

بررسی تأثیر پارامترهای فرآیندی بر شکل‌دهی با گاز لوله‌ی آلومینیومی AA 6063 در دمای داغ با استفاده از روش سطح پاسخ

مصطفی رجائی^{۱*}، سید جمال حسینی پور^۲، حامد جمشیدی اول^۳

- ۱- استادیار؛ مهندسی مکانیک، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
۲- استاد؛ مهندسی مواد، دانشکده‌ی مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران.
۳- دانشیار؛ مهندسی مواد، دانشکده‌ی مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران.

چکیده

آلیاژهای آلومینیوم کاربردهای زیاد، خواص ضد خوردگی و نسبت استحکام به وزن مناسبی دارند. فرآیند شکل‌دهی فلز داغ با دمش گاز جزو روش‌های نوین می‌باشد. در این مقاله، جهت به‌دست آوردن بیشترین درصد پرشدگی قالب و حداقل درصد نازک‌شدگی در ناحیه‌ی شکل‌دهی لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای آلومینیومی آلیاژ ۶۰۶۳، از یک شیوه‌ی آماری بر پایه‌ی شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده شده است. ابتدا مدل دقیق اجزای محدود از فرآیند تهیه گردیده و صحت مدل ایجادشده در قیاس با نتایج قطعه‌ی تجربی تأیید شده است. سپس تحلیل رگرسیون رویه‌ی پاسخ برای برازش یک سطح بر پاسخ‌های به‌دست‌آمده از آزمایشات به کار رفته است. عوامل مؤثر شامل دمای شکل‌دهی، فشار، نرخ فشار، تغذیه‌محوری و سرعت پانچ از روش سطح پاسخ به‌منظور استخراج مدل و یافتن بیشترین تأثیر مورد ارزیابی قرار گرفت. هر یک از این فاکتورها در سه سطح در قالب طراحی آزمایشات طرح مرکب مرکزی مورد مطالعه قرار گرفته تا تأثیر پارامترها و بهترین شرایط شناسایی شود. برای مدل‌سازی روش سطح پاسخ، از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت و برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، نقطه‌ی بهینه‌ی به‌دست‌آمده برای هر دو ویژگی مورد مطالعه عبارت است از: درجه‌ی حرارت 200°C ، فشار ۰/۲ bar، نرخ فشار ۶/۵ bar/s، تغذیه‌محوری ۷ mm و سرعت تغذیه ۰/۰۵ mm/s با درصد پرشدگی ۹۱/۲ و درصد نازک‌شدگی ۱۰/۳۷ به‌دست آمد. مدل ارائه‌شده برای پیش‌بینی مقادیر متغیرهای وابسته نتایج بسیار نزدیکی با یافته‌های تجربی به‌دست‌آمده داشت.

کلمات کلیدی

بهینه‌سازی، شکل‌دهی فلز داغ با گاز، سطح پاسخ، لوله‌های پله‌ای.

Investigating the effect of process parameters on gas forming of AA6063 aluminum tube at hot temperature using response surface method

M. Rajaei^{*1}, S. J. Hosseinipour², H. Jamshidi Aval²

1-Department of Mechanics, Faculty of Neyshabour, Khorasan Razavi Branch, Technical and Vocational University, Neyshabour, Iran

2-Research Center for Advanced Processes of Materials Forming, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Abstract

Aluminum alloys have many applications, anti-corrosion properties, and good strength-to-weight ratio. The hot metal gas forming process is one of the new methods. In this article, a statistical method based on finite element simulation has been used in order to obtain the highest percentage of mold filling and the lowest percentage of thinning in the forming area of 6063 aluminum alloy cylindrical stepped tubes. First, the detailed model of the finite elements of the process is prepared and the accuracy of the created model is confirmed by comparison with the results of the experimental part. Then the regression analysis of the response procedure has been used to fit a level on the responses obtained from the experiments. Effective factors including forming temperature, pressure, pressure rate, axial feed and punching speed were evaluated from the response surface method in order to extract the model and find the greatest effect. Each of these factors has been studied at three levels in the form of central composite design experiments to identify the effect of parameters and the best conditions. Design Expert software was used for modeling the response surface method and Abaqus finite element software was used for simulation. According to the obtained results, the optimal point obtained for both studied characteristics is: Temperature 552°C , pressure 6.5 bar, pressure rate 0.02 bar/s, axial feed 7 mm and feed speed 0.05 mm/s with filling percentage 91.2 and thinning percentage 10.37 were obtained. The presented model for predicting the values of the dependent variables had very close results with the experimental findings.

Keywords

Optimization, Hot Metal Gas Forming, Response Surface Methodology, AA6063 Alloy Step Tube

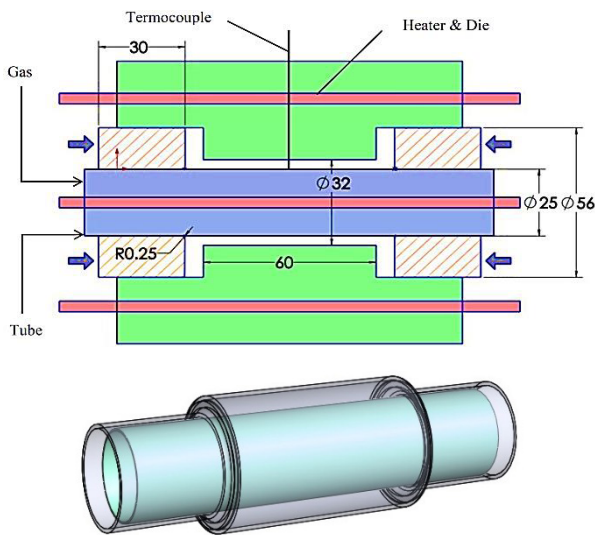
۱- مقدمه

با پیشرفت روزافزون فناوری صنایع نظامی، فضایی و خودروسازی، به منظور کاهش مصرف سوخت، کاهش هزینه تولید، محصولات با کیفیت بالاتر و همچنین تولید قطعات پیچیده، استفاده از مواد سبک وزن مانند آلیاژهای آلومینیوم به صورت جدی مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، یکی از راهکارهای جدید استفاده از دمش گاز در دمای بسیار بالاست که فرآیند شکل دهی فلز داغ با گاز^۱ یا شکل دهی با دمش گاز نامیده می شود. تنش سیلان فوق العاده کم ماده در دمای بالا شکل دهی قطعات بزرگ را امکان پذیر می کند و شکل پذیری بالای ماده در دمای بالا که تولید قطعات پیچیده و با عمق زیاد را ممکن می سازد، از جمله ویژگی های سودمند این فرآیند است [۱].

برخی از تحقیقات انجام شده با این فرآیند بر روی لوله در ادامه ذکر می شود. کدخداییان و همکارانش [۲] ابتدا با تحلیل آماری بر روی نتایج حاصل از شبیه سازی، ارتباط ریاضی بین متغیرهای نیرویی و شاخص های شکل پذیری را تعیین کردند و سپس با وارد کردن مدل های ریاضی حاصل به یک الگوریتم تکاملی، منحنی های نیرویی بهینه برای سهرای T را به دست آوردند. احمدی و همکارانش [۳] به منظور بهینه سازی منحنی اعمال بار، از یک شیوهی آماری بر پایه شبیه سازی اجزای محدود کمک گرفتند، ابتدا مدل دقیق اجزای محدود از فرآیند پیاده سازی و صحت مدل با قطعهی تجربی تأیید شد. سپس با انجام بهینه سازی، نمودار فشار- جابه جایی بهینه ای را به دست آوردند که با اعمال آن، قطعه با کمترین پراکندگی ضخامت تولید گردید. پژوهش های دیگری نیز روی بهینه سازی پارامترهای فرآیند هیدروفرمینگ لولهی تک لایه (مسیر بارگذاری فشار و پیشروی) انجام شده است که می توان به الگوریتم ژنتیک [۴ و ۵]، منطق

فازی [۶] اشاره کرد. در این الگوریتم، پارامترهای فشار داخلی و پیشروی محوری بهینه سازی شده اند و مسیر بارگذاری خطی فرض شده است. رجائی و همکاران [۷] مسیر بارگذاری بهینه را در فرآیند شکل دهی لوله های پلکانی استوانه ای AA۶۰۶۳ با استفاده از پارامترهای فشار داخلی، نرخ فشار، تغذیه محوری و سرعت پانچ به دست آوردند. لی و همکاران [۸] اثر تغذیه را بر روی تشکیل گاز داغ لوله های آلیاژ تیتانیوم کم استحکام مورد مطالعه قرار دادند که نشان داد بهترین دما برای شکل پذیری بالاتر حدود ۸۰۰ درجهی سانتی گراد است. وادیلو و همکاران [۹] از شبیه سازی عددی برای مطالعه اثر منحنی بارگذاری در فرآیند HMGF استفاده کردند. آنها توانستند فولاد ضدزنگ فریتی را تا ۵۵٪ در ۱۰۰۰ درجهی سانتی گراد بالچ کنند. وو و همکاران [۱۰] رفتار ورق های نورد شده $Ti_{22}Al_{24},5Nb_{0,5}Mo$ توسط آزمایش های کششی تک محوره و برآمدگی داغ با گاز را مطالعه کردند. آنها منحنی حد شکل گیری را تحت نرخ کرنش معادل ثابت به دست آوردند. مائو و همکاران [۱۱] با اعمال تغذیه محوری در فرآیند شکل دهی داغ، با دمش هوا تا دمای ۵۶۰ درجهی سانتی گراد، شکل پذیری لوله ای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۳ را به وسیلهی آزمون برآمدگی آزاد مطالعه نمودند. نتایج آنها نشان داد که تغذیه محوری نقش بسیار مهمی در شکل پذیری لوله در حالت داغ نسبت به حالت سرد داشته، به طوری که نسبت انبساط با تغذیه محوری در حدود ۱۳۲ درصد به دست آمد. الم و همکاران [۱۵] یک روش پیش فرمینگ با استفاده از یک یا چند موج در سطح مقطع لوله و سپس شکل دهی داغ لوله های فلزی $22MnB5$ جهت غلبه بر محدودیت های تشکیل HMGF را پیشنهاد کرده که به افزایش حداقل ضخامت دیوارهی قطعهی کار پس از فرآیند شکل دهی

آلومینیوم ۶۰۶۳ به قطر ۲۵ میلی‌متر با ضخامت ۱/۳ میلی‌متر، قالب، کمپرسور هوا، مانومتر، ترموکوپل نوع k، سیستم حرارتی و مجموعه‌ی سیستم تغذیه‌محوری. در این پژوهش، با توجه به شکل‌دهی در دمای بالا، از یک طراحی جدید در مکانیزم و قالب جهت اعمال تغذیه‌محوری استفاده شد. جنس قالب فولاد SPK بوده که با استفاده از دستگاه CNC با دقت بالا ماشین‌کاری شده است.



شکل ۱: الف) شماتیکی از قالب، المنت‌های حرارتی، هندسه‌ی قالب و لوله ب) شماتیکی لوله و قالب در محیط سرهم‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS

بررسی روی فرآیند به‌صورت هم‌دما انجام شده و برای رساندن دمای مجموعه به محدوده‌ی 530°C - 580°C ، از پنج عدد گرمکن میله‌ای و دو عدد گرمکن فشنگی با توان هر کدام ۳۰۰ وات و برای کنترل دما، از یک کنترلر درجه‌ی حرارت با دقت $3 \pm^{\circ}\text{C}$ استفاده شده است. در شکل (۱-الف)، شماتیکی از مجموعه قالب با یک طراحی جدید و هندسه‌ی مشخص، هندسه‌ی لوله، گرمکن‌ها و بوش‌ها نشان داده شده است. در شکل (۱-ب)، شماتیکی از لوله و قالب نشان داده شده که لوله در حالت پرشدگی کامل

به بیش از ۴۰٪ و کاهش احتمال تشکیل ترک کمک می‌کند. فضائی و همکاران [۱۶] اثر نرخ افزایش فشار گاز بر نحوه‌ی شکل‌گیری لوله‌ی تیتانیوم در دمای 840°C با استفاده از المان محدود و تست تجربی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایشات مختلف نشان داد که کاهش نرخ افزایش فشار گاز درون لوله، ضمن فراهم‌آوردن فرصت لازم برای یک‌نواختی دما و در نتیجه شکل‌گیری یک‌نواخت قطعه، باعث کاهش نرخ کرنش در جداره‌ی لوله شده و بدین ترتیب احتمال پاره‌شدن لوله کاهش می‌یابد.

۲- بیان مسئله، نوآوری و ذکر اهداف

در این مقاله، به تعیین بهینه‌ی پارامترهای دمای شکل‌دهی، فشار، نرخ فشار، تغذیه‌محوری و سرعت پانچ بر شکل‌پذیری لوله‌های پله‌ای در فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز به‌منظور ایجاد پرشدگی مناسب قالب و به‌حد اقل رساندن بیشترین نازک‌شدگی لوله پرداخته شده که از روش سطح پاسخ به‌منظور استخراج مدل و یافتن بیشترین تأثیر عوامل استفاده شده است. هر یک از این فاکتورها در سه سطح در قالب طرح آزمایشات طرح مرکب مرکزی^۱ مورد مطالعه قرار گرفته تا تأثیر پارامترها و بهترین شرایط برای بیشترین پرشدگی قالب و به‌حد اقل رساندن بیشترین نازک‌شدگی لوله شناسایی شود.

۳- روش تحقیق

۳-۱- آزمون‌های تجربی

تجهیزات مورد استفاده در فرآیند شکل‌دهی داغ لوله با دمش گاز همراه با تغذیه‌محوری عبارتند از: لوله‌ی آلیاژ

دماهای ۵۳۰، ۵۵۰ و ۵۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد. آنالیز ترکیب شیمیایی لوله‌ی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳ به روش کوانتومتری انجام و در جدول ۱ گزارش شده است.

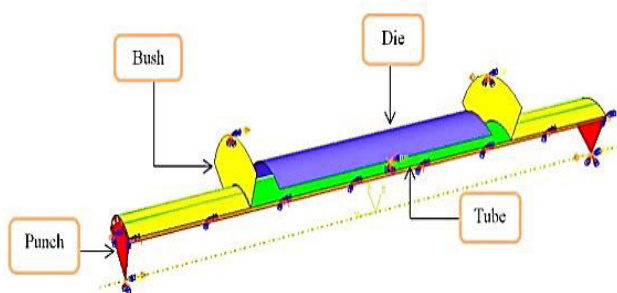
جدول ۱: ترکیب شیمیایی لوله (%wt)

AL	Mg	Si	Fe	Zn	Cu	Mn	Pb	Ti	Sn	Ni
(wt%)	0.482	0.335	0.0208	0.01	0.0166	0.03	0.03	0.03	0.017	0.02

برای تولید قطعات، از مسیر بارگذاری و درجه‌ی حرارت شکل‌دهی که پس از بهینه‌سازی عوامل مؤثر بر فرآیند شکل‌پذیری توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت پیشنهاد شده، استفاده گردیده است.

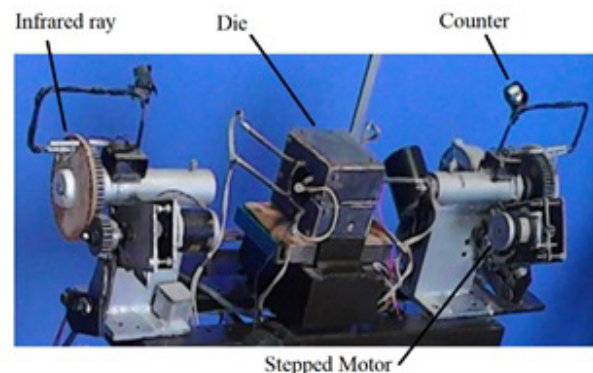
۳-۲- شبیه‌سازی اجزای محدود

به‌دلیل تغییر شکل متقارن لوله، از مدل متقارن محوری سه‌بعدی جهت شبیه‌سازی فرآیند استفاده گردید. نوع المان‌ها C3D4R و تعداد ۳ المان در راستای ضخامت لوله و ابعاد المان‌ها $1 \times 1 \times 0.43 \text{ mm}^3$ می‌باشد. قالب نیز با المان خطی و چهارگوش R3D4، از سری المان‌های صلب^۱ مش‌بندی شده و از حل‌گر ضمنی^۲ برای تحلیل شبیه‌سازی استفاده گردید.



شکل ۳: شماتیکی از مدل به‌کاررفته در شبیه‌سازی

به شکل داخلی قالب درآورده می‌شود. به‌منظور ایجاد تغذیه‌محوری لازم در آزمایش‌ها، یک مجموعه دستگاه که قابلیت اتصال به کامپیوتر را دارد و می‌تواند از دو طرف تغذیه‌محوری را با دقت زیاد اعمال کند، طراحی و ساخته شد. به‌منظور تأمین فشار شکل‌دهی، از یک دستگاه کمپرسور با حداکثر ظرفیت ایجاد فشار ۱۰ بار استفاده گردید. میزان سرعت و مقدار پیشروی توسط برد کنترل‌کننده‌ی استپ موتور تنظیم و با استفاده از پمپ، فشار به‌صورت خطی و آرام اعمال تا به فشار نهایی برسد، کنترل فشار در حین انجام فرآیند به وسیله‌ی مانومتر با دقت $\pm 0.3 \text{ bar}$ انجام می‌گیرد. برای آب‌بندی لوله، در دو انتهای آن، از دو سیستم ثابت‌کننده پیچ‌ومهره‌ای توسط بوش فلزی استفاده شده است که مانع از نشت هوای فشرده از لوله می‌شود. از اشعه‌ی مادون قرمز برای اندازه‌گیری دقیق میزان پیشروی تغذیه‌محوری استفاده می‌شود. در شکل ۲، شماتیکی از مجموعه دستگاه با یک طراحی جدید نشان داده شده است.



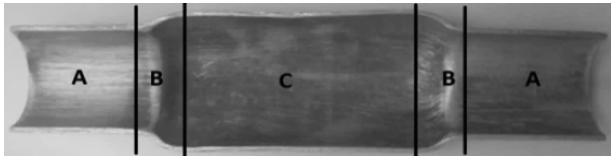
شکل ۲: شماتیکی از مجموعه تجهیزات سیستم تغذیه‌محوری

در ادامه، برای بررسی اثر دما و فشار شکل‌دهی بر روی حداقل درصد نازک‌شدگی و پرشدگی قالب، فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز همراه با تغذیه‌محوری در

۱- Discrete Rigid

۲- Implicit

نمونه‌ها در راستای طولی لوله به وسیله‌ی دستگاه برش سیمی بریده شده و همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، ضخامت نمونه در قسمت‌های مختلف با استفاده از میکرومتر اندازه‌گیری شد. همچنین پروفیل قطعه و درصد پرشدگی قالب مورد بررسی قرار گرفته است.

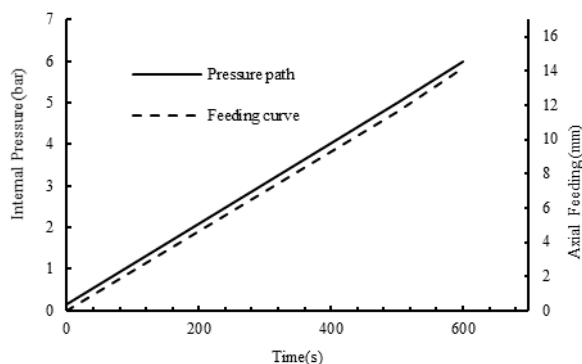


شکل ۶: نمونه برش خورده

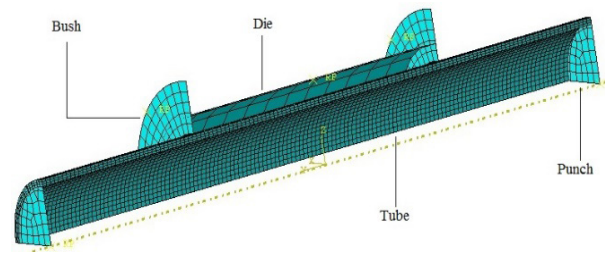
۴- نتایج و بحث

۴-۱- صحت‌سنجی شبیه‌سازی

برای تأیید شبیه‌سازی اجزای محدود، توزیع ضخامت از مرکز لوله پر شده و درصد پرشدگی با استفاده از مسیر بارگذاری شکل ۷ در دمای ۵۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شد.

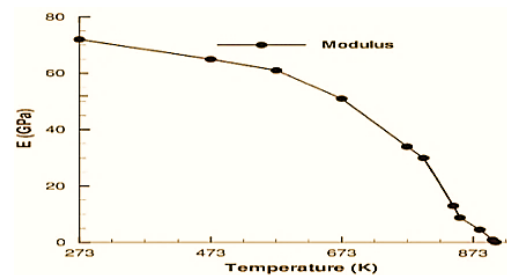


شکل ۷: مثالی از نمودار مسیر فشار و تغذیه محوری برحسب زمان برای فشار ۶ بار با تغذیه محوری ۱۴ میلی‌متر



شکل ۴: المان‌بندی مجموعه در نرم‌افزار اجزای محدود

در قسمت تعیین مشخصات سطوح در تماس باهم، از مدل اصطکاکی کولمب^۱ با ضریب اصطکاک ۰/۵ [۱۳] برای سطوحی که لوله با اجزا در تماس است، استفاده شده است. روش انتخاب سطوح روش تماس سطح به سطح^۲ و روش حل مدل اصطکاکی از نوع پنالتی^۳ انتخاب شده است. المان‌ها به صورت سعی و خطا به اندازه‌ای در نظر گرفته شده که کوچک شدن بیشتر آن تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در دقت نتایج نداشته باشد. در شکل ۴، مدل المان‌بندی مجموعه نشان داده شده است. در شکل ۵ و جدول (۲)، خواص مکانیکی آلیاژ مذکور که در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت، ارائه شده است.



شکل ۵: نمودار تغییرات مدول الاستیک آلیاژ آلومینیوم برحسب دما [۱۷]

جدول ۲: خواص مکانیکی ماده‌ی لوله AA ۶۰۶۳ [۱۳-۱۴]

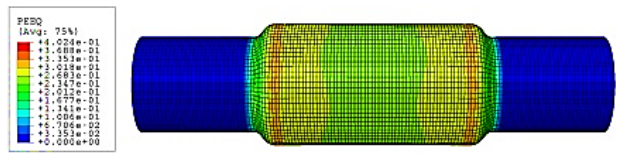
Material properties	Amount
Poissons ratio	۰/۳۳
Density (kg/m ^۳)	۲۶۸۰
Friction Coefficient	۰/۵

۱- Coulomb

۲- Surface to surface

۳- Penalty

در شکل ۸، لوله‌ی پله‌ای استوانه‌ای شکل داده شده در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی برای لوله با قطر ۲۵ و ضخامت ۱/۳ میلی‌متر و قطر قالب ۳۲ mm نشان داده شده است.



شکل ۸: لوله‌ی پله‌ای استوانه‌ای شکل داده شده در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی در دمای 580°C

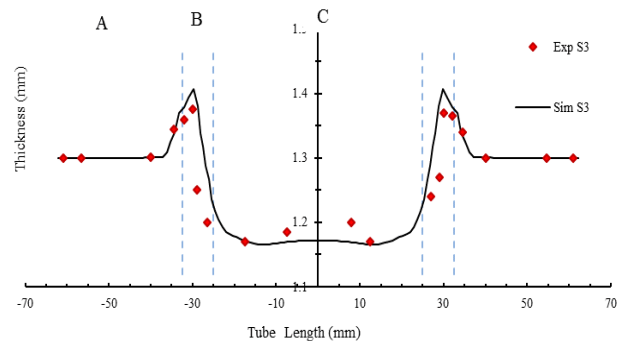
۲-۴- بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ
هر مسئله‌ی بهینه‌سازی نیازمند تعریف یک تابع هدف^۱ است که برطبق نیاز می‌بایست حداقل (یا بیشینه) شود؛ این کار با تغییر در متغیرهای طراحی^۲ امکان پذیر است. در این تحقیق، عوامل بهینه پنج عامل دمای شکل‌دهی، فشار، نرخ فشار، تغذیه محوری و سرعت پانچ از روش سطح پاسخ می‌بایست تعیین شود که اهداف مورد نظر شکل‌دهی، یعنی کمترین درصد نازک‌شدگی و بیشترین درصد پرشدگی قالب را برآورده سازد.

روش مورد استفاده در این تحقیق مدل‌سازی روش سطح پاسخ می‌باشد که از جمله روش‌های آماری است؛ این روش مجموعه‌ای متشکل از تکنیک‌های ریاضی و استنتاج آماری است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی به کار می‌رود که در آن‌ها خروجی سیستم (پاسخ) از تعداد زیادی از متغیرها تأثیر می‌پذیرد و هدف، بهینه‌سازی پاسخ‌های به دست آمده می‌باشد.

۳-۴- طراحی آزمایش

مهم‌ترین مسئله‌ی این تحقیق بررسی آثار اصلی و متقابل فاکتورها بوده که از این رو طرح آماری سطح پاسخ انتخاب شد. در این پژوهش، مدل‌سازی برای انجام آزمایش‌های معرفی شده از روش سطح پاسخ، با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی اجزای محدود (Abaqus) انجام گرفت و سپس از روش RSM-FEA برای به دست آوردن اطلاعات مورد نیاز

در شکل ۹، نمودار توزیع ضخامت نمونه‌ی شکل داده شده در شبیه‌سازی و تجربی با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، تفاوت بین درصد پرشدگی آزمایش و عددی کمتر از ۵٪ است.



شکل ۹: نمودار توزیع ضخامت در شبیه‌سازی و تجربی در دمای 580°C

جدول ۳- مقایسه‌ی تجربی و شبیه‌سازی درصد پرشدگی در دمای 580°C درجه‌ی سانتی‌گراد

درصد پرشدگی	آزمایش
۹۱	

۱- Objective Function

۲- Design Variables

یک مقدار خیلی کوچک فرض می‌شود؛ زیرا در صورت صفر فرض شدن، در جدول ۵ آزمایش‌های شماره ۱ تا ۹ و ۱۷ تا ۲۵ به علت تغذیه‌ی صفر، عملاً سرعت پانچ نیز صفر شده و دقیقاً این دو دسته آزمایش شبیه هم می‌شوند که با توجه به تعیین ۴۳ آزمایش توسط نرم‌افزار جهت بهینه‌سازی، دقت پایین می‌آید. (عدد ۰/۲ در تغذیه‌محوری برای از بین بردن خطای آماری می‌باشد و دراصل نماینده‌ی عدد صفر می‌باشد).

۴-۴-ارائه‌ی نتایج و بحث

طبق طرح آماری، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، شبیه‌سازی آن‌ها انجام شد و درصد پرشدگی قالب و حداقل درصد نازک‌شدگی آن‌ها به دست آمد که نتایج حاصل از آن در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵: ماتریس طراحی آزمایشات

NO	T	P	\dot{P}	X	V	Filling (%) Die	Thinning percentage (%)
۱	۰	۰	۰,۰۱	۰,۲		۴,۶۰	۲,۳۰
۲	۰	۰	۰,۰۱	۰,۲		۱۸,۷۰	۹,۲۷
۳	۹	۹	۰,۰۱	۰,۲		۱۹,۷۱	۹,۷۰
۴	۹	۹	۰,۰۱	۰,۲		۲۹,۴۶	۱۱,۶۷
۵	۰	۰	۰,۰۵	۰,۲		۰,۰۹	۲,۰۳
۶	۰	۰	۰,۰۵	۰,۲		۶,۳۰	۱,۹۸
۷	۹	۹	۰,۰۵	۰,۲		۸,۹۷	۶,۰۹
۸	۹	۹	۰,۰۵	۰,۲		۲۳,۸۷	۴,۳۴
۹	۰	۰	۰,۰۱			۷۳,۸۰	۰,۷۴
۱۰	۰	۰	۰,۰۱			۸۶,۶۷	۱۰,۳۲
۱۱	۹	۹	۰,۰۱			۸۰,۴۹	۰,۹۸
۱۲	۹	۹	۰,۰۱			۸۷,۳۷	۱۰,۴۸
۱۳	۰	۰	۰,۰۵			۶۳,۸۳	۸,۳۹

با توجه به طرح DOE استفاده گردید. در این مطالعه، اثر متغیرهای مستقل شامل: دمای شکل‌دهی (T)، فشار (P)، نرخ فشار (\dot{P})، تغذیه‌محوری (X) و سرعت سنبه (V) در سه سطح مورد ارزیابی قرار گرفت. در جدول ۴، متغیرهای مستقل فرآیند و مقادیر آن‌ها نشان داده شده است. در این تحقیق، از طرح مرکب مرکزی (CCD) با پنج متغیر مستقل شامل دمای شکل‌دهی، فشار، نرخ فشار، تغذیه‌محوری و سرعت پانچ، در سه سطح، جهت بررسی تأثیر شرایط بر پاسخ‌ها (درصد پرشدگی قالب و بیشترین نازک‌شدگی در لوله را به حداقل مقدار ممکن رساند) و بهینه‌سازی فرآیندهای مذکور استفاده شد؛ زیرا از این روش (CCD) برای تعیین مدل استاتیکی فرآیند و ارزیابی اثر متقابل بین فاکتورهای مؤثر بر هدف و همچنین شناسایی مؤثرترین عامل بر تابع هدف فرآیند بهره گرفته می‌شود.

جدول ۴: متغیرهای مورد بررسی در بهینه‌سازی و مقدار سطوح آن‌ها

نماد	سطح (-۱)	سطح (۰)	سطح (+۱)
دما (C°)	۵۳۰	۵۵۰	۵۸۰
فشار (Bar)	۵	۷	۹
نرخ فشار (Bar/s)	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵
تغذیه‌محوری (mm)	۰/۰۲	۷	۱۴
سرعت سنبه (mm/s)	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۵

طرح اولیه‌ی آزمایش‌ها به کمک نرم‌افزار Design & Expert طراحی و استفاده شد (جدول ۵). در جدول ۴، کمترین مقدار تغذیه‌محوری ۰/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده که این مقدار دراصل صفر بوده، ولی در محاسبات برای جلوگیری از خطای ناشی از عدد صفر،

۳۰	۵	۰,۰۵		۸۲,۰۷	۶,۹۸	۱۴	۵	۰,۰۵	۴۰,۰۲	۷,۸۳
۳۱	۹	۰,۰۵		۷۹,۸۰	۵,۶۳	۱۵	۹	۰,۰۵	۳۸,۳۷	۶,۳۵
۳۲	۹	۰,۰۵		۸۴,۸۱	۷,۹۱	۱۶	۹	۰,۰۵	۲۷,۷۳	۴,۹۹
۳۳	۷	۰,۰۳	۷,۱	۳۰,۵۸	۰,۱۱	۱۷	۵	۰,۰۱	۰,۶۰	۰,۷۳
۳۴	۷	۰,۰۳	۷,۱	۴۱,۶۰	۳,۷۶	۱۸	۵	۰,۰۱	۱۸,۹۰	۹,۴۵
۳۵	۵	۰,۰۳	۷,۱	۳۲,۹۸	۴,۳۲	۱۹	۹	۰,۰۱	۱۹,۹۹	۸,۶۳
۳۶	۹	۰,۰۳	۷,۱	۷۹,۲۸	۸,۴۶	۲۰	۹	۰,۰۱	۲۹,۲۰	۱۱,۶۲
۳۷	۷	۰,۰۱	۷,۱	۷۳,۵۸	۱۴,۲۱	۲۱	۵	۰,۰۵	۰,۰۸	۰,۰۳
۳۸	۷	۰,۰۵	۷,۱	۶۹,۲۷	۱۲,۲۶	۲۲	۵	۰,۰۵	۶,۲۷	۲,۲۳
۳۹	۷	۰,۰۳	۰,۲	۱۵,۸۲	۷,۸۲	۲۳	۹	۰,۰۵	۹,۱۰	۴,۱۷
۴۰	۷	۰,۰۳		۸۱,۹۸	۶,۴۴	۲۴	۹	۰,۰۵	۲۱,۶۵	۳,۸۲
۴۱	۷	۰,۰۳	۷,۱	۸۲,۸۴	۱۴,۵۸	۲۵	۵	۰,۰۱	۲۸,۶۳	۰,۰۱
۴۲	۷	۰,۰۳	۷,۱	۷۳,۰۴	۱۳,۰۴	۲۶	۵	۰,۰۱	۶۹,۱۸	۷,۱۱
۴۳	۷	۰,۰۳	۷,۱	۷۱,۳۲	۱۰,۶۰	۲۷	۹	۰,۰۱	۵۲,۱۲	۲,۹۸
						۲۸	۹	۰,۰۱	۸۳,۱۵	۹,۹۵
						۲۹	۵	۰,۰۵	۵۰,۰۲	۲,۷۵

۴-۵- تجزیه و تحلیل آماری

در جدول‌های ۶ و ۷، نتایج حاصل از آنالیز آماری به‌ترتیب برای پاسخ درصد پرشدگی قالب و پاسخ درصد نازک‌شدگی بر اساس مدل‌های مختلف ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو پاسخ از میان مدل‌های مختلف، نرم‌افزار معادله‌ی درجه‌دوم را به عنوان مناسب‌ترین مدل برای برازش داده‌ها پیشنهاد نموده است.

جدول ۶: نتایج تحلیل آماری مربوط به درصد پرشدگی قالب

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Mean vs Total	۱۵۸۹,۴۸	۱	۱۵۸۹,۴۸			
Linear vs Mean	۲۲۱,۶۳	۵	۴۴,۳۳	۱۸,۸۹	۰,۰۰۰۱ >	
۲FI vs Linear	۲۷,۷	۱۰	۲,۷۷	۱,۲۷	۰,۲۹۷۵	
۲FI Quadratic vs	۴۲,۸۸	۵	۸,۵۸	۱۱,۶۲	۰,۰۰۰۱ >	Suggested
Cubic vs Quadratic	۱۴,۶۶	۱۵	۰,۹۸	۴,۳۵	۰,۰۲۸۶	Aliased
Residual	۱,۵۷	۷	۰,۲۲			
Total	۱۸۹۷,۹۳	۴۳	۴۴,۱۴			

جدول ۷: نتایج تحلیل آماری مربوط به درصد نازک‌شدگی

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Mean vs Total	۱۹۱۵,۷۹	۱	۱۹۱۵,۷۹			
Linear vs Mean	۲۰۷,۰۱	۵	۴۱,۴	۳,۴۵	۰,۰۱۱۷	
۲FI vs Linear	۱۵۴,۷	۱۰	۱۵,۴۷	۱,۴۴	۰,۲۱۴۷	
۲FI Quadratic vs	۲۶۲,۳۱	۵	۵۲,۴۶	۴۲,۷۹	۰,۰۰۰۱ >	Suggested
Cubic vs Quadratic	۲۱,۷۴	۱۵	۱,۴۵	۱,۹۴	۰,۱۹۱۲	Aliased
Residual	۵,۲۴	۷	۰,۷۵			
Total	۲۵۶۶,۷۹	۴۳	۵۹,۶۹			

معنادار است. از میان پنج اثر درجه دوم متغیرها، دو اثر شامل اثرات درجه دوم دما (T^2) و درجه دوم تغذیه محوری (X^2) معنادار می‌باشد. همچنین از میان ده اثر متقابل بین متغیرها، سه اثر شامل اثرات متقابل دما با تغذیه محوری ($T X$)، فشار با تغذیه محوری ($P X$) و اثر متقابل نرخ فشار با سرعت سنبه ($V \dot{P}$) بر درصد پرشدگی قالب معنادار می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با توجه به ضریب رگرسیون تحلیل واریانس ارائه شده میزان تاثیر تغذیه محوری (X) مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامتر برای پرشدگی قالب است. بعد از آن، به ترتیب فشار (P) و دما (T) تأثیرگذار می‌باشد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مدل درجه دوم برازش شده با ضریب اطمینان بیش از ۹۳ درصد ($R^2 > 93$) با داده‌های آزمایش مطابقت دارد.

پس از انتخاب معادله‌ی درجه دوم به عنوان مدل مناسب، تحلیل واریانس ANOVA انجام شد. جهت اطمینان در مورد صحت عبارتهای موجود در مدل، از مقدار p-value استفاده می‌شود. هرچه مقدار p-value (میزان معنی‌داری) کوچکتر باشد، مدل پیشنهادی مقادیر پاسخ را بهتر برازش کرده است. در صورتی که دو عبارت دارای میزان معنی‌داری یکسانی باشند، عبارتی از اهمیت بیشتری برخوردار است که دارای F-value (آماره‌ی آزمون) بالاتری باشد. عبارتهایی که مقدار P آن‌ها از ۰/۰۵ کمتر باشد، از لحاظ آماری می‌تواند داده‌ها را با خطای کمتر از ۵ درصد پیش‌بینی کند.

در جدول ۸، نتایج تحلیل واریانس ANOVA برای درصد پرشدگی قالب نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که از میان پنج اثر خطی، چهار اثر بر درصد پرشدگی قالب

جدول ۸: جدول ANOVA برای پرکردن قالب.

	مجموع مربعات	درجه‌ی آزادی	میانگین مربعات	ضریب رگرسیون	P عدد (میزان معنی داری)	
Model	۲۸۷,۲۲	۱۳	۲۲,۰۹	۳۰,۰۲	۰,۰۰۰۱ >	significant
T	۱۴,۴۸	۱	۱۴,۴۸	۱۹,۶۹	۰,۰۰۰۱	
P	۱۶,۲۲	۱	۱۶,۲۲	۲۲,۰۵	۰,۰۰۰۱ >	
Ṗ	۸,۱۰	۱	۸,۱	۱۱,۰۱	۰,۰۰۲۴	
X	۱۸۲,۲۲	۱	۱۸۲,۲۲	۲۴۸,۵۴	۰,۰۰۰۱ >	
V	۴-۵,۵E	۱	۴-۵,۵E	۴-۷,۹E	۰,۹۷۸۴	
X	۳,۱۳	۱	۳,۱۳	۴,۲۵	۰,۰۴۸۲	
TV	۲,۹۵	۱	۲,۹۵	۴	۰,۰۵۴۸	
PX	۷,۸۴	۱	۷,۸۴	۱۰,۶۵	۰,۰۰۲۸	
PV	۲,۱۵	۱	۲,۱۵	۲,۹۳	۰,۰۹۷۸	
V Ṗ Ṗ	۷,۸۱	۱	۷,۸۱	۱۰,۶۲	۰,۰۰۲۹	
T ^۲	۱۰,۳۵	۱	۱۰,۳۵	۱۴,۰۷	۰,۰۰۰۸	
X ^۲	۵,۴۴	۱	۵,۴۴	۷,۳۹	۰,۰۱۰۹	
V ^۲	۲,۴۲	۱	۲,۴۲	۳,۲۹	۰,۰۸۰۱	
Residual	۲۱,۳۳	۲۹	۰,۷۴			
Cor Total	۳۰۸,۴۵	۴۲			٪ ۰۸/۹۳ = R ² ٪ ۰۹/۹۰ = (adj)R ²	

جدول ۹. نتایج آنالیز واریانس ANOVA برای درصد نازک‌شدگی

	مجموع مربعات	درجه‌ی آزادی	میانگین مربعات	ضریب رگرسیون	P عدد (میزان معنی‌داری)	
Model	۶۱۷/۹۳	۱۷	۳۶/۳۵	۲۷/۴۸	۰/۰۰۰۱ >	significant
T	۷۹/۹۵	۱	۷۹/۹۵	۶۰/۴۴	۰/۰۰۰۱ >	
P	۵۰/۲۴	۱	۵۰/۲۴	۳۷/۹۸	۰/۰۰۰۱ >	
Ṗ	۵۲/۷۰	۱	۵۲/۷۰	۳۹/۸۴	۰/۰۰۰۱ >	
X	۵/۷۳	۱	۵/۷۳	۴/۳۳	۰/۰۴۷۹	
V	۱۸/۳۹	۱	۱۸/۳۹	۱۳/۹۰	۰/۰۰۱۰	
TP	۱۰/۰۸	۱	۱۰/۰۸	۷/۶۲	۰/۰۱۰۷	
T Ṗ	۴۷/۹۸	۱	۴۷/۹۸	۳۶/۲۷	۰/۰۰۰۱ >	
TV	۱۲/۳۲	۱	۱۲/۳۲	۹/۳۲	۰/۰۰۵۳	
P Ṗ	۷/۰۹	۱	۷/۰۹	۵/۳۶	۰/۰۲۹۱	
PX	۲۲/۵۷	۱	۲۲/۵۷	۱۷/۰۶	۰/۰۰۰۴	

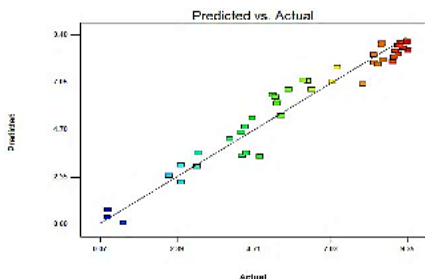
PV	۵/۸۷	۱	۵/۸۷	۴/۴۴	۰/۰۴۵۴
$\dot{P} X$	۴۲/۷۰	۱	۴۲/۷۰	۳۲/۲۸	۰/۰۰۰۱ >
T \dot{V}	۱۲۸/۶۰	۱	۱۲۸/۶۰	۹۷/۲۲	۰/۰۰۰۱ >
P \dot{V}	۱۸/۹۷	۱	۱۸/۹۷	۱۴/۳۴	۰,۰۰۰۹
$\dot{V} \dot{P}$	۴۰/۶۱	۱	۴۰/۶۱	۳۰/۷۰	۰/۰۰۰۱ >
X \dot{V}	۱۰/۲۶	۱	۱۰/۲۶	۷/۷۶	۰/۰۱
V \dot{V}	۵۲/۷۷	۱	۵۲/۷۷	۳۹/۸۹	۰/۰۰۰۱ >
Residual	۳۳/۰۷	۲۵	۱/۳۲		
Cor Total	۶۵۱/۰۰	۴۲			$\% ۹۴/۹۴ = R^2$
					$\% ۴۷/۹۱ = (adj)R^2$

$$(\%Die\ Filling)_{\dot{V}} = \{ - ۹۴۷,۸۹۰۹۲ + ۳,۴۱۳۷۲T + ۰,۴۰۵۳P - ۶۱,۴۶۱۶۹ \dot{P} + ۴,۰۱۲۱۲ X - ۵۵۷,۵۴۹۵ V \} + \{ - (۳,۶۲۵۲۹E-۳) T \cdot X + ۰,۰۶۰۶۷۴ T \cdot V - ۰,۰۷۱۷۱۶ P \cdot X + ۶,۴۸۴۹۵ P \cdot V + ۱۲۳۵,۲۴۴۵۸ \dot{P} \cdot V \} + \{ (-۳,۰۵۶۷۱ E-۳) T^۲ - ۰,۱۱۶۳۳ X^۲ + ۲۳۰۹,۲۷۱۱۷ V^۲ \}$$

$$\% Thinning = \{ - ۳۶۷۴,۸۵۶۶۶ + ۱۳,۰۲۸۸۱T + ۱۷,۰۲۷۹۳P + ۷۰۹,۹۴۵۴۱ \dot{P} + ۱,۶۸۸۳X - ۱۴۹۵,۹۵۹۷۱V \} + \{ - ۰,۰۱۱۲۴۴T \cdot P - ۲,۴۴۹۰۹T \cdot \dot{P} + ۱,۲۴۱۲T \cdot V - ۱۱,۷۶۶۲۵P \cdot \dot{P} - ۰,۱۲۱۷۱P \cdot X + ۱۰,۷۰۶۱۶P \cdot V + ۱۶,۷۴۰۸۹ \dot{P} \cdot X \} + \{ - ۰,۰۱۱۵۷۹T^۲ - ۰,۶۹۴۸ P^۲ + ۱۰,۱۶۶,۳۵۲۸۴ \dot{P}^۲ - ۰,۱۷۱۷۸ X^۲ + ۱۱۵۸۹,۶۰۲۸۴ V^۲ \}$$

جهت مشخص شدن کفایت مدل درصد پرشدگی قالب و مدل درصد نازک‌شدگی، از نمودارهای تأییدکننده استفاده شده که هر دو مدل تأیید گردید. در شکل ۱۰، نمودارهای مربوط به کفایت مدل درصد پرشدگی قالب و بیشترین نازک‌شدگی در قطعه را به حداقل مقدار ممکن رساند، عملکرد خوب مدل را نشان می‌دهد. در این نمودارها، مقادیر پیش‌بینی شده برحسب مقادیر واقعی رسم شده است.

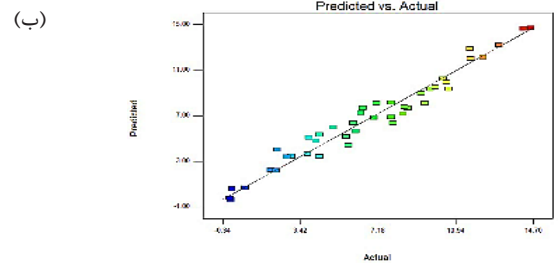
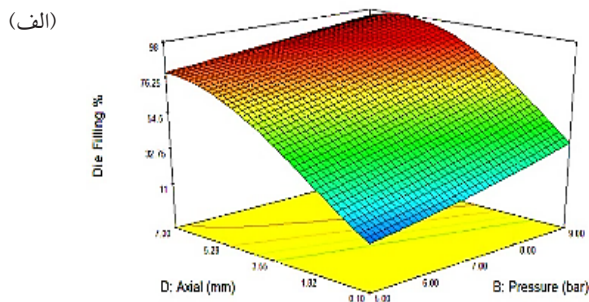
(الف)



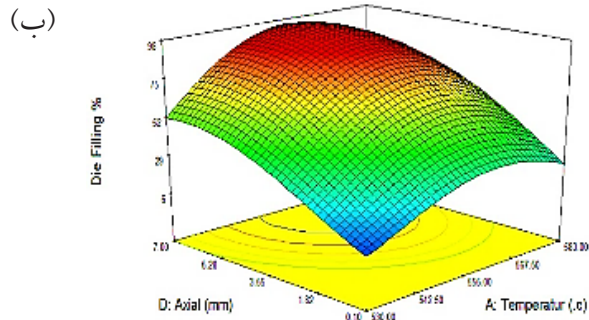
نتایج تحلیل واریانس ANOVA برای درصد نازک‌شدگی لوله در جدول ۹ نشان می‌دهد که تمام پنج اثر خطی و درجه دوم متغیرها بر درصد نازک‌شدگی لوله معنادار است. از میان ده اثر متقابل بین متغیرها، هفت اثر شامل اثرات متقابل دما با فشار (T P)، دما با نرخ فشار (T \dot{P})، دما با سرعت سنبه (T V)، فشار با نرخ فشار (P \dot{P})، فشار با تغذیه محوری (P X)، فشار با سرعت سنبه (P V) و اثر متقابل نرخ فشار با سرعت سنبه ($\dot{P} X$) بر درصد نازک‌شدگی لوله معنادار می‌باشد. اثر پارامترهای دما، نرخ فشار و مقدار فشار گاز تأثیر بیشتری بر پاسخ درصد نازک‌شدگی دارند. با توجه به میزان F-value در تحلیل واریانس ارائه شده، دما مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامتر برای درصد نازک‌شدگی است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مدل درجه دوم برازش شده با ضریب اطمینان بیش از ۹۴ درصد ($R^2 < ۹۴$) با داده‌های آزمایش مطابقت دارد.

۴-۶- ساخت مدل

پس از تحلیل آماری داده‌های شبیه‌سازی، مدل‌های ریاضی زیر به ترتیب برای پیش‌بینی درصد پرشدگی قالب و درصد نازک‌شدگی لوله به دست آمده است.



شکل ۱۰: مقادیر پیش‌بینی شده‌ی مدل رگرسیون بر اساس مقادیر واقعی برای (الف) درصد پرشدن قالب و (ب) درصد نازک شدن لوله



شکل ۱۱: (الف) تأثیر فشار و (ب) دما بر درصد پرشدگی قالب با افزایش تغذیه‌محوری

۵- نتایج و بحث

۵-۱- بررسی تأثیر متقابل پارامترها بر درصد پرشدگی قالب

در شکل ۱۱، اثر متقابل فشار و دما با تغذیه‌محوری بر درصد پرشدگی قالب نشان داده شده است. به‌طور کلی با افزایش دما، فشار و تغذیه‌محوری، درصد پرشدگی افزایش می‌یابد که با نتایج حاصل از آزمایشات تجربی تطابق دارد.

در شکل (۱۱-الف) مشاهده می‌شود که با افزایش فشار، اثر تغذیه‌محوری بر درصد پرشدگی بیشتر می‌شود؛ لذا با افزایش فشار چروکیدگی از بین رفته و درصد پرشدگی افزایش می‌یابد.

در شکل (۱۱-ب) مشاهده می‌شود که در تغذیه‌محوری کم، با افزایش دما از ۵۳۰ تا ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، مقدار درصد پرشدگی افزایش یافته است، اما از دمای ۵۵۰ درجه تا دمای ۵۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، درصد پرشدگی تغییر قابل‌توجهی نمی‌کند. این روند با افزایش تغذیه‌محوری نیز ادامه دارد. از یک طرف، با افزایش دما، استحکام ماده کاهش یافته و مقدار تغییر شکل لوله افزایش می‌یابد، از طرف دیگر، با افزایش دما، احتمال چسبندگی لوله به جداره‌ی قالب افزایش یافته و جریان ماده به درون حفره‌ی قالب سخت‌تر می‌شود.

در شکل ۱۲، اثر متقابل سرعت سنبه با دما، فشار و نرخ فشار بر درصد پرشدگی قالب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شکل (۱۲-الف)، سطح پاسخ به‌صورت دوانحنایی یا زین‌اسبی است که نشان‌دهنده‌ی اثر متضاد سرعت سنبه و دما می‌باشد. علت این پدیده می‌تواند ناشی از این باشد که از یک طرف با افزایش سرعت سنبه، سرعت تغییر شکل یا نرخ کرنش افزایش یافته که منجر به افزایش استحکام ماده می‌شود و از طرف دیگر، با افزایش دما استحکام ماده کاهش می‌یابد.

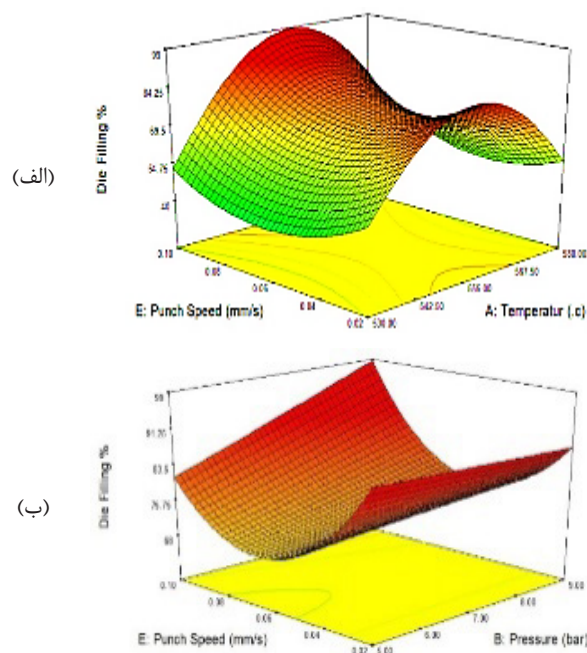
در شکل (۱۲-ب) مشاهده می‌شود که در سرعت سنبه‌ی کم، افزایش فشار تأثیر قابل‌توجهی در درصد پرشدگی ندارد، اما در سرعت سنبه‌ی بالا، افزایش فشار منجر به افزایش شدید درصد پرشدگی می‌شود. دلیل این رفتار ناشی از این است که در سرعت سنبه‌ی کم، افزایش فشار منجر به پارگی یا ترکیدگی لوله شده و لذا درصد پرشدگی تغییر نمی‌کند، اما با افزایش سرعت سنبه یا به عبارت دیگر تغذیه‌محوری، احتمال پارگی لوله کاهش یافته و درصد پرشدگی افزایش می‌یابد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو شکل، سطح پاسخ به صورت گنبدی شکل است؛ یعنی در مرکز بیشترین درصد نازک‌شدگی و در گوشه‌ها کمترین است.

در شکل (۱۳-الف) مشاهده می‌شود که با افزایش فشار درصد نازک‌شدگی افزایش می‌یابد، اما با افزایش تغذیه محوری، ابتدا درصد نازک‌شدگی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. افزایش فشار داخلی منجر به تنش کشش در لوله شده و نازک‌شدگی افزایش می‌یابد. افزایش تغذیه محوری باعث تنش فشاری شده و لذا نازک‌شدگی کاهش می‌یابد. در مقادیر تغذیه محوری کم، تنش کشش ناشی از فشار داخلی بر تنش فشاری غلبه نموده و نازک‌شدگی بیشتر شده است، اما در مقادیر تغذیه محوری زیاد، تنش فشاری ناشی از آن بر تنش کششی غلبه نموده و نازک‌شدگی کاهش می‌یابد.

در شکل (۱۳-ب) مشاهده می‌شود که ابتدا با افزایش دما از ۵۳۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، درصد نازک‌شدگی افزایش و سپس از دمای ۵۵۰ درجه تا دمای ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. دلیل این تغییرات ناشی از آن است که از یک طرف، با افزایش دما استحکام ماده کاهش یافته و مقدار تغییر شکل لوله افزایش می‌یابد و لذا درصد نازک‌شدگی نیز افزایش می‌یابد، از طرف دیگر با افزایش دما و فشار داخلی، احتمال پارگی در لوله نیز افزایش یافته که منجر به کاهش تغییر شکل لوله می‌شود.

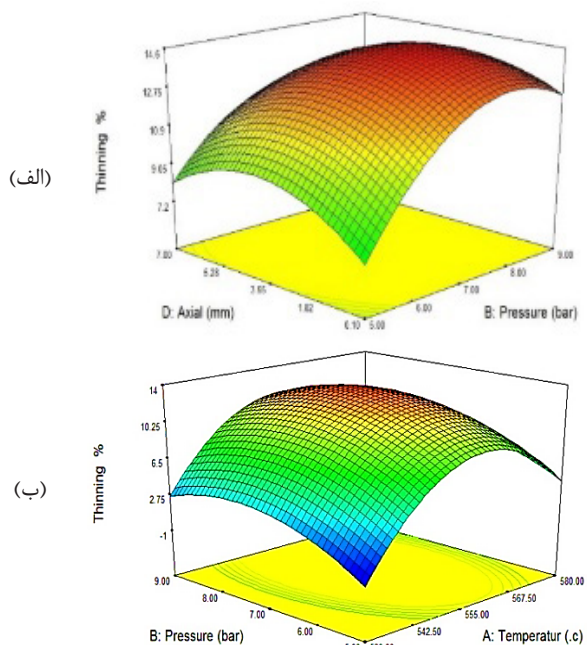
در شکل ۱۴، اثر متقابل سرعت سنبه با دما و فشار بر درصد نازک‌شدگی قالب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو شکل، سطح پاسخ به صورت دوانحنایی یا زین‌اسبی است که نشان‌دهنده اثر متضاد سرعت سنبه با دما و فشار می‌باشد. رفتار سطح



شکل ۱۲: اثر متقابل سرعت سنبه با (الف) دما، (ب) فشار، بر درصد پرشدگی قالب

۵-۲- بررسی تأثیر متقابل پارامترها بر درصد نازک‌شدگی

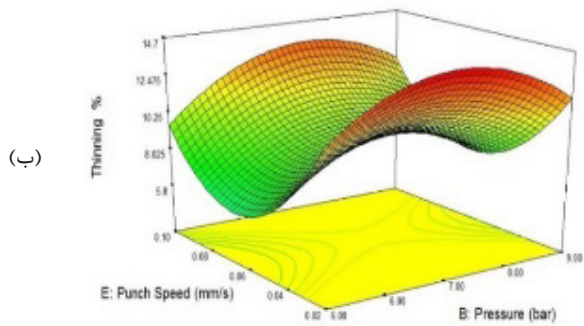
در شکل ۱۳، اثر متقابل فشار با دما و تغذیه محوری بر درصد نازک‌شدگی لوله نشان داده شده است.



شکل ۱۳: اثر متقابل فشار با (الف) تغذیه محوری، و (ب) دما، بر درصد نازک‌شدگی لوله

پاسخ در شکل (۱۴-الف) کاملاً مشابه با شکل (۱۲-الف) می‌باشد؛ یعنی با افزایش یا کاهش درصد پرشدگی، درصد نازک‌شدگی نیز افزایش یا کاهش یافته است.

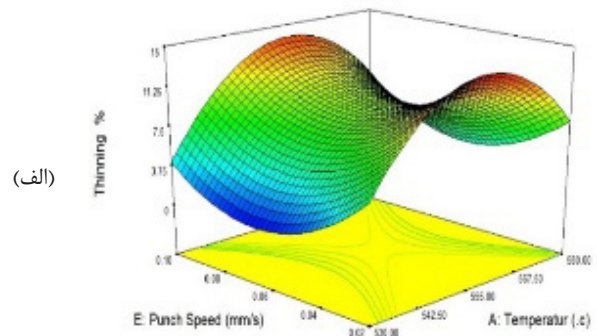
در شکل (۱۴-ب) مشاهده می‌شود که در مقادیر سرعت سنبه و فشار بالا، با وجود افزایش درصد پرشدگی قالب، درصد نازک‌شدگی کاهش یافته است. همان‌طور که اشاره شد، در سرعت سنبه‌ی کم، افزایش فشار منجر به پارگی لوله می‌شود و با افزایش سرعت سنبه، عملاً مقدار تغذیه‌ی بیشتری در زمان واحد انجام شده و تغذیه‌محوری بر فشار داخلی غلبه می‌یابد.



شکل ۱۴: اثر متقابل سرعت سنبه با (الف) دما، (ب) فشار، بر درصد نازک‌شدگی لوله

۵-۳- بهینه‌سازی

بعد از یافتن مدل‌های رگرسیونی، برای به‌دست‌آوردن بیشینه‌ی پرشدگی قالب و کمینه‌ی درصد نازک‌شدگی در بخش بهینه‌سازی نرم‌افزار دیزاین اکسپرت، جهت تعیین نقطه‌ی بهینه، مقدار درجه حرارت شکل‌دهی، فشار، نرخ فشار، تغذیه‌محوری و سرعت سنبه را به عنوان توابع هدف، و درصد پرشدگی قالب و درصد نازک‌شدگی لوله به عنوان اهداف مورد نظر آزمایشات در تجزیه و تحلیل‌های آماری به نرم‌افزار معرفی شد.



Number	T	P	\dot{P}	A	V	Die Filling (%)	Thinning (%)
۱	۵۵۲	۶/۵	۰/۰۲	۶/۹	۰/۰۵	۹۱/۲	۱۰/۳۷
۲	۵۵۱/۵	۶/۶۴	۰/۰۲	۷	۰/۰۵	۹۱/۷	۱۱/۴۵
۳	۵۵۳	۷/۵	۰/۰۳	۶/۹۵	۰/۰۴	۸۹/۶۷	۹/۶۵
۴	۵۵۲/۵	۷/۰۸	۰/۰۲	۶/۹۱	۰/۰۵	۸۷/۳۷	۱۰/۲۵

جدول ۱۰: شرایط بهینه جهت یافتن بیشینه‌ی پرشدگی قالب و کمینه‌ی درصد نازک‌شدگی

درصد پرشدگی	
آزمایش	۹۲٫۳
شبیه‌سازی	۸۷٫۴
درصد خطا (%)	۵

جدول ۱۱: مقایسه‌ی تجربی و شبیه‌سازی درصد پرشدگی در دمای ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد

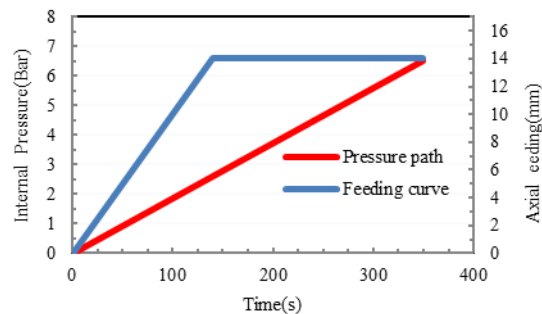
آزمایش تجربی در شرایط بارگذاری بهینه انجام شد که در شکل ۱۶ نشان داده شده است. میزان درصد پرشدگی قالب و درصد نازک‌شدگی قطعه‌ی تولیدشده به ترتیب ۹۲/۳ و ۹/۴۵ بود که با نتایج حاصل از مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل تطبیق خوبی دارد. در شکل ۱۷، نمودار توزیع ضخامت نمونه‌ی شکل‌داده‌شده که در شبیه‌سازی و تجربی با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول ۱۱ نشان داده شده است، تفاوت بین درصد پرشدگی آزمایش و عددی کمتر از ۵٪ است.

۶- نتیجه‌گیری کلی

ترکیبی از روش سطح پاسخ و روش اجزای محدود جهت تعیین شرایط بهینه‌ی فرایند (دمای شکل‌دهی، فشار، نرخ فشار، تغذیه‌محوری و سرعت پانچ) با هدف دستیابی به بیشترین پرشدگی قالب و حداقل‌رساندن بیشترین نازک‌شدگی به‌کار گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از این بود که تأثیرات درجه‌دو هر پنج متغیر مستقل معنی‌دار بود. برای هر پاسخ، با استفاده از آنالیز رگرسیون، مدل‌های چندجمله‌ای درجه‌دوم به‌دست آمد.

آنالیز واریانس (ANOVA) به‌منظور ارزیابی صحت و دقت مدل‌های به‌دست‌آمده اجرا گردیده و با توجه به نتایج موجود، نقطه‌ی بهینه‌ی به‌دست‌آمده عبارت است از ،

بهینه‌سازی متغیرهای وابسته با استفاده از روش سطح پاسخ انجام شد و نقاط بهینه که در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود، مشخص گردید. مقادیر بهینه در دمای ۵۵۲ درجه‌ی سانتی‌گراد، فشار ۶/۵ bar، نرخ فشار ۰/۲ bar/s، تغذیه‌محوری ۷ mm از هر طرف و سرعت سنبه ۰/۰۵ mm/s با درصد پرشدگی ۹۱/۲ و درصد نازک‌شدگی ۱۰/۳۷ حاصل شد.

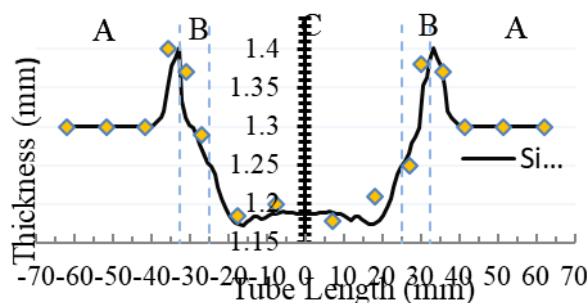


شکل ۱۵: مسیر بارگذاری بهینه

در شکل ۱۵، مسیر بارگذاری بهینه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود نرخ اعمال تغذیه‌محوری (سرعت سنبه) سریع‌تر از نرخ فشار اعمالی و در زمان ۱۴۰ ثانیه به ماکزیمم مقدار خود رسیده و سپس تا زمان ۳۵۰ ثانیه، با افزایش فشار، مقدار تغذیه‌محوری ثابت باقی می‌ماند.



شکل ۱۶: لوله‌ی پله‌ای استوانه‌ای شکل داده‌شده با مسیر بارگذاری بهینه



شکل ۱۷: نمودار توزیع ضخامت در شبیه‌سازی و تجربی در دمای ۵۵۰ °C

filler tube hydroforming by genetic algorithm". *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 229(4), pp. 623-630.

[6] Teng, B., Li, K., Yuan, S., 2013. "Optimization of loading path in hydroforming T-shape using fuzzy control algorithm". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69(5-8), pp. 1079-1086.

[7] Rajaei, M., Hosseinipour, S. J., Jamshidi Aval, H., 2021. "Multi-objective Optimization of HMGF Process Parameters for Manufacturing AA6063 Stepped Tubes using FEM-RSM". *International Journal of Engineering*, Vol. 34, No. 05, pp. 1305-1312.

[8] Liu, G., Wu, Y., Wang, D., and Yuan, S., 2015. Effect of feeding length on deforming behavior of Ti-3Al-2.5 V tubular components prepared by tube gas forming at elevated temperature, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 81, No. 9-12, pp.1809-1816.

[9] Vadillo, L., Santos, M. T., Gutierrez, M. A., Pérez, I., González, B., and Uthaisangsuk, V., 2007. Simulation and experimental results of the hot metal gas forming technology for high strength steel and stainless steel tubes forming, *AIP Conference Proceedings*, vol. 908, No. 1, pp. 1199-1204.

[10] Liu, Y. Wu, G., Liu, Z., 2016. Wang, Formability and microstructure of Ti22Al24. 5Nb0. 5Mo rolled sheet within hot gas bulging tests at constant equivalent strain rate, *Materials & Design*, Vol. 108, No. 1, pp.298-307.

[11] Maeno, K. M. T., and Fujimoto, K., 2014. Hot gas bulging of sealed aluminum alloy tube using resistance heating, *Materials Manufacturing Rev*, Vol. 1, pp. 1-6.

دما ۵۵۲ درجه‌ی سانتی‌گراد، فشار ۶/۵ bar، نرخ فشار ۰/۰۲ bar/s، تغذیه‌محوری ۷ mm و سرعت تغذیه ۱۰/۰۵ که پرشدگی ۹۱/۲ درصد و نازک‌شدگی ۱۰/۳۷ درصد حاصل شد. مدل ارائه‌شده برای پیش‌بینی مقادیر متغیرهای وابسته نتایج بسیار نزدیکی با یافته‌های تجربی به‌دست‌آمده داشت.

۷-مراجع

[1] Koc, M., Altan, T., 2002. "Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 123-138.

[2] Kadkhodayan, M., Erfani-Moghadam, A., 2012. "An investigation of the optimal load paths for the hydroforming of T-shaped tubes". *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 61, pp. 73-85.

[3] Ahmadi Brooghani, S. Y., Khalili, K., Eftekhari Shahri, S. E., Kang, B. S., 2014. "Loading path optimization of a hydroformed part using multilevel response surface method". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 70, pp. 1523-1531.

[4] Abedrabbo, N., Worswick, M., Mayer, R., Riemsdijk, V., 2009. "Optimization methods for the tube hydroforming process applied to advanced high-strength steels with experimental verification". *Journal Mater Process Technol*, Vol. 209(1), pp. 110-123.

[5] Intarakumthornchai, T., Aue-U-Lan, Y., Kesvarakul, R., Jirathearanat, S., 2015. "Feasible pressure and axial feed path determination for fuel

[۱۶] فضایی، ابوالفضل، شهبازی کرمی، جواد، حبیبی، مصطفی، پایگانه، غلامحسین، ۱۳۹۷. "بررسی تجربی و المان محدود فرآیند شکل‌دهی داغ با گاز لوله‌های تیتانیومی و تولید قطعه با سطح مقطع مربعی". فصلنامه علمی- پژوهشی مکانیک هوافضا، جلد ۱۴، شماره ۲، صفحه‌ی ۸۹ الی ۹۹

[17] Drezet. J. M, Phillion. A. B., 2010. "As-Cast Residual Stresses in an Aluminum Alloy AA6063 Billet: Neutron Diffraction Measurements and Finite Element Modeling". Journal of Metallurgical and Materials Transaction, Vol. 41, pp. 3396–3404.

[12] Drezet, J. M., Phillion, A. B., 2010. "As-Cast Residual Stresses in an Aluminum Alloy AA6063 Billet: Neutron Diffraction Measurements and Finite Element Modeling". Journal of Metallurgical and Materials Transaction, Vol. 41.

[13] Shamsi-Sarband, A., Hosseinipour, S. J., Bakhshi-Jooybari, M., Shakeri, M., 2013. "The Effect of Geometric Parameters of Conical Cups on the Preform Shape in Two-Stage Superplastic Forming Process". Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 22, No. 12, pp. 3601–3611.

[14] Rajaei, M., Hosseinipour, S. J., Jamshidi Aval, H., 2019. "Tearing criterion and process window of hot metal gas forming for AA6063 cylindrical stepped tubes". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, pp. 2609-2620.

[15] Alimov, A., Haase, R., Sviridov, A., 2022. "Upset bulging as a preforming operation for hot metal gas forming of 22MnB5 tubes". International Deep-Drawing Research Group Conference, IOP Conf. Ser: 1238 012016.