



بررسی پارامترهای فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی با استفاده از روش‌های تاگوچی و اجزا محدود

وحید مدانلو^{۱*}، حسین طالبی قادیکلایی^۲، بهنام آخوندی^۱، احمد مشایخی^۱، فرزاد احمدی خطیر^۳، علی زین‌العابدین بیگی^۴

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۴- کارشناس ارشد، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* سیرجان، صندوق پستی ۷۸۱۳۷۳۳۳۸۵، v.modanloo@sirjantech.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

یکی از اهداف اصلی در تولید محصولات ورقی با استفاده فرایند هیدروفورمینگ، دستیابی به کمترین نازک‌شدگی و نیروی شکل‌دهی لازم می‌باشد. در این مقاله، با استفاده از روش طراحی آزمایش و تحلیل اجزای محدود، فرایند شکل‌دهی ورق مسی با روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی، آزمایش‌های لازم طراحی شده است. در این طراحی، فشار بیشینه سیال، سرعت سنبه، ضریب اصطکاک سنبه با ورق، ضریب اصطکاک قالب با ورق، فاصله بین ورق‌گیر و ماتریس، شعاع گوشه سنبه، شعاع گوشه ماتریس و فشار پیش‌بشکه‌ای به‌عنوان متغیرهای ورودی و نسبت نازک‌شدگی و نیروی سنبه، به‌عنوان توابع پاسخ در نظر گرفته شدند. در ادامه با استفاده از روش اجزای محدود، آزمایش‌های طراحی شده به کمک مدل اجزای محدود صحت‌سنجی شده اجرا و خروجی‌های مورد نظر استخراج شدند. در پایان با انجام بهینه‌سازی به روش تاگوچی، سطوح بهینه پارامترهای ورودی به دست آمده و سپس آزمایش‌های تائیدی با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود انجام شدند. نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای شعاع گوشه سنبه و شعاع گوشه ماتریس، مهم‌ترین پارامترها برای تابع پاسخ نازک‌شدگی هستند. همچنین فشار بیشینه سیال، تأثیرگذارترین پارامتر بر نیروی سنبه می‌باشد.

مقاله پژوهشی
دریافت: ۵ فروردین ۱۴۰۲
داوری اولیه: ۱ اردیبهشت ۱۴۰۲
پذیرش: ۲۵ اردیبهشت ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

کشش عمیق هیدرودینامیکی
فشار شعاعی
بهینه‌سازی
روش تاگوچی
اجزا محدود

Investigation of process parameters of the hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure using Taguchi and finite element methods

Vahid Modanloo^{1*}, Hossein Talebi-Ghadikolae², Behnam Akhondi¹, Ahmad Mashayekhi¹, Farzad Ahmadi Khatir³, Ali Zeinolabedin Beygi⁴

1- Mechanical Engineering Department, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

3- Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

4- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 7813733385 Sirjan, Iran, v.modanloo@sirjantech.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 25 March 2023
First Decision: 21 April 2023
Accepted: 15 May 2023

Keywords:

Hydrodynamic Deep Drawing
Radial Pressure
Optimization
Taguchi Method
Finite Element

Abstract

Achieving the minimum thinning and required forming force is one of the main purposes in the manufacturing of sheet products using the hydroforming process. This paper investigates forming of the copper sheet using the hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure via the design of experiment method and finite element (FE) analysis. Firstly, the necessary experiments have been designed using the Taguchi design of experiment method. In this design, maximum fluid pressure, punch velocity, the friction coefficient between punch and sheet, the friction coefficient between die and sheet, the gap between blankholder and die, punch nose radius, die entrance radius, and prebulge pressure were considered as input variables and thinning ratio and punch force considered as response functions. Then, designed experiments were performed using an experimental verified FE model and the desired results were obtained. Finally, the optimum levels of input variables were obtained using the Taguchi optimization method and the confirmation experiments were performed using the FE simulation. Results show that the punch nose radius and die entrance radius are the essential parameters on the thinning ratio. Also, the maximum fluid pressure is the most effective parameter on the punch force.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

V. Modanloo, H. Talebi Ghadikolae, B. Akhondi, A. Mashayekhi, F. Ahmadi Khatir, A. Zeinolabedin Beygi, Investigation of process parameters of the hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure using Taguchi and finite element methods, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 10, pp. 11- 20, 2022 (in Persian). <https://doi.org/10.22034/IJME.2023.390896.1762>

۱- مقدمه

قطعه‌های نهایی با خواص مورد انتظار می‌باشند. تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه فرایند هیدروفرمینگ ورق انجام شده است [۲۱-۲۳]. تیموری و اشرفی [۲۴] با استفاده از روش آماری سطح پاسخ به بررسی اثر شعاع گوشه سنبه، شعاع گوشه قالب و فشار سیال بر روی حداکثر نازک‌شدگی و نیروی سنبه در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد با تنظیم شعاع گوشه ۹/۳ میلی‌متری، شعاع گوشه قالب ۲ میلی‌متری و فشار سیال ۲۶ مگاپاسکالی، ۷۱٪ مطلوبیت با ترکیب ۳۱٪ نازک‌شدگی و ۱۷۵ کیلونیوتن نیروی سنبه حاصل می‌شود. مدانلو و همکاران [۲۵] با استفاده از روش تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه، به انتخاب شرایط بهینه در شکل‌دهی ورق به روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی پرداختند. پارامترهای ورودی در پژوهش آن‌ها نسبت کشش حدی، فشار بیشینه سیال و فشار پیش‌بشکه‌ای و توابع خروجی نیز ضخامت نهایی، نیروی شکل‌دهی و تنش شعاعی بود. عملیات وزن‌دهی خروجی‌ها با استفاده از یک روش ترکیبی متشکل از تکنیک سلسله مراتبی^۱ و آنتروپی^۲ انجام شد. عملیات رنک‌دهی متغیرها نیز با استفاده از روش‌های تاپسیس^۳ و مورا^۴ انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که نسبت کشش ۱/۸۱، فشار بیشینه سیال ۳۷ مگاپاسکال و فشار پیش‌بشکه‌ای ۱۵ مگاپاسکال منجر به بهترین نتیجه خواهد شد. در آزمایشی با سطوح پارامتر ذکر شده، ضخامت قطعه نهایی ۲/۰۹ میلی‌متر به دست آمد. اینتاراکوم تورنچای و همکاران [۲۶] با استفاده از روش سطح پاسخ به بهینه‌سازی نیروی ورق‌گیر و بیشینه فشار در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی قطعات فنجان‌ی سهموی^۵ پرداختند. نتایج عددی نشان داد که مقادیر بهینه نیروی ورق‌گیر و بیشینه فشار به ترتیب ۶۳/۱۲۵ کیلونیوتن و ۲۷/۶۲۵ مگاپاسکال می‌باشد. صفری و همکاران [۲۷] به بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای فرایند هیدروفرمینگ بیلوزهای فلزی پرداختند. آن‌ها یک معادله رگرسیون درجه دوم جهت تعیین ضخامت کمینه بیلوز و ارتفاع کنگره توسعه دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش شعاع فیلت قالب، منجر به افزایش ضخامت کمینه بیلوز و نیز ارتفاع کنگره می‌شود. علوی هاشمی و سیدکاشی [۲۸] بیشینه نسبت کشش فنجان‌های استوانه‌ای از جنس مس را در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی دو مرحله‌ای به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با تعیین پارامترهای مؤثر

شکل‌دهی فلزات عبارت است از دستیابی به محصول مورد نظر از ماده اولیه به وسیله تغییر شکل پلاستیک بدون تغییر جرم که فرایندهای بسیاری از جمله استمپینگ [۱]، بلنکینگ [۲]، شکل‌دهی به کمک بالشتک لاستیکی [۳]، شکل‌دهی به کمک الکترومغناطیس [۴]، شکل‌دهی به کمک لیزر [۵]، خمکاری [۶]، شکل‌دهی غلتکی [۷] و غلتکی انعطاف‌پذیر [۸] را شامل می‌شود. علاوه بر فرایندهای ذکر شده، فرایند هیدروفرمینگ ورق یکی از روش‌های شکل‌دهی فلزات در حوزه صنایع خودروسازی و صنایع نظامی بوده که در آن از فشار سیال برای شکل‌دهی استفاده می‌شود. در شکل ۱ شماتیک این فرایند نشان داده شده است [۹]. از جمله مزایای این روش در مقایسه با کشش عمیق سنتی، برگشت فنی کمتر و امکان شکل‌دهی یکپارچه قطعات پیچیده می‌باشد. سرعت تولید پایین و هزینه بالای تجهیزات اعمال فشار نیز از جمله معایب آن می‌باشند. در سال‌های اخیر محققان از روش‌های متفاوتی برای هیدروفرمینگ ورق استفاده نموده‌اند؛ از جمله کشش عمیق هیدرومکانیکی، کشش عمیق هیدرودینامیکی و کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی که امروزه در شکل‌دهی قطعات با نسبت کشش بالا جایگاه ویژه‌ای یافته است [۱۴-۱۰].

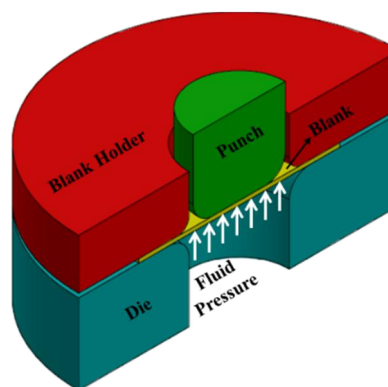


Fig. 1 Schematic of sheet hydroforming process [9]

شکل ۱ شماتیک فرایند هیدروفرمینگ ورق [9]

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های بسیاری پیرامون بهینه‌سازی و پیش‌بینی سطوح بهینه پارامترها در فرایندهای مختلف برای مواد فلزی [۱۵-۱۷] و غیرفلزی [۱۸-۲۰] صورت گرفته است. روش‌های سنتی طراحی و تحلیل در فرایندهای شکل‌دهی فلزات، بر پایه دیدگاه‌های تجربی بوده که منجر به افزایش هزینه و زمان می‌شود. ترکیب روش‌های بهینه‌سازی، طراحی آزمایش و شبیه‌سازی اجزای محدود، روش‌های کارآمدی برای رسیدن به

¹ Analytic Hierarchy Process (AHP)

² Entropy

³ TOPSIS

⁴ MOORA

⁵ Parabolic Cup

قطعات مسی بررسی شد؛ سپس با استفاده تحلیل سیگنال به نویز^۱، اثرات اصلی پارامترهای ورودی بر توابع هدف مورد بررسی قرار گرفت و سطوح بهینه پارامترهای تأثیرگذار مشخص گردید.

۲- مدل سازی عددی

از آنجاکه اجرای تجربی آزمایش‌ها زمان‌بر و پرهزینه است، در این مقاله به جای اجرای عملی هر یک از آزمایش‌های طراحی شده، از روش اجزا محدود استفاده شده و پارامترهای خروجی مورد نظر استخراج شده‌اند. جنس ورق استفاده شده در این فرایند مس خالص، با ضخامت ۲/۵ و قطر اولیه ۸۰ میلی‌متر بوده که خواص فیزیکی و مکانیکی این ماده با استفاده از مرجع [۲۳] در تحلیل فرایند بکار گرفته شده است. از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. چون قطعه متقارن است، به منظور ساده‌سازی و کاهش زمان تحلیل، فقط نیمی از ورق مدل گردید. مجموعه قالب به صورت صلب تحلیلی^۲ و ورق به صورت شکل‌پذیر^۳ مدل شده است. در شکل ۲ ابعاد هندسی مجموعه قالب نشان داده شده است.

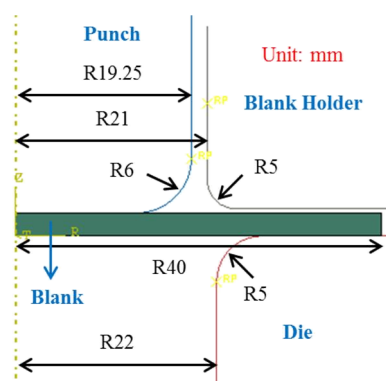


Fig. 2 Geometric dimensions of the die set

شکل ۲ ابعاد هندسی مجموعه قالب

از حل گر دینامیکی^۴ صریح برای تحلیل مسئله استفاده شده است. برای تعریف تماس ورق با اجزای قالب، از مدل اصطکاکی کولمب استفاده شد. مطابق با مرجع [۲۳]، ضریب اصطکاک بین سنبه با ورق ۰/۱۴ و بین قالب با ورق ۰/۰۴ در نظر گرفته شده است. از آنجاکه مجموعه قالب به صورت صلب تحلیلی مدل شده است، نیاز به شبکه‌بندی ندارد ولی برای شبکه‌بندی ورق از المان توپر هشت گره‌ای^۵ استفاده شده است. با استفاده از نتایج تجربی مرجع [۲۳]، صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی بررسی و

یعنی ارتفاع پیش بشکه‌ای معکوس و بیشینه فشار مورد نظر بر اساس ضخامت بحرانی، فجان نهایی با نسبت کشش ۳/۹۴ تولید می‌گردد. در مطالعه‌ای دیگر، شکل‌پذیری فجان‌های استوانه‌ای آلومینیومی در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی بر اساس یک چارچوب پیشنهادی جدید جهت به دست آوردن حداکثر نسبت کشش ممکن، توسط علوی هاشمی و سیدکاشی [۲۹] بررسی گردید. در نهایت فجان‌ها با نسبت کشش ۳/۴ شکل داده شد. خادمی و همکاران [۳۰] به بررسی عددی و تجربی عیب چین‌خوردگی قطعات مخروطی در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی پرداختند. با توجه به نتایج به دست آمده و با کنترل پارامتر حداکثر ارتفاع چروکیدگی بر اثر تغییر فشار، قطعه‌ای بدون چروکیدگی و پارگی شکل داده شد. قاسمی و همکاران [۳۱] به شکل‌دهی فجان‌های فولادی از جنس St14 با استفاده از یک روش ترکیبی جدید پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود برای افزایش عمق کشش در فرایند هیدروفورمینگ ورق، از ارتعاشات فراصوتی سنبه استفاده نمودند. بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای فرایند هیدروفورمینگ به کمک الگوریتم‌های PSO و NSGA-III توسط ژانگ و همکاران [۳۲] صورت گرفت. یعقوبی و همکاران [۳۳] با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی به بهینه‌سازی مسیر فشار در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی پرداختند.

با وجود تحقیقات متعدد در ارتباط با فرایند هیدروفورمینگ ورق، در زمینه بررسی جامع پارامترهای مؤثر در نازک‌شدگی ورق و نیروی سنبه و همچنین بهینه‌سازی آن‌ها در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی مطالعات اندکی گزارش شده است. توزیع ضخامت یکنواخت یا نازک‌شدگی قابل قبول یک فاکتور حائز اهمیت در تولید قطعات ورقی به روش هیدروفورمینگ می‌باشد. نازک‌شدگی بیش‌ازحد، کیفیت محصول نهایی را تحت تأثیر قرار داده و منجر به تمرکز تنش در نواحی مختلف قطعه و نهایتاً وقوع پارگی می‌شود. از طرف دیگر، با افزایش نیروی مورد نیاز شکل‌دهی نیاز به تجهیزات بیشتر و گران‌تر اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. در این مقاله، تأثیر پارامترهای ورودی فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی (هشت پارامتر: فشار بیشینه سیال، سرعت سنبه، ضریب اصطکاک سنبه با ورق، ضریب اصطکاک قالب با ورق، فاصله بین ورق‌گیر و ماتریس، شعاع گوشه سنبه، شعاع گوشه ماتریس و فشار پیش‌بشکه‌ای) با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی و تحلیل اجزای محدود بر روی مقادیر نازک‌شدگی و نیروی سنبه در شکل‌دهی

¹ S/N

² Analytical Rigid

³ Deformable

⁴ Dynamic Explicit

⁵ C3D8R

است. با توجه به تعداد ۸ فاکتور سه سطحی، اگر آزمایش‌ها به صورت طرح عاملی کامل طراحی شود، تعداد ۶۵۶۱ آزمایش لازم خواهد بود درحالی‌که با استفاده از روش تاگوچی و آرایه متعامد L27، طرح آزمایش‌ها با ۲۷ آزمایش اجرا خواهد شد. از نرم‌افزار Minitab برای طراحی و تحلیل آزمایش‌ها استفاده شده است [۳۷]. مطابق با شرایط هر آزمایش، فرایند با روش اجزای محدود تحلیل و مقادیر پارامترهای خروجی مطابق با جدول ۲ استخراج شد.

جدول ۱ محدوده عوامل ورودی

سطح زیاد	سطح میانی	سطح کم	نماد	عوامل ورودی
(3)	(2)	(1)		
۳۹	۲۷	۱۵	A	فشار بیشینه سیال (MPa)
۲۰۰	۱۰۰	۵۰	B	سرعت سنبه (mm/min)
۰/۲۰	۰/۱۴	۰/۰۵	C	ضریب اصطکاک سنبه با ورق
۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۰۲	D	ضریب اصطکاک قالب با ورق
۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۰۵	E	گپ بین ورق گیر و ماتریس (mm)
۱۰	۶	۲	F	شعاع گوشه سنبه (mm)
۸	۵	۲	G	شعاع گوشه ماتریس (mm)
۱۴	۷	۰	H	فشار پیش بشکه‌ای (MPa)

در این مقاله، برای بررسی پارگی ورق مسی از معیار حداکثر نازک‌شدگی استفاده شده است [۳۸]. برای محاسبه حداکثر نازک‌شدگی از معادله ۱ استفاده می‌شود.

$$\% \text{thinning} = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \quad (1)$$

در معادله فوق، t_0 ضخامت اولیه ورق و t_f ضخامت نهایی قطعه می‌باشد که از معادله ۲ به دست می‌آید.

$$t_f = t_0 \exp(\epsilon_t) \quad (2)$$

در معادله فوق ϵ_t کرنش ضخامتی می‌باشد. از سوی دیگر کرنش مهندسی اصلی یا همان e_θ در شرایط کرنش صفحه‌ای با استفاده از معادله ۳ تخمین زده می‌شود.

$$e_\theta = (23.3 + \frac{360}{25.4} t_0) (\frac{n}{0.21}) \quad (3)$$

در معادله فوق n نمای کرنش‌سختی ورق می‌باشد. همچنین توجه به شرایط کرنش صفحه‌ای و برقراری معادله‌های ۴ و ۵، مقدار کرنش حقیقی اصلی (ϵ_θ) و کرنش ضخامتی (ϵ_t) به دست می‌آید.

$$\epsilon_\theta = \ln(1 + \frac{e_\theta}{100}) \quad (4)$$

$$\epsilon_t = -\epsilon_\theta \quad (5)$$

مطابقت خوب نتایج عددی با تجربی طبق شکل ۳ گزارش شده است.

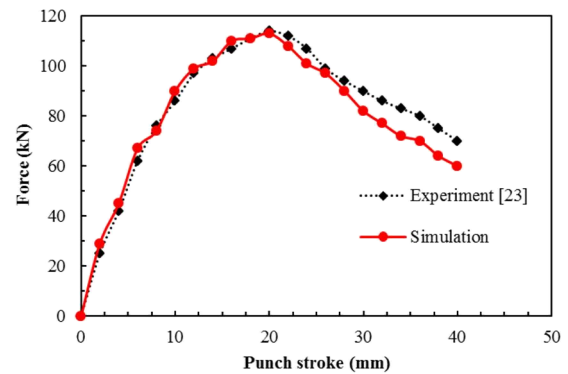


Fig. 3 Acceptable agreement between simulation and experimental results

شکل ۳ تطابق قابل قبول بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی

۳- طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی

هدف اصلی روش طراحی آزمایش‌ها، انتخاب بهترین حالت‌های ممکن آزمایش است که با استفاده از آن بتوان فرایند را ضمن توجیه‌پذیر بودن تعداد آزمایش‌ها، به مطلوب‌ترین شکل ممکن بررسی نمود [۳۴]. روش طراحی آزمایش تاگوچی را می‌توان همان روش عاملی جزئی دانست [۳۵]. برتری اصلی روش تاگوچی، استفاده از آرایه‌های متعامد^۱ و نسبت سیگنال به نویز می‌باشد. با روش تاگوچی انجام آزمایش‌ها ساده‌تر، سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر می‌شود. تاگوچی پیشنهاد می‌کند که با استفاده از نسبت سیگنال به نویز، می‌توان میزان تغییرات حول پاسخ مورد نظر را تجزیه و تحلیل نمود. این نسبت نشان‌دهنده حساسیت مشخصه کیفی مورد بررسی به فاکتورها، در یک فرایند کنترل شده می‌باشد. همواره در هر آزمایش بالاترین نسبت S/N مدنظر است. مقادیر S/N بالا نشان‌دهنده این است که اثر پارامترهای قابل کنترل بیشتر از اثر پارامترهای غیر قابل کنترل است [۳۶]. پارامترهای مختلفی در فرایند هیدروفورمینگ ورق نقش دارند. در این مقاله، فشار بیشینه سیال، سرعت سنبه، ضریب اصطکاک سنبه با ورق، ضریب اصطکاک قالب با ورق، فاصله بین ورق‌گیر و ماتریس، شعاع گوشه سنبه، شعاع گوشه ماتریس و فشار پیش‌بشکه‌ای به‌عنوان متغیرهای ورودی و نسبت نازک‌شدگی و نیروی سنبه به‌عنوان توابع پاسخ در نظر گرفته شده‌اند. هر کدام از متغیرهای ورودی در سه سطح کم، میانی و زیاد مطابق با جدول ۱ تعریف شده‌اند. محدوده مقدار متغیرهای ورودی بر اساس پژوهش‌های پیشین و شبیه‌سازی‌های اولیه تعیین شده

¹ Orthogonal Array

نشان داده شده است، مقدار نازک‌شدگی برای بعضی آزمایش‌ها (به‌طور مثال شماره‌های ۱، ۴ و ۷) بیش از ۵۵٪ می‌باشد که این موضوع بیان‌گر وقوع پارگی در ورق در این آزمایش‌ها می‌باشد. نکته قابل ذکر دیگر این می‌باشد که در تمامی آزمایش‌های طراحی شده، سنبه تا انتهای کورس مورد نظر (۴۰ میلی‌متر، شکل ۳) پایین می‌آید. یعنی ضخامت قطعه در انتهای فرایند شبیه‌سازی اندازه‌گیری شده است.

پس از محاسبه ε_f با جایگذاری در معادله ۲ مقدار t_f یا همان ضخامت نهایی ورق به دست آمده و در نتیجه با استفاده از معادله ۱، نازک‌شدگی حداکثر محاسبه می‌شود. در پژوهش حاضر با توجه به ضخامت اولیه ورق (۲/۵ میلی‌متر) و توان کرنش سختی ورق مسی (۰/۴۴)، مقدار نازک‌شدگی حداکثر برای ورق مسی با استفاده از معادله ۱، مقدار ۵۵٪ به دست آمد. به‌عبارت‌دیگر، میزان نازک‌شدگی بیش از این مقدار به معنی پارگی ورق در حین فرایند می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۲

جدول ۲ طراحی آزمایش‌ها و مقادیر خروجی

Table 2 Design of experiments and output values

شماره آزمایش	A	B	C	D	E	F	G	H	نازک‌شدگی (%)	نیروی سنبه (kN)
۱	۱۵	۵۰	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۵	۲	۲	۰	۷۴/۰۰	۵۱/۲۹
۲	۱۵	۵۰	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۱۰	۶	۵	۷	۳۲/۴۰	۱۲۸/۴۰
۳	۱۵	۵۰	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۱۵	۱۰	۸	۱۴	۱۸/۸۰	۱۱۹/۶۰
۴	۱۵	۱۰۰	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۲	۲	۷	۸۶/۰۰	۴۳/۱۳
۵	۱۵	۱۰۰	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۱۰	۶	۵	۱۴	۱۸/۰۰	۱۰۵/۳۰
۶	۱۵	۱۰۰	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۱۵	۱۰	۸	۰	۲۵/۸۰	۱۱۹/۳۰
۷	۱۵	۲۰۰	۰/۲۰	۰/۱۰	۰/۰۵	۲	۲	۱۴	۹۴/۰۰	۵۷/۲۲
۸	۱۵	۲۰۰	۰/۲۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۶	۵	۰	۷۵/۴۴	۸۵/۰۴
۹	۱۵	۲۰۰	۰/۲۰	۰/۱۰	۰/۱۵	۱۰	۸	۷	۱۶/۴۰	۱۲۶/۶۰
۱۰	۲۷	۵۰	۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۱۵	۲	۵	۰	۸۹/۰۸	۷۸/۷۰
۱۱	۲۷	۵۰	۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۰۵	۶	۸	۷	۲۲/۴۰	۱۴۳/۰۰
۱۲	۲۷	۵۰	۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۱۰	۱۰	۲	۱۴	۵۸/۰۰	۱۳۵/۵۰
۱۳	۲۷	۱۰۰	۰/۲۰	۰/۰۲	۰/۱۵	۲	۵	۷	۷۹/۲۰	۱۱۶/۰۰
۱۴	۲۷	۱۰۰	۰/۲۰	۰/۰۲	۰/۰۵	۶	۸	۱۴	۱۸/۰۰	۱۲۵/۸۰
۱۵	۲۷	۱۰۰	۰/۲۰	۰/۰۲	۰/۱۰	۱۰	۲	۰	۱۹/۲۰	۱۵۱/۰۰
۱۶	۲۷	۲۰۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۵	۲	۵	۱۴	۶۲/۶۸	۶۹/۱۸
۱۷	۲۷	۲۰۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۶	۸	۰	۲۶/۰۰	۱۴۳/۷۰
۱۸	۲۷	۲۰۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۰	۱۰	۲	۷	۴۶/۸۰	۱۴۵/۱۰
۱۹	۳۹	۵۰	۰/۲۰	۰/۰۵	۰/۱۰	۲	۸	۰	۲۰/۸۰	۱۴۵/۴۰
۲۰	۳۹	۵۰	۰/۲۰	۰/۰۵	۰/۱۵	۶	۲	۷	۲۱/۶۰	۱۸۲/۶۰
۲۱	۳۹	۵۰	۰/۲۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۱۰	۵	۱۴	۱۹/۲۰	۱۶۳/۲۰
۲۲	۳۹	۱۰۰	۰/۰۵	۰/۱۰	۰/۱۰	۲	۸	۷	۵۸/۸۰	۹۵/۵۸
۲۳	۳۹	۱۰۰	۰/۰۵	۰/۱۰	۰/۱۵	۶	۲	۱۴	۵۶/۰۰	۱۲۶/۳۰
۲۴	۳۹	۱۰۰	۰/۰۵	۰/۱۰	۰/۰۵	۱۰	۵	۰	۳۷/۶۰	۱۶۸/۵۰
۲۵	۳۹	۲۰۰	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۱۰	۲	۸	۱۴	۲۶/۰۰	۱۵۰/۴۰
۲۶	۳۹	۲۰۰	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۱۵	۶	۲	۰	۲۳/۲۰	۱۸۷/۶۰
۲۷	۳۹	۲۰۰	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۰۵	۱۰	۵	۷	۱۸/۰۰	۱۶۲/۶۰

۴- نتایج و بحث

۶ استفاده می‌شود. در این معادله I_i مقدار پاسخ و n تعداد تکرارها است. اگر هدف بیشینه نمودن تابع خروجی باشد، از معادله ۷ و اگر هدف، نزدیک نمودن خروجی به یک مقدار

بر اساس تابع زیان تاگوچی، سه نوع نسبت S/N استاندارد وجود دارد. زمانی که هدف کمینه نمودن تابع خروجی باشد، از معادله

نیز افزایش می‌یابد. در شکل ۷ تأثیر افزایش شعاع گوشه سنبه و شعاع گوشه ماتریس بر روی نسبت نازک‌شدگی نشان داده شده است. با افزایش شعاع گوشه سنبه و ماتریس، ورق به‌طور راحت‌تری سیلان یافته و جریان مواد هموارتر می‌شود؛ در نتیجه میزان نازک‌شدگی کاهش می‌یابد.

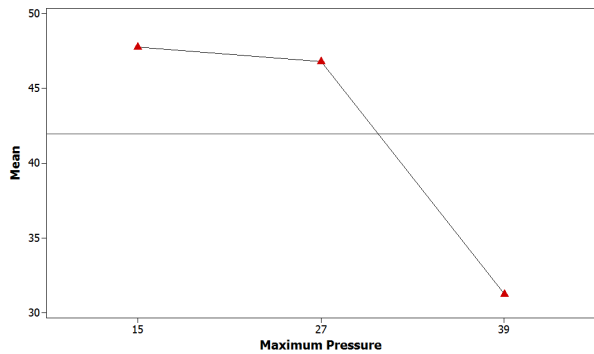


Fig. 5 Effects of maximum fluid pressure on the thinning ratio

شکل ۵ اثرات فشار بیشینه سیال بر نسبت نازک‌شدگی

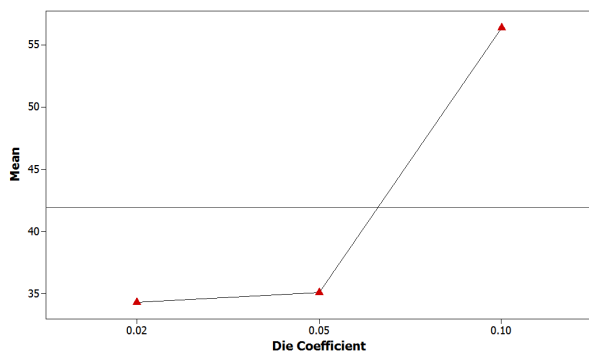


Fig. 6 Effects of die friction coefficient on the thinning ratio

شکل ۶ اثرات ضریب اصطکاک قالب بر نسبت نازک‌شدگی

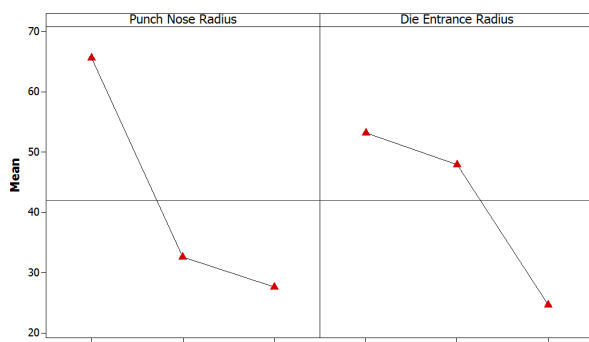


Fig. 7 Effects of punch nose radius and die entrance radius on the thinning ratio

شکل ۷ اثرات شعاع گوشه سنبه و شعاع گوشه ماتریس بر نازک‌شدگی

در جدول ۳ مقادیر S/N برای هر کدام از پارامترهای ورودی در سه سطح برای تابع پاسخ نازک‌شدگی، نشان داده شده است. با توجه به این نکته که هر چه مقدار S/N بیشتر باشد بهتر

اسمی باشد از معادله ۸ استفاده می‌شود که در آن y_o مقدار اسمی است [۳۹]. در این مقاله هدف کمینه نمودن هر دو خروجی نسبت نازک‌شدگی و نیروی سنبه بوده، لذا از رابطه ۱ استفاده می‌شود.

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)^2 \right) \quad (6)$$

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{y_i} \right)^2 \right) \quad (7)$$

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_o)^2 \right) \quad (8)$$

۴-۱- اثرات اصلی پارامترها بر نازک‌شدگی

در این مقاله نسبت نازک‌شدگی از تقسیم اختلاف بین ضخامت نهایی با ضخامت اولیه ورق بر ضخامت اولیه به دست می‌آید. در شکل ۴ نمودار اثرات اصلی پارامترها بر روی نسبت نازک‌شدگی نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده شد که چهار پارامتر فشار بیشینه سیال، ضریب اصطکاک بین قالب و ورق، شعاع گوشه سنبه و شعاع گوشه ماتریس تأثیر بیشتری بر نسبت نازک‌شدگی دارند که در ادامه هر کدام به‌صورت جداگانه تشریح خواهند شد.

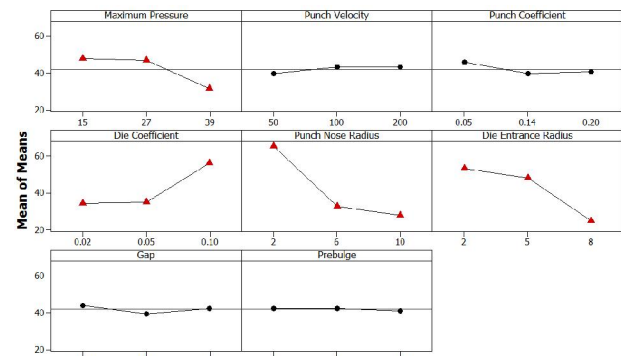


Fig. 4 Main effects of parameters on the thinning ratio

شکل ۴ نمودار اثرات اصلی پارامترها بر نسبت نازک‌شدگی

شکل ۵ تأثیر فشار بیشینه سیال بر نسبت نازک‌شدگی را نشان می‌دهد. مشاهده شد که با افزایش فشار بیشینه، میزان نازک‌شدگی کاهش می‌یابد. با افزایش فشار بیشینه، فشار سیال به‌عنوان پشتیبان برای ورق عمل کرده و ورق به سطح سنبه می‌چسبد و میزان کشش در ورق کاهش می‌یابد؛ در نتیجه میزان نازک‌شدگی کاهش می‌یابد. شکل ۶ تأثیر ضریب اصطکاک بین قالب و ورق را بر روی میزان نازک‌شدگی نشان می‌دهد. با افزایش ضریب اصطکاک بین ورق با قالب، ورق به سطح قالب چسبیده و کشش در ورق افزایش و در نتیجه میزان نازک‌شدگی

۴-۲- اثرات اصلی پارامترها بر نیروی سنبه

شکل ۹ نمودار اثرات اصلی پارامترها بر روی نیروی سنبه را نشان می‌دهد. مشاهده شد که پارامترهای فشار بیشینه سیال و شعاع گوشه سنبه تأثیر بیشتری بر نیروی سنبه دارند. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ هر یک از پارامترهای مذکور به ترتیب نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده شد با افزایش فشار بیشینه سیال و شعاع گوشه سنبه، نیروی مورد نیاز شکل‌دهی افزایش می‌یابد. طبق رابطه $F=PA$ با افزایش فشار سیال، سنبه به نیروی بیشتری برای نفوذ به درون محفظه قالب نیاز دارد. از طرف دیگر با افزایش شعاع گوشه سنبه، ورق پس از طی مسافت بیشتری به سطح سنبه می‌چسبد که همین امر موجب افزایش کرنش سختی و در نتیجه افزایش نیروی مورد نیاز شکل‌دهی می‌شود. در جدول ۴ نیز مقادیر S/N برای هر سطح از پارامترهای ورودی نشان داده شده است. با توجه به این مقادیر، حالت بهینه برای کمترین نیروی سنبه به صورت A1B2C1D3E1F1G1H3 خواهد بود. با اجرای آزمایش تأییدی به روش اجزای محدود و با استفاده از سطوح بهینه پارامترها، میزان نیروی سنبه ۱۰۱ کیلونیوتن به دست آمد.

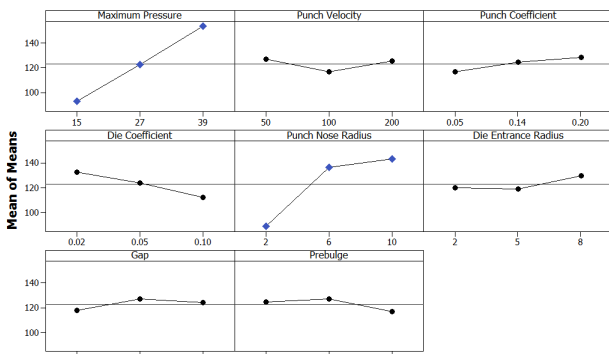


Fig. 9 Main effects of parameters on the punch force

شکل ۹ نمودار اثرات اصلی پارامترها بر نیروی سنبه

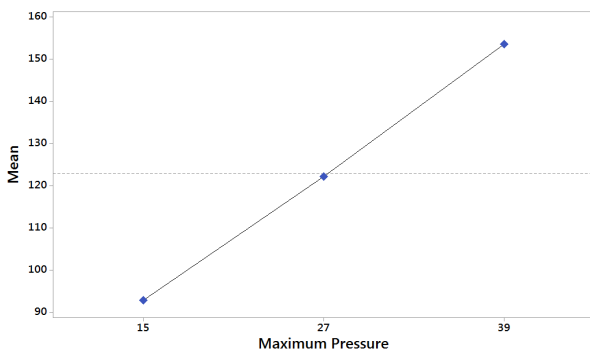


Fig. 10 Effects of maximum fluid pressure on the punch force

شکل ۱۰ اثرات فشار بیشینه سیال بر نیروی سنبه

است، حالت بهینه آزمایش برای کمترین نسبت نازک‌شدگی به صورت A3B1C3D1E3F3G3H3 خواهد بود. نماد و عدد به ترتیب نشان‌گر پارامتر و سطح آن می‌باشد. به عنوان مثال منظور از A3 این است که پارامتر فشار بیشینه سیال در سطح زیاد خود باشد. با اجرای آزمایش تأییدی به روش اجزای محدود با استفاده از سطوح بهینه پارامترها، میزان نازک‌شدگی به مقدار ۱۶/۱۷٪ به دست آمد. در شکل ۸، قطعه شکل‌داده شده در حالت بهینه به همراه ناحیه بحرانی نازک‌شدگی نشان داده شده است. مطابق با جدول ۲، آزمایش شماره ۹ منجر به بهترین جواب یعنی کمترین نازک‌شدگی به میزان ۱۶/۴۰٪ می‌شود. در این آزمایش، پارامترهای شکل‌دهی و سطوح آن‌ها برابر با A1B3C3D3E3F3G3H2 می‌باشد. با مقایسه نازک‌شدگی بهینه با کمترین میزان نازک‌شدگی جدول ۲، مشاهده می‌شود که نازک‌شدگی در حدود ۲٪ بهبود یافته است.

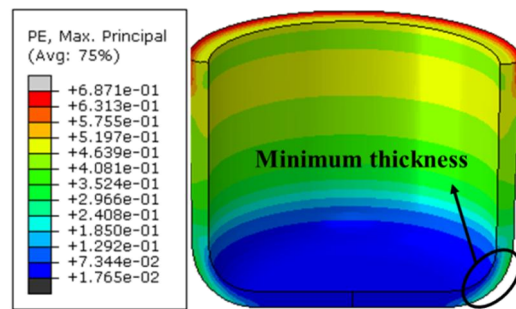


Fig. 8 The optimized deformed part with critical zone for the thinning
شکل ۸ قطعه شکل‌داده شده در حالت بهینه به همراه ناحیه بحرانی نازک‌شدگی

جدول ۳ مقادیر S/N نسبت نازک‌شدگی برای هر سطح از پارامترها

Table 3 S/N values of thinning ratio for each level of the parameters

پارامترها	نماد	مقادیر S/N		
		سطح کم	سطح متوسط	سطح زیاد
فشار بیشینه سیال	A	-۳۱/۲۹	-۳۱/۹۶	-۲۹/۰۳
سرعت سنبه	B	-۳۰/۳۴	-۳۰/۸۷	-۳۱/۰۷
ضریب اصطکاک سنبه	C	-۳۲/۵۱	-۲۹/۹۱	-۲۹/۸۶
ضریب اصطکاک قالب	D	-۲۹/۱۷	-۲۹/۲۸	-۳۳/۸۳
فاصله بین ورق‌گیر و ماتریس	E	-۳۰/۹۱	-۳۰/۸۱	-۳۰/۵۶
شعاع گوشه سنبه	F	-۳۵/۳۹	-۲۹/۱۴	-۲۷/۷۶
شعاع گوشه ماتریس	G	-۳۳/۲۰	-۳۲/۰۱	-۲۷/۰۷
فشار پیش بکشهای	H	-۳۰/۷۲	-۳۰/۹۷	-۳۰/۵۹

۳. با افزایش ضریب اصطکاک بین قالب و ورق از ۰/۲ تا ۰/۱، نازک‌شدگی در ورق به میزان ۳۹٪ افزایش می‌یابد.
۴. با افزایش فشار بیشینه سیال از ۱۵ تا ۳۹ مگاپاسکال، میزان نازک‌شدگی در ورق حدود ۳۵٪ کاهش می‌یابد.
۵. فشار بیشینه سیال و شعاع گوشه سنبه تأثیرگذارترین پارامتر برای تابع پاسخ نیروی سنبه می‌باشد.
۶. با افزایش فشار بیشینه سیال و شعاع گوشه سنبه، نیروی سنبه به ترتیب به میزان ۴۰ و ۳۸٪ افزایش می‌یابد.

۶- مراجع

- [1] V. Modanloo, H. Talebi-Ghadikolaee, V. Alimirzaloo, M. Elyasi, Fracture prediction in the stamping of titanium bipolar plate for PEM fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 7, pp. 5729-5739, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.088>
- [2] M. Elyasi, Force parameters and experimental characterisation in fine-blanking process, *Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 1, no. 1-2, pp. 234-242, 2015. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2015.1121707>
- [3] H. Deilami Azodi, A. Hassani, S. Mazdak, A. Zeinolabedin Beygi, E. Sherkatghanad, Numerical Study on Weld Line Displacement in Rubber Pad Forming of Tailor Welded Blanks, *Karafan Quarterly Scientific Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 145-164, 2022. <https://doi.org/10.48301/KSSA.2022.341267.2096> (in Persian)
- [4] M. Afrasiab, Y. Hojjat, G. Faraji, H. Moslemi Naeini, Formability enhancement of ultrafine-grained pure copper sheets produced by accumulative roll bonding aided by electromagnetic forming, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 120, no. 11-12, pp. 7445-7459, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09197-x>
- [5] S. Mazdak, M. R. Sheykhosslami, M. Gholami, H. Parvaz, M. M. Najafzadeh, S. Mahmoudi, A. Vanaki, A statistical model for estimation of bending angle in laser bending of two-layer steel-aluminum sheets, *Optics & Laser Technology*, vol. 157, pp. 108575, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108575>
- [6] H. Talebi-Ghadikolaee, H. Moslemi Naeini, A. H. Rabiee, A. Zeinolabedin Beygi, S. Alexandrov, Experimental-numerical analysis of ductile damage modeling of aluminum alloy using a hybrid approach: ductile fracture criteria and adaptive neural-fuzzy system (ANFIS), *International Journal of Modelling and Simulation*, pp. 1-16, 2022. <https://doi.org/10.1080/02286203.2022.2121675>
- [7] M. S. Zeinali, H. Moslemi Naeini, H. Talebi-Ghadikolaee, V. Panahizadeh, Numerical and experimental investigation of fracture in roll forming process using Lou-Huh fracture criterion, *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 47, no. 12,

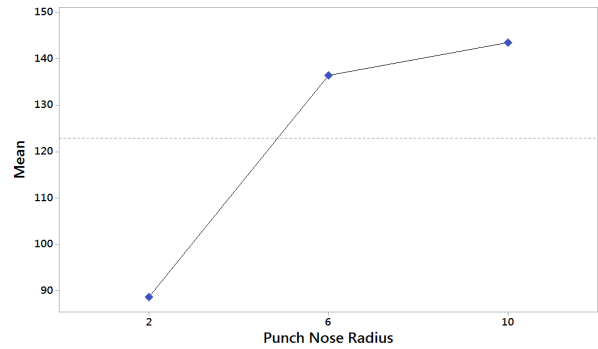


Fig. 11 Effects of punch nose radius on the punch force

شکل ۱۱ اثرات شعاع گوشه سنبه بر نیروی سنبه

جدول ۴ مقادیر S/N نیروی سنبه برای هر سطح از پارامترها

Table 4 S/N values of punch force for each level of parameters

مقادیر S/N			نماد	پارامترها
سطح زیاد	سطح متوسط	سطح کم		
-۴۳/۵۷	-۴۱/۴۲	-۳۸/۷۱	A	فشار بیشینه سیال
-۴۱/۳۶	-۴۰/۸۶	-۴۱/۴۹	B	سرعت سنبه
-۴۱/۷۱	-۴۱/۱۸	-۴۰/۸۱	C	ضریب اصطکاک سنبه با ورق
-۴۰/۵۲	-۴۱/۱۸	-۴۲/۰۰	D	ضریب اصطکاک قالب با ورق
-۴۱/۴۴	-۴۱/۹۰	-۴۰/۳۷	E	فاصله بین ورق گیر و ماتریس
-۴۳/۰۷	-۴۲/۴۶	-۳۸/۱۷	F	شعاع گوشه سنبه
-۴۲/۲۰	-۴۱/۰۳	-۴۰/۴۷	G	شعاع گوشه ماتریس
-۴۰/۹۳	-۴۱/۵۱	-۴۱/۲۶	H	فشار پیش بشکهای

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر هشت پارامتر فشار بیشینه سیال، سرعت سنبه، ضریب اصطکاک سنبه با ورق، ضریب اصطکاک قالب با ورق، فاصله بین ورق گیر و ماتریس، شعاع گوشه سنبه، شعاع گوشه ماتریس و فشار پیش‌بشکهای بر روی نسبت نازک‌شدگی ورق و نیروی سنبه در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی تعیین شد. پس از طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی و اجرای آن‌ها به روش اجزای محدود، نتایج مربوط به توابع پاسخ استخراج شد و نمودارهای اثرات اصلی، مقادیر نسبت سیگنال به نویز و همچنین سطوح بهینه پارامترها برای هر تابع پاسخ به دست آمد. با بررسی نتایج مشخص شد که:

۱. شعاع گوشه سنبه و شعاع گوشه ماتریس، ضریب اصطکاک بین قالب و ورق و فشار بیشینه سیال مهم‌ترین پارامترها برای تابع پاسخ نسبت نازک‌شدگی هستند.
۲. با افزایش شعاع گوشه سنبه و ماتریس، نازک‌شدگی در ورق به ترتیب به میزان ۵۸ و ۵۴٪ کاهش می‌یابد.

- [17] M. Elyasi, M. Hossinzade, Design of experiment approach to the study of parameters in the new die set tube hydroforming, *AIP Conference Proceedings*, vol. 1383, no. 1, pp. 669-674, 2011. <https://doi.org/10.1063/1.3623671>
- [18] A. H. Rabiee, E. Sherkatghanad, A. Zeinolabedin Beygi, H. Moslemi Naeini, L. Lang, Experimental investigation and modeling of fiber metal laminates hydroforming process by GWO optimized neuro-fuzzy network, *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, vol. 12, no. 2, pp. 193-209, 2023. <https://doi.org/10.22061/jcarme.2022.8268.2101>
- [19] E. Sherkatghanad, H. Moslemi Naeini, A. H. Rabiee, A. Zeinolabedin Beygi, V. Zal, L. Lang, Modeling and predicting the important properties of the PVC/glass fiber composite laminates in the production process by the TLBO-ANFIS approach, *Iranian Journal of Materials Forming*, vol. 8, no. 4, pp. 63-75, 2021. <https://doi.org/10.22099/IJMF.2021.41242.1190>
- [20] M. Salamat-Talab, V. Tahmasbi, M. Safari, A. Zeinolabedin Beygi, Mathematical Modeling, Sobol Sensitivity Analysis and Optimization of Main Parameters in Drilling of E-glass/epoxy Laminated Composites, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 8, no. 11, pp. 43-53, 2022. (in Persian)
- [21] V. Modanloo, A. Gorji, M. Bakhshi-Jooybari, A comprehensive thinning analysis for hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, vol. 43, pp. 487-494, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40997-018-0221-6>
- [22] V. Alimirzaloo, V. Modanloo, Minimization of the sheet thinning in hydraulic deep drawing process using response surface methodology and finite element method, *International Journal of Engineering*, Vol. 29, No. 2, pp. 264-273, 2016.
- [23] V. Modanloo, A. Gorji, M. Bakhshi-Jooybari, Effects of forming media on hydrodynamic deep drawing, *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 30, pp. 2237-2242, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0433-x>
- [24] R. Teimouri, H. Ashrafi, Optimization of hydroforming process for deep drawing of AA7075 using finite element simulation and response surface methodology, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 70, pp. 2265-2275, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12666-017-1083-0>
- [25] V. Modanloo, A. Doniavi, R. Hasanzadeh, Application of multi criteria decision making methods to select sheet hydroforming process parameters, *Decision Science Letters*, Vol. 5, No. 3, pp. 349-360, 2016. <https://doi.org/10.5267/j.dsl.2016.2.005>
- [26] T. Intarakumthornchai, S. Jirathearant, S. Thongprasert, P. Dechaumphai, FEA-based optimization of blank holder force and pressure for hydromechanical deep drawing of parabolic cup pp. 15591-15602, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06662-3>
- [8] V. Panahizadeh, Y. Dadgar Asl, F. Saeidi, S. Afshin, Numerical and Experimental Analysis of Spring-back Defect in Flexible Roll Forming Process using Anisotropic Yield Criteria, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 11, no. 4, pp. 93-105, 2021. <https://doi.org/10.22044/JFSM.2021.10554.3343> (in Persian)
- [9] V. Modanloo, B. Akhoundi, A. Mashayekhi, H. Talebi Ghadikolaee, A. Zeinolabedin Beygi, The study of forming of steel cups using hydrodynamic deep drawing process, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 9, No. 8, pp. 56- 64, 2022. <https://doi.org/10.22034/IJME.2023.385634.1748> (in Persian)
- [10] S. Hajiahmadi, M. Elyasi, M. Shakeri, Evaluation of drawing force by a new dimensionless method in deep drawing process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 234, no. 13, pp. 1604-1614, 2020. <https://doi.org/10.1177/0954405420929770>
- [11] S. Hajiahmadi, M. Elyasi, M. Shakeri, Investigation of a new methodology for the prediction of drawing force in deep drawing process with respect to dimensionless analysis, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 1-13, 2019. <https://doi.org/10.1186/s40712-019-0110-9>
- [12] S. Hajiahmadi, M. Elyasi, M. Shakeri, Development a new methodology for measuring deep drawing forces based on dimensionless evaluation, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 235, no. 19, pp. 4057-4069, 2021. <https://doi.org/10.1177/0954406220969718>
- [13] Y. Gholiyan, M. Elyasi, M. J. Mirmia, Study of fluid pressure on formability of metal sheets by using fixed and pulsating sheet hydroforming method, *Iranian journal of Marine technology*, vol. 8, no. 1, pp. 23-29, 2021. (in Persian)
- [14] S. M. Hejazi Alhossini, M. Elyasi, M. J. Mirmia, Effect of heat treatment on formability of AA6061 aluminum alloy in the sheet hydroforming process, *Iranian journal of Marine technology*, vol. 7, no. 3, pp. 39-50, 2020. (in Persian)
- [15] H. Deilami Azodi, S. Rezaee, H. Badparva, A. Zeinolabedin Beygi, Optimizing AA3105-St12 two-layer sheet in incremental sheet forming process using neural network and multi-objective genetic algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, vol. 22, no. 2, pp. 121-132, 2022. (in Persian)
- [16] V. Tahmasbi, A. Zeinolabedin-Beygi, S. H. Elahi, M. A. Ashtiani, Statistical modeling, optimization and sensitivity analysis of dried turning of aluminum bronze alloy, *Sādhanā*, vol. 47, no. 4, pp. 232, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12046-022-01955-7>

- Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, no. 5-6, pp. 4043-4055, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08057-4>
- [33] A. Yaghoobi, H. Baseri, M. Bakhshi-Jooybari, A. Gorji, Pressure path optimization of hydrodynamic deep drawing of cylindrical-conical parts, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 14, pp. 2095-2100, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12541-013-0284-7>
- [34] M. Moradian, A. Doniavi, V. Modanloo, V. Alimirzaloo, Process parameters optimization in gas blow forming of pin-type metal bipolar plates using Taguchi and finite element methods, *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, vol. 2, no. 10, pp. 102-108, 2017.
- [35] V. Modanloo, R. Hasanzadeh, P. Esmaili, The study of deep drawing of brass-steel laminated sheet composite using taguchi method, *International Journal of Engineering*, Vol. 29, No. 1, pp. 103-108, 2016. <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2016.29.01a.14>
- [36] D. C. Montgomery, Design and analysis of experiments: *John wiley & sons*, 2017.
- [37] V. Alimirzaloo, V. Modanloo, E. Babazadeh Asbagh, Experimental investigation of the effect of process parameters on the surface roughness in finishing process of chrome coated printing cylinders, *International Journal of Engineering*, Vol. 29, No. 12, pp. 1775-1782, 2016. <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2016.29.12c.17>
- [38] V. Modanloo, V. Alimirzaloo, M. Elyasi, Manufacturing of titanium bipolar plates using warm stamping process, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 45, pp. 9661-9667, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04870-3>
- [39] V. Modanloo, V. Alimirzaloo, Investigation of the forming force in torsion extrusion process of aluminum alloy 1050, *International Journal of Engineering*, Vol. 30, No. 6, pp. 920-925, 2017. <https://doi.org/10.5829/ije.2017.30.06c.13>
- using greedy search and RSM methods, *Engineering Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 15-32, 2010. <https://doi.org/10.4186/ej.2010.14.2.15>
- [27] M. Safari, J. Joudaki, Y. Ghadiri, A comprehensive study of the hydroforming process of metallic bellows: investigation and multi-objective optimization of the process parameters, *International Journal of Engineering*, vol. 32, no. 11, pp. 1681-1688, 2019. <https://doi.org/10.5829/IJE.2019.32.11B.19>
- [28] S. Alavi Hashemi, S. Seyedkashi, Investigation on improvement of limit drawing ratio in two-stage hydrodynamic deep drawing of cylindrical cups, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 44, no. 10, pp. 456, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03760-z>
- [29] S. H. Alavi Hashemi, S. M. H. Seyedkashi, Investigation of consecutive two-stage hydrodynamic deep drawing of aluminum cylindrical cups, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 236, no. 6-7, pp. 920-931, 2022. <https://doi.org/10.1177/09544054211062296>
- [30] M. Khademi, H. Gorji, M. Bakhshi-Jooybari, Effects of material and process parameters on wrinkling of conical parts in modified hydroforming process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 116, pp. 259-279, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07413-8>
- [31] R. Ghasemi, M. Elyasi, H. Baseri, M. J. Mirnia, Microstructural analysis of sheet hydroforming process assisted by radial ultrasonic punch vibration in a hydro-mechanical deep drawing die, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-10, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11007-x>
- [32] Z. Zhang, F. Xu, X. Sun, Optimization of process parameters during hydroforming of tank bottom using NSGA-III algorithm, *The International Journal of*