

پیش‌بینی نیروی آهنگری شعاعی داغ تک مرحله‌ای با استفاده از روش رویه پاسخ

استادیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اصفهان	مهرداد پورسینا
کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان	پویا فوده
دانشجوی دکترا، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان	داوود پورسینا

چکیده

آهنگری شعاعی داغ یک فرآیند آهنگری قالب باز محسوب می‌شود که برای تبدیل لقمه‌های فولادی بزرگ به سیلندره‌های توپر و توخالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تغییر شکل در این روش حاصل تعداد زیادی عمل رفت و برگشت چهار قالب می‌باشد که با فاصله کوتاه و به صورت شعاعی در محیط قطعه‌کار قرار گرفته‌اند. از آنجاییکه ماکزیمم توان دستگاه‌های آهنگری شعاعی، مقداری ثابت است، دانستن مقدار نیروی وارد بر قالب می‌تواند از آسیب رساندن به دستگاه و هدر رفتن ماده جلوگیری به عمل آورد. در این تحقیق فرآیند آهنگری شعاعی داغ تک مرحله‌ای با استفاده از روش اجزای محدود سه بعدی و به صورت ترمومکانیکی شبیه‌سازی گردیده است. رفتار ماده الاستو-ویسکو-پلاستیک و اصطکاک به صورت ترکیبی از اصطکاک کولمب و تنش برشی محدود شده در نظر گرفته شده است. از آنجایی که تعیین نیروی آهنگری با استفاده از شبیه‌سازی فرآیند نیاز به صرف زمان و هزینه زیاد دارد، به منظور پیش‌بینی نیروی وارد بر قالب، از روش رویه پاسخ که یکی از روش‌های طراحی آزمایش است، استفاده گردیده است. روش رویه پاسخ روشی است که با استفاده از یک سری تکنیک‌های آماری و ریاضی، رابطه‌ای درجه ۲ بین پارامترهای خروجی و ورودی به وجود می‌آورد و فرآیند را بهینه می‌کند. در این مقاله چهار پارامتر زاویه ورودی قالب، درجه حرارت اولیه قطعه‌کار، میزان پیشروی طولی قطعه‌کار و میزان کاهش سطح مقطع قطعه‌کار به عنوان پارامترهای ورودی و نیروی وارد بر قالب به عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته شده است.

کلمات کلیدی: آهنگری شعاعی داغ - قطعات استوانه‌ای توپر - اجزای محدود سه بعدی - روش رویه پاسخ

Prediction of One Stage Hot Radial Forging Force Using Response Surface Method

Mehrdad. Poursina	Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Isfahan
Pouya. Foode	M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology
Davoud. Poursina	Ph.D. Student, Faculty of Science, University of Isfahan

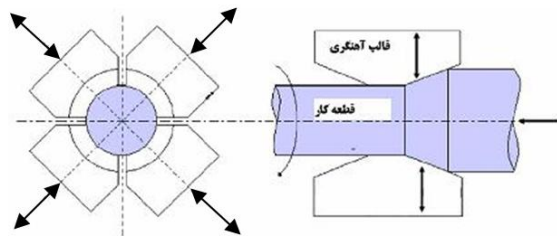
Abstract

Radial forging is an open die forging process for converting ingot into the hollow and solid cylinders. Deformation in this process results from a large number of short strokes and high speed hammer blows on the workpiece. Because of maximum forging force per die is constant, determining of die force before process can prevent die damage and wastage of material. In this research a hot radial forging process is simulated thermo mechanically through 3D finite element method. The behaviour of material is considered as an elastic-visco-plastic. A mixture of coulomb law and constant limit shear is applied to simulate workpiece-die contact. As determination of radial forging force by simulation, is time consuming, so in this paper for prediction die force, response surface method (RSM) is used. RSM is the combination of mathematical and statistical techniques used in an empirical study of relationships and optimization, where several independent variables, influence a dependent variable or response. RSM, the relationships between the responses and the variables investigated is commonly approximated by polynomial functions, whilst the model parameters are obtained by a small number of experiments utilizing a design of experiment. In this paper four parameters such as die inlet angle, billet temperature, work piece feed rate and reduction used as input parameters and die force used as output parameter.

Key Words : Hot Radial forging, solid cylinder product, 3-D FEM, RSM Method

۱- مقدمه

آهنگری شعاعی برای اولین بار در سال ۱۹۴۶ توسط دکتر کوالووتز موسس شرکت اتریشی GFM مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا آهنگری شعاعی برای آهنگری داغ قطعات کوچک و آهنگری سرد بعضی قطعات همراه با مندرل به کار گرفته شد. از سال ۱۹۷۰ تکنولوژی آهنگری چهار چکشه برای تولید مقاطع گرد و میله‌های طویل توسط GFM ابداع گردید. پس از آن، توانایی و تعداد کاربردهای آهنگری شعاعی (RF) سیر افزایشی داشت. امروزه بیش از هزاران عدد از ماشین‌های آهنگری شعاعی با ماکزیمم بار آهنگری ۳۰ MN در هر قالب، در گوشه و کنار جهان نصب شده است. در حقیقت آهنگری شعاعی یک فرآیند آهنگری قالب باز بوده که با استفاده از حرکت کوتاه و سریع چهار قالب بر قطعه کار ضربه وارد نموده و شکل نهایی قطعه کار را ایجاد می‌کند (شکل ۱).



شکل ۱- اساس کار ماشین آهنگری شعاعی به منظور تولید سیلندر توپر.

پس از هر ضربه که با صدای بلند همراه است، قطعه کار در جهت محوری به درون قالب‌ها پیش برده می‌شود [۱]. در نتیجه در هر ضربه فقط یک جزء کوچک از قطعه کار شکل داده می‌شود. علاوه بر این برای بدست آوردن سطح گرد در قطعات مدور، قطعه کار با نرخ ۶ الی ۱۵ دور در دقیقه خواهد چرخید. برای جلوگیری از پیچش در قطعه، چرخش قطعه کار در مدت زمانیکه قطعه و قالب در تماس با یکدیگر قرار دارند به طور لحظه‌ای متوقف می‌گردد.

همچنین به سبب حرکت خلاف جهت قالب‌ها چون برآیند نیروها یکدیگر را خنثی می‌کنند، هیچ نیرویی به پی دستگاه انتقال پیدا نمی‌کند. از جمله مزایای انحصاری آهنگری شعاعی بر سایر روش‌های معمول آهنگری می‌توان به مواردی نظیر تولید انبوه، کاهش هزینه‌ها، کاهش انرژی مصرفی، صرفه جویی در مواد اولیه، ساختار لایه‌ای بهبود یافته، به حداقل رسانیدن تخلخل و ترک‌ها و حفره‌ها و افزایش استحکام مواد اشاره نمود. از موادی که در طی این فرآیند آهنگری می‌شوند می‌توان به انواع فولادها بویژه فولادهای پرآلیاژ، آلیاژهای تیتانیوم، تنگستن، برلیوم و تعداد زیادی سوپرآلیاژها با کاربرد در

دمای بالا اشاره کرد [۲]. با توجه به پیچیدگی‌های آهنگری شعاعی تحقیقات نسبتاً کمی در مقایسه با دیگر فرآیندهای شکل‌دهی در این زمینه صورت گرفته است. همانطور که اشاره شد، آهنگری شعاعی برای اولین بار در سال ۱۹۴۶ توسط دکتر کوالووتز موسس شرکت اتریشی GFM مورد بررسی قرار گرفت. در سال ۱۹۷۶ آلتان و لاهوتی، فرآیند آهنگری شعاعی سرد را برای قالب‌های مرکب و تک زاویه (ساده) با استفاده از روش تختال^۱ مورد بررسی قرار دادند [۳ و ۴]. در سال ۱۹۸۶ تیزنگ و کوبایاشی اولین محققینی بودند که فرآیند آهنگری با سنبه (مندرل) را شبیه‌سازی کردند. آنها فرآیند را به صورت همدمای بررسی و از اختلاف بین قطر داخلی قطعه و سنبه صرف نظر کردند [۵]. در سال ۱۹۹۵ دامبلسکی و همکارانش در یک تحقیق دیگر یک مدل اجزاء محدود برای محاسبه کرنش، نرخ کرنش و پراکندگی دما در آهنگری شعاعی ارائه کردند [۶]. در سال ۱۹۹۸ جانگ و لیو تنش‌های پس‌ماند را در محصولات آهنگری شعاعی سرد بوسیله روش اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند [۷]. در سال ۲۰۰۵ قاعی و موحدی در یک تحقیق، اثرات هندسی قالب را بر روی تغییر شکل در فرآیند آهنگری شعاعی سرد مورد بررسی قرار دادند [۸]. در سال ۲۰۰۶ قاعی و کریمی، فرآیند آهنگری شعاعی سرد را به کمک روش کران بالا^۲ مطالعه نمودند [۹]. همانطور که ملاحظه می‌گردد بیشتر تحقیقات انجام گرفته تاکنون بر روی فرآیند آهنگری شعاعی سرد بوده و بندرت بر روی آهنگری شعاعی داغ مطالعه‌ای صورت گرفته است. لذا در این مقاله به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف آهنگری شعاعی داغ از قبیل زاویه ورودی قالب، میزان پیشروی قطعه کار، میزان کاهش سطح مقطع قطعه کار و دمای قطعه کار بر روی نیروی آهنگری پرداخته شده و میزان نیرو در شرایط مختلف با استفاده از روش رویه پاسخ که یکی از روش‌های طراحی آزمایش است، پیش بینی می‌شود.

۲- شبیه‌سازی فرآیند

برای شبیه‌سازی این فرآیند از روش اجزای محدود و نرم‌افزار ABAQUS کمک گرفته شده است. مدل شامل دو

^۱ - Slab Method

^۲ - Upper Bound



شکل ۳- دستگاه دیلاتومتر.

معادله اینوی رفتار ماده را بر اساس رابطه بین تنش، کرنش و نرخ کرنش در دماهای مختلف بیان می‌کند:

$$\sigma = C \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (1)$$

ثابت‌های معادله اینوی در جدول ۲ با استفاده از نتایج دیلاتومتری تعیین شده است.

جدول ۲- انطباق نتایج دیلاتومتری بر معادله اینوی.

توان نرخ کرنش (m)	توان کرنش (n)	ضریب ثابت (پاسکال) C	دما (درجه سانتیگراد)
۰/۰۷۱	۰/۱۰۲	۲/۶۳ e+۸	۸۵۰
۰/۱۳۴	۰/۱۱۵	۱/۵۴ e+۸	۹۵۰
۰/۱۰۸	۰/۱۱۶	۱/۳۶ e+۸	۱۰۵۰
۰/۱۳۱	۰/۰۷۹	۱/۰۹۵ e+۸	۱۱۰۰

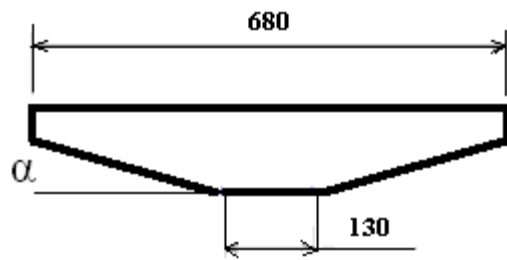
سایر خواص فولاد مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول ۳ بیان شده است.

جدول ۳- سایر خواص فولاد مخصوص.

ضریب هدایت (watt/m*k)	۴۹/۸
چگالی (kg/m ³)	۷۸۵۰
نسبت پواسون	۰/۳
گرماوی ویژه (joule/kg*k)	۴۷۲
ضریب گرماوی الاستیک	۰/۹

در این شبیه‌سازی دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد و انتقال حرارت به صورت ناپایدار و گذرا فرض شده است. این انتقال حرارت شامل انتقال حرارت تشعشعی، همرفت و جابه‌جایی در حین فرآیند می‌باشد. در تحقیق حاضر به دلیل برتری‌های روش حل صریح^۱ نسبت به حل ضمنی^۲ برای فرآیندهای شکل‌دهی، از روش صریح استفاده شده است. از آنجاییکه نیروی آهنگری دارای مقادیر بزرگی می‌باشد، در نظر گرفتن اصطکاک به صورت کولمب ممکن است باعث شود که

بخش است. بخش اول قالب‌ها که شامل چهار قالب هم شکل و اندازه است که با فاصله یکسان به صورت محیطی در اطراف قطعه‌کار مرتب شده‌اند و بخش دوم قطعه‌کار که یک ماده تغییرشکل‌پذیر بوده و در این تحقیق یک استوانه توپر در نظر گرفته شده است. از آنجاییکه تغییر شکل قالب‌ها در مقایسه با قطعه‌کار قابل صرفه نظر می‌باشد، لذا قالب‌ها صلب فرض می‌شوند. شکل ۲ نمایی از مقطع قالب استفاده شده در این تحقیق که نوعی قالب تک زاویه با زاویه ورودی α می‌باشد را نشان می‌دهد. پهنای قالب ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۲- مقطع قالب تک زاویه (ابعاد بر حسب میلی‌متر).

پارامترهای ثابت شبیه‌سازی در جدول شماره ۱ بیان شده است.

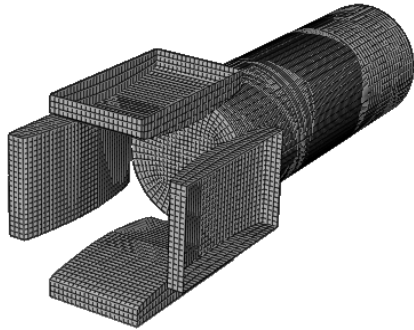
جدول ۱- پارامترهای ثابت شبیه‌سازی.

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
طول قطعه‌کار	۱/۶ متر	قطر اولیه قطعه‌کار	۰/۵۴ متر
چرخش قطعه‌کار	۱۲ درجه	دمای اولیه قالب	۲۰۰ درجه سانتیگراد
طول کل قالب	۰/۶۸ متر	ماکزیمم سرعت قالب	۰/۴ متر بر ثانیه

در این تحقیق ماده مورد استفاده یک فولاد کم آلیاژ مشابه AISI 4337 است. رفتار ماده الاستو-ویسکو پلاستیک در نظر گرفته شده است. مدل الاستو-ویسکو-پلاستیک برای موادی استفاده می‌گردد که رفتار ماده علاوه بر کرنش و تنش به نرخ کرنش و دما نیز بستگی داشته باشد. آزمایش‌های متعددی به منظور تعیین معادلات متشکله ماده که یکی از مهمترین عوامل شبیه‌سازی می‌باشد وجود دارد که عبارت از آزمایش کشش و فشار ساده، آزمایش پیچش دینامیکی، پرسهای کوبه‌ای و دستگاه دیلاتومتر می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از دستگاه دیلاتومتر که در شکل ۳ نشان داده شده است، معادلات متشکله ماده مشخص گردیده است. تست‌های فشار داغ در دماهای ۸۵۰، ۹۵۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد با نرخ کرنش‌های ۰/۱، ۱ و ۱۰ (1/sec) انجام گرفته و سپس نتایج حاصل از آن بر معادله اینوی (رابطه ۱) انطباق داده شده است.

1 - Explicit

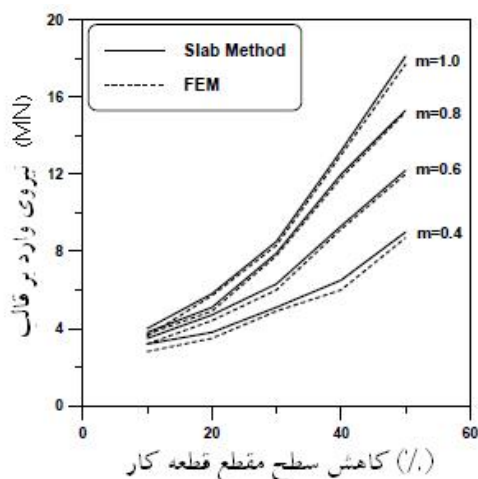
2 - Implicit



شکل ۴- نمونه مش بندی شده فرآیند آهنگری شعاعی داغ.

۳- تایید شبیه سازی

بیشتر تحقیقات انجام گرفته در زمینه آهنگری شعاعی در شرایط سرد بوده و هیچگونه نتایج تجربی در آهنگری شعاعی داغ موجود نمی باشد. ناگزیر به منظور بررسی صحت شبیه سازی، در ابتدا نتایج بدست آمده از روش FEM با روش تختال مقایسه گردیده و سپس کانتور کرنش پلاستیک موثر با الگوی جریان مواد که از یک نمونه ماکرواچ شده بدست آمده مقایسه شده است. به منظور مقایسه نتایج روش FEM با روش تختال، بایستی ابعاد قطعه کار و قالب مشابه اطلاعات موجود در مرجع [۱] باشد. آنالیز با ضرایب اصطکاک مختلف ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد و در یک مرحله انجام گرفته و نیروها در کاهش سطح مقطع های مختلف در دو روش تختال و FEM با یکدیگر مقایسه شده است. همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می شود، نتایج حاصل از این دو روش از انطباق قابل قبولی برخوردار بوده و ماکزیمم خطا در حدود ۷ درصد می باشد.



شکل ۵- مقایسه نتایج اجزا محدود با روش تختال

تنش برشی تماسی از تنش برشی تسلیم بیشتر شود، بنابراین اصطکاک به صورت ترکیبی از معیار کولمب و تنش برشی محدود شده فرض شده است (رابطه ۲).

$$\tau_f = \begin{cases} \mu \sigma_N & \text{if } \tau \leq \tau_y \\ m \bar{\sigma} / \sqrt{3} & \text{if } \tau > \tau_y \end{cases} \quad (2)$$

در این رابطه τ_f بیانگر تنش برشی، τ_y معرف تنش برشی تسلیم و $\bar{\sigma}$ میانگین تنش جریان خواهد بود. در حقیقت اگر تنش برشی بزرگتر از تنش برشی تسلیم باشد مدل اصطکاک، مدل چسبنده خواهد بود که معمولاً در فرآیندهای شکل دهی داغ از همین مدل استفاده می شود و اگر تنش برشی در سطوح تماس کوچکتر از تنش برشی تسلیم باشد از رابطه $\mu \sigma_N$ استفاده خواهد شد که μ ضریب اصطکاک کولمب و σ_N تنش عمود بر سطح می باشد. لازم به ذکر است که مقدار m به عنوان ضریب اصطکاک در شکل دهی داغ برابر ۰/۸ در نظر گرفته می شود.

سرعت شعاعی هر قالب در شبیه سازی به صورت هارمونیک سینوسی در نظر گرفته شده، که شبیه یک مکانیزم لنگ لغزنده می باشد. در شبیه سازی هنگامی که تغییر شکل ها بزرگ می شود، المان ها اغلب در آستانه خراب شدن و از بین رفتن قرار می گیرند لذا نتایج قابل قبولی ارایه نمی کنند. در چنین شرایطی لازم است نگاشتی از المان های خراب به المان های اصلاح شده انجام داد و شبکه بندی را بهبود بخشید یا اصطلاحاً مش بندی مجدد نمود. در آنالیز به روش صریح در نرم افزار ABAQUS این قابلیت وجود دارد که بهبود شبکه بندی به صورت خودکار انجام گیرد. تعداد المان استفاده شده برای قطعه کار حدود ۶۰۰۰۰ المان و نوع آن C3D8RT می باشد. این المان از نوع محیط پیوسته سه بعدی هشت گرهی با فرمول بندی انتگرال کاهش یافته می باشد. مرتبه هندسی آن خطی است و قابلیت کنترل پدیده ساعت شنی را نیز دارد. در شبیه سازی، قالب به عنوان جسم صلب در نظر گرفته شده و المان به کار رفته در مش بندی آن از نوع R3D4 می باشد که المانی صلب و چهار گرهی، برای تماس های سه بعدی می باشد. از آنجایی که تعداد المان های به کار گرفته شده در شبیه سازی قطعه کار بسیار زیاد می باشد لذا به منظور کاهش زمان حل از mass scale (مقیاس دهی جرمی) ۱۰۰ در شبیه سازی استفاده شده است. مدل اجزای محدود فرآیند آهنگری شعاعی داغ در شکل ۴ نشان داده شده است.

۴- طراحی آزمایش

بررسی پارامترهای مؤثر بر هر خروجی نیازمند تحلیل آماری نتایج است. در این تحقیق از روش رویه پاسخ^۱ که یکی از قویترین طراحی‌های آماری ممکن می‌باشد، استفاده شده است.

روش رویه پاسخ روشی است که با استفاده از یک سری تکنیک‌های آماری و ریاضی رابطه‌ای درجه ۲ بین پارامترهای خروجی و ورودی به وجود می‌آورد و در نهایت فرآیند را بهینه می‌کند. در مسائلی که رابطه بین پاسخ و متغیرهای مستقل را نمی‌توان به طور دقیق مشخص کرد، از روش رویه پاسخ استفاده می‌شود. پس اولین قدم در این روش، یافتن تقریبی مناسب برای ارتباط دادن پاسخ و مجموعه متغیرهای مستقل است. معمولا از چند جمله‌ای‌های مرتبه پایین، مانند تقریب خطی در ناحیه‌ای بسیار محدود از دامنه کاری متغیرهای مستقل استفاده می‌شود. اگر پاسخ توسط یک تابع خطی از متغیرهای مستقل مدل شود، تابع تقریب زنده برای مدل مرتبه اول به صورت رابطه (۳) خواهد بود:

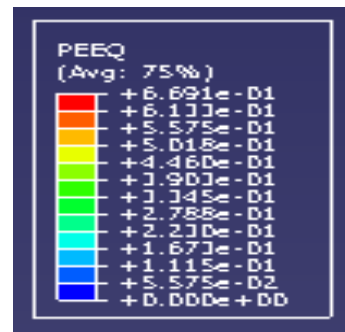
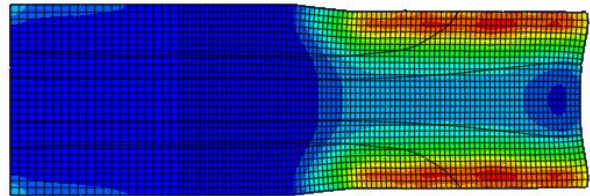
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (3)$$

در صورت وجود خمیدگی در پاسخ یا تأثیر پارامترها بر یکدیگر، باید از چندجمله‌ای‌های مرتبه بالاتر، مانند مدل مرتبه دوم استفاده کرد (رابطه ۴).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4)$$

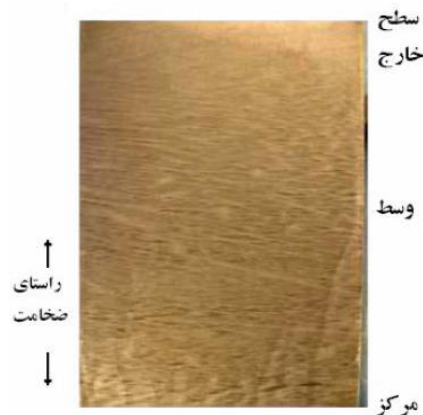
کلیه مسائلی که به روش رویه پاسخ بررسی می‌شوند با این چند جمله‌ای‌های تقریب زنده مدل می‌شوند. البته واضح است که یک مدل چندجمله‌ای درجه ۲ در تمامی فضای کاری نمی‌تواند پاسخ را مدل کند، اما برای ناحیه‌ای نسبتا کوچک، چنین مدلهایی معمولا تقریب خوبی دارند. برای برآورد ضریب پارامترها در تقریب چندجمله‌ای‌ها، از روش کمترین مربعات استفاده می‌گردد. پس از آن، بهینه‌سازی پاسخ بر اساس رویه نسبت داده شده انجام می‌شود. در این نوع طراحی از کمترین تعداد آزمایش ممکن بدون از دست دادن دقت استفاده می‌شود. هدف در طراحی آماری ایجاد یک رابطه منطقی بین هر یک از پارامترهای خروجی با پارامترهای مستقل ورودی است. این نوع تحلیل این امکان را به طراح می‌دهد تا بتواند با تغییر سطوح هر

شکل ۶ میزان کرنش پلاستیک موثر (PEEQ) را در لایه-های مختلف قطعه کار نشان می‌دهد همانگونه که مشاهده می‌گردد میزان کرنش پلاستیک موثر یا میزان فشردگی ماده، در لایه‌های بیرونی قطعه کار بیشتر بوده و به تدریج به طرف مرکز قطعه کار کاهش می‌یابد.



شکل ۶ - چگونگی توزیع کرنش پلاستیک موثر با اعمال میزان پیشروی ۲۰mm، زاویه ورودی قالب ۵ درجه، کاهش سطح مقطع ۱۷/۶٪ و دمای اولیه ۸۵۰ درجه سانتیگراد.

شکل ۷ بیانگر الگوی جریان مواد در یک نمونه ماکرو اچ شده از قطعه کار بوده و همانطور که مشاهده می‌گردد در لایه بیرونی میزان فشردگی ماده و تراکم خطوط جریان نسبت به مرکز بیشتر می‌باشد. تراکم خطوط جریان نشانگر بزرگ بودن کرنش پلاستیک موثر می‌باشد. همانگونه که از مقایسه شکل-های ۶ و ۷ مشخص است، شبیه‌سازی از دقت قابل قبولی برخوردار است.



شکل ۷- نمونه ماکرو اچ شده.

۱۳	۹۰۰	۷/۵	۲۵	۱۷/۶	۱۲/۴۵
۱۴	۱۰۰۰	۷/۵	۲۵	۱۷/۶	۹/۱
۱۵	۹۰۰	۱۲/۵	۲۵	۱۷/۶	۱۰/۸
۱۶	۱۰۰۰	۱۲/۵	۲۵	۱۷/۶	۷/۹۵
۱۷	۸۵۰	۱۰	۲۰	۱۴/۲	۱۱/۳۵
۱۸	۱۰۵۰	۱۰	۲۰	۱۴/۲	۶/۳
۱۹	۹۵۰	۵	۲۰	۱۴/۲	۸/۹
۲۰	۹۵۰	۱۵	۲۰	۱۴/۲	۶/۹۵
۲۱	۹۵۰	۱۰	۱۰	۱۴/۲	۵/۹۵
۲۲	۹۵۰	۱۰	۳۰	۱۴/۲	۸/۲۵
۲۳	۹۵۰	۱۰	۲۰	۷/۴	۴/۸۵
۲۴	۹۵۰	۱۰	۲۰	۲۱	۹/۵۵
۲۵	۹۵۰	۱۰	۲۰	۱۴/۲	۷/۲۵

۵- تجزیه و تحلیل نتایج

برای تحلیل نحوه اثرگذاری پارامترهای ورودی بر روی نیرو از آنالیز نتایج با استفاده از تحلیل ANOVA استفاده شده و یک مدل درجه ۲ چندجمله‌ای برای نتایج در نظر گرفته شده است که فرمول آن به صورت رابطه (۵) می‌باشد.

$$Y_u = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_i X_i^2 + \sum_{j>k}^i b_{ij} X_i X_j \quad (5)$$

در این رابطه Y_u مقدار پارامتر خروجی و ضریب b_0 مقدار ثابت معادله و b_i ضرایب خطی و b_{ii} ضرایب درجه ۲ و b_{ij} ضرایب اثرات متقابل هستند و $X_i (1,2,...,k)$ سطوح مختلف k پارامتر ورودی هستند. با استفاده از روش کوچکترین مربعات مقدار عددی ضرایب محاسبه می‌شود که فرمول بالا را به صورت رابطه (۶) برای ۴ متغیر تعیین می‌کند:

$$Y_u = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 + b_{44} X_4^2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{34} X_3 X_4 \quad (6)$$

شایان ذکر آنکه ممکن است برخی از پارامترهای غیر مؤثر از این معادله حذف شوند. معادله رگرسیون بدست آمده توسط روش رویه پاسخ برای نیرو به صورت رابطه (۷) می‌باشد:

یک از پارامترها تاثیرات مستقیم یا غیر مستقیم هر یک از پارامترها را روی خروجی‌ها شناسایی کند. این نوع طراحی علاوه بر پیش‌بینی ضریب پارامترهای درجه یک (Main effect) و بررسی اثرات پارامترها بر یکدیگر (Interaction effect)، ضریب پارامترهای درجه ۲ را نیز محاسبه می‌کند، بنابراین رویه پیش‌بینی شده برای هر مقدار خروجی می‌تواند میزان خطای کمتری داشته باشد. در آهنگری شعاعی داغ پارامترهایی نظیر زاویه ورودی قالب، میزان کاهش سطح مقطع، دمای اولیه قطعه‌کار و پیشروی از عوامل مؤثر بر نیروی وارد بر قالب می‌باشد. لذا ابتدا پارامترهای ورودی به ترتیب درجه حرارت (T)، زاویه ورودی قالب (α) و پیشروی (F) و کاهش سطح مقطع (R) در نظر گرفته شده و سپس برای هر پارامتر، سطوح مختلفی که در جدول ۴ نشان داده شده است انتخاب گردیده است. پس از این مرحله آزمایش‌ها طراحی و انجام شده اند.

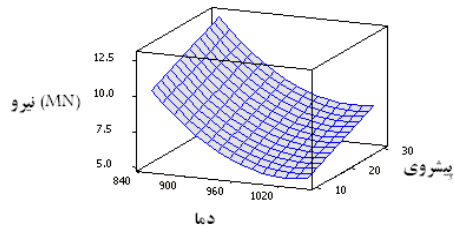
جدول ۴- سطوح پارامترهای مختلف.

سطح	سطح	سطح	سطح	سطح	پارامترها
۱	۲	۳	۴	۵	
۸۵۰	۹۰۰	۹۵۰	۱۰۰۰	۱۰۵۰	درجه حرارت (°C)
۵	۷/۵	۱۰	۱۲/۵	۱۵	زاویه ورودی قالب (°)
۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	پیشروی (mm)
۷/۴	۱۰/۸	۱۴/۲	۱۷/۶	۲۱	کاهش سطح مقطع (%)

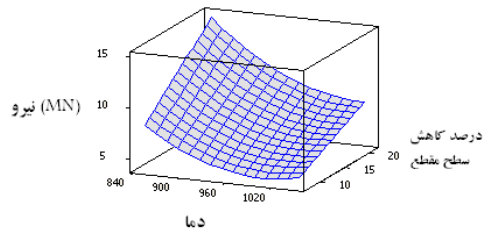
این طراحی شامل ۲۵ آزمایش است که از $2^k = 2^4 = 16$ نقطه در گوشه‌ها و $2k=8$ نقطه محوری و یک نقطه مرکزی تشکیل شده است. (k تعداد متغیرهای مستقل است (جدول ۵)).

جدول ۵- آزمایش‌های طراحی شده.

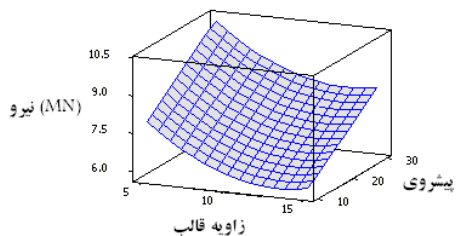
(n)	T(°C)	α (°)	F(mm)	R(%)	Force (MN)
۱	۹۰۰	۷/۵	۱۵	۱۰/۸	۷/۴
۲	۱۰۰۰	۷/۵	۱۵	۱۰/۸	۵/۳
۳	۹۰۰	۱۲/۵	۱۵	۱۰/۸	۶/۹۵
۴	۱۰۰۰	۱۲/۵	۱۵	۱۰/۸	۵/۱
۵	۹۰۰	۷/۵	۲۵	۱۰/۸	۹
۶	۱۰۰۰	۷/۵	۲۵	۱۰/۸	۶/۴۵
۷	۹۰۰	۱۲/۵	۲۵	۱۰/۸	۷/۹
۸	۱۰۰۰	۱۲/۵	۲۵	۱۰/۸	۵/۷۵
۹	۹۰۰	۷/۵	۱۵	۱۷/۶	۱۰/۸۵
۱۰	۱۰۰۰	۷/۵	۱۵	۱۷/۶	۷/۹
۱۱	۹۰۰	۱۲/۵	۱۵	۱۷/۶	۹/۳۵
۱۲	۱۰۰۰	۷/۵	۱۵	۱۷/۶	۶/۸



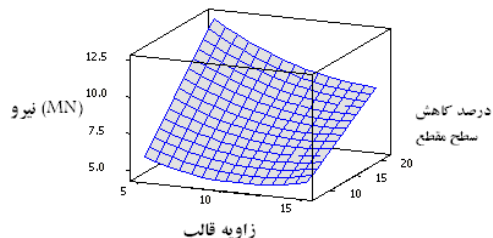
(ب)



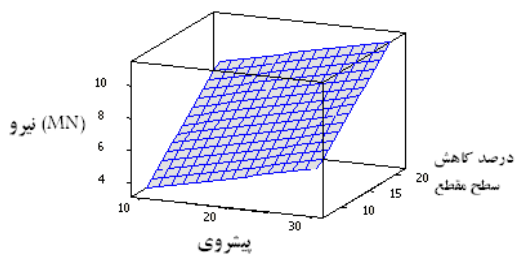
(ج)



(د)



(ه)

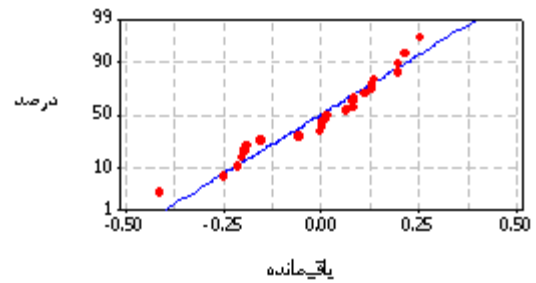


(ی)

شکل ۹- تاثیر پارامترهای مختلف بر نیرو

$$F(MN) = 163.783 - 0.331858 T - 0.525319 \alpha + 0.119583 F + 1.65901 R + 0.000169687 T^2 + 0.0318750 \alpha^2 - 0.00112132 T R - 0.0216912 \alpha R \quad (7)$$

نمودار احتمال نرمال که بیانگر دقت معادله رگرسیون است، در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌کنید، از طرفی دامنه نمودار کوچک بوده (۰/۳ تا -۰/۴) و همچنین نقاط به خط مستقیم نزدیک می‌باشد که هر دو عامل نشانگر دقیق بودن معادله رگرسیون خواهد بود.

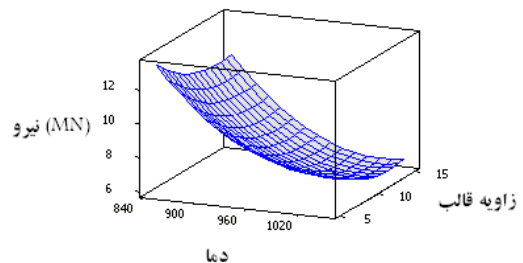


شکل ۸- نمودار احتمال نرمال

اثر پارامترهای مختلف بر نیرو در شکل ۹ (الف - ی) نشان داده شده است. پارامترهای ثابت در شکل ۹ در جدول ۶ ارایه گردیده است. برای مثال در شکل (۹-الف) دما و زاویه قالب متغیر ولی میزان پیشروی، ۲۰ میلی‌متر و کاهش سطح مقطع نیز ثابت و ۱۴/۲٪ در نظر گرفته شده است.

جدول ۶- پارامترهای ثابت در شکل ۹.

دمای اولیه	۹۵۰ °C
زاویه ورودی	۱۰ °
میزان پیشروی	۲۰ mm
کاهش سطح مقطع	۱۴/۲٪

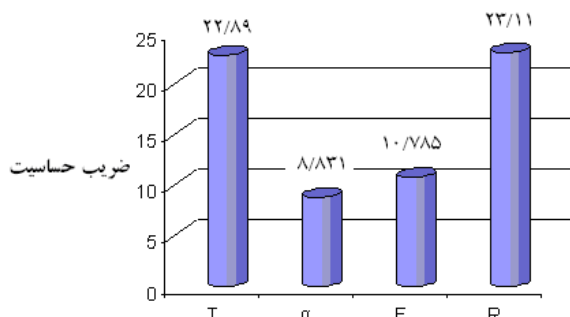


(الف)

T*R	۲/۸۰۸	۰/۰۱۳
R*α	۲/۷۱۵	۰/۰۱۵

با مقایسه پارامتر T-value با توزیع تی می توان به موثر بودن پارامتر پی برده و هرچه این میزان بیشتر باشد احتمال موثر بودن پارامتر افزایش می یابد. در حقیقت پارامتر T بیانگر میزان حساسیت می باشد.

شکل ۱۰ حساسیت هر کدام از پارامترها را بر روی نیروی آهنگری نشان می دهد. در حقیقت هرچه میزان حساسیت بیشتر باشد، تاثیر آن پارامتر بر روی خروجی بیشتر می باشد.



شکل ۱۰- میزان تاثیر پذیری نیرو از پارامترهای مختلف

پارامترهایی که میزان P_value آنها بیش از ۰/۰۵ باشد بر روی نیرو تاثیر گذار نبوده و از معادله رگرسیون حذف می شوند. در جدول ۸ تنها پارامترهایی نشان داده شده که میزان P_value آنها کمتر از ۰/۰۵ می باشد.

۶- نتیجه گیری

۱: با افزایش درجه حرارت (T) و زاویه ورودی (α)، نیروی وارد بر قالب کم می شود.

۲: با افزایش میزان پیشروی (F) و افزایش پارامتر کاهش سطح مقطع (R)، نیروی وارد بر قالب زیاد می شود.

۳: پارامتر کاهش سطح مقطع به طور غیر مستقیم بر روی تاثیر درجه حرارت بر نیرو اثر دارد زیرا با افزایش پارامتر کاهش سطح مقطع، درجه حرارت لایه های میانی قطعه کار که از عوامل تاثیر گذار بر نیرو می باشد، افزایش می یابد.

۴: پارامتر کاهش سطح مقطع به طور غیر مستقیم بر روی تاثیر زاویه ورودی قالب بر نیرو اثر دارد زیرا با افزایش پارامتر کاهش سطح مقطع، سطح زاویه دار قالب با قطعه کار تماس بیشتری پیدا می کند.

۵: پارامترهای دما و کاهش سطح مقطع نسبت به پارامترهای زاویه و میزان پیشروی تاثیر بیشتری دارند.

۶: هنگامیکه حداقل ۳ پارامتر در کمترین یا بیشترین سطح خود باشند روش RSM معمولاً جواب مناسبی نمی دهد (تست شماره ۹ جدول ۷).

همانطور که از شکل ۹ مشخص است، با افزایش میزان پیشروی و افزایش پارامتر کاهش سطح مقطع، نیرو افزایش و با افزایش پارامتر زاویه ورودی قالب و دمای اولیه، نیرو کاهش پیدا کرده است. شکل (۹-ج) نشان می دهد، تاثیر دما بر نیرو با افزایش پارامتر میزان کاهش سطح مقطع، بیشتر شده است. علت این افزایش آنست که با افزایش پارامتر کاهش سطح مقطع، به علت افزایش کار پلاستیک، دما در لایه های میانی قطعه کار افزایش پیدا کرده که این خود بر نیرو تاثیر گذار خواهد بود. از طرفی همانطور که در شکل (۹-ه) مشخص است با افزایش پارامتر کاهش سطح مقطع، تاثیر پارامتر زاویه ورودی قالب بر روی نیرو بیشتر گردیده است. برای ارزیابی معادله رگرسیون از یک سری آزمایش که در جدول ۷ ارائه شده استفاده گردیده است.

جدول ۷- آزمایش های انجام شده

n	T	α	F	R	FEM Force (MN)	RSM Force (MN)
۱	۸۵۰	۷/۵	۳۰	۱۷/۶	۱۵/۸۵	۱۵/۳
۲	۸۵۰	۱۰	۳۰	۱۴/۲	۱۱/۳۵	۱۱/۵۶
۳	۱۰۰۰	۷/۵	۳۰	۱۷/۶	۸/۴۵	۸/۴۵
۴	۱۰۵۰	۱۲/۵	۳۰	۱۷/۶	۶/۸	۶/۹۰
۵	۱۰۰۰	۷/۵	۲۵	۱۰/۸	۶/۴۵	۶/۴۹
۶	۹۵۰	۱۰	۱۰	۱۴/۲	۵/۹۵	۶/۱۳
۷	۹۵۰	۱۲/۵	۳۰	۱۷/۶	۸/۲	۸/۱۳
۸	۸۵۰	۷/۵	۳۰	۱۰/۸	۱۰/۰۵	۱۰/۴
۹	۸۵۰	۵	۱۰	۱۷/۶	۱۵/۵	۱۴/۷
۱۰	۹۰۰	۱۰	۳۰	۱۷/۶	۱۰/۸۵	۱۰/۵

همانطور که مشاهده می شود ماکزیمم خطا (۰/۵) برای ردیف ۹ جایکه سه فاکتور دما، زاویه ورودی و پیشروی در پایین ترین سطح خود هستند بدست آمده است. یکی از مزایای تحلیل به روش ANOVA آنست که محقق از میزان تاثیر هر عامل ورودی بر روی پارامتر خروجی اطلاع پیدا می نماید. جدول ۸ میزان پارامتر T-value و P_value را برای هر پارامتر مشخص می نماید.

جدول ۸- ضرایب رگرسیون محاسبه شده برای نیرو

پارامتر	T-value	P-value
ثابت	۷۱/۴۸	۰
T	۲۲/۸۸۶	۰
α	۸/۸۳۱	۰
F	۱۰/۷۸۵	۰
R	۲۳/۱۱۱	۰
T*T	۷/۴۸۷	۰
α*α	۳/۵۱۶	۰/۰۰۳

مراجع

- [1] Lahoti G.D, Altan T, Analysis and optimaization of the radial forging process for manufacturing gun barrels, Defense technical informationcenter, USA, 1974
- [2] Khayatzade S., Poursina M., golestanian H.: A simulation of hollow and solid products in multi-pass hot radial forging using 3-D FEM Method, Proceeding of 11th Esaform Conferences, 23-25-april, lyon, France
- [3] Lahoti G.D, Altan T. : Analyze of the radial forging process for manufacturing of rods and tubes, journal of engineering for industry, Vol.98, PP. 265-271, 1976
- [4] Lahoti G.D, Dembowski P.V., Altan T. : Radial forging of tubes and rods with compound angle dies , proceeding of NUMRC-IV, ed, Altan T., may17-19 Columbus, OH, , PP.87-98, 1976.
- [5] Tszeng T.C., Kobayashi S., “Determination of residual stresses in radial forging”, Manufacturing Processes Simulation, PED-Vol. 20, pp. 31-45, 1986.
- [6] Domblesky J.P., Shivpuri R., Painter B., “Application of finite-element method to the radial forging of large diameter tubes”, J.M.P.T., vol. 49, pp. 57-74, 1995.
- [7] Jang D.Y., Liou J.H., “Study of stress development in axi-symmetric products processed by radial forging using a 3-D finite element method”, J.M.P.T., vol. 74, pp. 74-82, 1998.
- [8] Ghaei A., Movahhedy M.R., Karimitaheri A., “Study of the effects of die geometry on deformation in the radial forging process”, J.M.P.T., vol. 170, pp. 156-163, 2005.
- [9] Ghaei, A.K. Karimitaheri A., Movahhedy, M.R., “A new upper bound solution for analysis of the radial forging process”, I.J.M.S., vol. 48, pp. 1264–1272, 2006.,.