



## بهینه‌سازی شکلی قالب‌های پیش‌فرم در فرآیند آهنگری دقیق دو مرحله‌ای

سعید مجیدی<sup>۱</sup>، مهرداد پورسینا<sup>۲</sup> و فرهاد حاجی ابوطالبی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۴/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۲۵

### چکیده

در فرآیند آهنگری، هندسه قالب پیش‌فرم، نقش مهمی در کیفیت قطعه آهنگری شده و کاهش هزینه تولید دارد. پرنشیدن کامل قالب، چروکیدگی، خواص متالورژیکی غیریکنواخت و ایجاد پلیسه زیاد و نامناسب، مهم‌ترین معایب در فرآیند آهنگری می‌باشند که با طراحی مناسب قالب پیش‌فرم می‌توانند از بین رفته یا کاهش یابند. در این تحقیق، بهینه‌سازی شکل قالب پیش‌فرم در فرآیند آهنگری دو مرحله‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، کدهای شبیه‌سازی فرآیند آهنگری به زبان پایتون در نرم‌افزار ABAQUS اجرا گردیده و برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک با شیوه نخبه‌گرا که در نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شده، استفاده می‌گردد. برای صحت سنجی روش فوق دو مثال حل می‌شود. در مثال اول، آهنگری سرد یک سیلندر توخالی آلومینیومی در یک مرحله، باعث ایجاد پدیده چروکیدگی در سطح داخلی آن می‌شود. جهت حذف پدیده چروکیدگی، آهنگری در دو مرحله انجام گردیده و شکل قالب پیش‌فرم در مرحله اول به گونه‌ای تعیین می‌شود که عیب چروکیدگی برطرف گردد. در مثال دوم، با تغییر شکل قالب پیش‌فرم، پلیسه ایجاد شده در تولید دنده متحرک سه و چهار خودرو پژو از مقدار ۱۳/۹٪ به ۳/۵٪ کاهش می‌یابد. برای اعتبارسنجی نتایج بهینه‌سازی، دنده مذکور در شرکت آهنگری خودرو با قالب پیش‌فرم بهینه آهنگری شد و صحت نتایج تایید گردید.

**کلمات کلیدی:** فرآیند آهنگری؛ بهینه‌سازی؛ الگوریتم ژنتیک؛ روش اجزاء محدود.

## Shape optimization of preform dies in two-stage near net forging process

S. Majidi<sup>1</sup>, M. Poursina<sup>2</sup>, F. Haji Aboutalebi<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> Msc., Mech. Eng., Univ. Isfahan, Isfahan, Iran

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng. Dept., Univ. Isfahan, Isfahan, Iran

<sup>3</sup> Assist. Prof., Mech. Eng. Dept., Univ. Isfahan, Isfahan, Iran

### Abstract

In a forging process, geometry of preform die plays an important role in the quality of forging part and decreasing the cost of production. Incomplete die filling, folding, nonhomogeneous metallurgical properties, improper and large amount of flash are the most important defects in the forging process which can be reduced or eliminated with a proper preform die. In this research, shape optimizing of preform die in the two-stage forging process is investigated. For this purpose, PYTHON simulation codes of forging process are run in the ABAQUS software and the genetic algorithm supported by an elitist strategy which is developed in the MATLAB software is used for the optimization. To verify the above method, two examples are studied. In the first example, cold forging of a hollow aluminum cylinder in a single stage, leads to the folding defect in its inner surface. In order to omit the folding defect, the forging process is carried out in two stages and the preform die shape is determined so that the folding defect is removed. In the second example, with changing the shape of preform die, the amount of flash is reduced from 13.9% to 3.5% in forging of a sliding cluster gear 3 and 4 of Peugeot 405 vehicle. For validation of the optimization results, the mentioned gear was forged in Ahangari company by optimum preform die and accuracy of the results was confirmed.

**Keywords:** Forging process; Optimization; Genetic algorithm; Finite element method.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۳۱۳۷۹۳۴۱۱۰؛ فکس: ۰۳۱۱۷۹۳۲۷۴۹

آدرس پست الکترونیک: [f.hajiboutalebi@eng.ui.ac.ir](mailto:f.hajiboutalebi@eng.ui.ac.ir)

## ۱- مقدمه

فرآیند آهنگری یکی از قدیمی‌ترین روش‌های شکل‌دهی است که به علت ایجاد دانه‌بندی ریز و بدون حفره، خواص یکنواخت و افزایش استحکام قطعه تولیدی در مقایسه با فرآیندهای ریخته‌گری و ماشین کاری، مورد توجه روز افزون محققان و تولیدکنندگان قرار گرفته است. این فرآیند نقش به‌سزایی در صنعت، به خصوص در صنایع خودروسازی داشته و به همین منظور روش‌های بهینه‌سازی در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

قطعات تولید شده به روش آهنگری، حدود ۴۰٪ وزن اتومبیل‌های مدرن و ۸۰٪ وزن هواپیماهای مسافربری را تشکیل می‌دهند [۱]. در تولید شاتون خودرو به روش آهنگری، ۲۰٪ تا ۴۰٪ ماده اولیه به عنوان پلیسه هدر می‌رود. در سال ۲۰۰۰، وازکوئز<sup>۱</sup> و تایلان<sup>۲</sup> با استفاده از روش توزیع جرمی، آهنگری شاتون خودرو را با حذف پلیسه به انجام رساندند [۲]. هم چنین با طراحی یک قالب شش تکه دقیق و پیچیده، موفق به تولید مفصل یونیورسال با شیار جانبی به روش آهنگری بدون پلیسه شدند [۳]. در سال ۲۰۰۰ فقمه<sup>۳</sup> و ویلدنت<sup>۴</sup> بهینه‌سازی یک قطعه متقارن محوری را با استفاده از روش الگوریتم BFGS<sup>۵</sup> انجام دادند. تابع هدف ایشان پر شدن کامل قالب و جلوگیری از ایجاد چروکیدگی در قطعه بود [۴]. پورسینا و همکاران در سال ۲۰۰۴، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و روش اجزاء محدود، پدیده بشکهای شدن در آهنگری قالب باز یک قطعه استوانه‌ای شکل توپر را از بین بردند. در این بهینه‌سازی تابع هدف، شکل قالب پیش‌فرم و ضریب اصطکاک بود [۵]. در سال ۲۰۰۷، صدیقی و تکمه‌چی با ابداع یک الگوریتم جدید برای تولید یک قطعه مربوط به صنعت هوافضا و بهره‌گیری از روش اجزاء محدود موفق به کاهش پلیسه به میزان ۷/۳٪ شدند [۶].

در تولید میل‌لنگ خودرو، حدود ۴۵٪ از جرم ماده اولیه، به عنوان پلیسه هدر می‌رود. در سال ۲۰۰۹ برند<sup>۶</sup> و همکاران، با طراحی قالب‌های چندتکه، آهنگری میل‌لنگ دو سیلندری

را با حذف کامل پلیسه انجام دادند [۷]. در همین سال، هان<sup>۷</sup> و همکارش با استفاده از روش اجزاء محدود، فرآیند آهنگری چرخشی یک قطعه استوانه‌ای را مطالعه کرده و با الگوهای تماسی مختلف و کنترل کرنش پلاستیک معادل در قطعه تولیدی، آن را به صورت همگن آهنگری کردند [۸]. کاتارینا<sup>۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۰، با استفاده از الگوریتم ژنتیک آهنگری داغ چند مرحله‌ای را با چند تابع هدف بهینه‌سازی کردند [۹]. در سال ۲۰۱۱، خالد<sup>۹</sup> و همکاران، با مرتبط کردن نرم‌افزارهای SOLIDWORK و DEFORM و با تغییر شکل قطعه اولیه، آهنگری سرد قطعه پیش‌برنده زیردریایی را بهینه کرده و پلیسه ایجاد شده در تولید آن را از بین بردند [۱۰]. در این تحقیق، یک الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی ارائه شده که در آن معادلات تغییرشکل به روش اجزاء محدود حل گردیده و با استفاده از این روش، بهینه‌سازی شکل قالب پیش‌فرم در فرآیند آهنگری دو مرحله‌ای، برای دو قطعه بررسی شده است. جنبه نوآوری و متفاوت این مطالعه مرتبط کردن نرم‌افزارهای ABAQUS و MATLAB برای بهینه‌سازی شکل قالب بسته در فرآیند آهنگری می‌باشد.

## ۲- روش و پارامترهای بهینه‌سازی

هر مسئله بهینه‌سازی شامل قسمت‌های زیر است:

- ۱- متغیرهای بهینه‌سازی: با تغییر این پارامترها، مساله به شرایط بهینه می‌رسد. در فرآیند آهنگری هندسه قالب پیش‌فرم، ضریب اصطکاک، دمای قطعه، قالب و غیره می‌توانند متغیرهای طراحی باشند. در این تحقیق در مثال اول هندسه قالب پیش‌فرم و ضریب اصطکاک و در مثال دوم تنها هندسه قالب پیش‌فرم متغیرهای طراحی هستند.
- ۲- تابع هدف: یک مقدار اسکالر است که از نتایج تحلیل استخراج شده و باید کمینه یا بیشینه شود. در مثال اول، حذف پدیده چروکیدگی و در مثال دوم کاهش میزان پلیسه و پرشدن کامل قالب تابع هدف می‌باشند.
- ۳- قیود طراحی: در تمام فرآیندهای آهنگری نیروی پرس یک قید بر مسئله حاکم است. در آهنگری داغ، کاهش

<sup>1</sup> Vazquez

<sup>2</sup> Taylan

<sup>3</sup> Fourment

<sup>4</sup> Vielledent

<sup>5</sup> Brodyen-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS)

<sup>6</sup> Bernd

<sup>7</sup> Han

<sup>8</sup> Catarina

<sup>9</sup> Khaleed

در این مقاله از کد دوتایی<sup>۵</sup> استفاده گردیده و برای هر متغیر طراحی تعداد بیت دلخواه در نظر گرفته می‌شود. قدم دوم تعریف تابع برازش است که بسته به تابع هدف و قیدهای مسئله معرفی خواهد گردید. الگوریتم ژنتیک مورد استفاده شامل چهار عملگر انتخاب، حذف و اضافه، تقاطع و جهش است که توسط استراتژی نخبه‌گرا پشتیبانی می‌شود. بنابراین رشته‌های مطلوب همواره در جمعیت بعدی نیز وجود خواهند داشت و عملگر بر روی آن‌ها هیچ‌گونه عملی انجام نمی‌دهد.

انتخاب: در این تحقیق از شیوه چرخ رولت<sup>۶</sup>، برای انتخاب انتخاب والدین استفاده شده است. در این روش رشته‌های با برازش بالا شانس بیشتری برای انتخاب شدن به‌عنوان والد را دارند.

تقاطع: در این عملگر، تولید مثل توسط والدینی که قبلاً انتخاب شده‌اند صورت می‌پذیرد. رشته ایجاد شده (فرزند) توسط این عملگر، دارای ژن از هر دو والدین خود می‌باشد. در این تحقیق، عمل تولید مثل به روش تقاطع یکنواخت<sup>۷</sup> صورت می‌پذیرد.

حذف و اضافه: این عملگر شبیه بودن رشته‌ها را کنترل می‌کند. ابتدا، رشته‌های حاصل از عمل تقاطع به جمعیت اولیه اضافه شده و جمعیت بر اساس تابع برازش مرتب می‌گردد. سپس، رشته‌هایی که دقیقاً هم شکل هستند مشخص شده و فقط یکی از آن‌ها در جمعیت باقی می‌ماند. در ادامه، به جای رشته‌های حذف شده رشته جدیدی جایگزین می‌گردد.

جهش: برای افزایش هرچه بیشتر تنوع رشته‌ها و جلوگیری از همگرایی به یک نقطه بهینه موضعی، تعدادی رشته به جمعیت جدید اضافه می‌شود. پس از محاسبه برازش رشته‌های اضافه شده و مرتب کردن آن‌ها، مجدداً تعدادی از رشته‌ها که دارای کمترین برازش هستند از جمعیت خارج گردیده و تعداد رشته‌ها به حالت اولیه برمی‌گردد.

در پایان جهت همگرایی و توقف برنامه، باید معیاری تعریف شود که این معیار، رسیدن تابع هدف به یک عدد مشخص یا انجام شدن تعداد مشخصی از مراحل تولید نسل می‌باشد. شکل ۱، روندنمای حل مسئله را نشان می‌دهد.

بیش از حد ضخامت در قالب پیش‌فرم مجاز نمی‌باشد، زیرا مقاطع نازک زودتر سرد شده و سرد شدن یک قسمت از قطعه، باعث افزایش تنش تسلیم، فشار به قالب نهایی و شکست آن می‌گردد [۱].

۴- الگوریتم بهینه‌سازی: الگوریتم فوق، با در نظر گرفتن قیود طراحی و تغییر متغیرهای بهینه‌سازی، سعی بر کمینه یا بیشینه کردن تابع هدف دارد. در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک به عنوان روش بهینه‌سازی استفاده شده است.

### ۳- الگوریتم ژنتیک، عملگرها و پارامترها

الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم‌های تکاملی است که از تکنیک‌های زیست‌شناسی مانند وراثت و جهش استفاده می‌کند [۱۱]. این الگوریتم در سال ۱۹۶۰ توسط جان هالند<sup>۱</sup> هالند<sup>۱</sup> ابداع شد و برای اولین بار توسط دانشجوی وی، دیوید دیوید گلبگ<sup>۲</sup>، در بهینه‌سازی یک مسئله مهندسی مورد استفاده قرار گرفت [۱۲].

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی است که معمولاً می‌تواند به نقطه بهینه مطلق همگرا شود، زیرا در این روش، فرایند جستجو هم‌زمان از چند نقطه متفاوت شروع می‌گردد. تعداد این نقاط جمعیت اولیه و هریک از این نقاط، نشانگر حلی برای مسئله است که در علم ژنتیک به کروموزوم<sup>۳</sup> معروف بوده و به صورت یک رشته نشان داده می‌شود. این رشته توسط یک کد فرمت تعریف گردیده و با محاسبه تابع برازش<sup>۴</sup> تعریف شده، میزان تطبیق هریک از جواب‌ها با خواسته مسئله تعیین می‌گردد. در این روش، رشته‌هایی به جمعیت بعدی راه پیدا می‌کنند که تطبیق بیشتری با محیط داشته یا به عبارت دیگر تابع برازش مقدار بزرگتری برای آن‌ها محاسبه نموده است. پس از معرفی متغیرهای طراحی و دامنه جستجو که خصوصیات فیزیکی جمعیت را بیان می‌کند، حل‌های متفاوت توسط یک کد فرمت مناسب که به آن ژن نمونه می‌گویند ارائه می‌گردد. ایجاد کد فرمت اولین قدم در الگوریتم ژنتیک است.

<sup>1</sup> John Holland

<sup>2</sup> David Golberg

<sup>3</sup> Chromosome

<sup>4</sup> Fitness Function

<sup>5</sup> Binary

<sup>6</sup> Roulette Wheel

<sup>7</sup> Uniform Crossover

شکل ۱- روندنمای حل مسئله بهینه سازی

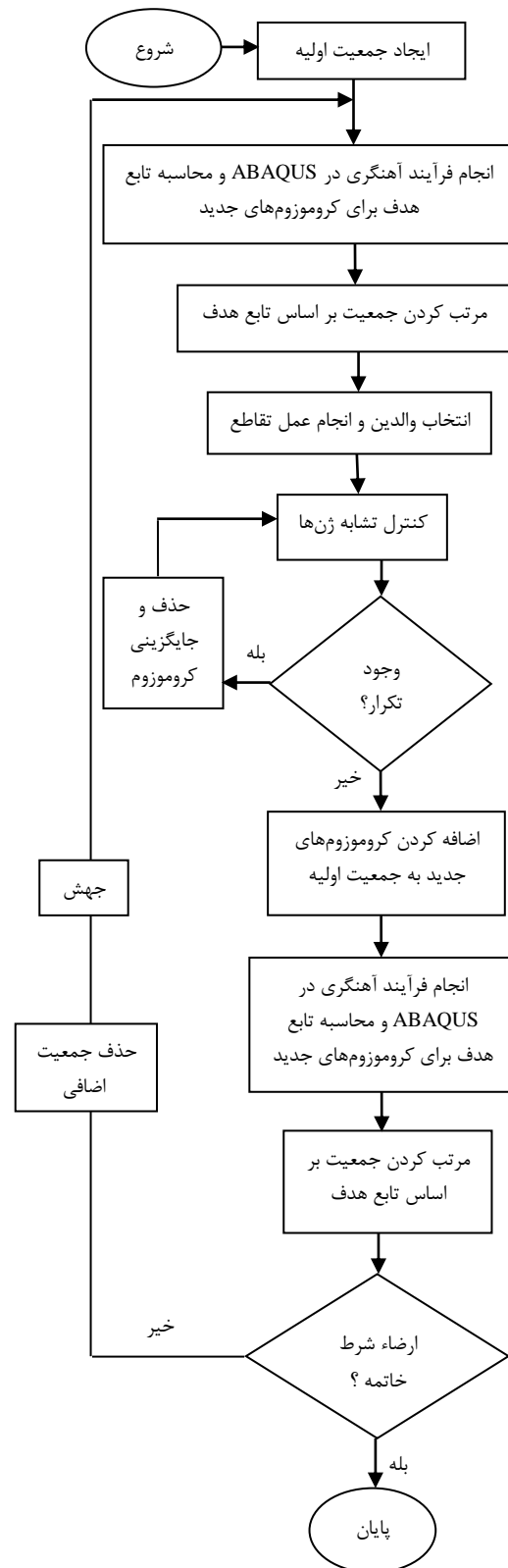
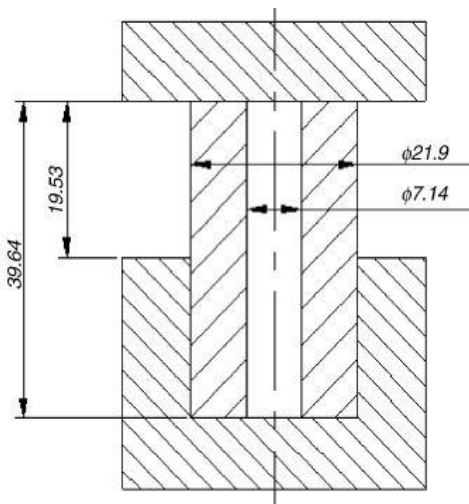
#### ۴-۱- مثال اول: آهنگری سرد استوانه توخالی

مطابق شکل ۲، آهنگری سرد یک استوانه توخالی از جنس آلومینیوم (Al606-T6) به عنوان مثال اول در نظر گرفته می‌شود. این مسئله قبلاً توسط پورسینا و همکاران به روش الگوریتم ژنتیک و اجزاء محدود بررسی شده است [۵]. شکل قالب پیش‌فرم به دست آمده در این تحقیق با شکل قالب حاصل از تحقیق پورسینا و همکاران از مطابقت خوبی برخوردار است.

معادله ساختاری که برای این نوع آلومینیوم استفاده می‌شود، معادله کوپر<sup>۱</sup> - سایموند<sup>۲</sup> است که رفتاری وابسته به نرخ کرنش داشته و توسط معادله ۱ بیان می‌گردد [۱۳]:

$$\dot{\epsilon}_p = D \left( \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_0} - 1 \right)^n \quad \text{for } \bar{\sigma} \geq \sigma_0 \quad (1)$$

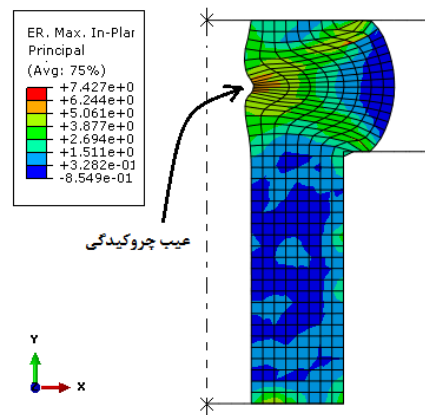
در رابطه فوق،  $\dot{\epsilon}_p$ ، نرخ کرنش پلاستیک معادل،  $\bar{\sigma}$ ، تنش تسلیم جاری و  $\sigma_0$  تنش تسلیم اولیه می‌باشد.  $n$  و  $D$  ثابت‌های ماده هستند که می‌توانند تابع دما و دیگر متغیرهای میدانی باشند. تحلیل به صورت صریح دینامیکی و ضرایب  $D$  و  $n$  به ترتیب ۶۵۰۰ و ۴ انتخاب می‌شود. هم چنین قالب پایینی ثابت و بارگذاری به صورت جابجایی به قالب بالایی اعمال می‌گردد. المان‌ها نیز از نوع متقارن محوری و مربعی شکل انتخاب می‌شوند.



<sup>1</sup> Cowper

<sup>2</sup> Symond

شکل ۲- آهنگری قطعه استوانه‌ای (ابعاد بر حسب میلی‌متر) در این مثال تعداد جمعیت ۱۶، تعداد جمعیت گروه نخبه ۴، تعداد جمعیت حذف شده در هر مرحله ۶ و تعداد بیت مورد استفاده جهت کد کردن متغیرهای طراحی هندسی ۶ می‌باشد. آهنگری تک مرحله‌ای این قطعه، منجر به ایجاد عیب چروکیدگی در سطح داخلی آن می‌شود. در قسمتی از قطعه که چروکیدگی اتفاق می‌افتد، نرخ کرنش دارای بیشترین مقدار است که این مسئله در شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد.

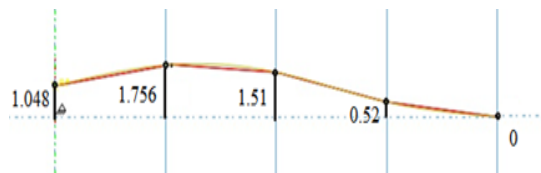


شکل ۳- بیشترین نرخ کرنش در محل چروکیدگی

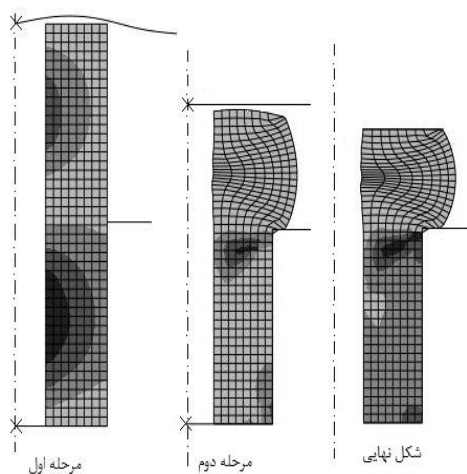
شکل ۴- متغیرهای طراحی در مثال اول پس از بهینه‌سازی متغیرهای مساله به صورت زیر تعیین می‌گردند:

$$b^t = [1/0.48, 1/7.56, 1/0, 51/52, 0, 0/1] \quad (3)$$

پنج عدد اول از چپ به راست، ارتفاع نقاط کنترلی قالب بر حسب میلی‌متر و عدد آخر ضریب اصطکاک می‌باشد. مطابق شکل ۵، برای تعیین شکل قالب پیش‌فرم، از نقاط به دست آمده یک منحنی اسپلاین عبور داده می‌شود. قطعه آهنگری شده در طی دو مرحله آهنگری و با قالب پیش‌فرم تعیین شده، پس از بهینه‌سازی در شکل ۶ نشان داده شده است. همان گونه که شکل آشکار می‌کند، با استفاده از یک قالب پیش‌فرم مناسب، پدیده چروکیدگی در سطح داخلی استوانه از بین رفته است. میانگین جواب‌ها و بهترین جواب به دست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌گردد در طی ۲۱ مرحله تولید نسل، شرط خاتمه الگوریتم که رسیدن تابع هدف به عدد ۰/۵ می‌باشد، ارضاء می‌شود. هم چنین بهترین جواب از عدد ۸/۲۴ در اولین نسل، به ۰/۴۲ و میانگین جواب از ۱۵/۲ به ۳/۱۲ می‌رسد.



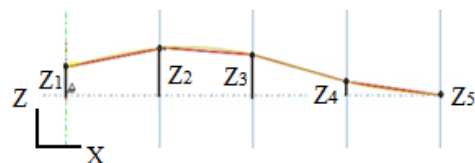
شکل ۵- هندسه قالب به دست آمده از الگوریتم (اندازه‌ها بر حسب میلی‌متر)



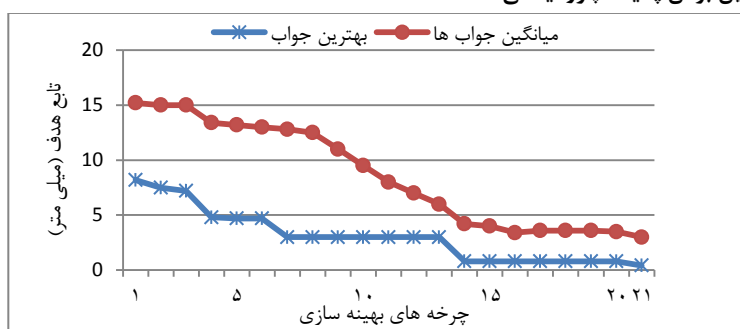
تابع هدف در این نمونه، مجموع اختلاف فاصله تمام گره‌های روی مرز داخلی از یک دیواره صاف می‌باشد که در بهینه‌سازی باید به حداقل مقدار ممکن برسد. برای از بین بردن این عیب از یک قالب پیش‌فرم استفاده می‌گردد. برای این منظور پنج نقطه روی هندسه قالب پیش‌فرم به عنوان متغیر طراحی در نظر گرفته می‌شود. نقاط فوق به همراه ضریب اصطکاک، بردار طراحی را تشکیل می‌دهند:

$$b^t = [z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6] \quad (2)$$

مختصات X این نقاط ثابت و برابر ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ mm بوده و ارتفاع این نقاط از یک نقطه مرجع ( $Z_i$ ) از الگوریتم ژنتیک محاسبه می‌شود.



شکل ۶- از بین بردن پدیده چروکیدگی



شکل ۷- بهترین جواب و میانگین جواب‌ها در ۲۱ مرحله تولید نسل

نرخ کرنش و دما نیز وابسته می‌باشد. معادله ساختاری برای این نوع فولاد مطابق رابطه ۴ تعریف می‌شود [۱]:

$$\sigma = A\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (۴)$$

مقادیر  $A$ ،  $n$  و  $m$  بر حسب دماهای مختلف در جدول ۲ آورده شده که این اعداد از آزمایش کشش فولاد مذکور در شرکت فولاد اصفهان حاصل شده است.

جدول ۲- ضرایب معادله ساختاری بر حسب دما

دما (سلیسیوس)	۸۵۰	۹۵۰	۱۰۵۰	۱۱۰۰
A (MPa)	۲۶۳	۱۵۴	۱۳۶	۱۰۹/۵
n	۰/۱۰۲	۰/۱۱۵	۰/۱۱۶	۰/۰۷۹
m	۰/۰۷۱	۰/۱۳۴	۰/۱۰۸	۰/۱۳۱

به دلیل داغ بودن فرآیند آهنگری، فرض اصطکاک کولمب ممکن است باعث شود که تنش برشی تماسی نسبت به تنش برشی تسلیم بیشتر شده و قطعه به قالب بچسبد. بنابراین اصطکاک به صورت ترکیبی از معیار کولمب و تنش برشی محدود شده تعریف می‌گردد. رابطه (۵) تنش برشی محدود شده را نشان می‌دهد:

$$\tau = mk \quad (۵)$$

در رابطه فوق  $k$ ، تنش برشی تسلیم و برابر است با:

$$k = \bar{\sigma} / \sqrt{3} \quad (۶)$$

$\bar{\sigma}$  میانگین تنش جریان و  $m$  ثابت اصطکاک است که به صورت تجربی مشخص شده و برای فرآیندهای آهنگری داغ حدود ۰/۸ در نظر گرفته می‌شود [۱]. همان‌طور که از شکل ۸ مشخص است، زمانی که تنش برشی معادل در فرآیند به این مقدار برسد، لغزش اتفاق می‌افتد.

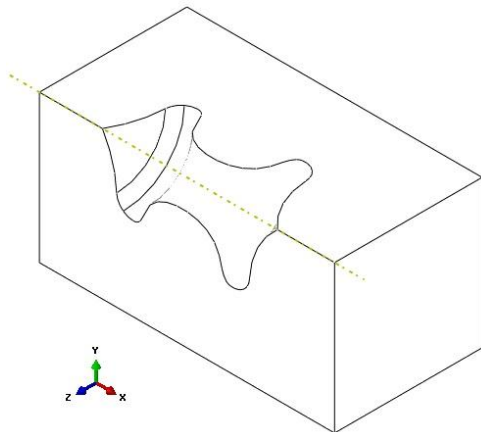
#### ۴-۲- مثال دوم: آهنگری داغ دنده متحرک سه و چهار خودرو پژو

فرآیند آهنگری داغ دنده متحرک سه و چهار خودرو پژو ۴۰۵ به عنوان مثال دوم انتخاب می‌گردد. در این مثال، اثر انتقال حرارت نیز در نظر گرفته می‌شود زیرا مقدار پلیسه و خنک شدن آن در نحوه جریان ماده درون قالب نقش عمده‌ای دارد. مطابق تحقیقات صورت گرفته، کاهش ۴۸ درجه دمای فولاد از دمای  $1200^{\circ}\text{C}$  به  $1152^{\circ}\text{C}$ ، باعث ۱۵٪ افزایش تنش تسلیم می‌گردد [۱]. بنابراین در شبیه‌سازی، سه نوع انتقال حرارت هدایتی، جابجایی و تابشی در نظر گرفته شده و فرآیند به صورت حرارتی-دینامیکی صریح تحلیل می‌شود. خصوصیات حرارتی فرآیند در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- خصوصیات حرارتی در فرآیند آهنگری

$1100^{\circ}\text{C}$	درجه حرارت قطعه اولیه
$400^{\circ}\text{C}$	درجه حرارت قالب
$30^{\circ}\text{C}$	درجه حرارت محیط
$465^{\text{J}}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$	گرمای ویژه
$54^{\text{W}}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$	ضریب انتقال حرارت هدایتی
$8/5^{\text{W}}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$	ضریب انتقال حرارت جابجایی
۰/۸	ضریب انتقال حرارت تشعشعی

جنس قطعه از فولاد 25CrMo4 و قالب‌ها به صورت صلب تعریف می‌گردند. در دماهای پایین، تنش بیشتر وابسته به کرنش است، اما در دماهای بالاتر، تنش علاوه بر کرنش، به



شکل ۱۰- قالب پیش‌فرم بهینه

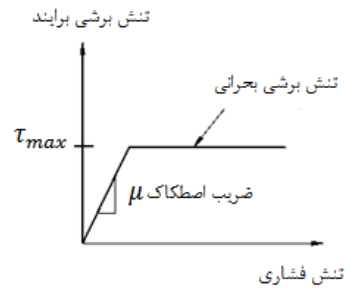
مختصات شعاعی نقاط از چپ به راست به صورت زیر می‌باشد:

$$b^t = [17/1, 48, 47/86, 34/72, 27/78, 25/76, 27/57, 34/13, 43/18, 40/78, 6/41] \text{ (mm)} \quad (8)$$

همان گونه که شکل ۱۱ نشان می‌دهد، قالب پیش‌فرم حاصل از بهینه‌سازی در شرکت آهنگری خودرو ساخته شده است. نتایج شبیه‌سازی و عملی قطعه آهنگری شده توسط قالب پیش‌فرم در شکل ۱۲ ارائه شده است. چنانچه واضح است، از لحاظ شکل قطعه و پلیسه ایجاد شده، مطابقت خوبی بین نتایج عددی و عملی مشاهده می‌گردد. هم چنین شکل ۱۳ محصول نهایی به دست آمده از شبیه‌سازی های عددی را نشان می‌دهد. پلیسه اطراف این قطعه توسط قالب دوره بری حذف و به شکل نهایی تبدیل گردیده و سپس توسط دستگاه هاب دنده‌زنی می‌شود. محصول نهایی پس از عملیات دوره بری در شکل ۱۴ قابل مشاهده است.



شکل ۱۱- قالب پیش‌فرم تراشیده شده بعد از بهینه‌سازی



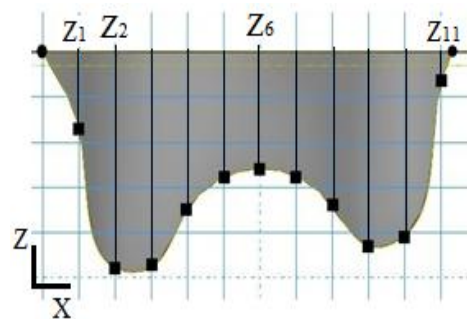
شکل ۸- مدل اصطکاکی با محدودیت تنش برشی بحرانی

مقدار ضریب اصطکاک در آهنگری داغ و استفاده از روانکار مناسب ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. هم چنین تحلیل از نوع دینامیکی صریح و المان‌ها به صورت مکعبی انتخاب می‌گردند. قالب پایینی ثابت و قالب بالایی به سمت پایین جابجا می‌شود. تابع هدف در این نمونه مجموع فاصله شعاعی تمام گره‌های روی مرز شکل حاصل از آهنگری با شکل مطلوب است.

در این مثال تعداد جمعیت ۱۲، تعداد جمعیت نخبه ۴، تعداد جمعیت حذف شده در هر مرحله ۴ و تعداد بیت مورد استفاده جهت کد کردن متغیرهای طراحی هندسی ۴ می‌باشد. برای بهینه‌سازی شکل قالب پیش‌فرم، از ۱۱ نقطه به عنوان متغیر طراحی استفاده می‌شود (شکل ۹). مختصات X این نقاط ثابت بوده و مختصات Z آن‌ها تغییر می‌کند. بردار طراحی به صورت زیر می‌باشد:

$$b^t = [z_1, z_2, z_3, \dots, z_9, z_{10}, z_{11}] \quad (7)$$

با استفاده از دستور اسپیلاین یک منحنی از نقاط فوق گذرانده می‌شود. مطابق شکل ۱۰، با چرخاندن این منحنی حول خط افقی و کم کردن حجم آن از یک مکعب در نرم‌افزار ABAQUS، شکل قالب پیش‌فرم تعیین می‌شود.



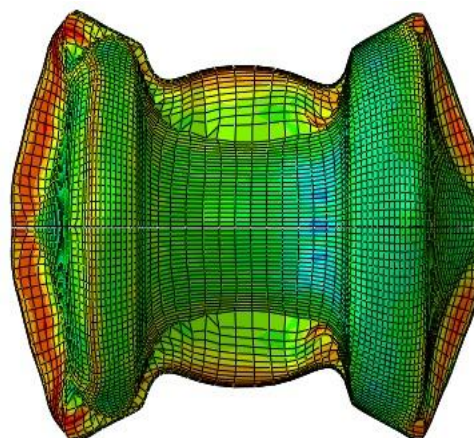
شکل ۹- منحنی قالب پیش‌فرم



شکل ۱۴- شکل نهایی قطعه پس از عملیات دوره بری



(الف)



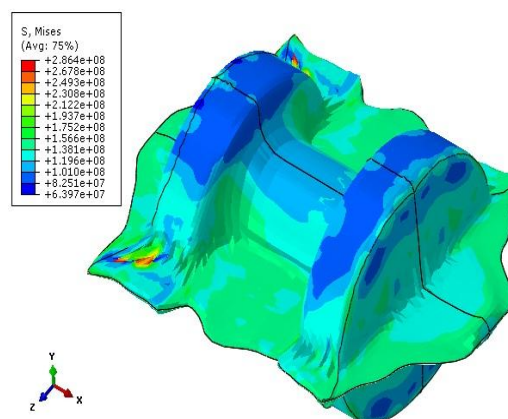
(ب)

شکل ۱۲- قطعه پیش‌فرم (الف) عملی (ب) شبیه‌سازی

میانگین جواب‌ها و بهترین جواب به دست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. این جواب‌ها همان فضای خالی قالب هستند که از اختلاف شکل آهنگری شده با شکل مطلوب به دست می‌آیند. مطابق شکل، در طی ۳۱ مرحله تولید نسل، شرط خاتمه الگوریتم که رسیدن بهترین مقدار تابع هدف به عدد کمتر از ۲ می‌باشد، ارضاء می‌شود. بهترین جواب از عدد  $31/8$  در اولین نسل، به  $1/8$  و میانگین جواب از  $61/2$  به  $12/4$  در ۳۱ نسل می‌رسد.

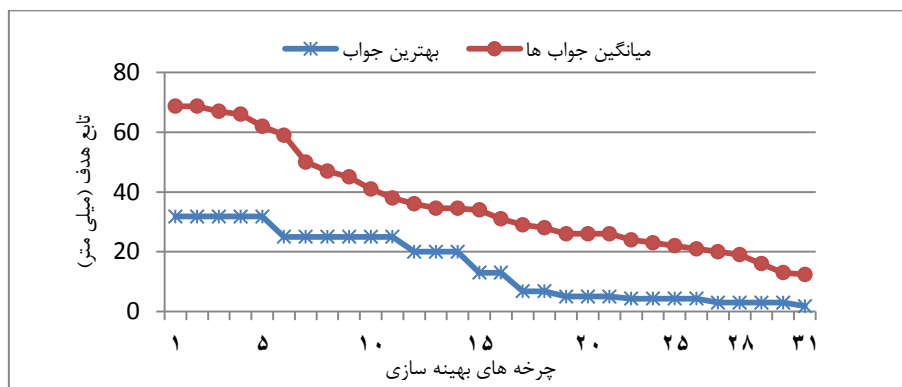
### ۵- نتیجه گیری

بهینه‌سازی فرآیند آهنگری از طریق شکل بهتر قالب پیش‌فرم، به کمک شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی و تغییر پارامترهای هندسی، می‌تواند به نتایج قابل قبولی منجر شود. روش‌های جستجوی اتفاقی، مانند الگوریتم ژنتیک، اگر به تکنیک‌هایی برای تسریع همگرایی مجهز شوند، قادر هستند چشم‌اندازهای استفاده از این الگوریتم‌ها را در حل مسائل واقعی روشن‌تر کنند. در این پژوهش دو مثال بررسی گردید. مثال اول آهنگری سرد یک سیلندر توخالی آلومینیومی بود که جهت حذف پدیده چروکیدگی در آهنگری تک مرحله‌ای آن، آهنگری در دو مرحله انجام شد. شکل قالب پیش‌فرم در مرحله اول به گونه‌ای تعیین گردید که عیب چروکیدگی در سطح داخلی آن رفع شود. در مثال دوم، پلیسه ایجاد شده در تولید دنده متحرک سه و چهار خودرو پژو با تغییر شکل قالب پیش‌فرم از مقدار  $13/9\%$  به  $3/5\%$  کاهش یافت که نتایج فوق با نتایج عملی شرکت آهنگری خودرو مطابقت داده شد.



شکل ۱۳- شکل قطعه نهایی حاصل از تحلیل ABAQUS





شکل ۱۵- بهترین جواب و میانگین جواب‌ها در ۳۱ مرحله تولید نسل

- [8] Han X, Hua L (2009) Plastic deformation behaviours of cold rotary forging under different contact patterns by 3d elastic-plastic FE method. *Mat Trans* 50: 1949–1958.
- [9] Catarina F, Antonio C, Sousa C (2010) Pareto-based multi objective hot forging optimization using a genetic algorithm. *Int Conf Eng Opt*.
- [10] Khaleed H, Samad Z, Othman A (2011) Work-piece optimization and thermal analysis for flashless cold forging of auv propeller hubs - FEM simulation and experiment. *J Manu Proc* 13: 41–49.
- [11] Holland JH (1975) *Adaptation in natural and artificial systems*. Univ. Michigan Press, USA.
- [12] Goldberg ED (1989) *Genetic Algorithms in search optimisation and machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, MA, USA.
- [13] Symonds PS, Ting TC (1964) Longitudinal impact on visco-plastic rods- approximate methods and comparisons. *J App Mech* 31: 611–620.

## ۶- مراجع

- [۱] بیگلری ف، صادقی م (۱۳۸۹) طراحی قالب‌های فورج. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [2] Vazques V, Taylan A (2000) Die design for flashless forging of complex parts. *J Mat Proc Tech* 98: 81–89.
- [3] Vazques V, Taylan A (2000) New concept in die design physical and computer modeling applications. *J Mat Proc Tech* 98: 212–223.
- [4] Fourment L, Vielledent D (2000) Shape optimization for metal forming problems. *Europ Cong Comput Meth Appl Scien Eng*.
- [5] Poursina M, Parvizian J, Antonio C (2004) Optimum pre-form dies in two-stage forging. *J Mat Proc Tech* 174: 325–333.
- [6] Sedighi M, Tokmechi S (2007) A new approach to preform design in forging process of complex part. *J Mat Proc Tech* 197: 314–324.
- [7] Bernd A, Muller S, Nickel R (2009) Flashless precision forging of a two-cylinder-crankshaft. *Germ Acad Soc Prod Eng* 12: 381–389.