



بهینه‌سازی پیش‌فرم آهنگری پره توربین با استفاده از روش سطوح پاسخ

سید حمیدرضا ترابی^۱، امیر امیری^۲، محمدحسین صادقی^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، sadeghim@modares.ac.ir

چکیده- یکی از روش‌های تولید پره‌ها آهنگری است. اما با توجه به پیچیدگی‌های پره امکان تولید آن در یک مرحله وجود نداشته و در نظر گرفتن پیش‌فرم برای آن لازم است. پیش‌فرم مناسب می‌تواند پر شدن کامل قالب را تضمین کرده و موجب کاهش نیروی آهنگری، کاهش مواد هدر رنده به صورت پلیسه و یکنواخت شدن کرنش‌ها شود. در این مقاله یک هندسه اولیه برای پیش‌فرم، با استفاده از سطح مقطع بیضی برای قسمت ایرفویل، در نظر گرفته شد و روش سطوح پاسخ برای بهینه‌سازی این پیش‌فرم استفاده شد. هدف‌های بهینه‌سازی، پر شدن کامل قالب و کاهش حجم پلیسه، نیروی آهنگری و واریانس کرنش در نظر گرفته شد. در پایان، مدل بهینه با مدل روش توزیع جرم مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که روش سطوح پاسخ نتایج بهتری نسبت به روش توزیع جرم به دست می‌دهد. همچنین از مدل‌سازی فیزیکی برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی استفاده شد. نتایج نشان داد مطابقت خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی وجود دارد.

کلید واژگان: آهنگری، پره توربین، بهینه‌سازی پیش‌فرم، روش سطوح پاسخ.

Forging preform optimization of turbine blade using response surface method

S.H.R. Torabi¹, A. Amiri², M.H. Sadeghi^{3*}

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

2- PhD. Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

3- Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran. sadeghim@modares.ac.ir

Abstract- Forging is one of the blade production methods. But according to the complications of blades, they can't be produced in one stage and it's necessary for them to consider preform. In this research, a basic geometry with elliptical cross section for airfoil of blade, was considered and response surface method was used to optimize this preform. Optimization purposes were considered completely die filling and reduction of flash volume, forging load and strain variance. At the end, optimized preform was compared with the model of mass distribution method. Results show response surface method gives better results than mass distribution method. Also physical modeling was used for verification of simulation results. Results show simulation results have a good corresponding with experimental results.

Keywords: Forging, Turbine Blade, Preform Optimization, Response Surface Method.

۱- مقدمه

منظور تولید قطعه با شکل هندسی و خواص مطلوب می‌باشد. برای رسیدن به شکل هندسی و خواص مطلوب معمولاً از قالب‌های چند مرحله‌ای که به قالب‌های پیش‌فرم معروفند،

یکی از روش‌های تولید قطعات مکانیکی، آهنگری است. آهنگری، فرایند شکل‌دهی توده‌ای از فلز تحت فشار یا ضربه به

استفاده می‌شود. طراحی پیش‌فرم منطقی می‌تواند به پر شدن کامل قالب کمک کرده، منجر به کاهش حجم مواد هدررونده به صورت پلیسه و نیروهای آهنگری شود و همچنین به یکنواخت‌تر شدن کرنش‌ها کمک کند.

اولین تحقیقات در زمینه طراحی پیش‌فرم توسط بیسواس و همکاران انجام شد [۱]. در این تحقیق شکل‌های پیش‌فرم به دو روش کامپیوتری و تجربی تعیین شدند. در هر مورد جریان مواد و پر شدن مناسب محفظه قالب با یکدیگر مقایسه شد و بهترین شکل پیش‌فرم برای رسیدن به مقدار بهینه سایس قالب، مقدار مواد استفاده شده، نیروهای اعمالی و پر شدن قالب انتخاب شد. سال‌ها بعد هوانگ و همکاران [۲] طرح ردیابی معکوس^۱ با کمک المان محدود را با ضوابطی برای کنترل شرایط مرزی در طی فرایند، برای طراحی شکل پیش‌فرم قطعه H شکل معرفی کردند. مقایسه نتایج نشان داد که کرنش در نقاط مختلف قطعه H شکل یکنواخت‌تر شد و طرح ردیابی معکوس روش مناسبی برای طراحی شکل پیش‌فرم و رسیدن به حالت تغییر شکل یکنواخت می‌باشد. کیم و همکاران [۳] با استفاده از روش اصلی کران بالا به یافتن شکل پیش‌فرم آهنگری پرداختند. مقایسه نتایج این روش با نتایج عملی نشان داد که استفاده از روش شبیه‌سازی کران بالا و پیش‌فرم طراحی شده به این روش می‌تواند محصول متقارن‌تر و امکان‌پذیرتر را برای طراحی پیش‌فرم فرایند آهنگری قالب بسته ارائه کند. بیگری و همکاران [۴] روش ردیابی معکوس را با الگوریتم فازی ترکیب نمودند تا شکل قطعه‌کار را در مراحل قبلی تخمین بزنند. آنان بیان داشتند که با استفاده از ترکیب الگوریتم فازی و روش ردیابی معکوس، قطعه حاصل دارای کرنش یکنواخت‌تری خواهد بود.

هو و دین [۵] تأثیر دما و نرخ کرنش را بر ویژگی‌های شکل‌دهی آلیاژ تیتانیوم بررسی کردند. برای شبیه‌سازی واقعی‌تر فرایند آهنگری پره با روش المان محدود، شرایط فرایند از جمله رفتار مکانیکی آلیاژ و شرایط مرزی را با استفاده از آزمایش‌های تجربی به دست آوردند و آهنگری قالب داغ پره را به عنوان یک روش اقتصادی برای تولید نزدیک به شکل نهایی بررسی کردند. ژائو و همکاران [۶] روش بهینه‌ای را برای فرایند آهنگری با استفاده از روش المان محدود بر مبنای روش

آنالیز حساسیت ارائه دادند. در این کار روشی برای بهبود راندمان محاسبات ریاضی ارائه و درستی این روش اثبات گردید. قطر بیلت اولیه برای بهبود و رسیدن به حالت تولید ناب بهبود یافت و روشی هم برای ارتباط شرایط مرزی با قالب بالا و قالب ثابت پایینی ارائه شد. تیاگراجان و همکاران [۷] از روش سطوح پاسخ برای بهینه‌سازی پیش‌فرم آهنگری چندمرحله‌ای یک شاتون استفاده کردند. آنها هدف‌های بهینه‌سازی خود را پر شدن قالب و کمترین واریانس کرنش انتخاب کردند. نتایج نشان داد که واریانس کرنش بهبود یافت و قالب کاملاً پر شد. شهریاری و همکاران [۸] از روش سطوح پاسخ برای پیش‌بینی نیروی آهنگری سوپراآلیاژ نایمونیک^۲ استفاده کردند. نتایج نشان داد عواملی که بیشترین تأثیر را روی نیروی آهنگری دارد، ضخامت پلیسه و طرح خارجی قالب نهایی است و شعاع‌های داخلی و خارجی تأثیری بر نیروی آهنگری ندارد. چنگ و همکاران [۹] شبیه‌سازی سه‌بعدی مراحل آهنگری پره کمپروسور توربین گازی را انجام دادند. در این تحقیق مراحل آهنگری پره از بیلت اولیه تا پره نهایی به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی و بررسی شد. در نهایت با استفاده از نتایج شبیه‌سازی قطعه‌کار تولید گردید. کای و همکاران [۱۰] از روش سطوح پاسخ برای بهبود همگن بودن تغییر شکل در آهنگری قطعات هوافضا استفاده کردند. آنها بیان داشتند که این روش با دقت خوبی قابلیت بهبود همگن بودن تغییرشکل را داراست. میرزالو و همکاران [۱۱] به بررسی عددی و تجربی طراحی پیش‌فرم پره کمپروسور موتور هوایی برای آلیاژ Ti-6Al-4V پرداختند. آنها با ترکیب روش سطوح پاسخ و الگوریتم ژنتیک پیش‌فرمی را برای پره طراحی کردند و با استفاده از این پیش‌فرم، پره نهایی را تولید کردند. آنها همچنین ویژگی‌های پره نهایی را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند این روش، روش مناسبی برای طراحی پیش‌فرم پره می‌باشد.

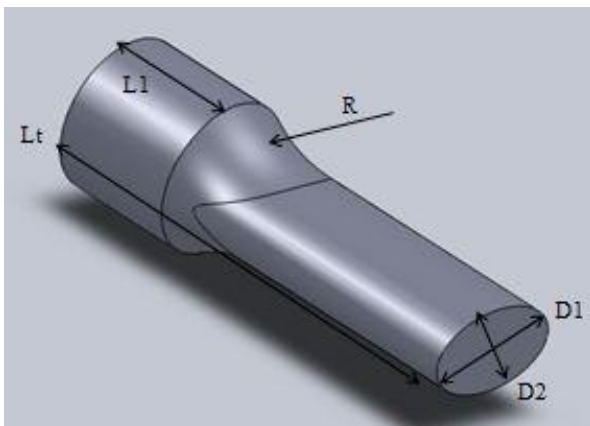
با بررسی پیشینه پژوهش مشخص شد که تاکنون بهینه‌سازی پیش‌فرم پره با استفاده از روش سطوح پاسخ انجام نشده است. هدف از این تحقیق بکارگیری روش سطوح پاسخ برای طراحی پیش‌فرم آهنگری پره آلومینیومی، که در شکل ۱ نشان داده شده، و مقایسه این روش با روش سنتی توزیع جرم بوده است.

1. Backward method

2. Nimonic80-A

نهایی، مقطع دایره‌ای برای قسمت ریشه با قطر ثابت ریشه در نظر گرفته شد و برای قسمت ایرفویل به دلیل این که مقطع بیضی بهترین شکل برای طراحی پیش‌فرم است [۱۳]، به صورت مقطع بیضوی انتخاب شد. به این منظور همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، ابعاد هدف برای بهینه‌سازی، طول ریشه (L_1)، طول کامل پره (L_t)، قطر بزرگ بیضی ایرفویل (D_1)، قطر کوچک بیضی ایرفویل (D_2) و شعاع اتصال ریشه و قسمت ایرفویل (R) انتخاب شد.

در روش سطوح پاسخ، ابتدا می‌بایست مقادیر حداقل و حداکثری را به عنوان مقادیر ورودی به نرم‌افزار معرفی کرد. به این منظور از نسبت حجمی بیلت به پره نهایی استفاده شد که نسبت حجمی ۱ برای مقادیر حداقل و نسبت حجمی ۱/۶ برای مقادیر حداکثر استفاده شد. ابعاد حداقل و حداکثر در جدول ۱ و مدل آنها در شکل ۳ نشان داده شده است.



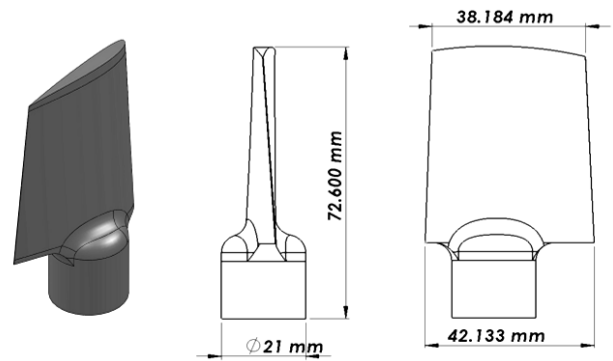
شکل ۲ مدل پیش‌فرم اولیه

جدول ۱ مقادیر حداقل و حداکثر پیش‌فرم

ابعاد	مقادیر حداکثر (میلی‌متر)	مقادیر حداقل (میلی‌متر)
L_1	۲۱	۱۵
L_t	۷۲	۶۰
D_1	۲۰	۱۲
D_2	۲۰	۱۲
R	۳۰	۱۵

۴- تحلیل داده‌ها

برای تحلیل داده‌ها ابتدا می‌بایست خروجی‌های مورد نظر برای بهینه‌سازی تعیین شوند. برای کمی کردن معیار پر شدن قالب لی و همکاران [۱۴] رابطه‌ای را با عنوان نرخ پرشدگی معرفی کردند:



شکل ۱ مدل سه‌بعدی قطعه نهایی

آهنگری پره با استفاده از نرم‌افزار المان محدود دیفرم^۱ برای به دست آوردن حجم پلیسه، نیروی آهنگری، میزان توزیع تغییر شکل در قطعه پیش‌فرم و قطعه نهایی و کرنش تک‌تک المان‌های موجود در قطعه‌کار، شبیه‌سازی شده و نتایج در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۲ برای طراحی آزمایش استفاده شده است. در پایان نتایج به دست آمده با روش سنتی توزیع جرم مقایسه شده است.

۲- روش سطوح پاسخ

این روش، ترکیبی از تکنیک‌های ریاضی و آمار است که برای مدل‌بندی و تحلیل مسائلی که پاسخ مورد نظر تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد، مفید است و هدف آن بهینه‌سازی این پاسخ است.

در اکثر مسائل مربوط به روش سطوح پاسخ، صورت بستگی بین پاسخ و متغیرهای مستقل نامعلوم است. پس، اولین قدم در این روش یافتن تقریبی مناسب برای بستگی واقعی موجود بین پاسخ و مجموعه متغیرهای مستقل است.

هدف بعدی این روش، تعیین شرایط عملکرد بهینه برای سیستم یا تعیین ناحیه‌ای از فضای عاملی است که مشخصه‌های عملکرد رضایت‌بخش باشند. روش سطوح پاسخ در اصل برای استفاده در درک مکانیسم فیزیکی سیستم به کار نمی‌رود، هرچند می‌توان برای حصول چنین اطلاعاتی از این روش بهره گرفت [۱۲].

۳- روش طراحی پیش‌فرم اولیه

برای طراحی هندسه اولیه پیش‌فرم، با توجه به هندسه قطعه

1. Deform-3D
2. Design Expert

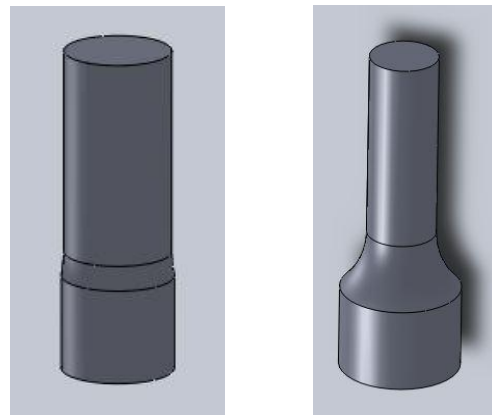
آمده است. با استفاده از این داده‌ها مدل درجه دو برای برازش داده‌ها انتخاب شد و جدول تحلیل واریانس برای مدل‌ها استخراج شد که در جدول ۴ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر $Prob > F$ در هر چهار مدل کوچک‌تر از ۰/۰۵ می‌باشد و این، به این معنی است که این مدل در سطح اطمینان ۹۵٪ ($\alpha=0.05$) معنی‌دار بوده و در نتیجه دست کم یکی از جملات دارای اثر معنی‌داری بر روی متغیر پاسخ است. همچنین مقادیر R^2 برای هر سه پاسخ نرخ پرشدگی، حجم پلیسه و نیروی آهنگری نزدیک به یک است که نشان‌دهنده این است که مدل‌های به دست آمده با قابلیت اطمینان بالایی قابل قبول می‌باشند. برای مثال، معادله ۴ با قابلیت اطمینان ۹۷/۴۸٪ ($R^2=0.9748$) تغییرپذیری در متغیر پاسخ FR را برای متغیرهای به دست آمده توصیف می‌کند. برای واریانس کرنش این مقدار کمتر است، اما به دلیل این که این مقدار تقریباً نزدیک ۰/۸ می‌باشد این مقدار قابل قبول است.

همچنین شرط نرمال بودن توزیع باقی‌مانده‌ها، استقلال زمانی باقی‌مانده‌ها و عدم وابستگی مقادیر باقی‌مانده نسبت به مقادیر برازش شده بررسی شد و هیچ‌گونه روند خاصی در توزیع باقی‌مانده‌ها مشاهده نشد و صحت مدل از این جهت نیز تأیید شد که در اینجا به جهت اختصار از آوردن آنها صرف نظر شده است. شکل ۴ مقادیر پیش‌بینی شده را در مقابل مقادیر به دست آمده توسط آزمایش، برای این روش نشان می‌دهد. در این نمودار هر چه نقاط به خط راست نزدیک‌تر باشند نشان‌دهنده این است که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و مقادیر واقعی به یکدیگر نزدیک هستند و مقدار خطای مدل کم است. همان‌طور که مشاهده می‌شود داده‌ها نزدیک به خط راست هستند و این نشان‌دهنده صحت مدل‌های به دست آمده می‌باشد.

توابع هدف به دست آمده از روش سطوح پاسخ به صورت معادلات (۷-۴) می‌باشد.

$$FR = +0.092739 \times L_1 + 0.10919 \times L_1 + 0.22719 \times D_1 + 0.21860 \times D_2 + 8.03429 \times 10^{-3} \times R - 1.26392 \times 10^{-3} \times L_1 \times D_1 - 1.10420 \times 10^{-3} \times L_1 \times D_2 - 1.04925 \times 10^{-3} \times L_1 \times D_1 - 1.04350 \times 10^{-3} \times L_1 \times D_2 - 2.55194 \times 10^{-3} \times D_1 \times D_2 - 1.40658 \times 10^{-3} \times L_1^2 - 5.33155 \times 10^{-4} \times L_1^2 - 2.45848 \times 10^{-3} \times D_1^2 - 2.31364 \times 10^{-3} \times D_2^2 - 1.69946 \times 10^{-4} \times R^2 - 7.56531 \quad (4)$$

$$FV = +1.14030 \times 10^{-5} - 625.43390 \times L_1 - 1639.28021 \times L_1$$



شکل ۳ مدل پیش‌فرم‌های الف- حدافل، ب- حداکثر

$$FR = \frac{V_{actual}}{V_{blade}} \quad (1)$$

که در آن V_{actual} حجم ماده موجود در حفره قالب در انتهای فرایند و V_{blade} حجم قطعه نهایی است. زمانی که قالب پر نشده باشد، مقدار این ضریب کوچک‌تر از یک است و زمانی که قالب پر شده باشد، مقدار این ضریب مساوی یک است.

همچنین مقدار حجم پلیسه توسط رابطه ۲ به دست آمد:

$$FV = V_{fp} - V_{actual} \quad (2)$$

که در آن V_{fp} حجم قطعه نهایی قبل از تریم^۱ پلیسه است. واریانس کرنش در قطعه نهایی از رابطه ۳ محاسبه شد:

$$SV = \frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}{n} \quad (3)$$

که در آن ε_i کرنش المان i ام و $\bar{\varepsilon}$ میانگین کرنش تک تک المان‌هاست. n نیز تعداد المان‌های موجود در قطعه کار است.

نیروی آهنگری (F) در قطعه نهایی نیز با استفاده از اطلاعات موجود در نرم‌افزار دیفرم به دست آمد.

همان‌طور که گفته شد، برای تحلیل داده‌ها روش سطوح پاسخ انتخاب شد و با توجه به تعداد عامل‌ها و سطوح، مدل باکس-بنکن^۲ برای طراحی آزمایش انتخاب شد. با استفاده از این مدل ۴۶ آزمایش توسط نرم‌افزار پیشنهاد شد. جدول طراحی آزمایش در جدول ۲ آمده است. با شبیه‌سازی این مدل‌ها توسط نرم‌افزار دیفرم مقادیر نرخ پرشدگی، حجم پلیسه و نیروی آهنگری برای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲، توسط نرم‌افزار به دست آمد. پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی در جدول ۳

1. Trim
2. Box-Behnken

$$\begin{aligned}
 &+1.88595 \times D_1 \times D_2 + 0.49826 \times D_1^2 - 17.50764 \times D_2 \\
 &-59.64798 \times D_1 - 1.64683 \times L_t \quad (6) \\
 SV = &+0.10591 \times L_1 + 1.34858 \times L_t + 0.16445 \times D_1 \\
 &+0.19289 \times D_2 - 9.82556 \times 10^{-3} \times L_t^2 - 52.6060 \quad (7) \\
 &-4121.49455 \times D_1 + 29.67500 \times L_t \times D_1 \\
 &+26.14271 \times L_t \times D_2 + 74.06719 \times D_1 \times D_2 \\
 &+19.45135 \times L_1^2 + 6.49154 \times L_t^2 + 39.74451 \times D_1^2 \\
 &+34.96378 \times D_2^2 - 3733.18153 \times D_2 \quad (8) \\
 F = &+308.80136 + 3.28252 \times L_1 + 0.41816 \times L_t \times D_1
 \end{aligned}$$

جدول ۲ جدول طراحی آزمایش

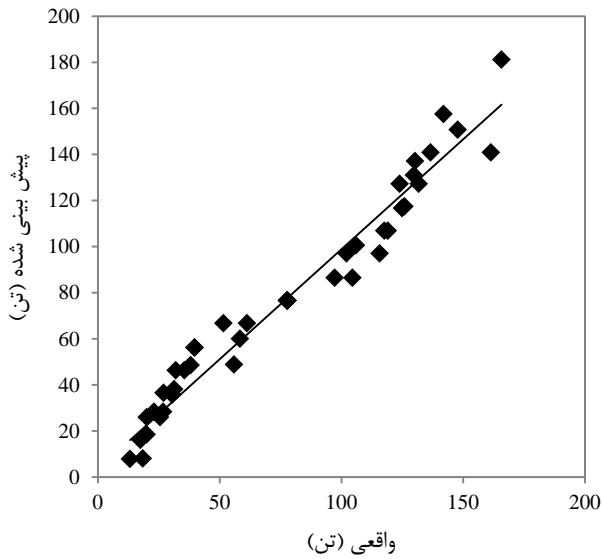
SV	F (ton)	FV (mm ³)	FR	R (mm)	D ₂ (mm)	D ₁ (mm)	L _t (mm)	L ₁ (mm)	Run	Std
۰/۳۶۴۱	۲۶/۹۷۳	۲۳۶	۰/۹۰۱۲۹۳	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۶۰/۰۰	۱۵/۰۰	۲۲	۱
۰/۴۹۸۷	۳۹/۶۵۷۶	۴۶۲/۳	۰/۹۳۹۳۱۹	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۶۰/۰۰	۲۱/۰۰	۴۶	۲
۰/۶۷۳۵	۱۱۵/۶۶۸	۱۰۳۵/۸	۱	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۷۲/۰۰	۱۵/۰۰	۳۹	۳
۱/۵۰۳۷	۱۲۴/۹۰۲	۱۸۹۴/۱	۱	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۷۲/۰۰	۲۱/۰۰	۳۳	۴
۰/۱۴۶۶	۱۳/۱۷۰۶	۵۵/۶	۰/۷۷۸۰۳	۲۲/۵۰	۱۲/۰۰	۱۲/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۸	۵
۰/۱۴۶۶	۵۸/۳۲	۲۲۹/۶	۰/۹۷۴۹۰۹	۲۲/۵۰	۱۲/۰۰	۲۰/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۳۴	۶
۰/۵۶۰۶	۵۵/۸۹	۳۶۲/۶	۰/۹۶۶۴۴۵	۲۲/۵۰	۲۰/۰۰	۱۲/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۱۲	۷
۱/۶۹۶۸	۵۲۴/۸۸	۵۲۷۶/۹	۱	۲۲/۵۰	۲۰/۰۰	۲۰/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۲۴	۸
۰/۴۷۳۳	۳۱/۹۷۸۸	۲۲۵/۱	۰/۹۲۱۸۸۲	۱۵/۰۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۶۰/۰۰	۱۸/۰۰	۴۰	۹
۰/۹۵۵۱	۱۱۷/۶۱۲	۱۳۵۰	۱	۱۵/۰۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۷۲/۰۰	۱۸/۰۰	۴۱	۱۰
۰/۵۰۳	۳۵/۵۲۶۶	۳۱۰/۴	۰/۹۲۶۶۳۶	۳۰/۰۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۶۰/۰۰	۱۸/۰۰	۱۵	۱۱
۱/۰۸۸۶	۱۱۹/۰۷	۱۵۴۶/۱	۱	۳۰/۰۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۷۲/۰۰	۱۸/۰۰	۱۹	۱۲
۰/۵۱۶	۲۰/۰۲۳۲	۱۹۴/۲	۰/۸۳۵۳۷	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۱۲/۰۰	۶۶/۰۰	۱۵/۰۰	۳	۱۳
۰/۶۹۷۶	۳۱/۲۹۸۴	۳۸۰/۹	۰/۸۹۶۰۳۸	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۱۲/۰۰	۶۶/۰۰	۲۱/۰۰	۶	۱۴
۱/۸۰۱۶	۱۲۹/۷۶۲	۲۲۶۹/۱	۱	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۲۰/۰۰	۶۶/۰۰	۱۵/۰۰	۲۸	۱۵
۲/۴۳۴۴	۱۴۷/۷۴۴	۲۸۰۶/۲	۱	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۲۰/۰۰	۶۶/۰۰	۲۱/۰۰	۴۳	۱۶
۰/۲۴۳۹	۲۰/۰۷۱۸	۷۱/۲	۰/۸۷۱۸۲۶	۱۵/۰۰	۱۲/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۴۴	۱۷
۱/۹۹۹	۱۲۳/۹۳	۲۳۹۲/۹	۱	۱۵/۰۰	۲۰/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۱۸	۱۸
۰/۱۸۷۹	۲۵/۵۱۵	۱۱۸/۴	۰/۸۸۷۱۸۴	۳۰/۰۰	۱۲/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۲۷	۱۹
۲/۱۶۵۲	۱۳۱/۷۰۶	۲۳۱۴/۱	۱	۳۰/۰۰	۲۰/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۲۰	۲۰
۰/۴۰۹۴	۱۸/۴۱۹۴	۱۰۴/۲	۰/۸۲۳۷۲۸	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۱۲/۰۰	۶۰/۰۰	۱۸/۰۰	۲۹	۲۱
۰/۴۱۳۹	۳۸/۰۵۳۸	۲۸۲/۵	۰/۹۲۴۴۵۷	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۱۲/۰۰	۷۲/۰۰	۱۸/۰۰	۳۷	۲۲
۱/۰۲۸۷	۱۰۵/۹۴۸	۹۴۳/۸	۱	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۲۰/۰۰	۶۰/۰۰	۱۸/۰۰	۱۰	۲۳
۲/۲۳۵۸	۱۶۵/۷۲۶	۳۹۷۰/۹	۱	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۲۰/۰۰	۷۲/۰۰	۱۸/۰۰	۴۵	۲۴
۰/۱۴۰۷	۱۷/۴۴۷۴	۴۸/۵	۰/۸۴۶۰۱۳	۲۲/۵۰	۱۲/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۱۵/۰۰	۱۴	۲۵
۰/۴۲۱۶	۳۰/۵۲۰۸	۳۵۶/۹	۰/۸۹۹۰۱۴	۲۲/۵۰	۱۲/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۲۱/۰۰	۳۸	۲۶
۱/۹۱۰۷	۱۲۵/۸۷۴	۲۲۵۸/۱	۱	۲۲/۵۰	۲۰/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۱۵/۰۰	۳۱	۲۷
۲/۴۶۹۸	۱۳۰/۲۴۸	۲۷۸۵/۱	۱	۲۲/۵۰	۲۰/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۲۱/۰۰	۱۳	۲۸
۰/۵۸۶۱	۲۳/۰۳۶۴	۱۵۵/۳	۰/۸۶۶۲۵۶	۱۵/۰۰	۱۶/۰۰	۱۲/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۱۶	۲۹
۲/۲۹۹۷	۱۳۶/۵۶۶	۲۴۸۶/۳	۱	۱۵/۰۰	۱۶/۰۰	۲۰/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۲	۳۰
۰/۳۸۲۲	۲۶/۷۷۸۶	۱۹۹/۱	۰/۸۸۰۴۶	۳۰/۰۰	۱۶/۰۰	۱۲/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۷	۳۱
۲/۵۹۳۷	۱۶۱/۳۵۲	۲۵۶۴/۷	۱	۳۰/۰۰	۱۶/۰۰	۲۰/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۴۲	۳۲
۰/۶۹۵۹	۵۱/۵۱۶	۲۵۹/۳	۰/۹۶۸۶۹۹	۱۵/۰۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۱۵/۰۰	۱	۳۳
۱/۶۴۵۹	۹۷/۲	۶۶۴/۵	۰/۹۹۹۶۳۶	۱۵/۰۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۲۱/۰۰	۳۵	۳۴
۰/۹۱۹	۶۱/۲۳۶	۲۷۹/۳	۰/۹۸۰۴۲۸	۳۰/۰۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۱۵/۰۰	۴	۳۵
۲/۴۳۳۴	۱۰۴/۴۹	۸۲۱/۴	۱	۳۰/۰۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۲۱/۰۰	۳۰	۳۶
۰/۱۷۹۳	۱۷/۸۸۴۸	۸۲/۸	۰/۸۲۴۹۵۳	۲۲/۵۰	۱۲/۰۰	۱۶/۰۰	۶۰/۰۰	۱۸/۰۰	۱۷	۳۷
۰/۲۹۶	۳۹/۷۰۶۲	۲۴۲/۱	۰/۹۲۵۱۲۹	۲۲/۵۰	۱۲/۰۰	۱۶/۰۰	۷۲/۰۰	۱۸/۰۰	۹	۳۸
۱/۰۳۰۶	۱۰۲/۰۶	۱۰۵۰/۱	۱	۲۲/۵۰	۲۰/۰۰	۱۶/۰۰	۶۰/۰۰	۱۸/۰۰	۳۲	۳۹
۲/۲۷۵۱	۱۴۱/۹۱۲	۳۷۱۹/۱	۱	۲۲/۵۰	۲۰/۰۰	۱۶/۰۰	۷۲/۰۰	۱۸/۰۰	۵	۴۰
۱/۲۷۲۲	۷۷/۷۶	۴۲۲/۴	۰/۹۹۳۰۴۹	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۲۱	۴۱
۱/۲۷۲۲	۷۷/۷۶	۴۲۲/۴	۰/۹۹۳۰۴۹	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۲۳	۴۲
۱/۲۷۲۲	۷۷/۷۶	۴۲۲/۴	۰/۹۹۳۰۴۹	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۱۱	۴۳
۱/۲۷۲۲	۷۷/۷۶	۴۲۲/۴	۰/۹۹۳۰۴۹	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۲۶	۴۴
۱/۲۷۲۲	۷۷/۷۶	۴۲۲/۴	۰/۹۹۳۰۴۹	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۲۵	۴۵
۱/۲۷۲۲	۷۷/۷۶	۴۲۲/۴	۰/۹۹۳۰۴۹	۲۲/۵۰	۱۶/۰۰	۱۶/۰۰	۶۶/۰۰	۱۸/۰۰	۳۶	۴۶

جدول ۳ پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی

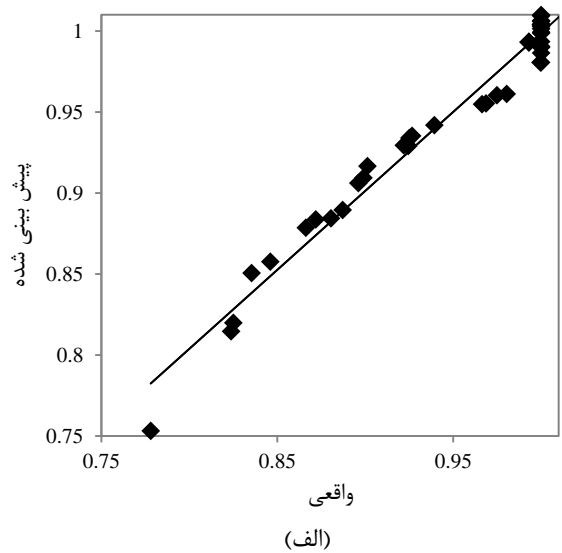
پارامتر	مقدار
ماده	Al6082
دما (°C)	۴۵۰
ضریب انتقال حرارت ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	۵
ضریب اصطکاک	۰/۳

جدول ۴ جدول تحلیل واریانس مربوط به هر چهار پاسخ

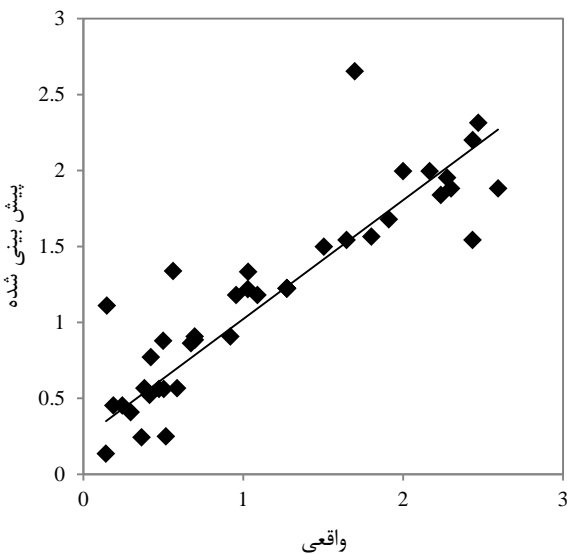
پاسخ	Prob>F	R^2	R^2 تنظیم شده	انحراف معیار
FR	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۷۴۸	۰/۹۶۲۲	۰/۰۱۲
FV	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۸۰۵	۰/۹۷۴۲	۱۹۸/۲۰
F	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۵۴۱	۰/۹۴۵۵	۱۰/۹۳
SV	<۰/۰۰۰۱	۰/۷۸۲۸	۰/۷۵۵۷	۰/۳۸



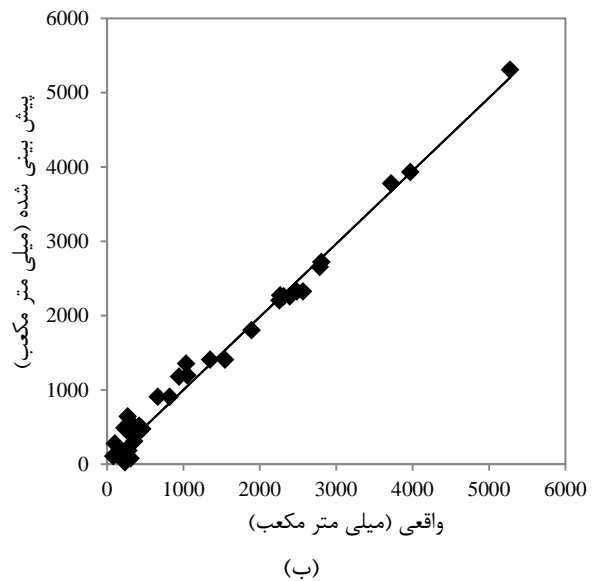
(ج)



(الف)



(د)



(ب)

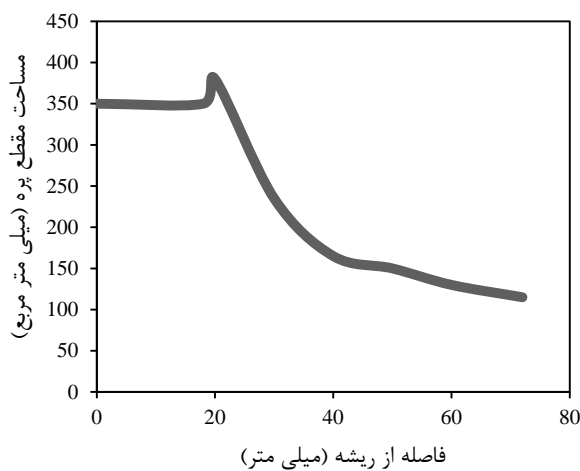
شکل ۴ مقایسه مقادیر حقیقی و مقادیر پیش‌بینی شده برای الف- نرخ پرشدگی $R^2=۰/۹۷۴۸$ ، ب- حجم پلیسه (mm^3) $R^2=۰/۹۸۰۵$ ، ج- نیرو (تن) $R^2=۰/۹۵۴۱$ ، د- واریانس کرنش $R^2=۰/۷۸۲۸$

۵- بهینه‌سازی پیش‌فرم

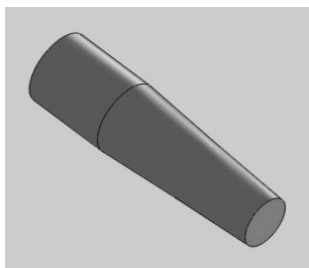
طبق مطالب گفته شده در بخش ۴، بیشترین مقدار نرخ پرشدگی، کمترین مقدار حجم پلیسه، کمترین مقدار نیروی آهنگری و کمترین مقدار واریانس کرنش به عنوان اهداف بهینه‌سازی انتخاب شدند.

جدول ۶ مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده توسط روش سطوح پاسخ با مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار دیفرم برای

مدل بهینه		مقدار پیش‌بینی شده	مقدار محاسبه شده	میزان خطا (%)
پاسخ	هدف	مقدار پیش‌بینی شده	مقدار محاسبه شده	میزان خطا (%)
FR	ماکزیمم	۰/۹۹۹۹۹۹	۱	۰
FV (mm ³)	مینیمم	۱۰۱۳/۶۵	۹۸۱/۲	۳/۳۱
F (N)	مینیمم	۱۱۰۵۲۶۱	۱۰۹۹۳۰۰	۰/۵۴
SV	مینیمم	۰/۹۸۳۳	۰/۹۰۸۶	۸/۲۲



شکل ۶ منحنی توزیع جرم



شکل ۷ مدل و شبیه‌سازی پیش‌فرم طراحی شده به روش سنتی توزیع جرم

شکل ۸ مقدار حجم پلیسه را در دو حالت طراحی با روش

پس از تحلیل پاسخ‌ها با روش سطوح پاسخ، بهینه‌سازی مدل انجام شد و یک مدل بهینه به دست آمد که مقادیر بهینه در جدول ۵ آمده است.

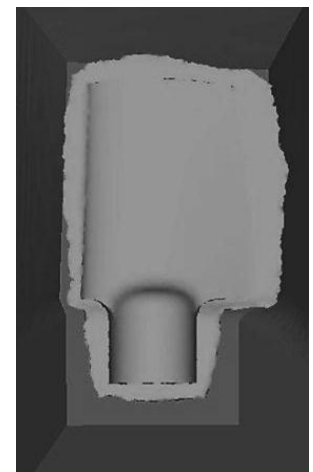
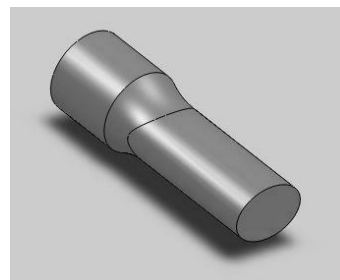
مدل و شبیه‌سازی پیش‌فرم بهینه در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود قالب کاملاً پر شده است. مقایسه مقادیر پاسخ پیش‌بینی شده با مقادیر به دست آمده از نرم‌افزار دیفرم در جدول ۶ آمده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود مقادیر بسیار به یکدیگر نزدیک هستند و این به معنی دقیق بودن نتایج است.

۶- بحث و نتایج

به منظور نشان دادن قابلیت اطمینان و کارایی روش بهینه‌سازی انجام شده، مدل به دست آمده از روش سطوح پاسخ با مدل به دست آمده از روش سنتی توزیع جرم مقایسه می‌شود. در طراحی سنتی، طراحی پیش‌فرم براساس روش توزیع جرمی انجام می‌گیرد. مدل در نظر گرفته شده برای این کار یک بیلت مخروطی خواهد بود. برای به دست آوردن ابعاد بیلت از منحنی توزیع جرم مدل نهایی پره استفاده می‌شود. منحنی توزیع جرمی پره در شکل ۶ نشان داده شده است. با کمک این منحنی ابعاد بیلت که یک مخروط خواهد بود، به دست آمد. بر همین اساس پیش‌فرم طراحی شده در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۵ ابعاد بهینه پیش‌فرم به دست آمده از روش سطوح پاسخ

ابعاد	R	D_2	D_1	L_t	L_1
مقدار (میلی‌متر)	۲۳/۱۶	۱۴/۶۲	۱۸/۸۶	۶۵/۳۷	۱۹/۲۱

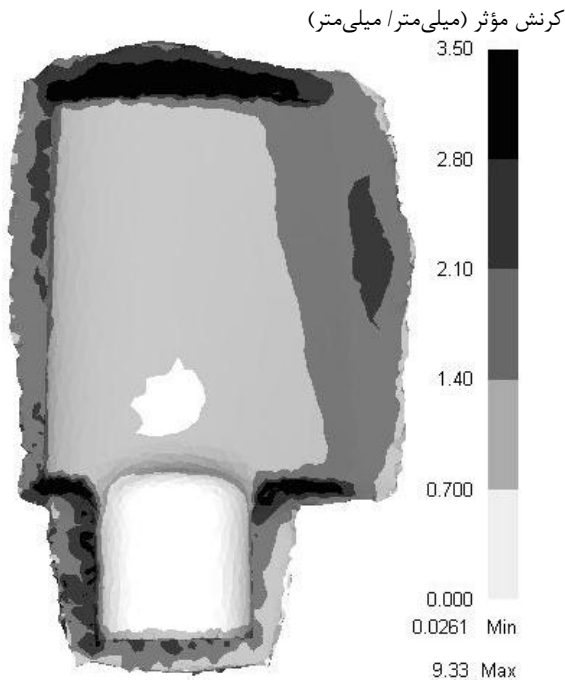


شکل ۵ مدل بهینه و شبیه‌سازی این مدل در نرم‌افزار دیفرم

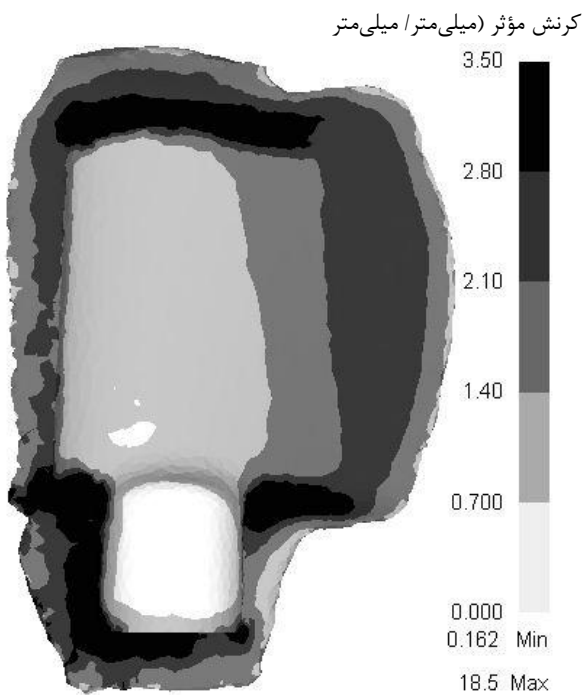
سنتی توزیع جرم و مدل بهینه شده توسط روش سطوح پاسخ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، مقدار پلیسه برای آهنگری پیش‌فرم بهینه‌سازی شده به روش سطوح پاسخ به میزان ۱۱۷/۶۴٪ کمتر از پیش‌فرم طراحی شده به روش سنتی است.

همچنین در شکل ۹ منحنی‌های نیرو-جابجایی در دو حالت آهنگری با پیش‌فرم سنتی و پیش‌فرم بهینه‌سازی شده نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، نیروی نهایی لازم برای آهنگری پیش‌فرم بهینه به میزان ۲۲/۱٪ کمتر از پیش‌فرم طراحی شده به روش سنتی است.

شکل ۱۰ توزیع کرنش در دو حالت طراحی با روش سنتی توزیع جرم و مدل بهینه شده توسط روش سطوح پاسخ را نشان می‌دهد.



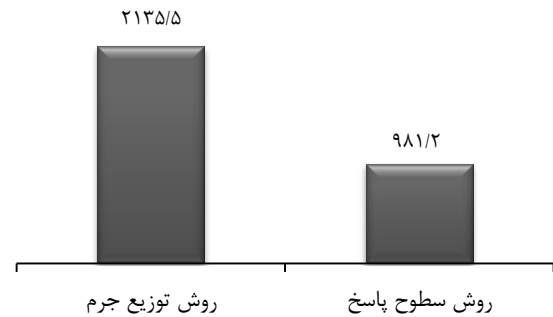
(الف)



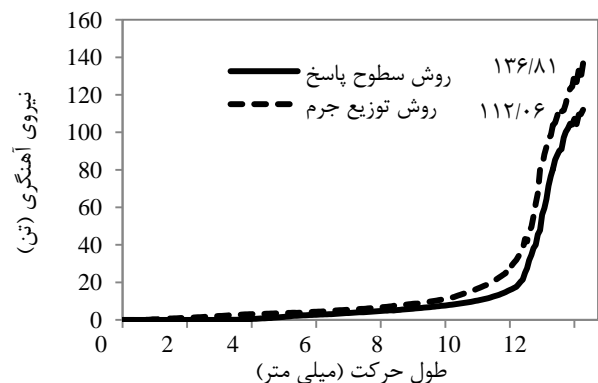
(ب)

شکل ۱۰ مقایسه توزیع کرنش در دو حالت طراحی، الف- مدل بهینه شده توسط روش سطوح پاسخ، ب- روش سنتی توزیع جرم

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات کرنش در روش سطوح پاسخ، در قسمت‌های مرکزی قطعه‌کار که در بازه ۰ تا ۱/۷۵ تغییر می‌کند، کمتر از روش توزیع جرم است و



شکل ۸ مقایسه حجم پلیسه (میلی‌متر مکعب) در دو حالت طراحی با روش سنتی توزیع جرم و مدل بهینه شده توسط روش سطوح پاسخ



شکل ۹ منحنی نیرو-جابجایی در دو حالت آهنگری با پیش‌فرم سنتی و پیش‌فرم بهینه‌سازی شده به روش سطوح پاسخ

کلی از سه نوع ماده برای مدل‌سازی فیزیکی استفاده می‌گردد. گل‌ها^۱، موم‌ها^۲ و فلزات این سه گروه کلی را تشکیل می‌دهند [۱۵]. گل‌ها عموماً پایه خاک رس دارند و معروف‌ترین آنها پلاستیسین^۳ است. موم‌ها نیز انواع مختلفی دارند که می‌توان از آنها به موم‌های ریخته‌گری دقیق اشاره کرد. از بین فلزاتی که برای مدل‌سازی فیزیکی استفاده می‌شوند سرب و آلومینیوم استفاده بیشتری دارند. ماده مدل‌ساز مورد انتخاب باید خصوصیات مشابهی با ماده حقیقی، از جمله همسانگردی^۴، تنش سیلان و رفتار اصطکاکی داشته باشد [۱۵].

رفتار کار گرم آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ و سرب در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

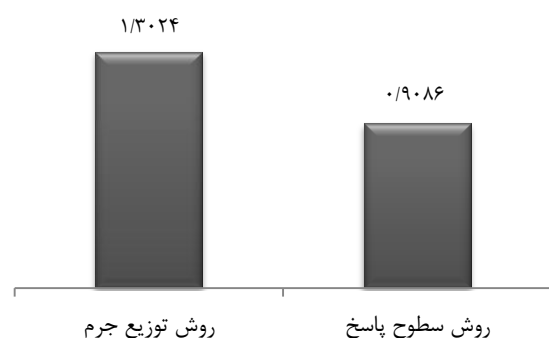
همان‌طور که مشاهده می‌شود سرب در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس و بالاتر از آن، هیچ‌گونه کارسختی از خود نشان نمی‌دهد که این رفتار مشابه رفتار آلیاژ آلومینیوم در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس می‌باشد. لذا می‌توان از این بازه دمایی برای مدل‌سازی آهنگری داغ آلیاژ آلومینیوم استفاده کرد. از این رو، در این تحقیق ماده سرب ۹۹/۹۹٪ برای مدل‌سازی فیزیکی و تأیید نتایج شبیه‌سازی‌ها انتخاب گردید. برای اجرای مدل‌سازی فیزیکی مراحل انجام شده برای طراحی پیش‌فرم آلومینیومی، برای سرب اجرا شد و ابعاد پیش‌فرم بهینه برای سرب به دست آمد. سپس قالب‌ها و قطعات پیش‌فرم سربی ساخته شدند. برای ساخت قطعه پیش‌فرم سربی از روش ریخته‌گری استفاده شد. ابتدا مطابق شکل ۱۳ مدل ریخته‌گری قطعات پیش‌فرم از جنس آلومینیوم به روش ماشینکاری با فرز CNC ساخته شد. سپس با کمک این مدل‌ها قطعه پیش‌فرم با روش ریخته‌گری ماسه‌ای، ریخته‌گری شد. شکل ۱۴ قطعه پیش‌فرم ریخته‌گری شده را نشان می‌دهد.

نیمه‌های قالب نهایی از جنس فولاد با ماشین‌کاری توسط فرز CNC مطابق مدل نشان داده شده در شکل ۱۵ ساخته شدند. برای اجرای فرایند آهنگری از یک پرس مکانیکی با ظرفیت ۳۰ تن، مطابق شکل ۱۶ استفاده شد. نمونه‌های سربی در کوره تا دمای ۲۲۰ درجه سلسیوس گرم شده و با روان‌کار گریس نسوز مخلوط شده با پودر گرافیت، آهنگری می‌شوند.

قسمت‌های مرکزی قطعه‌کار که دارای رنگ یکنواخت هستند و ایرفویل پره را تشکیل می‌دهند، دارای تغییرات کرنش یکنواخت‌تری هستند. همچنین مقادیر تغییرات کرنش در بخش‌های نزدیک به کانال پلیسه (مناطق سفید رنگ) در روش توزیع جرم بیشتر است. بنابراین، تغییرات کرنش برای قطعه نهایی آهنگری با پیش‌فرم بهینه‌سازی شده به روش سطوح پاسخ یکنواخت‌تر از پیش‌فرم طراحی شده به روش سنتی است. شکل ۱۱ مقدار واریانس کرنش در دو حالت طراحی با روش سنتی توزیع جرم و مدل بهینه شده توسط روش سطوح پاسخ را برای قطعه نهایی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار واریانس کرنش برای آهنگری پیش‌فرم بهینه‌سازی شده به روش سطوح پاسخ به میزان ۴۳/۳۴٪ نسبت به روش توزیع جرم کاهش یافته است.

۷- مدل‌سازی فیزیکی

از آنجا که اجرای آهنگری آلیاژ آلومینیوم هزینه‌بر است، برای بررسی صحت نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، نتایج فرایند با استفاده از ماده مدل‌ساز که در ادامه توضیح داده می‌شود، آزمایش شد. برای مدل‌سازی فیزیکی فرایند آهنگری روش‌هایی وجود دارد که به کمک آنها می‌توان در دمای پایین و با نیروی کمی در داخل قالب این فرایند را مورد مطالعه قرار داد. با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی می‌توان اطلاعاتی مانند نحوه جریان مواد در داخل قالب و عیوب حاصل از آهنگری را به دست آورد.



شکل ۱۱ مقایسه مقادیر واریانس کرنش برای هر دو روش

هر چه قدر مدل رفتار مکانیکی ماده مدل‌ساز به ماده اصلی شبیه‌تر باشد بیشتر می‌توان به این اطلاعات تکیه کرد. به طور

1. Clays
2. Waxes
3. Plasticine
4. Isotropy

قطعه آهنگری شده در انتهای عملیات برای حالت شبیه‌سازی و حالت تجربی در شکل ۱۷ آمده است.



شکل ۱۵ قالب‌های بالایی و پایینی

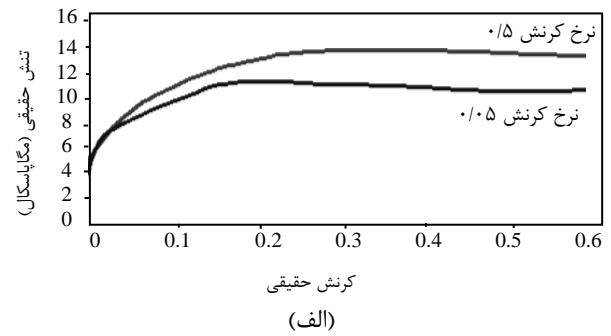


(الف)

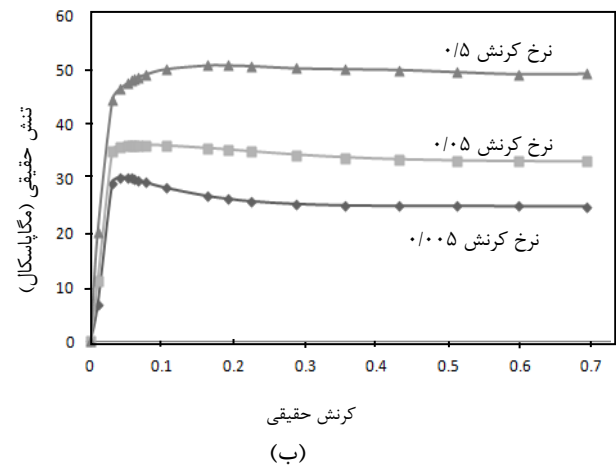


(ب)

شکل ۱۶ پرس مکانیکی استفاده شده در آزمایش‌های تجربی، الف- پرس مکانیکی استفاده شده، ب- قالب‌های بالا و پایین نصب شده روی پرس



(الف)



(ب)

شکل ۱۲ رفتار کار گرم الف- سرب ۹۹/۹۹٪ در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس [۱۵]، ب- آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس [۱۶]



شکل ۱۳ مدل ریخته‌گری



شکل ۱۴ قطعه پیش‌فرم ریخته‌گری شده

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک هندسه اولیه برای پیش‌فرم در نظر گرفته شد و بهینه‌سازی مدل توسط روش سطوح پاسخ انجام شد و یک مدل بهینه به دست آمد. برای نشان دادن اعتبار و اثر بخشی روش ارائه شده، فرایند شکل‌دهی پره با استفاده از نرم‌افزار المان محدود شبیه‌سازی گردید و نتایج به دست آمده، با روش سنتی توزیع جرم مقایسه شد. نتایج نشان داد که پیش‌فرم بهینه‌سازی شده با روش سطوح پاسخ، پر شدن کامل محفظه قالب را تسهیل کرده و موجب کاهش مقدار ماده هدر رونده به صورت پلیسه به میزان $117/64\%$ ، کاهش نیروهای آهنگری به میزان $22/1\%$ و همچنین یکنواخت‌تر شدن کرنش‌ها و کاهش واریانس کرنش به میزان $43/34\%$ نسبت به روش توزیع جرم می‌شود. همچنین نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی به وسیله مدل‌سازی فیزیکی صحت‌سنجی شد. نتایج نشان داد مطابقت خوبی بین شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی وجود دارد.

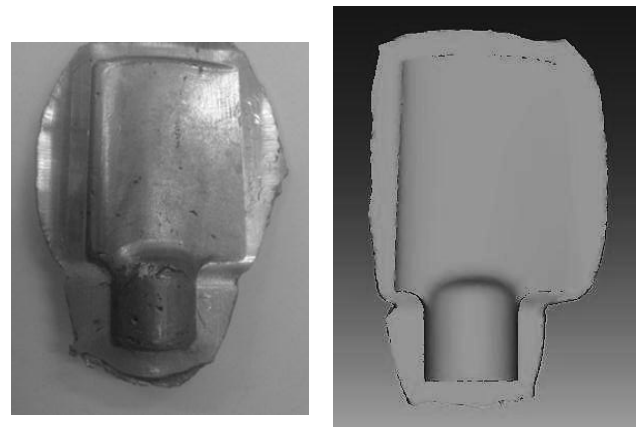
بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش سطوح پاسخ می‌تواند به عنوان ابزاری قدرتمند برای بهینه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی پیچیده مانند آهنگری پرها به کار گرفته شود و از این روش به جای روش‌های آزمون و خطا برای جلوگیری از هدر رفتن زمان و ماده مورد استفاده و همچنین رسیدن به شرایط مطلوب استفاده کرد.

۹- مراجع

- [1] Biswas S.K., Knight W.A., "Preform Design for Closed Die Forgings Experimental Basis for Computer Aided Design", *International Journal of Machine Tools Design and Research*, Vol. 15, No 3, 1975, pp. 179-193.
- [2] Hwang S.M., Kobayashi S., "Preform Design in Disk Forging", *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Vol. 26, 1986, pp. 231-243.
- [3] Kim H.Y., Kim D.W., "Computer-aided Preform Design in the Closed-die", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 41, 1994, pp. 83-104.
- [4] Biglari F.R., O'Dowd N.P., Fenner R.T., "Optimum Design of Forging Dies Using Fuzzy Logic in Conjunction With the Backward Deformation Method", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 38, No 8, 1998, pp. 981-1000.
- [5] Hu Z.M., Dean T.A., "Aspects of Forging of Titanium Alloys and the Production of Blade

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تطبیق خوبی بین سیلان ماده در قطعه تولیدی و قطعه شبیه‌سازی شده و شکل‌گیری پلیسه وجود دارد. بنابراین صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی از این جهت تأیید می‌شود.

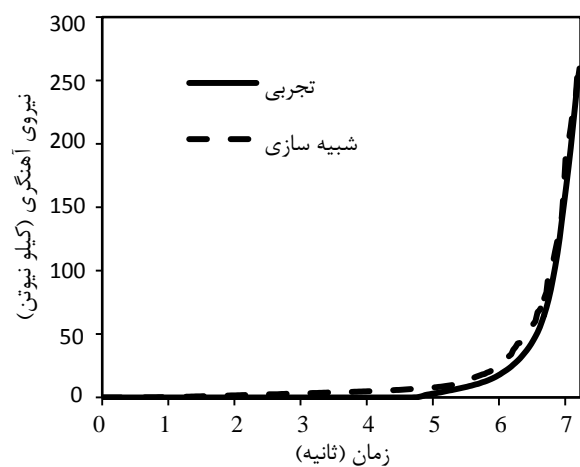
دستگاه پرس مورد استفاده توانایی ترسیم منحنی نیرو-جابجایی را دارا می‌باشد و می‌توان منحنی حاصل را با منحنی به دست آمده از شبیه‌سازی مقایسه نمود. شکل ۱۸ منحنی نیرو-زمان آهنگری را برای حالت شبیه‌سازی و آهنگری تجربی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، منحنی آهنگری تجربی با منحنی شبیه‌سازی هم‌خوانی خوبی دارد و دو منحنی تقریباً بر روی هم منطبق هستند.



(ب)

(الف)

شکل ۱۷ مقایسه قطعه تولیدی به روش تجربی با نتایج شبیه‌سازی، الف- شبیه‌سازی، ب- تجربی



شکل ۱۸ نمودار نیرو-زمان مربوط به نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی

- Using the Finite Element Method and Fuzzy-Pareto Based Genetic Algorithm”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 6, 2012, pp. 1801-1810.
- [12] Montgomery, D.S., “*Design and Analysis of Experiments*”, Iran University of Science and Technology publication, Tehran, Iran, 2007, pp. 357-361 (In Persian)
- [13] Ou H., Balendra R., “Preform Design for Forging of Aerofoil Sections Using FE Simulation”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 80, No. 1, 1998, pp. 144-148.
- [14] Lee S.R., Lee Y.K., Park C.H., Yang D.Y., “A New Method of Preform Design in Hot Forging by Using Electric Field Theory”, *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 44, No. 4, 2002, pp. 773-792.
- [15] Amiri, A., “*Evaluation and optimization of process variables in the form of hot forging nickel-base superalloy*”, Thesis of M.Sc, Tarbiat Modares University, 2008. (In Persian)
- [16] Baroughi, B., “Forged blades are pre-designed form using equipotential lines”, *Thesis of M.Sc, Tarbiat Modares University, 2012. (In Persian)*
- Forms”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 111, 2001, pp. 10-19
- [6] Zhaoa G., Maa X., Zhaoa X., Grandhi R.V., “Studies on Optimization of Metal Forming Processes Using Sensitivity Analysis Methods”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 147, 2004, pp. 217-228
- [7] Thiyagarajan N., Grandhi R.V., “Multi-level Design Process for 3D Preform Shape Optimization in Metal Forming”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 170, 2005, pp. 421-429.
- [8] Shahriari D., Amiri A., Sadeghi M.H., Cheraghzadeh M., “Optimal Closed Die Finish Forgings for Nimonic80-A Alloy Using FEM Method”, *International Journal of Material Forming*, Vol. 1, 2008, pp. 29-32.
- [9] Cheng L., Zhang L., Mu Zh., Tai Q., Zheng Q., “3D FEM Simulation of the Multi-stage Forging Process of a Gas Turbine Compressor Blade”, *Journal of materials processing technology*, Vol. 98, 2008, pp. 463-470.
- [10] Cai J., Li F., Li T., “A New Approach of Preform Design Based on 3D Electrostatic Field Simulation and Geometric Transformation”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 56, 2011, pp. 579-588.
- [11] Alimirzaloo V., Sadeghi M.H., Biglari F.R., “Optimization of the Forging of Aerofoil Blade