقدار واقعی آن است که عواملی نظیر مش‌بندی مجدد می‌تواند دلیل آن باشد. سپس در انتهای کورس دو منحنی مجدداً بر هم منطبق‌اند. دلیل این امر این است که شرایط تغییر شکل کاملاً کنترل شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی‌ها با آزمایش‌های عملی تطابق بسیار خوبی نشان می‌دهد که بیان‌کننده دقت بالای آزمایش‌ها، پارامترهای انتخاب شده و قابلیت اطمینان تحلیل المان محدود می‌باشد.

#### ۴-۵- نتایج شبیه‌سازی‌های مرحله نهایی فورج

##### ۴-۵-۱- نیرو

نتایج شبیه‌سازی برای نیرو در شکل ۲۴ نشان داده شده است. در شکل ۲۴- الف تغییرات نیروی فورج با دمای قالب را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نیروی فورج با افزایش دمای قالب کاهش می‌یابد. دلیل این امر این است که دمای قطعه کار در اثر تماس با قالب سردتر، کاهش می‌یابد و تنش سیلان آن افزایش می‌یابد.

شکل ۲۱ منحنی‌های کالیبراسیون،  $400^{\circ}\text{C}$  ( $0.35/0.1^{\circ}\text{C}$ ) ( $m=$ 

#### جدول ۳ فاکتور اصطکاکی به دست آمده از آزمایش‌های حلقه

فاکتور اصطکاکی	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰	۵۰۰
دما ( $^{\circ}\text{C}$ )	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲۲	۰/۴۷

#### ۵-۳- پرس جانبی استوانه

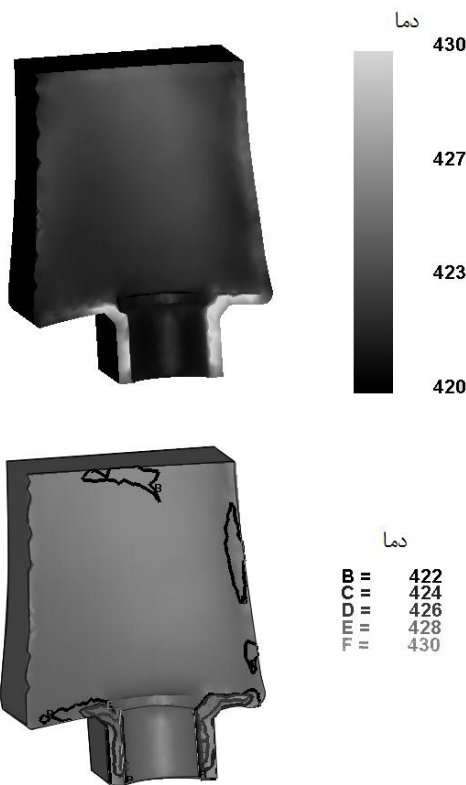
برای این که صحت آزمایش‌های انجام شده و شبیه‌سازی‌های عددی ارزیابی شود، نتایج به دست آمده باید بررسی شود. با توجه به این که تغییر شکل در سطح مقطع‌های یک پره در فرایند فورج همانند فرایند سطح افزایشی استوانه است [۳]، لذا با توجه به مناسب بودن فرایند پرس جانبی و هزینه‌های کم آن نسبت به آزمایش نمونه واقعی، برای ارزیابی از این فرایند استفاده شد. در این آزمایش قطعه‌کار تا ضخامت ۲ mm کاهش داده شد. ابعاد نمونه سطح افزایشی جانبی همانند نمونه فشار انتخاب شد با این تفاوت که شیارهای دو انتهای نمونه ایجاد نشده است. دمای تغییر شکل  $430^{\circ}\text{C}$  انتخاب شد که یک دمای معمول برای فورج آلیاژ مورد نظر می‌باشد. برای روان‌کاری نیز مانند آزمایش‌های پیشین از گرافیت محلول در روغن استفاده شد. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار دیفرم تری‌دی استفاده شد که در ادامه نیز از این نرم‌افزار استفاده خواهد شد. ضریب اصطکاک با توجه به نتایج آزمایش‌های حلقه برای این دما ۰/۲۴ انتخاب شد. خواص حرارتی و الاستیکی ماده از طریق استانداردها به دست آمد [۲۰-۲۲].

در شکل ۲۲ نمونه سطح افزایشی شده حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی آمده است. شکل ظاهری نمونه برای دو حالت کاملاً مشابه هم است. شکل ۲۳ نتایج نیرو-جابجایی آزمایش و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

درحالتی که  $420^{\circ}\text{C}$  = دمای قالب،  $450^{\circ}\text{C}$  = دمای قطعه و  $0.5$  (mm/s) = سرعت، کمترین مقدار می‌شود. نیرو برای شرایط مشابه و دمای قطعه کار  $435^{\circ}\text{C}$  بسیار نزدیک به آن است. نیروی فورج برای این حالت، تنها حدود ۱۰ تن بیشتر از حالت مشابه با دمای قطعه کار  $450^{\circ}\text{C}$  است.

#### ۵-۴-۲- دمای قالب

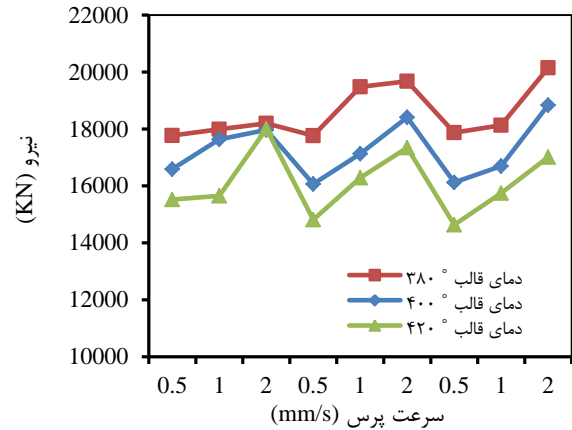
شکل ۲۵ توزیع دمای قالب را برای  $420^{\circ}\text{C}$  = دمای قالب،  $450^{\circ}\text{C}$  = دمای قطعه و  $0.5$  (mm/s) = سرعت و شکل ۲۶ توزیع دمای قالب را برای حالت مشابه با دمای قطعه کار  $435^{\circ}\text{C}$  نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲۵ مشاهده می‌شود که دما در قالب چندان بالا نمی‌رود و در بیشتر نقاط حدود  $422^{\circ}\text{C}$  است. در کانال پلیسه دما اندکی افزایش دارد و به  $430^{\circ}\text{C}$  می‌رسد. این مقدار با توجه به تعداد تولید کم، منطقی است.



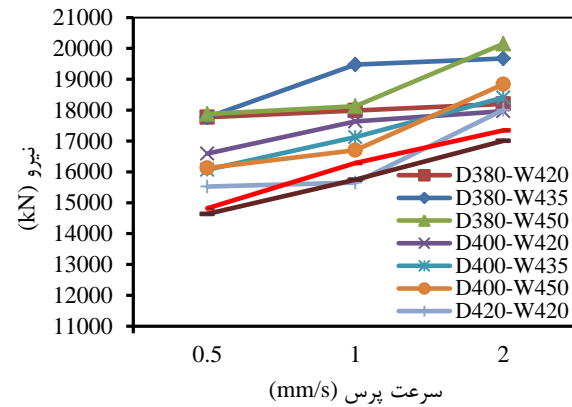
شکل ۲۵ توزیع دما در قالب -  $420^{\circ}\text{C}$  = دمای قالب،

$450^{\circ}\text{C}$  = دمای قطعه کار و  $0.5$  (mm/s) = سرعت پرس

همان طور که در شکل ۲۶ دیده می‌شود توزیع دما مانند حالت قبل است. دما در بیشتر نقاط قالب حدود  $421^{\circ}\text{C}$  است. در نواحی کانال پلیسه اندکی افزایش می‌یابد و به  $425^{\circ}\text{C}$



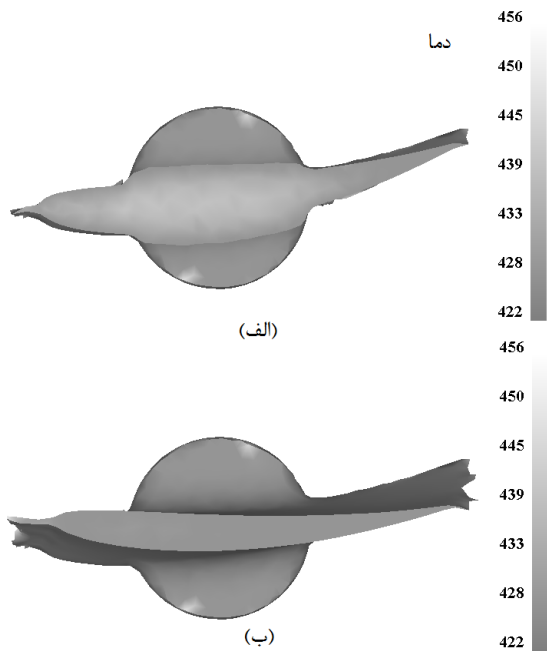
(الف)



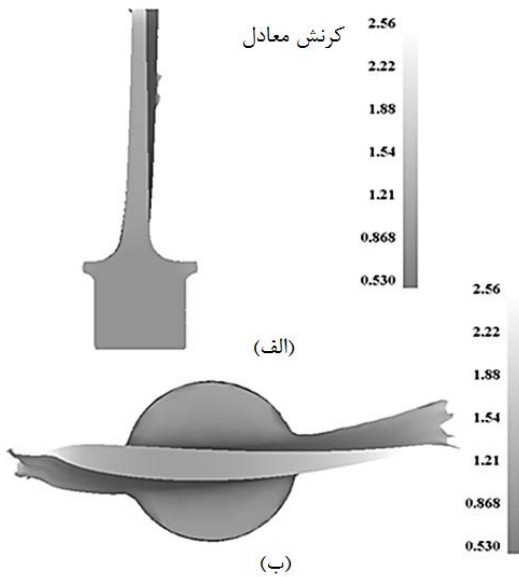
(ب)

شکل ۲۴ الف- تغییرات نیروی فورج با دمای قالب ب- تغییرات نیروی فورج با دمای قطعه کار و قالب و تغییرات سرعت رم پرس (قالب =  $D$ ) و (قطعه کار =  $W$ )

به طور کلی با افزایش سرعت، نیروی فورج افزایش می‌یابد و این به دلیل افزایش تنش سیلان با افزایش نرخ کرنش است. در حالتی که دمای قالب  $380^{\circ}\text{C}$  و دمای قطعه  $420^{\circ}\text{C}$  است نیروی فورج با افزایش سرعت تغییر چندانی نمی‌کند. زیرا در این حالت زمان تماس قالب و قطعه کمتر و کاهش دمای قطعه کار کاهش می‌یابد و نیز حساسیت تنش سیلان به افزایش نرخ کرنش کمتر از دماهای بالاتر مانند  $450^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. تأثیرات متقابل این دو عامل باعث می‌شود که نیروی شکل دهی تغییرات چندانی نداشته باشد. دمای قطعه کار تأثیر مشخصی روی نیروی فورج ندارد. زیرا با این که با افزایش دما تنش سیلان ماده کاهش می‌یابد ولی حساسیت به نرخ کرنش نیز بیشتر می‌شود و همچنین غیریکنواختی توزیع کرنش را در تماس با قالب سردتر افزایش می‌دهد. این پدیده در دماهای پایین‌تر قالب واضح‌تر می‌باشد. با توجه به شکل ۲۴- ب نیرو



شکل ۲۷ توزیع دما در پره -  $435^{\circ}\text{C}$  = دمای قطعه کار الف- محل اتصال ریشه به بدنه ب- سطح مقطع بدنه پره



شکل ۲۸ توزیع کرنش در پره -  $450^{\circ}\text{C}$  = دمای قطعه کار الف- سطح مقطع طولی و مرکز ب- سطح مقطع بدنه پره

#### ۵-۴-۴- توزیع کرنش

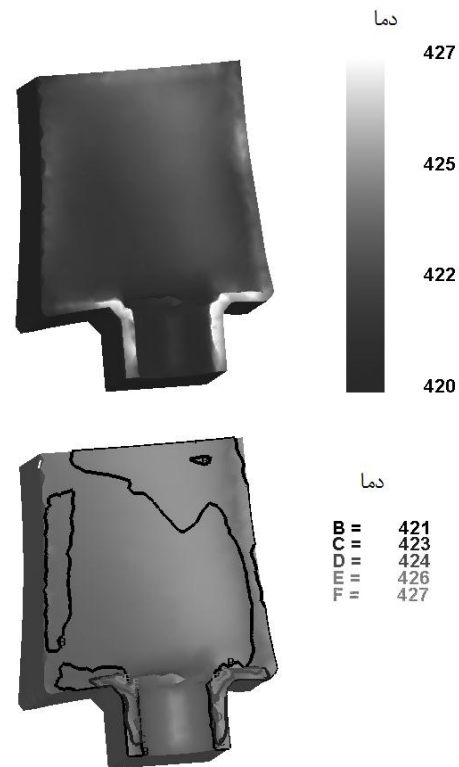
شکل ۲۸ توزیع کرنش قطعه کار با دمای پیش گرم  $450^{\circ}\text{C}$  را نشان می‌دهد. کرنش با دور شدن از محور قطعه کار افزایش می‌یابد و در قسمت کانال پلیسه بیشترین مقدار را دارد. در داخل قطعه کار بیشترین مقدار کرنش معادل برابر با  $1/97$  است. در قسمت حساس اتصال ریشه به بدنه، کرنش کم و برابر

می‌رسد که اندکی بهتر از حالت قبل می‌باشد. بیشترین دما در کانال پلیسه و محل اتصال ریشه پره به بدنه است که به دلیل جریان زیاد ماده و فشار بالای کانال پلیسه است.

#### ۵-۴-۳- دمای قطعه کار

شکل ۲۷ توزیع دما را در قطعه کار با دمای پیش گرم  $435^{\circ}\text{C}$  نشان می‌دهد. دمای سطح قطعه کار همانند قالب در بیشتر نقاط  $421^{\circ}\text{C}$  است. در بدنه پره به دلیل این که ضخامت آن بسیار کم و ضریب هدایت حرارتی آلومینیم بالاست و تغییر شکل با سرعت کمی انجام می‌شود، دما افت کرده و همدمای با سطح پره است (شکل ۲۷-ب). در قسمت ریشه پره و محل اتصال آن با بدنه که ضخامت زیاد است، دما در مرکز قطعه کار بالاست و حتی در مرکز ریشه به دمای اولیه  $435^{\circ}\text{C}$  می‌رسد (شکل ۲۷-الف).

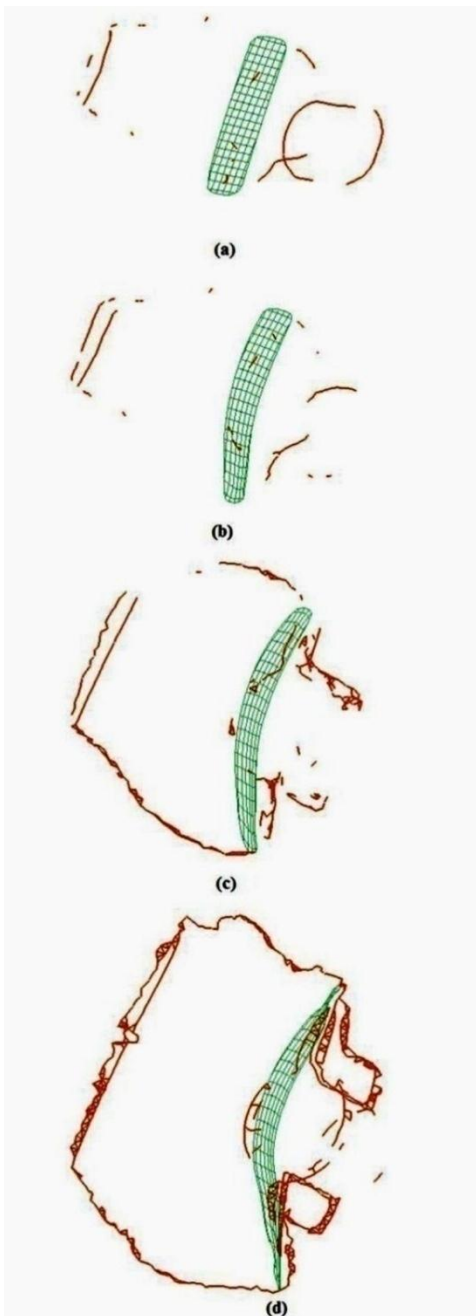
بنابراین دما در فرایند فورج نهایی پره بالا نمی‌رود و شرایط مناسبی برای تغییر شکل وجود دارد. برای فورج با دمای پیش گرم  $450^{\circ}\text{C}$  نیز روند به این ترتیب است با این تفاوت که دمای بیشینه پره به دمای اولیه  $450^{\circ}\text{C}$  می‌رسد.



شکل ۲۶ توزیع دما در قالب -  $420^{\circ}\text{C}$  = دمای قالب،  $435^{\circ}\text{C}$  = دمای قطعه کار و  $0/5$  (mm/s) = سرعت پرس

سطوح متقاطع زیاد و تغییر ضخامت‌ها قابل توجه است و ماده می‌تواند در جهات و سرعت‌های مختلف جریان پیدا کند. شکل ۳۰ تغییر شکل شبکه ماده این ناحیه را نشان می‌دهد.

شبکه ماده تقریباً در یک صفحه تغییر شکل پیدا می‌کند، یعنی جریان در طول پره وجود ندارد و ماده به صورت عرضی گسترش می‌یابد و ایرادهای جریانی در آن شکل نمی‌گیرد. دلیل این امر مناسب بودن پیش‌فرم و همچنین جایگیری آن در قالب نهایی است.

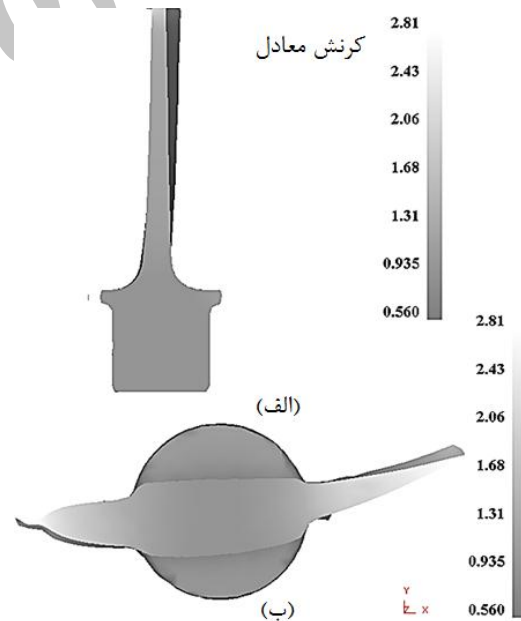


شکل ۳۰ تغییر شکل شبکه ماده در محل اتصال ریشه به بدنه

با ۰/۵۵ است (شکل ۲۸-ب). کرنش در اینجا به خاطر این که در مرحله پیش‌فرم تغییر شکل مناسبی داشته و شعاع آن به شعاع قطعه‌کار نهایی نزدیک شده، کاهش یافته است.

شکل ۲۹ توزیع کرنش قطعه‌کار با دمای پیش‌گرم  $435^{\circ}\text{C}$  را نشان می‌دهد. الگوی توزیع کرنش در اینجا همانند حالت قطعه‌کار با دمای پیش‌گرم  $450^{\circ}\text{C}$  است با این تفاوت که کرنش‌ها اندکی کمتر و در بیشترین حالت در داخل قطعه‌کار به  $1/85$  می‌رسد. بنابراین دمای  $435^{\circ}\text{C}$  توزیع کرنش بهتری به دست می‌دهد. دلیل این امر این است که در این حالت اختلاف دمای قطعه‌کار و قالب کمتر است و سردشوندگی ناشی از قالب کمتر و در نتیجه گرادیان توزیع کرنش کمتر می‌شود.

با در نظر گرفتن نیروها، دمای قالب و توزیع کرنش،  $420^{\circ}\text{C}$  = دمای قالب،  $435^{\circ}\text{C}$  = دمای قطعه‌کار و  $0/5$  (mm/s) = سرعت بهترین حالت را دارد. با در نظر گرفتن تغییرات دمای بیلت،  $435 - 450^{\circ}\text{C}$  یک بازه دمایی بهینه برای فورج پره ژنراتور زیمنس می‌باشد.



شکل ۲۹ توزیع کرنش در قطعه‌کار -  $435^{\circ}\text{C}$  = دمای قطعه‌کار  
الف- سطح مقطع طولی ب- سطح مقطع بدنه پره

#### ۵-۴-۵- جریان ماده

در فرایند فورج قطعات پیچیده، عیوب جریانی مختلفی ایجاد می‌شود و کیفیت قطعات تولیدی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ناحیه اتصال ریشه به بدنه پره حساسیت زیادی دارد و بحرانی‌ترین ناحیه آن محسوب می‌شود، چرا که در این ناحیه

- [8] Mei Z., Yuli L., He Y., "Influence of the Shape and Position of the Preform in the Precision Forging of a Compressor Blade", *J. Mat. Pro. Tech.*, Vol. 120, Issues 1-3, 2002, pp. 80-83
- [9] Yanqiu Z., Debin S., Fuchang X., "Flow Lines Control of Disk Structure with Complex Shape in Isothermal Precision Forging", *J. Mat. Pro. Tech.*, 2009, pp. 745-753.
- [10] Cheng L., Liwen Z., Zhengjun M., Qingan T., Quying Z., "3D FEM Simulation of Multi-Stage Forging Process of a Turbine Compressor Blade", *J. Mat. Pro. Tech.*, 2008, pp. 463-470.
- [11] Ou H., Wang P., Lu B., Long H., "Finite Element Modeling and Optimization of Net-Shape Metal Forming Processes with Uncertainties", *Computers & Structures*, Vol. 90-91, 2012, pp. 13-27.
- [12] M.H. Sadeghi, A. Khosravi, Parametric design, mold design and manufacture of precision forging gear pinion 405 using CAD / CAM, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol.8, 2008, (In Persian)
- [13] Y. Parseh, M.H. Sadeghi, Numerical simulation and physical modeling to produce a piece of walnut Pλους by using a precise forging process, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol.8, 2010, (In Persian)
- [14] R. Saeedi, M. H. Sadeghi, Multistage Forging of Al-2024 Alloy Siemens Generator Fan Blade, 3<sup>rd</sup> conferences of rotating equipment in oil and power industries, Tehran, 2011. (In Persian)
- [15] He Y., Mei Z., Yuli L., "A Study of Influence of Friction Conditions on the Forging Process of a Blade with Tenon", *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, pp. 42-46.
- [16] Petrov P., Perfilov V., Stebunov S., "Prevention of Lap Formation in Near Net Shape Isothermal Forging Technology of Part of Irregular Shape Made of Aluminium Alloy A92618", *J. Mat. Pro. Tech.* 2006, pp. 218-223.
- [17] Charpentier P.L., Stone B.C., Ernst S.C., Thomas J.F., "Characterization and Modeling of the High Temperature Flow Behavior of Al 2024", *Metall. Trans.*, 1986, Vol. 17A, pp. 22-27.
- [18] Malas J.C., Venugopal S., Seshacharyulu T., "Effect of Microstructural Complexity on the Hot Deformation Behavior of Aluminum 2024", *Materials Science and Engineering*, A368 2004, pp. 41-47
- [19] Totten G., Mackenzie D., *Handbook of Aluminum Vol.1 Metallurgy and Processes*, MARCEL DEKKER, INC., 2003.
- [20] *ASM Metals Handbook*, Vol. 14 Forming and Forging, ASM international, 1993.
- [21] M.H. Hojati, M. Bakhshi, J. Hosseini-pour, *Fundamentals of hot and cold forging application*, Mazandaran University, 2006. (In Persian)
- [22] *ASM Metals Handbook*, Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, 1993.

## ۶- جمع‌بندی

- ۱- منحنی‌های تنش- کرنش حقیقی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ مورد استفاده، در بازه دمایی ۳۰۰ تا ۵۰۰ °C و نرخ کرنش های ۰/۰۱، ۰/۱ و ۰/۵ (S<sup>-1</sup>) به دست آمد.
- ۲- با استفاده از آزمایش‌های حلقه و فشار، فاکتور اصطکاکی در دماهای ۵۰۰، ۴۵۰، ۴۰۰ و ۳۵۰ °C بترتیب برابر با ۰/۴۷، ۰/۲۲، ۰/۲۷ و ۰/۲۸ به دست آمد.
- ۳- تغییرات ابعادی و منحنی نیرو-جابجایی در شبیه‌سازی با نتایج نمونه تغییرشکل یافته اصلی در شرایط آزمایش پرس جانبی استوانه به عنوان آزمایش‌های صحه‌گذاری، کاملاً مشابه هستند.
- ۴- روش جدیدی برای کاهش نیروی جانبی قالب ارائه شد و با تغییر زاویه سطح جدایش، حالت ایده‌ال به دست آمد و نیروی جانبی تقریباً حذف شد.
- ۵- مراحل تغییرشکل پره از بیلت خام تا پره نهایی با کمترین پیش‌فرم ممکن، طراحی و شبیه‌سازی شد.
- ۶- شرایط بهینه فورج هم‌دمای پره فن ژنراتور زیمنس با ۴۲۰ °C = دمای قالب، ۴۵۰ °C - ۴۳۵ °C = دمای قطعه‌کار و ۰/۵ (mm/s) = سرعت پرس، تعیین و پارامترهای خروجی بررسی شد.

## ۷- مراجع

- [1] Grass H., Kremaszky C., Werner E., "3-D FEM-Simulation of Hot Forming Processes for the Production of a Connecting Rod", *Computational Materials Science*, 2006, Vol. 36, pp. 480-489.
- [2] Vazquez V., Altan T., "Die Design for Flashless Forging of Complex Parts", *J. of Materials Processing Technology*, 2000, Vol. 98, pp. 81-89.
- [3] Cheng L., Liwen Z., Zhengjun M., Qingan T., Quying Z., "3D FEM Simulation of the Multi-Stage Forging Process of a Gas Turbine Compressor Blade", *J. of Materials Processing Technology*, 2008, Vol. 198, pp. 463-470.
- [4] Liu Y., Du K., Zhan M., Yang H., Zhang F., "Physical Modeling of Blade Forging", *J. of Materials Processing Technology*, 2000, pp. 141-144
- [5] Park J., Hwang H., "Preform Design for Precision Forging of an Asymmetric Rib-Web Type Component", *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, Vol. 187-188, pp. 595-599
- [6] Beom-Soo K., Naksoo K., Kobavas S., "Computer-Aided Preform Design of An Airfoil Section Blade", *J. Mach. Tools Manufact.*, 1990, pp. 43-52
- [7] Ou H., Balendra R., "Preform Design for Forging of Aerofoil Sections Using FE Simulation", *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 80-81, 1 August 1998, pp. 144-148