



Modeling and Optimization of Hole Ovalization in Laser Bending of Perforated Metal Sheets

Mohsen Rezaei ^a, Mehdi Safari ^{b*}, Davood Akbari ^b

^a Department Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, 3818146763, Iran

^b Department Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 14115111, Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Rezaei M, Safari M, Akbari D. Modeling and Optimization of Hole Ovalization in Laser Bending of Perforated Metal Sheets. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2025;5(3):366-382.

 <https://10.66224/masm.5.3.366>

KEYWORDS

Laser bending,
Perforated sheet,
Ovality.

ABSTRACT

Laser bending of metal sheets is one of the most common forming processes and is widely used across various industries. Perforated sheets, due to their geometric discontinuities, encounter serious challenges during mechanical bending operations, which lead to ovalization of the holes and reduced dimensional accuracy. In this study, laser bending of 2-mm-thick perforated 304 stainless steel sheets is performed using a CO₂ laser, based on an experimental design developed through the response surface methodology and the Box-Behnken algorithm. For this purpose, the effects of process parameters—including laser power, scan speed, and laser beam diameter—on the percentage of hole ovalization are investigated. The results show that increasing the laser power and beam diameter increases ovalization, while increasing the scan speed reduces it. Analysis of variance of the statistical model indicates the significance of the main effects, interactions, and second-order terms of the parameters. Parameter optimization reveals that, in order to achieve minimum ovalization (0.22%), the laser power, scan speed, and beam diameter should be set to 87 W, 75 mm/min, and 2 mm, respectively.

Extended Abstract

1. Introduction

In the industries ranging from automotive and aerospace to construction and ventilation systems, the bending of sheet metals is one of the most fundamental and widely employed forming processes. Conventional mechanical bending, which relies on contact tools such as dies, punches, and matrices, is effective for uniform sheets but faces significant limitations when applied to perforated sheets due to geometric discontinuities. Holes along the bend line act as stress concentrators, often leading to undesirable effects such as hole ovalization, edge tearing, localized buckling, and dimensional inaccuracies. Additionally, mechanical bending is heavily dependent on the design and fabrication of dedicated dies, which is costly, time-consuming, and limits flexibility in low-volume or customized production. The presence of mechanical contact also introduces heterogeneous tensile and compressive stresses, reducing repeatability and potentially damaging surface quality. Laser bending (LBP) has emerged as a non-contact forming method that can overcome many of these limitations. By delivering a highly focused laser beam to the sheet surface, localized heating induces steep thermal gradients across the thickness, resulting in controlled plastic deformation during cooling. This approach eliminates classical spring-back, reduces

* Corresponding author:

E-mail address: m.safari@arakut.ac.ir

DOI: <https://10.66224/masm.5.3.366>

Received: July 09, 2025; Received in revised form: August 11, 2025; Accepted: September 10, 2025.

© Author



surface damage, and allows for precise, localized, and gradual bending. However, in perforated sheets, holes create localized stress and strain concentrations, which can affect both the bending angle and the geometric integrity of the perforations. In particular, ovalization of holes and localized thickness variations remain critical challenges that must be quantified and controlled to ensure dimensional accuracy and performance reliability.

2. Material and methods

In this study, the laser bending of perforated stainless steel 304 sheets (thickness 2 mm, dimensions 75×50 mm, with linearly aligned holes) was systematically investigated using a continuous CO₂ laser with a maximum power of 120 W. The sheet surfaces were coated with graphite powder to enhance laser absorption. Three key process parameters were selected as input variables: laser output power (LOP: 80–120 W), laser scanning speed (LSS: 25–75 mm/min), and laser beam diameter (LBD: 2–4 mm). The primary response was percentage of hole ovalization, measured using a MITUTOYO CRYSTA-Apex V544 coordinate measuring machine and defined as $(D_{\max} - D_{\min})/D \times 100\%$. The experimental design employed a Box–Behnken response surface methodology (RSM) to evaluate the main, quadratic, and interaction effects of the process parameters with a minimal number of experiments while capturing non-linear behavior. Figure 1 illustrates the schematics of the arrangement of holes in the perforated sheet and also the laser bending process with a sample of laser bent perforated sheets.

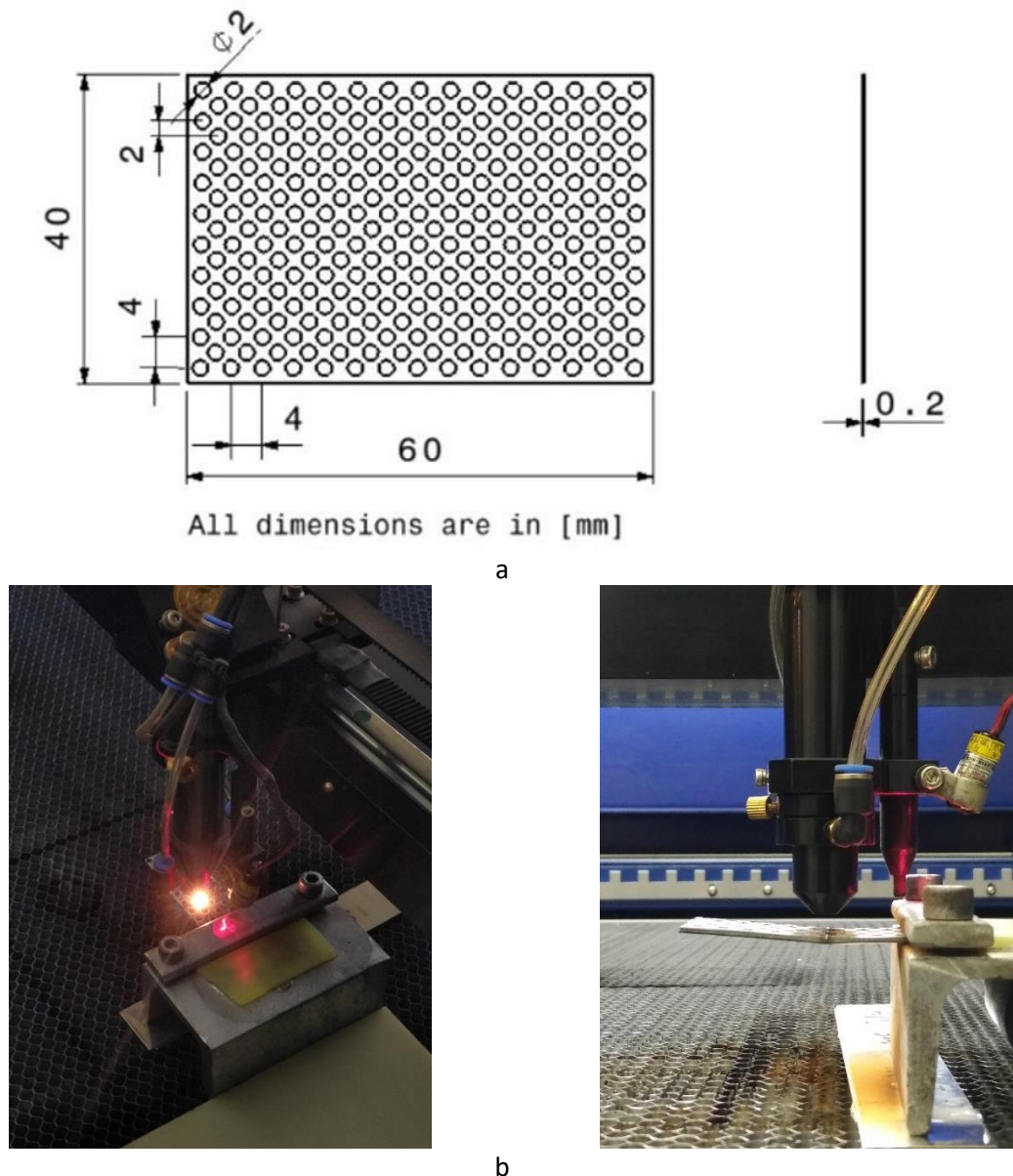


Figure 1. a- The schematics of the arrangement of holes in the perforated sheet; b- The laser bending process and a sample of laser bent perforated sheets

A systematic investigation of process parameters affecting hole ovalization in the laser bending of perforated sheets was conducted using a Response Surface Methodology (RSM) and the Box–Behnken design. Laser power, scan speed, and beam diameter were selected as input variables based on their influence on heat input, thermal gradients, and the heat-affected zone. The percentage of ovalization of holes along the irradiation path was defined as the output response, and the parameter levels used in the experiments are listed in Table 1. The full experimental design generated by RSM is presented in Table 2.

Table 1 The parameter levels used in the experiments

Input parameter	Unit	Abbreviation	Levels		
Laser power	W	P	80	100	120
Laser scanning speed	mm/min	S	25	50	75
Laser beam diameter	mm	D	2	3	4

3. Results

ANOVA results (Table 3) show that the statistical model is highly significant, with p-values below 0.05 and a high F-statistic, indicating that variations in hole ovalization are mainly governed by the process parameters. Laser power is identified as the most influential factor, while the quadratic terms for power and beam diameter are also significant. The lack-of-fit is insignificant, confirming that the second-order regression model accurately represents the process behavior.

Table 2 The design of experiments (DOE) for laser bending process

Test number	P	S	D
1	120	50	4
2	100	75	2
3	100	75	4
4	120	25	3
5	80	25	3
6	80	50	4
7	100	50	3
8	80	50	2
9	100	50	3
10	120	50	2
11	100	50	3
12	100	25	2
13	80	75	3
14	120	75	3
15	100	25	4

Table 3 The analysis of variance results for ovality of holes in laser bent perforated sheets

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	1.35697	0.150774	198.82	0.000
Linear	3	1.21938	0.406458	535.99	0.000
P	1	0.56711	0.567113	747.84	0.000
S	1	0.22445	0.224450	295.98	0.000
D	1	0.42781	0.427813	564.15	0.000
Square	3	0.13464	0.044881	59.18	0.000
P*P	1	0.12410	0.124103	163.65	0.000
S*S	1	0.00216	0.002156	2.84	0.153
D*D	1	0.00863	0.008626	11.37	0.020
2-Way Interaction	3	0.00295	0.000983	1.30	0.372
P*S	1	0.00203	0.002025	2.67	0.163
P*D	1	0.00090	0.000900	1.19	0.326
S*D	1	0.00002	0.000025	0.03	0.863
Error	5	0.00379	0.000758		
Lack-of-Fit	3	0.00293	0.000975	2.25	0.322
Pure Error	2	0.00087	0.000433		
Total	14	1.36076			

The model achieves $R^2 = 96.72\%$ and $R^2(\text{adj}) = 96.22\%$, demonstrating excellent predictive capability. Residual analysis (Figure 2) confirms that the model fits the data well and that the residuals exhibit random distribution.

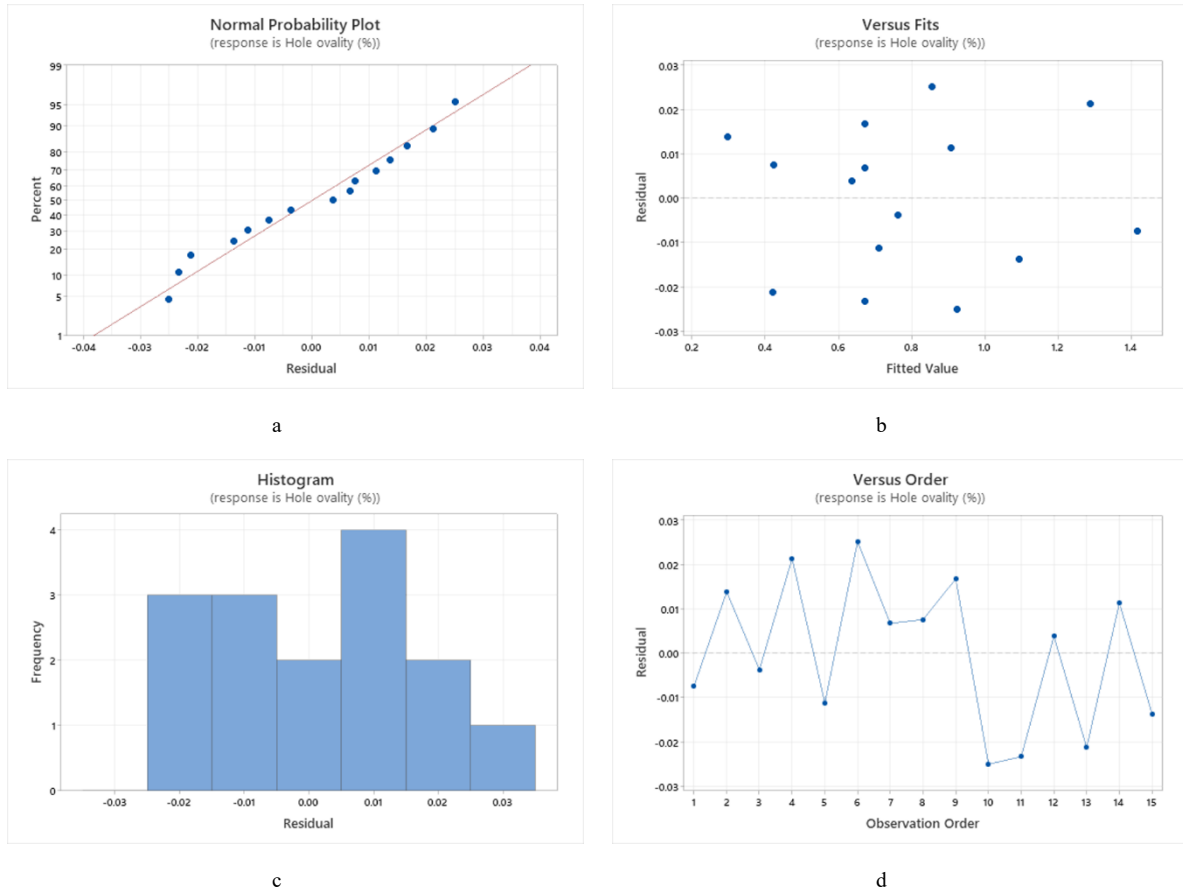


Figure 2. The residual plots for the ovality of the laser bent perforated sheet; a- Normal Probability Plot of Residuals, b- Residuals versus Fitted Values, c- Histogram of Residuals, d- Residuals versus Observation Order

Main effect plots (Figure 3) show that increasing laser power and beam diameter increases hole ovalization due to intensified or expanded thermal gradients, while increasing scan speed reduces ovalization by lowering interaction time and limiting heat accumulation.

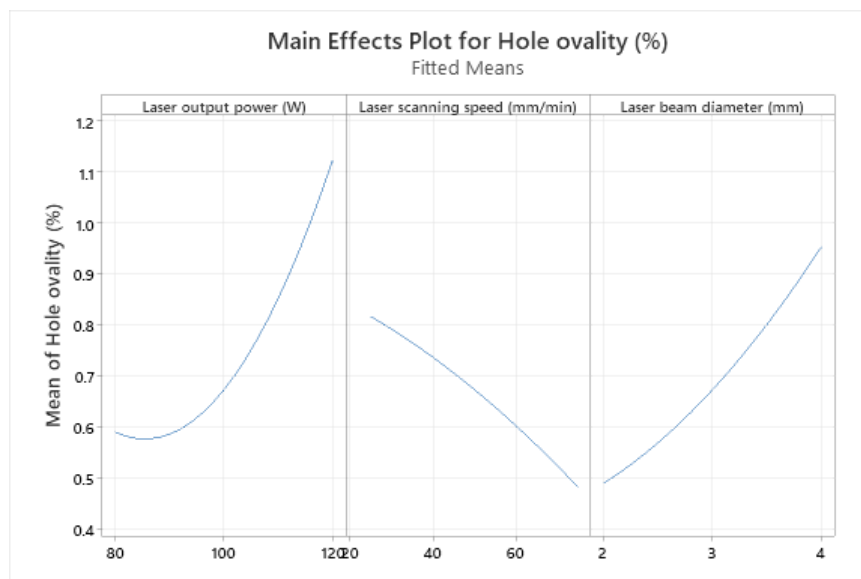


Figure 3. Main effect plots of input parameters on the ovality of holes in laser bent perforated sheet

Optimization using the regression model indicates that minimum ovalization (0.22%) is achieved at 87 W laser power, 75 mm/min scan speed, and 2 mm beam diameter, as illustrated in Figure 4.

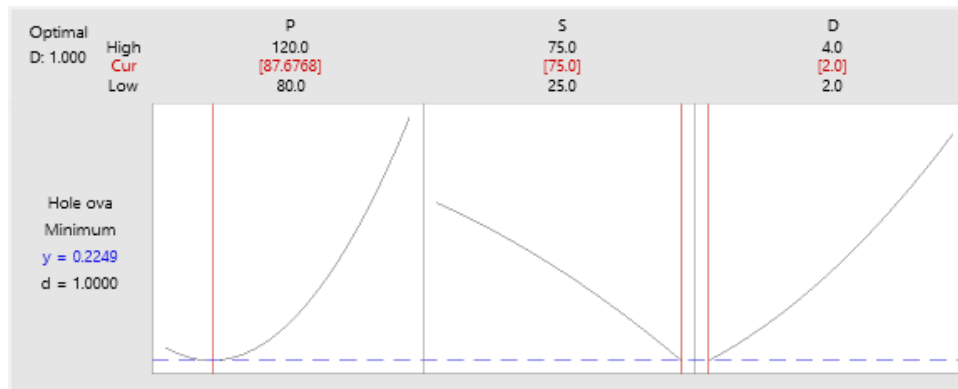


Figure 4. Optimal process parameters for achieving an ovalization of 0.22%

4. Conclusion

Laser bending of 2-mm-thick perforated AISI 304 stainless steel was studied to evaluate the effects of laser power, scanning speed, and beam diameter on hole ovalization using RSM with a Box–Behnken design. Laser power was identified as the most influential parameter, with higher power increasing thermal gradients and plastic deformation, leading to greater ovalization. Increasing scanning speed reduced laser–material interaction time and decreased hole distortion, while a larger beam diameter intensified strain concentration at hole edges, increasing ovalization. ANOVA confirmed significant main and interaction effects, indicating nonlinear process behavior. Optimization results showed that minimum hole ovalization (0.22%) is achieved at 87 W laser power, 75 mm/min scanning speed, and a 2 mm beam diameter.



مدل سازی و بهینه سازی بیضوی شدن سوراخ ها در خم کاری لیزری ورق های فلزی سوراخ دار

محسن رضائی الف، مهدی صفری ب*، داود اکبری ج

الف دانشجوی دکترا، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، m.rezaei@arakut.ac.ir

ب دانشیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، m.safari@arakut.ac.ir

ج دانشیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، daakbari@modares.ac.ir

واژگان کلیدی	چکیده
خم کاری لیزری، ورق سوراخ دار، بیضوی شدن.	خم کاری ورق های فلزی یکی از رایج ترین فرآیندهای شکل دهی است که در صنایع مختلف کاربرد گسترده دارد. ورق های سوراخ دار به دلیل حضور ناپیوستگی های هندسی، با مشکلات جدی در فرآیندهای خم کاری مکانیکی مواجه هستند که منجر به بیضوی شدن سوراخ ها و کاهش دقت ابعادی می شود. در این مطالعه، خم کاری لیزری ورق های سوراخ دار استیل ۳۰۴ با ضخامت ۲ میلی متر با استفاده از لیزر CO ₂ و طراحی آزمایش مبتنی بر روش سطح پاسخ و الگوریتم باکس - بنکن انجام می شود. بدین منظور اثر پارامترهای فرآیندی شامل توان لیزر، سرعت اسکن و قطر پرتوی لیزر بر درصد بیضوی شدن سوراخ ها مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج نشان می دهند که افزایش توان و قطر پرتوی لیزر موجب افزایش بیضوی شدن و افزایش سرعت اسکن منجر به کاهش آن می شود. تحلیل واریانس مدل آماری بیانگر معناداری اثرات اصلی، برهم کنش ها و اثرات درجه دوم پارامترها هستند. بهینه سازی پارامترها نشان می دهد که برای دستیابی به حداقل بیضوی شدن (۰/۲۲ درصد)، توان لیزر، سرعت اسکن و قطر پرتوی لیزر به ترتیب باید برابر ۸۷ وات، ۷۵ میلی متر بر دقیقه و ۲ میلی متر تنظیم شوند.

۱- مقدمه

فرآیندهای شکل دهی فلزات از مهم ترین فرآیندهای تولید بوده که در زمینه های مختلف صنعتی نیز کاربرد دارند [۱-۵]. خم کاری یکی از رایج ترین فرآیندهای شکل دهی ورق های فلزی است که به طور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می گیرد. در روش های متداول خم کاری، تغییر شکل ورق از طریق اعمال نیروی مکانیکی توسط قالب، سنبه و ماتریس انجام می شود. اگرچه این روش ها برای بسیاری از کاربردها مناسب هستند، اما در قطعاتی با هندسه پیچیده، ضخامت کم یا وجود ناپیوستگی های هندسی نظیر سوراخ ها، با محدودیت ها و چالش های جدی مواجه می شوند. خم کاری لیزری به عنوان یک روش نوین و غیرتماسی شکل دهی، رویکردی متفاوت نسبت به روش های مکانیکی ارائه می دهد. در این فرآیند، انرژی متمرکز پرتو لیزر به صورت موضعی به سطح ورق تابانده شده و باعث افزایش سریع دما در ناحیه تابش می شود. این افزایش دما منجر به ایجاد گرادیان دمایی شدید در ضخامت ورق شده و در نتیجه، کرنش های حرارتی و پلاستیک در مرحله سرد شدن باعث خم شدگی ورق می گردند. از آنجاکه تغییر شکل عمدتاً در اثر انقباض حرارتی و بدون اعمال نیروی خارجی رخ می دهد، پدیده بازگشت فبری کلاسیک که در خم کاری مکانیکی رایج است، به طور مؤثری حذف می شود.

در ورق های سوراخ دار، وجود سوراخ ها باعث ایجاد ناپیوستگی در سطح و مقطع ورق می شود که این امر رفتار خم کاری را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می دهد. در خم کاری با ابزار مکانیکی، تمرکز تنش در اطراف سوراخ ها به ویژه سوراخ های واقع در امتداد خط خم، منجر به بروز پدیده هایی نظیر بیضوی شدن سوراخ ها، تغییر ابعاد، پارگی لبه سوراخ و حتی کماتش موضعی ورق می شود. علاوه بر این، تماس مستقیم ابزار با ورق موجب اعمال تنش های کششی و فشاری ناهمگن شده که در نهایت باعث کاهش دقت ابعادی و افت کیفیت سطحی قطعه می گردد. یکی دیگر از معضلات مهم خم کاری مکانیکی ورق های سوراخ دار، وابستگی شدید فرآیند به طراحی قالب است. طراحی و ساخت قالب های اختصاصی برای ورق های سوراخ دار، به ویژه در تیراژ پایین یا قطعات سفارشی، هزینه بر و زمان بر بوده و انعطاف پذیری تولید را به شدت کاهش می دهد. علاوه بر این، سایش ابزار و تغییر شرایط تماس در اطراف سوراخ ها می تواند منجر به تکرار پذیری پایین فرآیند و پراکندگی نتایج شود. در مقابل، خم کاری لیزری به دلیل ماهیت غیرتماسی خود، بسیاری از محدودیت های فوق را برطرف می سازد. عدم استفاده از قالب و ابزار مکانیکی موجب کاهش تمرکز تنش های مکانیکی در اطراف سوراخ ها شده و احتمال پارگی یا اعوجاج شدید سوراخ ها را کاهش می دهد. همچنین، امکان کنترل دقیق پارامترهای فرآیند نظیر توان لیزر، سرعت اسکن و قطر پرتوی لیزر، این قابلیت را فراهم می آورد که میدان دمایی و کرنش پلاستیک به صورت هدفمند تنظیم شود. از دیگر محاسن مهم خم کاری لیزری برای ورق های سوراخ دار، قابلیت اعمال خم کاری موضعی و تدریجی است. این ویژگی اجازه می دهد تا تغییر شکل به صورت یکنواخت تری در اطراف سوراخ ها توزیع شود و شدت بیضوی شدن سوراخ های واقع در مسیر تابش دهی کاهش یابد. علاوه بر این، حذف تماس مکانیکی باعث حفظ کیفیت سطحی ورق و جلوگیری از آسیب های فیزیکی به لبه سوراخ ها می شود. با وجود این مزایا، خم کاری لیزری ورق های سوراخ دار نیز با چالش هایی همراه است. تمرکز حرارتی و توزیع غیریکنواخت دما در اطراف سوراخ ها می تواند منجر به کرنش های موضعی شدید، تغییرات ضخامت و بیضوی شدن سوراخ ها شود. از این رو، شناخت دقیق اثر پارامترهای فرآیند خم کاری لیزری بر رفتار هندسی و ضخامت ورق های سوراخ دار، شرط لازم برای بهره برداری بهینه از این فناوری پیشرفته است. طی سال های اخیر تحقیقات زیادی در زمینه ی خم کاری ورق های فلزی با کمک پرتوی لیزر انجام شده است که در ادامه به برخی از آن ها اشاره می شود. سونگ و همکاران [۶] به بررسی خم کاری لیزری فولادهای استحکام بالا با استفاده از آزمایش و شبیه سازی اجزای محدود پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که افزایش ضریب جذب سطحی تأثیر قابل توجهی بر افزایش زاویه خم دارد. مگی و همکاران [۷] اثر پارامترهای فرآیند، به ویژه تعداد پاس های تابش دهی، را بر خم کاری لیزری ورق های فولاد زنگ نزن بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد که افزایش تعداد پاس ها موجب افزایش زاویه خم و بهبود خواص مکانیکی ناحیه خم شده می شود. فتن و همکاران [۸] اثر پوشش سطحی بر رفتار خم کاری لیزری را مطالعه کردند. آن ها گزارش دادند که افزایش ضریب جذب ناشی از پوشش، موجب افزایش تغییر شکل خمشی ورق می شود. همچنین فتن و همکاران [۹] اثر ابعاد هندسی ورق را در خم کاری لیزری فولاد AH36 بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش عرض و کاهش ضخامت ورق منجر به افزایش زاویه خم می شود. پاراماسیوان و همکاران [۱۰] اثر خنک کاری اجباری را با استفاده از شبیه سازی عددی بررسی کردند. آن ها نشان دادند که خنک کاری خارجی باعث افزایش گرادیان دمایی و در نتیجه افزایش زاویه خم می شود. صفری و جودکی [۱۱] از شبکه های عصبی مصنوعی برای پیش بینی زاویه خم در خم کاری لیزری استفاده کردند و دقت بالای این روش را در مدل سازی رفتار فرآیند گزارش دادند. کتبی و همکاران [۱۲] توزیع تنش پسماند در خم کاری لیزری ورق های دولایه فولاد-تیتانیوم را بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد که افزایش توان لیزر باعث افزایش تنش های کششی در ضخامت ورق می شود. ژانگ و همکاران [۱۳] پدیده اثر لبه را در خم کاری لیزری فولادهای دوفازی مطالعه کردند. آن ها گزارش دادند که افزایش تعداد پاس های تابش دهی می تواند شدت اثر لبه را کاهش دهد. سیدکاشی و همکاران [۱۴] اثر پارامترهای لیزر شامل توان، سرعت اسکن و قطر پرتو را بر خم کاری لیزری ورق های روکش دار بررسی کردند و حساسیت بالای رفتار خم کاری نسبت به این پارامترها را نشان دادند. ونگ و همکاران [۱۵] تغییرات ضخامت ورق در مسیر تابش دهی لیزر را در ورق های چندلایه مورد مطالعه قرار دادند و گزارش کردند که پدیده ضخیم شدگی موضعی می تواند در اثر تکامل ریزساختار رخ دهد. صفری و همکاران [۱۶] خم کاری به کمک لیزر ورق های سوراخ دار از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را با بررسی اثر توان لیزر، سرعت اسکن و تعداد تابش ها بر زاویه خم را بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد افزایش توان و تعداد تابش ها زاویه خم را افزایش و افزایش سرعت اسکن آن را کاهش می دهد. همچنین صفری و جودکی [۱۷] اثر پارامترهای لیزر بر زاویه خم و تغییر شکل سوراخ ها را بررسی کردند و نشان دادند که افزایش توان لیزر موجب

افزایش زاویه خم و تغییر شکل جانبی سوراخ‌ها می‌شود، درحالی‌که افزایش سرعت اسکن اثر معکوس دارد.

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر درزمینه‌ی خم‌کاری ورق‌های فلزی با استفاده از لیزر و تعداد قابل‌توجهی از پژوهش‌های تجربی و شبیه‌سازی در این حوزه، مطالعات متمرکز بر خم‌کاری لیزری ورق‌های سوراخ‌دار به میزان قابل‌توجهی محدود است. ورق‌های سوراخ‌دار به دلیل کاربرد گسترده در صنایع مختلف مانند خودروسازی، ساختمان و تجهیزات تهویه، نقش مهمی در کاهش وزن سازه و بهبود جریان هوا ایفا می‌کنند؛ بااین‌حال، حفظ دقت هندسی سوراخ‌ها در طول فرآیند خم‌کاری یکی از چالش‌های اصلی آن‌ها محسوب می‌شود. ازاین‌رو، بررسی تغییر شکل هندسی سوراخ‌ها، به‌ویژه درصد بیضی‌شدن آن‌ها در مسیر تابش لیزر، امری ضروری برای اطمینان از عملکرد بهینه و کیفیت نهایی ورق‌ها است. در این مطالعه، اثر پارامترهای کلیدی فرآیند شامل توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و قطر پرتو بر میزان بیضی‌شدن سوراخ‌ها مورد بررسی دقیق قرار گرفته و تلاش شده است تا با استفاده از طراحی آزمایش‌های آماری و بهینه‌سازی، دیدی جامع نسبت به رفتار ورق‌های سوراخ‌دار در خم‌کاری لیزری ارائه شود.

۲- کار تجربی و روش تحلیل

برای بررسی تجربی اثر پارامترهای لیزر بر بیضی‌شدن سوراخ‌های واقع در مسیر تابش‌دهی، از یک دستگاه لیزر دی‌اکسیدکربن پیوسته با حداکثر توان ۱۲۰ وات استفاده شد. نمونه‌ها از فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با ابعاد $۷۵ \times ۵۰ \times ۱$ میلی‌متر و با سوراخ‌هایی در مسیر تابش آماده شدند. سطح نمونه‌ها پیش از تابش لیزر با پودر گرافیت پوشش داده شد تا جذب انرژی بهینه گردد. در شکل ۱ شماتیکی از آرایش قرارگیری سوراخ‌ها در ورق سوراخ‌دار و همچنین نمای کلی فرآیند خم‌کاری با لیزر ورق‌های سوراخ‌دار زنگ‌نزن نشان داده شده است.

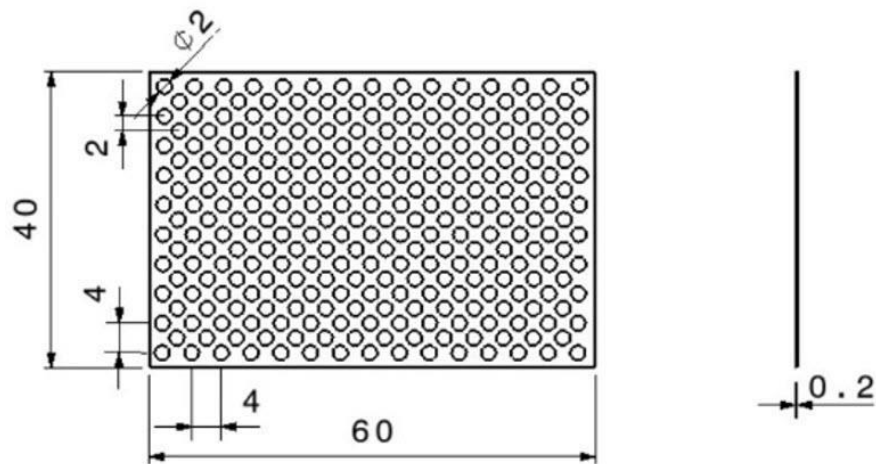
در انجام آزمایش‌های تجربی، نمونه‌ها از یک لبه‌مهار و لبه‌مقابل آزاد باقی گذاشته شد تا تغییر شکل و خم‌کاری انجام شود. برای اندازه‌گیری قطر سوراخ‌ها، از دستگاه اندازه‌گیری مختصات MITUTOYO مدل CRYSTA-Apex V544 استفاده شد. پدیده بیضی‌شدن سوراخ‌ها عمدتاً ناشی از ایجاد تنش‌های کششی در سطح خارجی و تنش‌های فشاری در سطح داخلی ناحیه متأثر از حرارت در حین فرآیند خم‌کاری لیزری است. این توزیع نامتقارن تنش‌ها در اثر گرادیان‌های شدید دمایی و تغییر شکل پلاستیک موضعی به وجود آمده و منجر به تغییر شکل هندسی سوراخ‌های واقع در مسیر تابش‌دهی می‌شود. در این پژوهش، درصد بیضی‌شدن به‌عنوان شاخص کمی برای ارزیابی میزان اعوجاج هندسی سوراخ‌ها در ناحیه خم‌کاری تعریف می‌شود. در کاربردهای صنعتی، چنین تغییر شکلی می‌تواند عملکرد سازه‌ای و سیالی قطعه را تحت تأثیر قرار داده و منجر به اختلال در جریان یا کاهش دقت ابعادی شود. میزان بیضی‌شدن سوراخ‌ها بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\text{Ovalization} = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \times 100(\%) \quad (1)$$

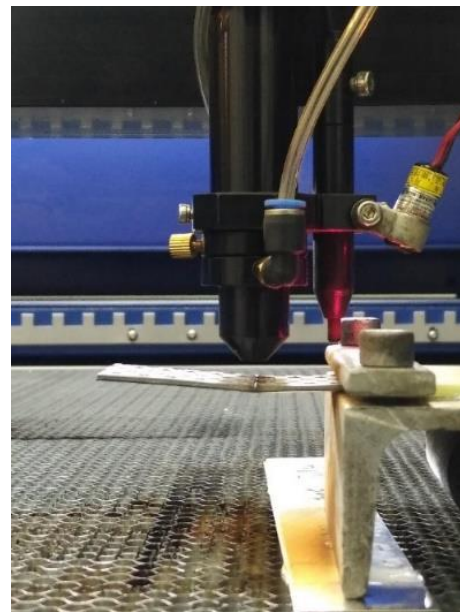
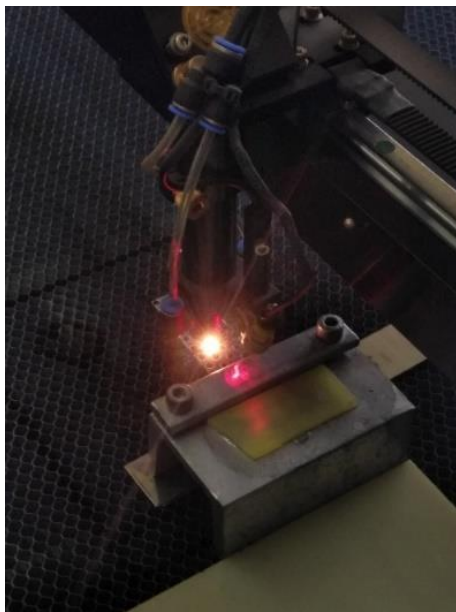
که در آن $D_{\max}$ و $D_{\min}$ به‌ترتیب بیانگر بیشینه و کمینه قطر متوسط سوراخ تغییرشکل‌یافته بوده و D قطر اولیه سوراخ پیش از اعمال فرآیند خم‌کاری لیزری است.

به‌منظور بررسی نظام‌مند اثر پارامترهای فرآیند بر بیضی‌شدن سوراخ‌ها در خم‌کاری لیزری ورق‌های سوراخ‌دار، از روش طراحی آزمایش‌ها مبتنی بر روش سطح پاسخ و الگوریتم باکس-بنکن استفاده شد. به‌کارگیری روش طراحی آزمایش این امکان را فراهم می‌سازد که با حداقل تعداد آزمایش‌ها، اثرات پارامترهای اصلی، توان دوم آن‌ها و برهم‌کنش‌های متقابل به‌صورت هم‌زمان مورد ارزیابی قرار گیرد و رفتار غیرخطی فرآیند به‌دقت مدل‌سازی شود. در این پژوهش، توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و قطر پرتو لیزر به‌عنوان متغیرهای ورودی انتخاب شدند. انتخاب این پارامترها بر اساس نقش مستقیم آن‌ها در میزان انرژی ورودی، توزیع حرارتی، شکل‌گیری گرادیان دمایی و توسعه ناحیه متأثر از حرارت صورت گرفته است. توان لیزر کنترل‌کننده شدت انرژی اعمال‌شده به ورق است، درحالی‌که سرعت اسکن تعیین‌کننده زمان برهم‌کنش پرتو با ماده بوده و قطر پرتو هندسه توزیع انرژی حرارتی را مشخص می‌کند. در مقابل، درصد بیضی‌شدن سوراخ‌های واقع در مسیر تابش‌دهی به‌عنوان پاسخ‌های خروجی فرآیند

در نظر گرفته شدند. هر یک پارامترهای ورودی در چند سطح مختلف تنظیم شدند تا امکان بررسی جامع اثرات آن‌ها فراهم شود. در جدول ۱ مقادیر مختلف هر پارامتر مورد استفاده در آزمایش‌های خم‌کاری با لیزر نشان داده شده است. همچنین در جدول ۲ لیست آزمایش‌های انجام شده بر اساس روش پاسخ سطح و الگوریتم باکس - بنکن نشان داده شده است.



الف



ب

شکل ۱ الف - شماتیکی از آرایش سوراخ‌ها (همه اندازه‌ها به میلی‌متر می‌باشند)، ب- نمای کلی فرآیند خم‌کاری با لیزر ورق‌های سوراخ‌دار زنگ نزن به همراه نمونه‌ای از ورق‌های خم‌کاری شده

جدول ۱ مقادیر در نظر گرفته‌شده برای پارامترهای ورودی در روش پاسخ سطح

پارامتر	نماد	سطح پایین	سطح میانی	سطح بالا
توان لیزر (وات)	P	۸۰	۱۰۰	۱۲۰
سرعت اسکن لیزر (میلی‌متر بر دقیقه)	S	۲۵	۵۰	۷۵
قطر پرتوی لیزر (میلی‌متر)	D	۲	۳	۴

جدول ۲ لیست آزمایش‌ها بر اساس روش سطح پاسخ

شماره آزمایش	توان لیزر	سرعت اسکن لیزر	قطر پرتوی لیزر
۱	۱۲۰	۵۰	۴
۲	۱۰۰	۷۵	۲
۳	۱۰۰	۷۵	۴
۴	۱۲۰	۲۵	۳
۵	۸۰	۲۵	۳
۶	۸۰	۵۰	۴
۷	۱۰۰	۵۰	۳
۸	۸۰	۵۰	۲
۹	۱۰۰	۵۰	۳
۱۰	۱۲۰	۵۰	۲
۱۱	۱۰۰	۵۰	۳
۱۲	۱۰۰	۲۵	۲
۱۳	۸۰	۷۵	۳
۱۴	۱۲۰	۷۵	۳
۱۵	۱۰۰	۲۵	۴

۳- نتایج

نتایج تحلیل واریانس برای بیضوی شدن سوراخ‌های واقع بر مسیر تابش‌دهی در فرآیند خم‌کاری ورق‌های سوراخ‌دار با لیزر در جدول ۳ ارائه شده است. مقادیر به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که مدل آماری استخراج‌شده از نظر آماری معنادار است. مقدار P مربوط به مدل کمتر از 0.05 بوده که بیانگر اعتبار مناسب مدل برای پیش‌بینی بیضوی شدن سوراخ‌ها در بازه پارامترهای مورد بررسی است.

جدول ۳ نتایج آنالیز واریانس برای بیضوی شدن سوراخ‌های واقع بر مسیر تابش‌دهی در فرآیند خم‌کاری ورق‌های سوراخ‌دار با لیزر

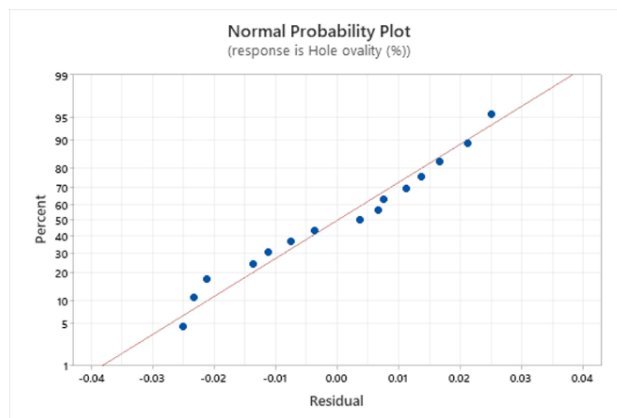
منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات تعدیل‌شده	میانگین مربعات تعدیل‌شده	مقدار F	مقدار P
مدل	۹	۱/۳۵۶۹۷	۰/۱۵۰۷۷۴	۱۹۸/۸۲	۰/۰۰۰
خطی	۳	۱/۲۱۹۳۸	۰/۴۰۶۴۵۸	۵۳۵/۹۹	۰/۰۰۰
توان لیزر	۱	۰/۵۶۷۱۱	۰/۵۶۷۱۱۳	۷۴۷/۸۴	۰/۰۰۰
سرعت اسکن لیزر	۱	۰/۲۲۴۴۵	۰/۲۲۴۴۵۰	۲۹۵/۹۸	۰/۰۰۰
قطر پرتوی لیزر	۱	۰/۴۲۷۸۱	۰/۴۲۷۸۱۳	۵۶۴/۱۵	۰/۰۰۰
درجه ۲	۳	۰/۱۳۴۶۴	۰/۰۴۴۸۸۱	۵۹/۱۸	۰/۰۰۰
درجه دوم توان	۱	۰/۱۲۴۱۰	۰/۱۲۴۱۰۳	۱۶۳/۶۵	۰/۰۰۰
درجه دوم سرعت	۱	۰/۰۰۲۱۶	۰/۰۰۲۱۵۶	۲/۸۴	۰/۱۵۳
درجه دوم قطر	۱	۰/۰۰۸۶۳	۰/۰۰۸۶۲۶	۱۱/۳۷	۰/۰۲۰
برهم‌کنش دوتایی	۳	۰/۰۰۲۹۵	۰/۰۰۰۹۸۳	۱/۳۰	۰/۳۷۲
توان * سرعت	۱	۰/۰۰۲۰۳	۰/۰۰۲۰۲۵	۲/۶۷	۰/۱۶۳
توان * قطر	۱	۰/۰۰۰۹۰	۰/۰۰۰۹۰۰	۱/۱۹	۰/۳۲۶
سرعت * قطر	۱	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۲۵	۰/۰۳	۰/۸۶۳
خطا	۵	۰/۰۰۳۷۹	۰/۰۰۰۷۵۸		
Lack-of-Fit	۳	۰/۰۰۲۹۳	۰/۰۰۰۹۷۵	۲/۲۵	۰/۳۲۲
خطای خالص	۲	۰/۰۰۰۸۷	۰/۰۰۰۴۳۳		
جمع کل	۱۴	۱/۳۶۰۷۶			

همچنین مقدار بالای F مدل بیانگر آن است که تغییرات مشاهده شده در درصد بیضوی شدن سوراخ ها عمدتاً ناشی از اثر پارامترهای فرآیند بوده و سهم خطای تصادفی در مقایسه با تغییرات کل ناچیز است. به عبارتی این شاخص میزان تأثیر واقعی عامل مورد بررسی را نسبت به نویز یا خطای آزمایش نشان می دهد. هرچه مقدار F بزرگ تر باشد، احتمال تأثیرگذاری واقعی عامل بر پاسخ بیشتر خواهد بود. مقادیر بالای F معمولاً نشان دهنده معناداری آماری عامل یا مدل هستند. همچنین در جدول ۳، درجه آزادی بیانگر تعداد مشاهدات مستقل موجود برای برآورد یک پارامتر آماری است. درجه آزادی برای هر منبع تغییرات به طور جداگانه محاسبه می شود و در تعیین میانگین مربعات و آزمون های آماری نقش اساسی دارد. به طور کلی، افزایش درجه آزادی موجب افزایش قابلیت اطمینان نتایج آماری می شود. مجموع مربعات تعدیل شده بیانگر میزان تغییرات پاسخ منتسب به هر عامل پس از حذف اثر سایر عوامل موجود در مدل است. این پارامتر سهم واقعی هر متغیر در تغییرات پاسخ را مشخص می کند. همچنین میانگین مربعات تعدیل شده که از تقسیم مجموع مربعات تعدیل شده بر درجه آزادی به دست می آید، مبنای محاسبه F قرار گرفته و برای ارزیابی معناداری آماری عوامل مورد استفاده قرار می گیرد. آزمون Lack of Fit بررسی می کند که آیا مدل ریاضی انتخاب شده توانایی توصیف مناسب داده های تجربی را دارد یا خیر. این آزمون خطای ناشی از نامناسب بودن مدل را از خطای تصادفی آزمایش تفکیک می کند. خطای خالص از تکرار آزمایش ها به دست می آید و نشان دهنده خطاهای تصادفی موجود در فرآیند آزمایش است. این پارامتر در آزمون Lack of Fit نقش مهمی ایفا می کند.

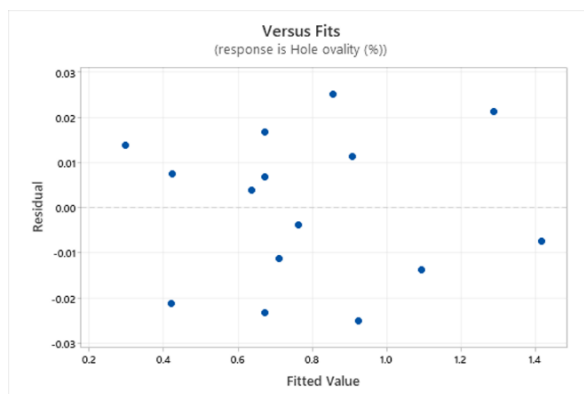
بررسی جدول ۳ نشان می دهد که توان لیزر بیشترین سهم را در تغییرات درصد بیضوی شدن سوراخ ها دارد. این پارامتر با مقدار F-value بالا و P-value بسیار کمتر از ۰/۰۵ به عنوان اثرگذارترین پارامتر فرآیندی شناسایی شد. سرعت اسکن لیزر و قطر پرتوی لیزر نیز تأثیرات معناداری بر درصد بیضوی شدن سوراخ ها دارند. علاوه بر اثرات اصلی، نتایج آنالیز واریانس نشان می دهند که ترم های درجه دوم توان و قطر پرتوی لیزر در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار هستند که این موضوع وجود رفتار غیرخطی و انحنای قابل توجه در سطح پاسخ را تأیید می کند. در نهایت، مقدار ناچیز خطای باقیمانده و عدم معناداری Lack of Fit نشان می دهد که مدل درجه دوم استخراج شده قادر است رفتار فرآیند خم کاری لیزری ورق های سوراخ دار را با دقت بالا پیش بینی کند. این مدل می تواند به عنوان ابزاری قابل اعتماد برای بهینه سازی پارامترهای فرآیند باهدف کنترل بیضوی شدن سوراخ ها مورد استفاده قرار گیرد. رگرسیون خطی درجه دوم به کاررفته برای توصیف تغییرات بیضوی شدن سوراخ های واقع بر مسیر تابش دهی در فرآیند خم کاری ورق های سوراخ دار با لیزر در معادله (۲) نمایش داده شده است.

$$\text{Hole ovality (\%)} = 3.920 - 0.07835 P + 0.00137 S - 0.139 D + 0.0004583 P^*P - 0.0000387 S^*S + 0.0483 D^*D - 0.0000450 P^*S + 0.000750 P^*D + 0.000100 S^*D \quad (2)$$

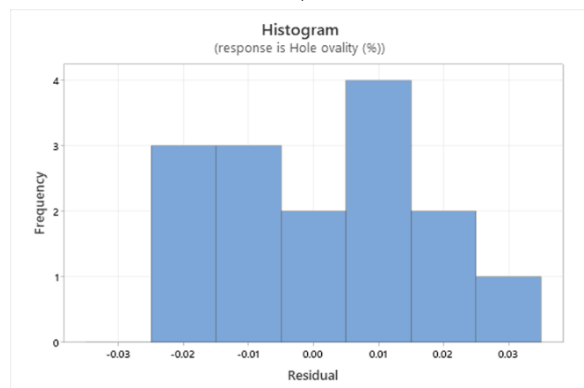
نتایج به دست آمده برای این مدل نشان می دهد که مقادیر $R^2 = 96.72\%$ و $R^2(\text{adj}) = 96.22\%$ بوده که به خوبی بیانگر توانایی مدل در توصیف رفتار داده های تجربی است. همچنین بررسی الگوی پراکندگی باقیمانده ها در شکل ۲ مؤید این موضوع است که برازش مدل مناسب بوده و خطاها از الگوی مشخصی تبعیت نمی کنند. در شکل ۲-الف نمودار احتمال نرمال باقیمانده ها برای بررسی نرمال بودن توزیع خطاهای مدل مورد استفاده قرار می گیرد. در صورتی که نقاط داده در امتداد یک خط مستقیم قرار گیرند، می توان نتیجه گرفت که باقیمانده ها از توزیع نرمال پیروی می کنند. همان طور که در شکل ۲-الف مشاهده می شود، اغلب نقاط در نزدیکی خط مرجع قرار گرفته اند و انحراف قابل توجهی از روند خطی مشاهده نمی شود. بنابراین فرض نرمال بودن خطاها برقرار بوده و مدل توسعه یافته از اعتبار آماری مناسبی برخوردار است. همچنین مطابق شکل ۲-ب نمودار باقیمانده ها در برابر مقادیر برازش شده به منظور بررسی یکنواختی واریانس خطاها و شناسایی الگوهای احتمالی در باقیمانده ها ترسیم می شود. در یک مدل مناسب، نقاط باید به صورت تصادفی در اطراف خط صفر پراکنده باشند و هیچ روند مشخصی مشاهده نشود. مطابق شکل ۲-ب، پراکندگی باقیمانده ها در اطراف محور صفر کاملاً تصادفی بوده و الگوی خاصی نظیر قیفی شدن یا انحنای دیده نمی شود.



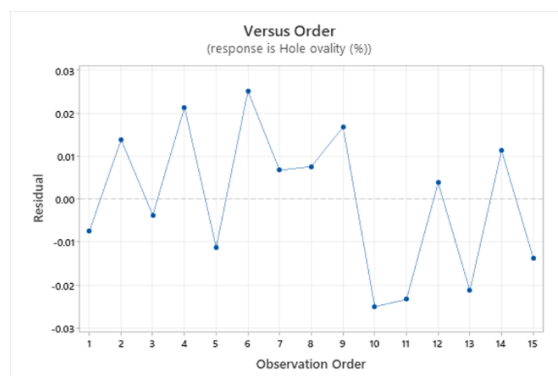
الف



ب



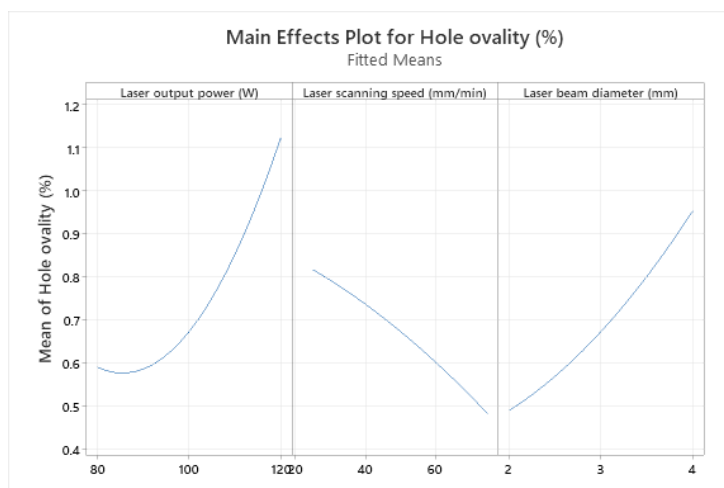
ج



د

شکل ۲ الف) نمودارهای احتمال نرمال باقیمانده‌ها، ب) باقیمانده‌ها در برابر مقادیر برازش شده، ج) هیستوگرام باقیمانده‌ها و د- نمودار باقیمانده‌ها در برابر ترتیب مشاهدات برای بیضوی شدن سوراخ‌ها

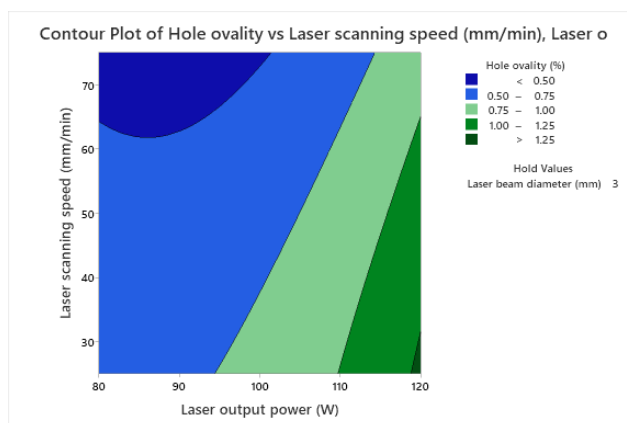
شکل ۲- ج هیستوگرام باقیمانده ها توزیع فراوانی خطاهای مدل را نمایش می دهد و برای ارزیابی نرمال بودن داده ها به کار می رود. در این نمودار، توزیع باقیمانده ها حول مقدار صفر تقریباً متقارن است و تمرکز اصلی داده ها در نزدیکی مرکز قرار دارد. عدم وجود چولگی شدید یا چندقله ای بودن توزیع نشان می دهد که خطاهای مدل از توزیع نرمال قابل قبولی برخوردار هستند و برازش مدل از کیفیت مناسبی برخوردار است. نمودار باقیمانده ها در برابر ترتیب مشاهدات (شکل ۲- د) برای بررسی استقلال خطاها و شناسایی روندهای زمانی یا سیستماتیک در داده ها استفاده می شود. در صورتی که نقاط به صورت تصادفی در اطراف خط صفر توزیع شده باشند، می توان نتیجه گرفت که بین خطاها وابستگی وجود ندارد. مطابق شکل ۲- د، باقیمانده ها بدون روند افزایشی یا کاهشی مشخص در طول ترتیب آزمایش ها پراکنده شده اند و الگوی تناوبی یا خوشه بندی مشاهده نمی شود. بنابراین فرض استقلال مشاهدات برقرار بوده و اثر عوامل خارجی یا خطاهای سیستماتیک بر نتایج آزمایش ناچیز است. در حوزه طراحی آزمایش، مقدار بالای R^2 یکی از معیارهای کلیدی برای سنجش کیفیت و اعتبار مدل آماری محسوب می شود؛ به این معنا که هرچه این مقدار به عدد ۱ یا ۱۰۰ درصد نزدیک تر باشد، مدل به نحو مطلوب تری داده های واقعی را بازتاب داده و قابلیت پیش بینی آن بیشتر است. علاوه بر این، تحلیل نمودار باقیمانده-برآزش (Residual-Fitted) نیز ابزار مهمی برای ارزیابی صحت مدل سازی است. انتظار می رود مدل سازگار با داده های آزمایشگاهی از میان نقاط تجربی عبور کرده و فاصله داده ها تا منحنی رگرسیون کم و تصادفی باشد؛ موضوعی که مقدار R^2 نیز آن را کمی سازی می کند. در شکل ۳ نمودار اثرات اصلی پارامترهای ورودی شامل توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و قطر پرتوی لیزر بر بیضوی شدن سوراخ های واقع بر مسیر تابش دهی در فرآیند خم کاری ورق های سوراخ دار با لیزر نشان داده شده است.



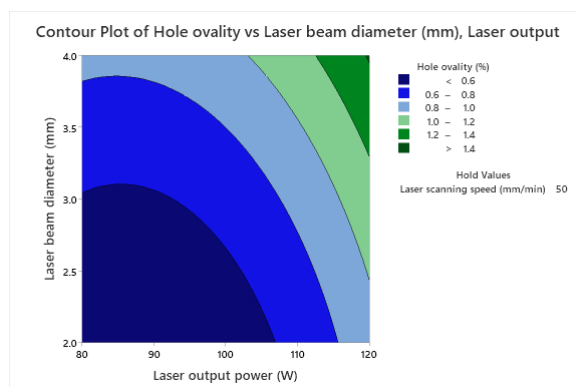
شکل ۳ نمودار اثرات اصلی پارامترهای ورودی شامل توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و قطر پرتوی لیزر بر بیضوی شدن سوراخ های واقع بر مسیر تابش دهی در فرآیند خم کاری ورق های سوراخ دار با لیزر

همان طور که از شکل ۳ مشاهده می شود با افزایش توان لیزر درصد بیضوی شدن سوراخ ها افزایش می یابد. به دلیل اینکه افزایش توان لیزر موجب افزایش چگالی انرژی ورودی به ورق و تشدید گرادیان دمایی در ناحیه اطراف سوراخ ها می شود. این تمرکز حرارتی باعث بروز کرنش های حرارتی نامتقارن در لبه سوراخ ها شده و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک غیریکنواختی در راستای مسیر تابش دهی ایجاد می کند. چنین رفتاری به طور مستقیم منجر به افزایش بیضوی شدن سوراخ ها می شود. در مقابل با افزایش سرعت اسکن لیزر درصد بیضوی شدن سوراخ ها کاهش می شود. افزایش سرعت اسکن لیزر موجب کاهش زمان برهم کنش پرتو با ماده و در نتیجه کاهش میزان تجمع حرارت در ناحیه تابش دهی می شود. این پدیده از توسعه ناحیه پلاستیک گسترده در اطراف سوراخ ها جلوگیری کرده و توزیع تنش های پسماند را یکنواخت تر می سازد. کاهش بیضوی شدن سوراخ ها در سرعت های اسکن بالا نشان می دهد که کنترل زمان اعمال انرژی می تواند به عنوان راهکاری مؤثر برای حفظ دقت هندسی در خم کاری لیزری ورق های سوراخ دار مورد استفاده قرار گیرد. همچنین با افزایش قطر پرتوی لیزر درصد بیضوی شدن سوراخ ها نیز افزایش می یابد. اثر مثبت قطر پرتو لیزر بر درصد بیضوی شدن را می توان به گسترش ناحیه متأثر از حرارت نسبت داد. افزایش قطر پرتو باعث توزیع انرژی در سطح وسیع تری شده و گرادیان دمایی ملایم تر اما گسترده تری ایجاد می کند. در حضور سوراخ ها، این توزیع حرارتی غیریکنواخت منجر به تمرکز کرنش در لبه های سوراخ و تشدید تغییر شکل بیضوی می شود. این مسئله اهمیت نقش

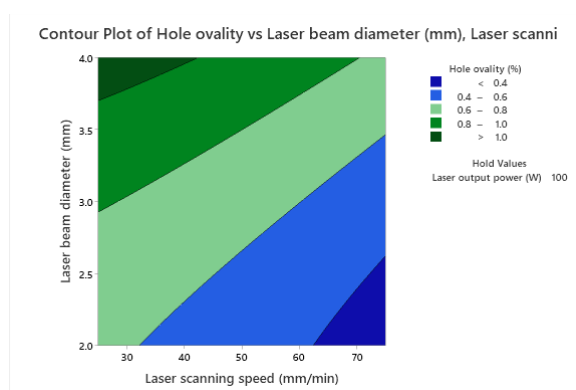
هندسه پرتو در فرآیند خم‌کاری لیزری ورق‌های سوراخ‌دار را برجسته می‌سازد. نمودارهای برهم‌کنش نشان داده شده در شکل ۴ ثابت می‌کنند که در توان‌های بالا، کاهش سرعت اسکن می‌تواند منجر به افزایش شدید بیضی‌شدن شود، درحالی‌که در سرعت‌های بالاتر این اثر تا حد زیادی کنترل می‌شود. همچنین برهم‌کنش توان لیزر و قطر پرتو بیانگر آن است که افزایش هم‌زمان این دو پارامتر موجب افزایش شدید انرژی مؤثر ورودی و تشدید اعوجاج سوراخ‌ها می‌شود.



الف



ب

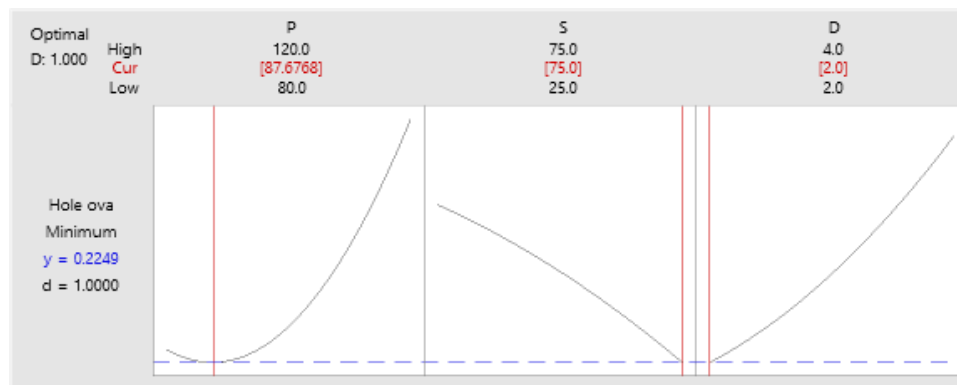


ج

شکل ۴ کانتورهای برهم‌کنش پارامترهای ورودی بر درصد بیضی‌شدن سوراخ‌ها، الف) توان لیزر و سرعت اسکن لیزر، ب) توان لیزر و قطر پرتوی لیزر، ج) سرعت اسکن لیزر و قطر پرتوی لیزر

به‌منظور دستیابی به کمترین مقدار بیضی‌شدن، فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از مدل‌های رگرسیونی استخراج‌شده انجام

شد. نتایج بهینه‌سازی در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود برای دستیابی به درصد بیضوی شدن برابر ۰/۲۲ درصد در سوراخ‌های واقع بر مسیر تابش‌دهی لازم است که پارامترهای توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و قطر پرتوی لیزر به ترتیب برابر ۸۷ وات، ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه و ۲ میلی‌متر تنظیم شوند.



شکل ۵ مقادیر بهینه پارامترهای ورودی برای دستیابی به حداقل بیضوی شدن سوراخ‌ها

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار خم‌کاری لیزری ورق‌های سوراخ‌دار فولاد زنگ‌نزن AISI 304 با ضخامت ۲ میلی‌متر مورد مطالعه قرار گرفت و تأثیر پارامترهای اصلی فرآیند شامل توان لیزر، سرعت اسکن و قطر پرتوی لیزر بر میزان بیضوی‌شدن سوراخ‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) و طراحی آزمایش باکس-بنکن به صورت نظام‌مند ارزیابی شد. تمرکز بر تحلیل و مدل‌سازی تغییرات هندسی سوراخ‌ها در فرآیند خم‌کاری لیزری ورق‌های سوراخ‌دار، نوآوری اصلی این تحقیق را تشکیل می‌دهد. نتایج تجربی و تحلیل‌های آماری نشان دادند که پارامترهای فرآیند تأثیر قابل توجهی بر کیفیت هندسی قطعه نهایی داشته و تغییرات آن‌ها می‌تواند به طور مستقیم میزان اعوجاج و بیضوی‌شدن سوراخ‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. در میان متغیرهای بررسی‌شده، توان لیزر به عنوان مؤثرترین عامل شناخته شد. افزایش توان لیزر با افزایش انرژی ورودی به قطعه، تشدید گرادیان‌های دمایی و ایجاد کرنش‌های حرارتی غیریکنواخت در نواحی پیرامون سوراخ‌ها همراه بوده و در نتیجه موجب افزایش تغییر شکل پلاستیک موضعی و رشد میزان بیضوی‌شدن سوراخ‌ها می‌شود. در مقابل، افزایش سرعت اسکن لیزر با کاهش زمان برهم‌کنش بین پرتو و ماده، میزان انرژی جذب‌شده در واحد طول را کاهش داده و از گسترش نواحی دارای تغییر شکل پلاستیک جلوگیری می‌کند. بر این اساس، سرعت‌های اسکن بالاتر نقش مؤثری در کاهش اعوجاج هندسی و حفظ دقت ابعادی قطعات سوراخ‌دار ایفا می‌کنند. همچنین مشخص شد که قطر پرتوی لیزر نیز از عوامل تأثیرگذار بر رفتار تغییر شکل ورق است. افزایش قطر پرتو، اگرچه منجر به توزیع یکنواخت‌تر انرژی و کاهش شدت گرادیان‌های حرارتی می‌شود، اما به دلیل گسترش ناحیه متأثر از حرارت و تغییر در الگوی توزیع تنش و کرنش، در نهایت موجب افزایش بیضوی‌شدن سوراخ‌ها می‌گردد. این نتایج بیانگر اهمیت انتخاب مناسب مشخصات هندسی پرتو در کنترل اعوجاج‌های موضعی ناشی از فرآیند خم‌کاری لیزری است. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که علاوه بر اثرات اصلی پارامترهای فرآیند، اثرات متقابل و جملات درجه دوم نیز از نظر آماری معنادار هستند. این موضوع بیانگر ماهیت پیچیده و غیرخطی فرآیند خم‌کاری لیزری ورق‌های سوراخ‌دار بوده و نشان می‌دهد که پاسخ فرآیند تنها تابع اثرات مستقل پارامترها نیست، بلکه برهم‌کنش میان متغیرهای فرآیند نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی قطعه دارد. در این میان، برهم‌کنش بین توان لیزر و سرعت اسکن و همچنین برهم‌کنش بین توان لیزر و قطر پرتوی لیزر بیشترین تأثیر را بر میزان بیضوی‌شدن سوراخ‌ها از خود نشان دادند. علاوه بر این، اعتبار بالای مدل رگرسیونی توسعه‌یافته و انطباق مناسب مقادیر پیش‌بینی‌شده با داده‌های تجربی، کارایی و قابلیت اطمینان روش سطح پاسخ را در مدل‌سازی، تحلیل و پیش‌بینی رفتار فرآیند خم‌کاری لیزری تأیید کرد. نتایج بهینه‌سازی نیز نشان داد که حداقل میزان بیضوی‌شدن سوراخ‌ها، برابر با ۰/۲۲ درصد، در شرایط بهینه شامل توان لیزر ۸۷ وات، سرعت اسکن ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه و قطر پرتوی ۲ میلی‌متر حاصل می‌شود. دستیابی به این شرایط بهینه نشان می‌دهد که کنترل هم‌زمان پارامترهای حرارتی و هندسی فرآیند می‌تواند به طور مؤثری موجب کاهش اعوجاج‌های موضعی، حفظ هندسه اولیه سوراخ‌ها و بهبود دقت ابعادی قطعات سوراخ‌دار شود. یافته‌های این پژوهش می‌توانند

مبنای مناسبی برای طراحی، کنترل و بهینه‌سازی فرآیندهای خم‌کاری لیزری در تولید قطعات سوراخ‌دار با کیفیت هندسی بالاتر و عملکرد مطلوب‌تر در کاربردهای صنعتی باشند.

Authorship Contribution Statement

Mohsen Rezaei



Biography: Ph.D. student at Arak University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

Contribution Statement: Methodology, Resources, Supervision, Project administration, Investigation

Dr. Mehdi Safari



Biography: Associate Professor at Arak University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

Contribution Statement: Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing

Dr. Davood Akbari



Biography: Associate Professor at Tarbiat Modares University, Department of Mechanical Engineering, Tehran, Iran.

Contribution Statement: Conceptualization, Supervision, Validation, Writing – review & editing.

۵- مراجع

- [1] Boroumandpanah H, Nadaf A. Finite element and experimental investigation of the direct flow forming process of thin-walled high-strength steel tubes. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2024; 4(1):122–138.
- [2] Esmailian M, Boroumand F, Dehghan M. Simulation of the forming of jet engine compressor spools by ring rolling process. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2023; 3(2):216–235.
- [3] Numerical optimization of the blank shape in order to minimize the earring defect in the deep drawing process of square sections. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2023; 3(1):67–82.
- [4] Numerical study of a micro-alloyed steel microstructure during hot rolling process. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2022; 2(3):365–384.
- [5] Design and Manufacture of Low-Pressure Hydroforming Machine for Aluminum Tubes and Production of Rectangular Cross Section. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2022; 2(2):156–171.
- [6] Song JH, Lee GA, Jung KH, Park SJ. Laser irradiated bending characteristics of the ultra-high strength steel sheets. *International Journal of Automotive Technology*. 2015; 16:89–96.

- [7] Maji K, Pratihari DK, Nath AK. Experimental investigations, modeling, and optimization of multi-scan laser forming of AISI 304 stainless steel sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016; 83:1441–1455.
- [8] Fetene BN, Dixit US, Liao H. Laser bending of friction stir processed and cement-coated sheets. *Materials and Manufacturing Processes*. 2017; 32(14):1628–1634.
- [9] Fetene BN, Kumar V, Dixit US, Echempati R. Numerical and experimental study on multi-pass laser bending of AH36 steel strips. *Optics & Laser Technology*. 2018; 99:291–300.
- [10] Paramasivan K, Das S, Marimuthu S, Misra D. Increment in laser bending angle by forced bottom cooling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018; 94:2137–2147.
- [11] Safari M, Joudaki J. Prediction of bending angle for laser forming of tailor machined blanks by neural network. *Iranian Journal of Materials Forming*. 2018; 5(1):47–57.
- [12] Kotobi M, Honarparisheh M. Through-depth residual stress measurement of laser bent steel–titanium bimetal sheets. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2018; 53(3):130–140.
- [13] Zhang Y, Dong W, Qiao Y, Zhang C. Edge effect investigation of DP980 steel sheet in multiple laser scanning process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2019; 20:319–326.
- [14] Seyedkashi SMH, Abazari HD, Gollo MH, Woo YY, Moon YH. Characterization of laser bending of SUS304L/C11000 clad sheets. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019; 33:3223–3230.
- [15] Wang X, Ma X, Li Z, Wang RA. Study of thickening phenomenon in laser bending zone of a metal laminated plate. *Procedia CIRP*. 2016; 42:454–459.
- [16] Safari M, Babaei AM, Zamzami B, Alves de Sousa R. Experimental investigation, statistical modeling and optimization of laser bending process of perforated sheets. *Optics & Laser Technology*. 2024; 175:110810.
- [17] Safari M, Joudaki J. Studying the Effects of Process Parameters on Bending Angle and Edge Effects in Laser Bending Process of Perforated Sheets. *Iranian Journal of Materials Forming*. 2024; 11(3):4–12.