J. Adv. Mater. Eng., 2025;44(2)49-66. https://doi.org/10.47176/jame.44.2.1083

Journal of Advanced Materials in Engineering

Journal homepage: https://jame.iut.ac.ir/?lang=en

ISSN: 2251-600X EISSN: 2423-5733

Research Article

Statistical-Experimental Investigation of the Effect of Focal Length and Displacement on Laser Drilling of Hastelloy-X Superalloy Sheet using Single Pulse Fiber Laser

Mostafa Ghadimi Dafrazi, Reza Shoja Razavi*, Masood Barkat, Ali Khoram and Mohammad Erfanmanesh

Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran
* Corresponding author, Email: shoja_r@mut-es.ac.ir

(Received: 16 September 2024; Revised: 21 January 2025; Accepted: 22 January 2025; Available online: 5 March 2025)

ABSTRACT

Introduction and Objectives: In this research, the laser drilling process was carried out by a single pulse method and the effect of displacement and focal length parameters on the geometry of the hole (Inlet diameter, Outlet diameter, Taper, and Entrance circularity error) was studied.

Materials and Methods: In this study, statistical-experimental modeling was done using a full factorial experiment design with two factors of displacement and focal length in ten and seven levels on Hastelloy-X superalloy, respectively. Also, four cases of inlet and outlet hole diameter, cone angle, and circularity of the inlet diameter were considered as responses to the design of the experiment.

Results: The results showed that the diameter of the inlet and outlet holes increased with the increase of displacement and positive changes in the focal length. Also, the variation of the hole diameter was quite acceptable from 183 µm to 1768 µm with the single pulse method on the Hastelloy-X sheet with a thickness of 1 mm.

Conclusion: The optimized results of the answers revealed that the maximum value of the hole inlet diameter was 997.848 µm, the maximum hole outlet diameter was 771.341 µm, the taper was 6.492 degrees, and finally the entrance circularity error was 0.0167.

Keywords: Laser drilling, Hastelloy-X, Hole geometry, Optimization, Full factorial, Focal length.

How to Cite: Ghadimi Dafrazi M, Shoja Razavi R, Barkat M, Khoram A, Erfanmanesh M. Statistical-experimental investigation of the effect of focal length and displacement on laser drilling of hastelloy-X superalloy sheet using single pulse fiber laser. J Adv Mater Eng. 2025;44(2):49–66. https://doi.org/10.47176/jame.44.2.1083

Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by IUT press.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

مواد پیشرفته در مهندسی ۱۴۰۴؛۴۴(۲):۶۶-۴۹. https://doi.org/10.47176/jame.44.2.1083

مواد پیشرفته در مهندسی

صفحه خانگی فصلنامه: https://jame.iut.ac.ir/

شاپا: ۶۰۰X-۲۲۵۱ شاپا الکترونیکی: ۵۷۳۳-۲۴۲۳

مقاله پژوهشی

بررسی آماری- تجربی تأثیر فاصله کانونی و جابجایی بر سوراخ‌کاری لیزری روی ورق سوپرآلیاژ هستلوی ایکس با استفاده از لیزر فیبری تک‌پالس

مصطفی قدیمی دفرازی، رضا شجاع رضوی*، سید مسعود برکت، علی خرم و محمد عرفان‌منش

مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

* **نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: shoja_r@mut-es.ac.ir**

(دریافت: ۱۴۰۳/۶/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۳، انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵)

چکیده

مقدمه و اهداف: در این پژوهش فرایند سوراخ‌کاری لیزری به روش تک‌پالس انجام گرفت و تأثیر پارامترهای جابجایی و فاصله کانونی بر هندسه سوراخ (قطر ورودی، قطر خروجی، زاویه مخروطی و عدم دایره‌ای بودن قطر ورودی) مطالعه گردید.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه مدل‌سازی آماری- تجربی با استفاده از طراحی آزمایش به روش فاکتوریل کامل با دو فاکتور جابجایی و فاصله کانونی به‌ترتیب در ده و هفت سطح بر روی ورق هستلوی ایکس انجام گردید. همچنین چهار مورد قطر سوراخ ورودی و خروجی، زاویه مخروطی و میزان دایره‌ای بودن قطر ورودی به‌عنوان پاسخ‌های طراحی آزمایش در نظر گرفته شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد با افزایش جابجایی و تغییرات مثبت فاصله کانونی قطر سوراخ ورودی و خروجی افزایش می‌یابد. همچنین تنوع قطر سوراخ بسیار قابل‌قبول بوده و از ۱۸۳ میکرومتر تا ۱۷۶۸ میکرومتر با روش تک‌پالس روی ورق هستلوی ایکس با ضخامت یک میلی‌متر حاصل شد.

نتیجه‌گیری: نتایج بهینه‌شده پاسخ‌ها، حداکثر مقدار قطر ورودی سوراخ ۹۹۷/۸۴۸ میکرومتر، حداکثر قطر خروجی سوراخ ۷۷۱/۳۴۱ میکرومتر، زاویه سوراخ ۶/۴۹۲ درجه و درنهایت خطای عدم گردی ۰/۰۱۶۷ محاسبه گردید.

واژه‌های کلیدی: سوراخ‌کاری لیزری، هستلوی ایکس، مشخصات هندسی سوراخ، بهینه‌سازی، فاکتوریل کامل، فاصله کانونی.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، فرایند سوراخ‌کاری لیزری به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر برای سوراخ‌کاری قطعاتی مانند محفظه احتراق و پره‌های توربین در صنعت هوافضا که دارای قطعاتی با سوراخ‌های ریز و ابعاد دقیق هستند، مورداستفاده قرارگرفته است (۱). در موتورهای توربینی به دلیل دمای بالا، نیاز به سوراخ‌هایی با قطر کوچک برای خنک‌کاری است؛ به همین منظور سوراخ‌های راه بدر در پس‌سوز، محفظه احتراق، پره‌های توربین و نازل‌های راهنمای پره موتور ایجاد می‌شود تا با ایجاد جریان هوا هنگام چرخش و کارکرد موتور، انتقال حرارت صورت گرفته و دمای آن نیز کاهش یابد (۲). پیشرفت‌هایی قابل‌توجهی رخ‌داده تا فن‌آوری خنک‌سازی به موتورها اجازه دهد تا در دماهای بالا و فزاینده‌ای بدون تخریب قابل‌توجهی از خواص ساختاری مواد سازنده، کار کنند. بسیاری از این روش‌های خنک‌کننده شامل حذف گرما از سطوح اجزاء توسط یک لایه نازک از هوای با سرعت بالا است که به‌عنوان خنک‌کننده فیلم شناخته می‌شود. خنک‌سازی کافی فیلم، نیاز به کنترل زیادی بر روی اندازه، شکل، تعداد و موقعیت سوراخ‌های خنک‌کننده در بخش‌های مختلف دارد (۶-۳).

هستلوی ایکس، یک سوپرآلیاژ پایه نیکل محلول جامد مقاوم‌شده است که به دلیل مقاومت در برابر حرارت و اکسیداسیون، معمولاً در اجزای موتورهای توربین گاز استفاده می‌شود. بسیاری از این اجزا به تعداد زیادی سوراخ خنک‌کننده نیاز دارند که هستلوی ایکس را به یک سیستم آلیاژی مناسب برای مطالعه مواد در حین حفاری لیزری تبدیل می‌کند (۷ و ۸).

بیهاراتیش و همکاران (۲)، سوراخ‌کاری لیزری ورق‌های فلزی دارای روکش حرارتی را بررسی کردند. با استفاده از آزمایش‌های متعدد و روش‌های آماری تاگوچی، دریافتند که میزان پاشش مذاب و قطر خروجی سوراخ، رابطه مستقیم با قدرت لیزر دارد همچنین قطر ورودی سوراخ و میزان مخروطی بودن وابستگی زیادی به فشار گاز محافظ دارد. در تحقیق دیگری، تأثیر پارامترهای پالس بر حفاری لیزری سوپر آلیاژ هستلوی ایکس بررسی شد. عواملی مانند سرعت پردازش، دقت و تکرارپذیری، در مقایسه با روش‌های سنتی مانند ماشین‌کاری، حفاری لیزری را از لحاظ اقتصادی و کیفیت محصول بسیار برجسته نمود. در این پژوهش بررسی اثرات عوامل پالس لیزر بر سوراخ‌کاری لیزری سوپر آلیاژ هستلوی ایکس موردمطالعه قرار گرفت. نشان داده شد که ارتباط بین پالس لیزر و نرخ برداشت مواد می‌تواند سبب بهبود لایه دوباره منجمدشده و تغییرات و کیفیت سوراخ گردد (۹).

سیواپراساد و همکاران (۱۰)، سوراخ‌کاری سوپر آلیاژ هستلوی ایکس را با ضخامت ورق دو میلی‌متر، قطر سوراخ ۳۰۰ میکرومتر و با استفاده از دستگاه لیزر Nd:YAG مطالعه کردند. پارامترهای توان، عرض پالس، نرخ تکرار پالس و فشار گاز در چهار سطح به روش سطح پاسخ و بررسی تأثیر آن‌ها بر قطر خروجی و قطر ورودی، زاویه مخروطی و گردی سوراخ ورودی بر ورق هستلوی ایکس انجام شد. نتایج نشان داد که توان و فشار گاز، بیش‌ترین تأثیر را بر دقت سوراخ دارد. عیوب میکروترک و حفره بسیار به توان و نرخ تکرار وابسته هستند و گاز کمکی می‌تواند ترک‌ها را کاهش دهد. همچنین میشرا و یاداوا (۱۱)، مدلی را برای بهینه‌سازی سوراخ‌کاری ضربه‌ای فرایند لیزری پالسی Nd:YAG روی سوپر آلیاژ پایه نیکل انجام دادند. آن‌ها از روش تحلیل رابطه خاکستری[1] برای به‌دست آوردن نتایج بهینه استفاده کردند و نشان دادند که با افزایش جریان پالس و توان حداکثر میزان مخروطی شدن، نرخ برداشت مواد و منطقه متأثر از حرارت افزایش می‌یابد.

در تحقیقی دیگر، مرادی و همکاران (۱۲) به مطالعه سوراخ‌کاری لیزری ۵۰۰ وات روی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ باضخامت یک میلی‌متر پرداختند. پارامترهای فرکانس پالس، موقعیت فاصله کانونی، توان لیزر و سیکل کار، به‌عنوان عوامل کنترل فرایند انتخاب شدند. نشان داده شد که فرکانس پالس اثر مستقیم روی قطر ورودی سوراخ دارد و افزایش سیکل کار باعث افزایش زاویه مخروطی می‌شود. همچنین با افزایش توان لیزر، قطر ورودی و زاویه مخروطی افزایش می‌یابد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سوپر آلیاژ هستلوی ایکس

W	Co	Al	Ti	Fe	Mo	Ni	Cr	Si	S	P	Mn	C
0.41	1.23	0.1	0.04	19.95	8.98	Bal.	21.5	0.94	0.02	0.01	0.19	0.07

همچنین در تحقیق دیگری تأثیر پارامترهای عرض پالس و توان در مدور شدن سوراخ در فرآیند سوراخ‌کاری لیزری مطالعه گردید و مشخص شد که بیش‌ترین میزان مدور بودن سوراخ با کاهش عرض پالس و افزایش توان لیزر به‌دست می‌آید و قطر سوراخ وابسته به عرض پالس است (۱۳).

در پژوهشی دکتر قریشی و همکاران (۱۴)، با استفاده از لیزر ضربه‌ای به بررسی پارامترهای توان، روشنی پالس، فاصله کانونی و فرکانس لیزر روی ورق هستلوی ایکس پرداختند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی به نتایجی از قطر سوراخ‌های ورودی و خروجی، زاویه مخروطی و خطای عدم گردی سوراخ ورودی دست یافتند و با استفاده از طراحی آزمایش و آزمون تجربی صحت‌سنجی شدند. نتایج آماری و عملی نشان داد که تمام پارامترهای ورودی به‌طور قابل‌توجهی بر قطر ورودی سوراخ تأثیر می‌گذارد، درحالی‌که عرض پالس به‌طور قابل‌توجهی بر زاویه مخروطی و دایره‌ای بودن مؤثر است. همچنین تعامل بین فرکانس لیزر بالا و چرخه کار کم باعث کاهش مدت‌زمان پالس می‌شود.

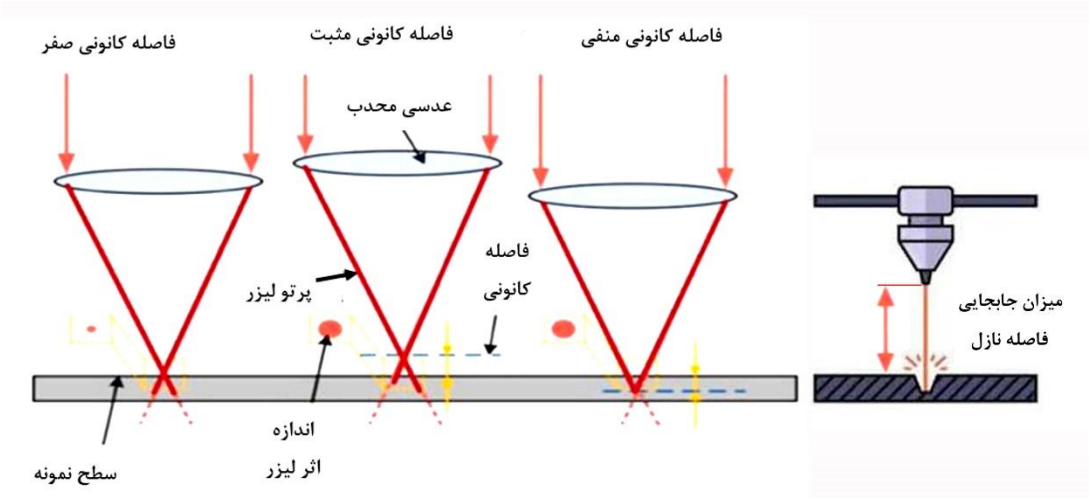
در اکثر تحقیقات قبلی توسط سایر محققان، طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش پاسخ سطح و تاگوچی انجام‌شده است و از روش فاکتوریل کامل استفاده‌نشده است؛ درحالی‌که روش فاکتوریل کامل با نظر گرفتن و بررسی آزمایشگاهی همه سطوح یکی از دقیق‌ترین روش‌ها است (۱۵ و ۱۶). همچنین برای به‌دست آوردن یک طیف متنوع قطری از سوراخ‌ها از روش لیزر فیبری تک‌پالس استفاده نشده است. تمرکز این پژوهش روی روش فاکتوریل کامل و محاسبه همه حالات سطوح پارامترها است که روش دقیقی است. از طرف دیگر استفاده از لیزر تک‌پالس برای به‌دست آوردن قطر سوراخ بزرگ‌تر از یک میلی‌متر که تابه‌حال در تحقیقی گزارش نشده است، روی ورق باضخامت یک میلی‌متر، با تغییرات فاصله کانونی و جابجایی آن کاری منحصربه‌فرد است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از ورق سوپرآلیاژ هستلوی ایکس به‌عنوان ماده اولیه، برای سوراخ‌کاری لیزری استفاده شد. در جدول (۱) درصد وزنی عناصر سوپر آلیاژ هستلوی ایکس با استفاده از روش کوانتومتر پرتابل[۲] (PMI Master Smart) اندازه‌گیری و ارائه شده است. این آلیاژ به ابعاد ۳۰mm×۴۰mm برش داده شد و نمونه‌های تهیه‌شده قبل از انجام فرایند سوراخ‌کاری با استفاده از استون شسته شد. فرایند سوراخ‌کاری با استفاده از دستگاه فیبری پیکو ثانیه با طول‌موج ۱۰۳۰ nm، قطر لکه پرتو ۲۰ میکرومتر و گاز محافظ آرگون انجام و برای انجام این فرایند قطر نازل ۰/۸ میلی‌متر، زمان فرایند ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه و مودالیتی عرض پالس[۳] یک هرتز ثابت در نظر گرفته شد و به روش تک‌پالس اجرا گردید.

به‌منظور افزایش میزان قطر سوراخ ایجادشده که برای اولین‌بار در ابعاد میلی‌متری انجام شده است، دو عامل جابجایی فاصله نازل و فاصله کانونی بر هندسه سوراخ (قطر ورودی (ID) و قطر خروجی (OD) و زاویه مخروطی (T) و عدم دایره‌ای بودن قطر ورودی (E))، مطالعه گردید. جابجایی و موقعیت فاصله کانونی به‌صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده‌شده است (۱۷). این مطالعه مدل‌سازی آماری- تجربی با استفاده از طراحی آزمایش به روش فاکتوریل کامل با دو فاکتور جابجایی و فاصله کانونی در ده و هفت سطح روی چهار پاسخ قطر سوراخ ورودی و خروجی و زاویه مخروطی و میزان دایره‌ای بودن قطر ورودی با ۷۰ آزمون انجام شد.

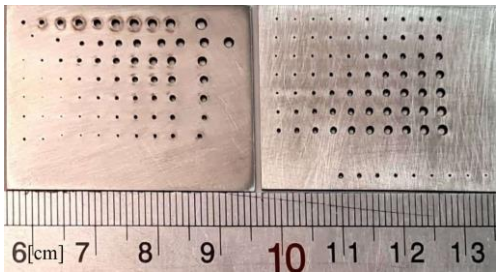
طراحی آزمایش برای دو پارامتر جابجایی فاصله نازل و



شکل ۱- شماتیک تابش لیزر بر نمونه و موقعیت میزان جابجایی و فاصله کانونی (۱۷).

جدول ۲- اطلاعات فاکتورهای موردنظر در طراحی آزمایش‌ها و سطوح مربوط به هرکدام

Factor	Levels	Values
Distance	10	1.5, 2.5, 3.5, …, 10.5
Focal length	7	-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3



شکل ۲- تصویر نمونه ورق سوراخ‌کاری شده.

فاصله کانونی[۴] توسط نرم‌افزار تحلیل داده مینی تب، مطابق جدول (۲) طراحی گردید.

آزمایش روی ورق بافاصله سه میلی‌متر از یکدیگر در ردیف‌های ۱۲ عددی انجام شد. پس از ایجاد سوراخ‌ها، با استفاده از میکروسکپ نوری (مدل Dewinter, DMI VICTORY، بزرگنمایی ۴۰ برابر) عکس‌برداری شد. عکس‌ها با استفاده از نرم‌افزار دیجی مایزر اندازه‌گیری گردید و نتایج قطر ورودی و قطر خروجی در اکسل ثبت گردید و میزان زاویه مخروطی با استفاده از رابطه (۱) به‌دست آمد (۱۰) و میزان عدم گردی سوراخ ورودی با تقسیم حداقل قطر بر حداکثر قطر به‌دست آمد (۱۰) و ثبت گردید. نتایج اندازه‌گیری شده مطابق جدول (۳) حاصل شد.

$$\text{Taper, } \alpha = [(D_T - D_B)]/[\text{hole depth}]\ (\text{mm/mm}) \times 180/\pi \quad (۱)$$

تصویر نمونه ورق سوراخ‌کاری شده در طراحی آزمایش در شکل (۲) نشان داده‌شده است.

در شکل (۳)، دستگاه سوراخ‌کاری لیزری مشاهده می‌شود که اجزای اصلی این دستگاه شامل مواردی همچون کامپیوتر (برای کنترل دقیق محل سوراخ)، تابلو برق و سیستم کنترل (برای محورها)، منبع لیزر و محفظه کار بوده است که در این محفظه نمونه قرار داده می‌شود و قطعه موردنظر سوراخ می‌گردد. تصاویر محل قرارگیری نمونه جهت عملیات سوراخ‌کاری در شکل (۴) نشان داده‌شده است. دستگاه سوراخ‌کاری لیزری قابلیت‌های زیر را نیز داراست:

- حداکثر قطر به‌کارگیری قطعات ۳۰۰ میلی‌متر
- مجهز به سیستم مکش هوا و آلاینده‌ها
- مجهز به درایوهای کنترل دقیق بدون لقی مکانیکی

جدول ۳- اطلاعات سطوح پارامترها و پاسخ‌ها

	Distance	Focal length	ID	OD	Taper (°)	E
1	1.50	-3.00	494.999	203.809	8.346	0.117
2	1.50	-2.00	377.369	186.724	5.464	0.118
3	1.50	-1.00	304.564	95.112	6.003	0.092
4	1.50	0.00	269.604	141.453	3.673	0.102
5	1.50	1.00	282.011	280.462	0.044	0.061
6	1.50	2.00	394.058	286.825	3.074	0.075
7	1.50	3.00	628.326	481.033	4.222	0.096
8	2.50	-3.00	341.012	129.836	6.053	0.112
9	2.50	-2.00	262.917	151.208	3.202	0.099
10	2.50	-1.00	197.024	176.422	0.591	0.084
11	2.50	0.00	235.702	233.580	0.061	0.020
12	2.50	1.00	421.324	333.080	2.529	0.098
13	2.50	2.00	580.351	423.695	4.490	0.072
14	2.50	3.00	795.427	621.290	4.991	0.079
15	3.50	-3.00	279.225	107.244	4.929	0.095
16	3.50	-2.00	269.489	214.775	1.568	0.095
17	3.50	-1.00	216.691	206.866	0.282	0.038
18	3.50	0.00	414.274	302.136	3.214	0.101
19	3.50	1.00	561.138	435.137	3.611	0.095
20	3.50	2.00	735.429	564.022	4.913	0.056
21	3.50	3.00	882.650	611.967	7.758	0.092
22	4.50	-3.00	298.724	192.391	3.048	0.097
23	4.50	-2.00	366.899	270.354	2.767	0.088
24	4.50	-1.00	357.206	336.446	0.595	0.086
25	4.50	0.00	546.869	374.456	4.942	0.085
26	4.50	1.00	727.676	537.182	5.460	0.083
27	4.50	2.00	888.729	625.973	7.531	0.033
28	4.50	3.00	1084.359	802.672	8.074	0.083
29	5.50	-3.00	343.531	204.296	3.991	0.097
30	5.50	-2.00	374.679	283.291	2.619	0.087
31	5.50	-1.00	529.171	436.418	2.659	0.087
32	5.50	0.00	645.494	497.445	4.243	0.082
33	5.50	1.00	901.064	665.343	6.756	0.085
34	5.50	2.00	1026.573	705.660	9.198	0.036
35	5.50	3.00	1135.792	724.901	11.777	0.077
36	6.50	-3.00	418.926	323.972	2.722	0.089
37	6.50	-2.00	500.370	408.616	2.630	0.075
38	6.50	-1.00	610.980	469.463	4.056	0.074
39	6.50	0.00	767.950	572.069	5.614	0.082
40	6.50	1.00	1019.037	734.129	8.166	0.082
41	6.50	2.00	1211.814	866.759	9.890	0.029
42	6.50	3.00	1303.853	964.167	9.736	0.066
43	7.50	-3.00	573.640	419.478	4.419	0.087
44	7.50	-2.00	580.450	464.431	3.325	0.064
45	7.50	-1.00	736.764	517.121	6.296	0.034
46	7.50	0.00	906.406	662.070	7.003	0.081
47	7.50	1.00	1139.178	855.548	8.130	0.081
48	7.50	2.00	1215.159	843.961	10.639	0.026
49	7.50	3.00	1343.308	971.066	10.669	0.071
50	8.50	-3.00	623.162	464.491	4.548	0.079
51	8.50	-2.00	681.067	488.660	5.515	0.064
52	8.50	-1.00	812.009	592.392	6.295	0.019
53	8.50	0.00	1265.325	736.607	15.154	0.063
54	8.50	1.00	1218.070	936.888	8.059	0.077
55	8.50	2.00	1323.528	926.148	11.390	0.053
56	8.50	3.00	1416.742	996.772	12.037	0.051
57	9.50	-3.00	643.183	464.139	5.132	0.076
58	9.50	-2.00	784.291	603.139	5.192	0.054
59	9.50	-1.00	1022.344	785.419	6.791	0.016
60	9.50	0.00	1358.743	815.037	15.584	0.044
61	9.50	1.00	1288.511	905.304	10.984	0.074
62	9.50	2.00	1429.759	973.136	13.088	0.035
63	9.50	3.00	1510.122	1054.843	13.049	0.038
64	10.50	-3.00	747.857	550.259	5.664	0.064
65	10.50	-2.00	812.199	460.734	10.074	0.051
66	10.50	-1.00	1056.744	741.479	9.036	0.043
67	10.50	0.00	1438.793	915.119	15.010	0.014
68	10.50	1.00	1380.599	950.731	12.321	0.053
69	10.50	2.00	1619.686	1035.842	16.734	0.015
70	10.50	3.00	1780.123	1244.951	15.339	0.024
71	1.50	-3.00	446.731	185.448	7.489	0.134
72	1.50	-2.00	413.523	209.799	5.839	0.114
73	1.50	-1.00	285.471	51.913	6.694	0.088
74	1.50	0.00	297.342	151.565	4.178	0.110
75	1.50	1.00	280.385	273.900	0.186	0.075
76	1.50	2.00	399.114	337.871	1.755	0.073
77	1.50	3.00	647.095	502.020	4.158	0.049
78	2.50	-3.00	372.382	137.145	6.742	0.114
79	2.50	-2.00	281.664	200.274	2.333	0.092
80	2.50	-1.00	183.523	164.719	0.539	0.087
81	2.50	0.00	225.383	220.729	0.133	0.017
82	2.50	1.00	440.293	368.559	2.056	0.108
83	2.50	2.00	599.687	461.370	3.965	0.071
84	2.50	3.00	769.037	587.865	5.193	0.093
85	3.50	-3.00	260.715	101.453	4.565	0.099
86	3.50	-2.00	310.782	241.076	1.998	0.094
87	3.50	-1.00	210.387	203.306	0.203	0.046
88	3.50	0.00	380.039	293.415	2.483	0.097

ادامه جدول ۳-

ادامه جدول ۳-

	Distance	Focal length	ID	OD	Taper (°)	E
89	3.50	1.00	579.571	471.157	3.107	0.093
90	3.50	2.00	717.367	528.600	5.411	0.066
91	3.50	3.00	924.521	636.573	8.253	0.072
92	4.50	-3.00	341.831	219.697	3.501	0.092
93	4.50	-2.00	341.473	243.246	2.815	0.090
94	4.50	-1.00	372.702	351.985	0.594	0.081
95	4.50	0.00	484.815	346.393	3.968	0.097
96	4.50	1.00	701.682	499.736	5.788	0.093
97	4.50	2.00	882.929	569.205	8.992	0.039
98	4.50	3.00	1041.089	770.252	7.763	0.087
99	5.50	-3.00	376.279	233.665	4.088	0.095
100	5.50	-2.00	406.713	315.967	2.601	0.089
101	5.50	-1.00	488.657	389.529	2.841	0.085
102	5.50	0.00	677.177	544.836	3.793	0.073
103	5.50	1.00	861.723	627.985	6.699	0.093
104	5.50	2.00	1063.412	721.175	9.809	0.033
105	5.50	3.00	1139.048	751.988	11.094	0.067
106	6.50	-3.00	389.114	290.065	2.839	0.093
107	6.50	-2.00	551.053	453.239	2.804	0.080
108	6.50	-1.00	648.220	509.353	3.980	0.064
109	6.50	0.00	799.107	602.070	5.648	0.078
110	6.50	1.00	960.732	697.742	7.538	0.087
111	6.50	2.00	1164.608	834.899	9.450	0.032
112	6.50	3.00	1274.355	956.070	9.123	0.074
113	7.50	-3.00	495.166	389.245	3.036	0.089
114	7.50	-2.00	626.626	536.135	2.594	0.066
115	7.50	-1.00	761.229	550.350	6.044	0.027
116	7.50	0.00	932.587	666.914	7.615	0.079
117	7.50	1.00	1090.682	796.190	8.441	0.084
118	7.50	2.00	1250.336	866.041	11.015	0.025
119	7.50	3.00	1346.945	978.986	10.547	0.069
120	8.50	-3.00	555.036	407.259	4.236	0.082
121	8.50	-2.00	724.528	534.680	5.442	0.052
122	8.50	-1.00	847.773	621.702	6.480	0.023
123	8.50	0.00	1220.706	729.945	14.066	0.069
124	8.50	1.00	1256.085	931.178	9.313	0.072
125	8.50	2.00	1310.387	881.835	12.283	0.044
126	8.50	3.00	1371.176	975.011	11.355	0.055
127	9.50	-3.00	708.645	520.375	5.396	0.068
128	9.50	-2.00	829.363	677.650	4.348	0.055
129	9.50	-1.00	973.352	757.263	6.194	0.017
130	9.50	0.00	1361.363	852.862	14.575	0.043
131	9.50	1.00	1312.552	937.622	10.746	0.072
132	9.50	2.00	1459.740	994.184	13.344	0.046

ادامه جدول ۳-

	Distance	Focal length	ID	OD	Taper (°)	E
133	9.50	3.00	1492.633	1031.501	13.217	0.041
134	10.50	-3.00	814.192	707.041	3.071	0.070
135	10.50	-2.00	840.354	517.571	9.252	0.055
136	10.50	-1.00	1119.569	798.242	9.210	0.045
137	10.50	0.00	1395.733	845.129	15.782	0.017
138	10.50	1.00	1424.527	983.430	12.643	0.044
139	10.50	2.00	1623.141	1050.407	16.416	0.012
140	10.50	3.00	1768.182	1200.828	16.262	0.023

شکل ۳- شکل ظاهری دستگاه سوراخ‌کاری لیزری مورداستفاده.

برای مطالعه ریخت‌شناسی سوراخ‌های ایجادشده، ورودی، خروجی و سطح مقطع سوراخ‌ها از دستگاه میکروسکوپ نوری استفاده شد. سطح مقطع نمونه‌های حاصل تا سنباده ۳۰۰۰ مسطح و سپس با خمیر الماس شش و یک میکرومتر و پودر آلومینای ۴۰ نانومتر پولیش شدند.

۳- نتایج و بحث

در این تحقیق چهار پاسخ قطر ورودی (ID)، قطر خروجی (OD)، زاویه مخروطی (Taper) و میزان گردی سوراخ ورودی (E) بر اساس تغییرات دو مؤلفه جابجایی و فاصله کانونی مورد

شکل ۴- محل قرارگیری نمونه در دستگاه سوراخ‌کاری لیزری.

تحلیل و بررسی قرار گرفت که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۱- قطر ورودی

در مورد بررسی پاسخ قطر ورودی مقدار R^2 برابر با ۹۹٫۸۰ درصد محاسبه شد که در جدول (۴) ذکر شده است. مقادیر بیان‌شده حاکی از انطباق بالای بین نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل می‌باشد.

مقدار R^2 (Adj)برای پاسخ قطر ورودی، به میزان ۹۹٫۶۰ درصد به‌دست آمد که حاکی از برازش بالای داده‌های حاصل از مدل با پاسخ قطر ورودی است. مقدار پارامتر R^2 (pred) که بیان‌کننده اثر مدل در پیش‌بینی مقدار پاسخ جدید است، برای پاسخ قطر ورودی ۹۹٫۱۹ درصد است.

جدول آنالیز واریانس مربوط به پارامتر قطر ورودی در جدول (۵) بیان‌شده است. همان‌طور که از مقادیر پارامتر P[5] که کمتر از ۰٫۰۵ می‌باشد، مشخص است که مدل‌های ارائه‌شده برای پارامترها، حدود صفر درصد احتمال انحراف دارد که نشان می‌دهد نتایج حاصل از مدل‌ها از برازش مناسبی با داده‌های

جدول ۴- خلاصه اطلاعات مدل

R^2	R^2 (adj)	R^2 (pred)
99.80%	99.60%	99.19%

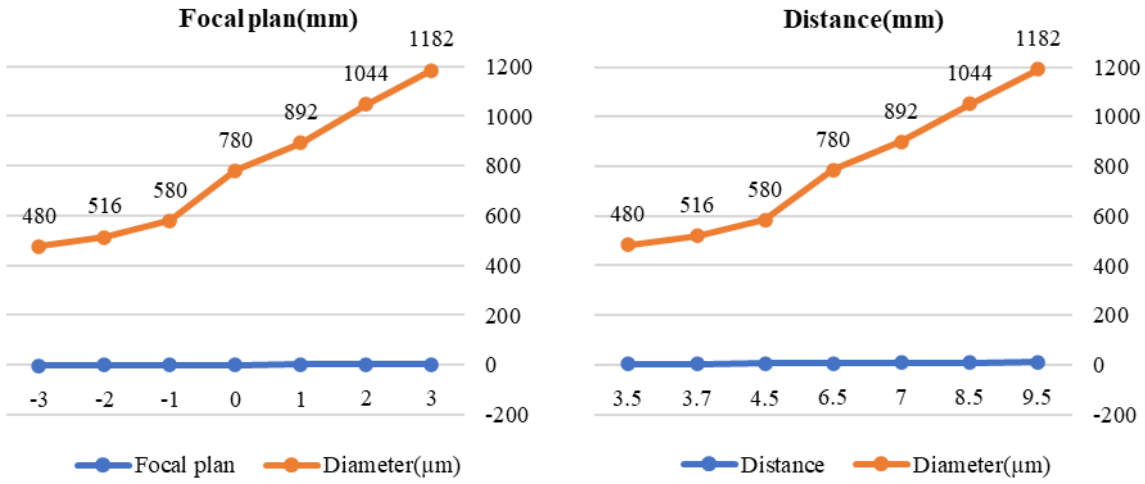
جدول ۵- آنالیز واریانس

Source	df	Adj MS	F-value	p-value
Model	69	335221	503.07	0.000
A-Focal length	6	1479313	2220.01	0.000
B-distance	9	1385980	2079.94	0.000
Distance*Focal plane	54	32973	49.48	0.000
Error	70	666		
Total	139			

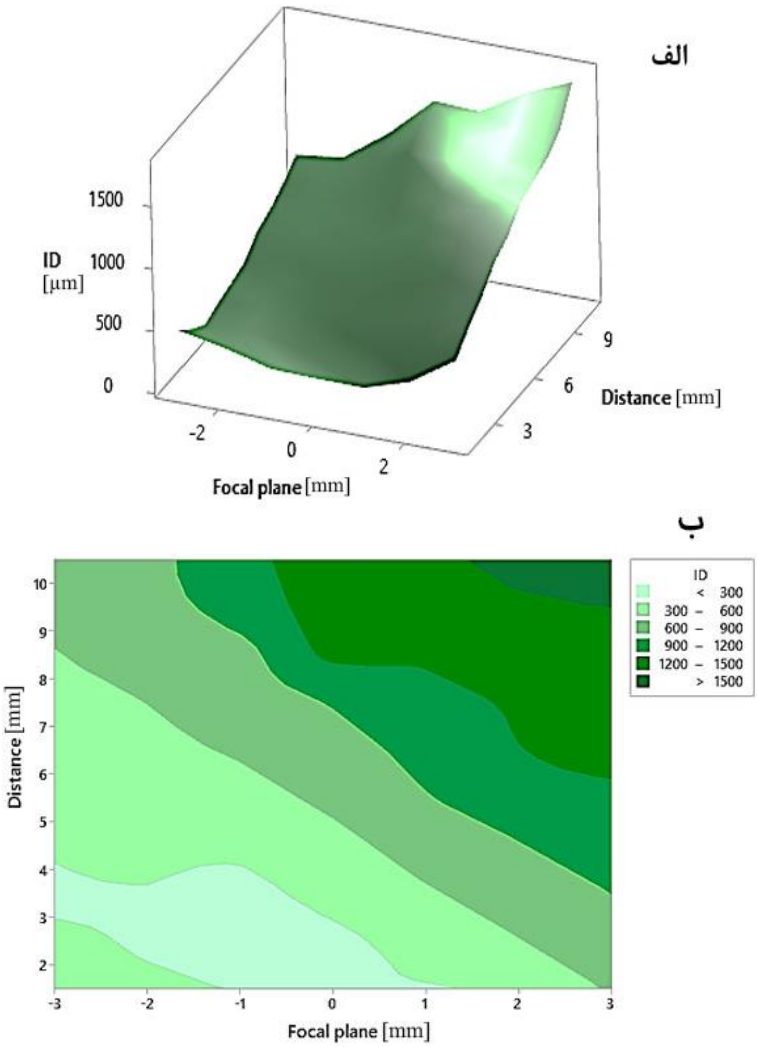
تجربی برخوردار است. همان‌طور که از جدول (۵) نیز برمی‌آید، مقادیر پارامتر F[6] برای دو مؤلفه جابجایی و فاصله کانونی به‌ترتیب برابر با ۲۰۷۹٫۹۴، ۲۰۲۰٫۰۱ است که نشان می‌دهد مدل‌های ارائه‌شده برای مشخصه هندسی یادشده بر اساس مقادیر F معنی‌دار هستند.

اثر هر یک از پارامترهای جابجایی فاصله نازل و فاصله کانونی بر قطر ورودی، به‌صورت مجزا در شکل (۵) نشان داده‌شده است. همان‌طور که از نتایج پیشین مشخص‌شده بود، این دو پارامتر تأثیر مستقیمی بر پاسخ قطر ورودی سوراخ دارند. در این نمودار مشاهده می‌شود با افزایش فاصله نازل از سطح نمونه، قطر ورودی افزایش می‌یابد و این به دلیل آن است که نقطه کانونی از مرکز ورق بالاتر آمده و پرتو واگرا شده و این عدم تمرکز باعث می‌شود محدوده بیش‌تری تحت تأثیر پرتو قرار بگیرد و این عامل باعث افزایش قطر ورودی می‌گردد. حرکت فاصله نازل همراه بافاصله کانونی می‌باشد و به همین خاطر دارای شیب بیش‌تری می‌باشد اثر تغییر فاصله کانونی به‌سمت مثبت هم دارای دلیل مشابه می‌باشد به همین جهت با روند جابجایی مثبت می‌توان شاهد رشد قطر ورودی بود (۱۰ و ۱۴).

در شکل (۶)، تأثیر هم‌زمان پارامترهای جابجایی و فاصله کانونی بر قطر ورودی سوراخ ایجادشده به نمایش درآمده



شکل ۵- تأثیر پارامترهای جابجایی و فاصله کانونی بر قطر ورودی.



شکل ۶- تأثیر هم‌زمان پارامترهای جابجایی و فاصله کانونی بر قطر ورودی: الف) نمودار سه‌بعدی و ب) نقشه دوبعدی.

جدول ۶- خلاصه اطلاعات مدل

R^2	R^2 (adj)	R^2 (pred)
99.49%	98.98%	97.95%

جدول ۷- آنالیز واریانس

Source	Df	Adj MS	F-value	p-value
Model	69	159623	196.76	0.000
A-Focal length	6	765610	943.72	0.000
B-distance	9	665921	820.84	0.000
Distance*Focal plane	54	7908	9.75	0.000
Error	70	811		
Total	139			

است. در هر دو نمودار سه‌بعدی و نقشه دوبعدی کاملاً اثر مستقیم این دو پارامتر بر قطر سوراخ ورودی مشخص است. به‌طورکلی هرچه فاصله جابجایی بیشتر می‌شود قطر سوراخ افزایش می‌یابد و این به دلیل پخش‌شدن و واگرایی پرتو و عدم تمرکز آن در نقطه برخورد می‌باشد به‌طور طبیعی قطر ورودی در جابجایی ۹/۵ میلی‌متر بیشتر از ۳/۵ میلی‌متر می‌باشد.

۳-۲- قطر خروجی

دومین پاسخ موردنظر در آزمایش، قطر خروجی سوراخ است. بر اساس مقادیر نشان داده‌شده در جدول (۶)، مقدار R^2 برابر با ۹۹/۴۹ درصد می‌باشد که حاکی از انطباق بالای مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقادیر واقعی است. مقادیر R^2 (adj) و R^2 (pred)، به‌ترتیب برابر با ۹۸/۹۸ و ۹۷/۹۵ درصد حاصل شد که بیان‌کننده درجه بالایی از برازش با پاسخ و همچنین اثرگذاری بالای مدل در پیش‌بینی مقدار پاسخ است.

با توجه به جدول (۷)، مقادیر P (P-value) برای مدل و دو پارامتر جابجایی فاصله نازل و فاصله کانونی حدود صفر به‌دست آمده است. این مقادیر نشان می‌دهد که مدل ارائه‌شده احتمال انحراف بسیار ناچیزی دارد که نشان می‌دهد نتایج حاصل از مدل، از برازش مناسبی با داده‌های تجربی برخوردار است. مقادیر ارائه‌شده پارامتر F برای مدل و دو پارامتر جابجایی فاصله نازل و فاصله کانونی به‌ترتیب برابر با ۱۹۶/۷۶، ۸۲۰/۸۴ و ۹۴۳/۷۲ می‌باشد که نشان می‌دهد مدل ارائه‌شده برای مشخصه هندسی قطر خروجی بر اساس مقادیر F، معنی‌دار هستند.

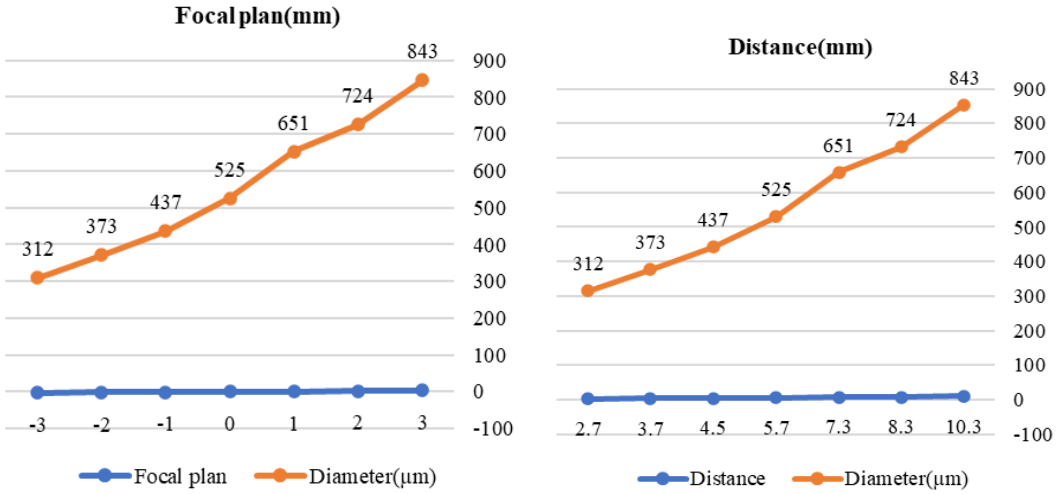
تأثیر دو پارامتر جابجایی و فاصله کانونی و همچنین برهمکنش این دو عامل بر قطر خروجی سوراخ ایجادشده در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، این اثرگذاری توسط مقادیر پارامتر F در جدول آنالیز واریانس نیز قابل تأیید می‌باشد.

در شکل (۸)، تأثیر هم‌زمان پارامترهای جابجایی و فاصله کانونی بر قطر ورودی سوراخ ایجادشده به نمایش درآمده است. در هر دو نمودار سه‌بعدی و نقشه دوبعدی، کاملاً اثر مستقیم این دو پارامتر بر قطر سوراخ ورودی مشخص است. رفتار مشابهی نیز در دیگر تحقیقات گزارش‌شده، مشاهده می‌شود (۱۸ و ۱۹). تیانهان و همکاران (۱۸)، نشان دادند که مقادیر قطر ورودی و خروجی سوراخ ایجادشده با افزایش جابجایی و فاصله کانونی افزایش می‌یابد.

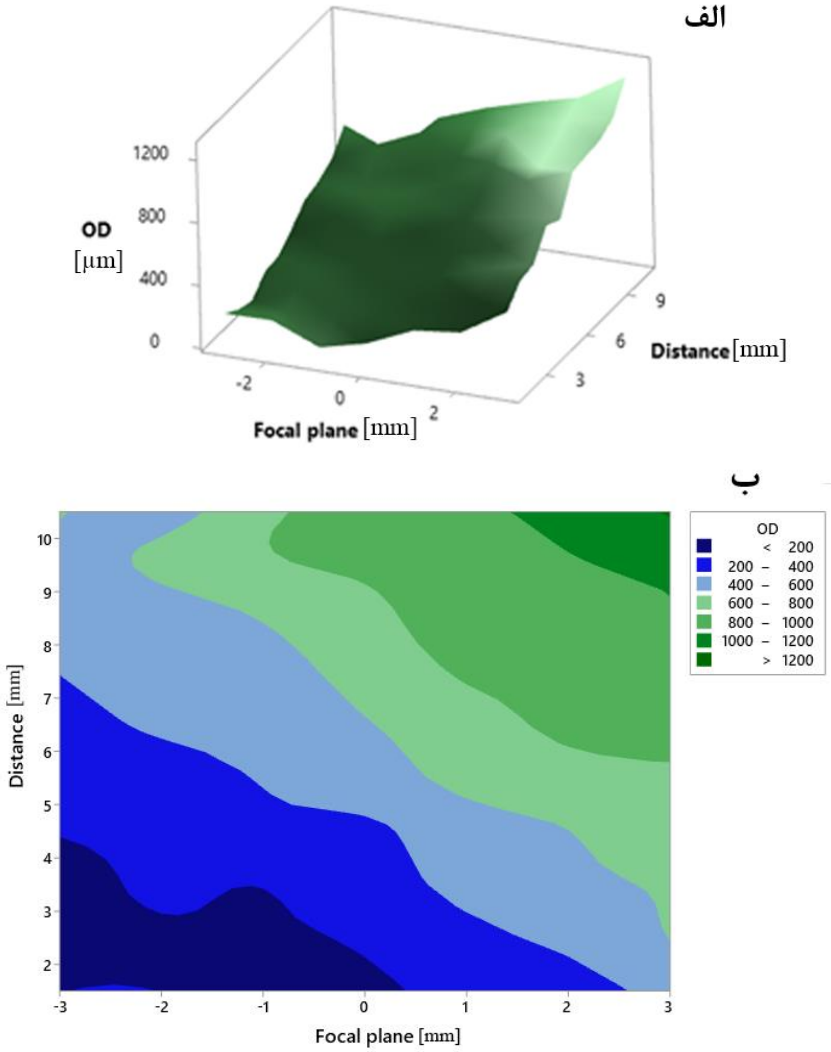
۳-۳- زاویه مخروطی

سومین پاسخ موردبررسی در این طراحی آزمایش زاویه مخروطی است که در این مورد مقدار R^2 برابر با ۹۹/۳۵ درصد است که در جدول (۸) نشان داده‌شده است. این مقدار بیانگر انطباق بالایی بین نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل می‌باشد. م مقادیر R^2 (adj) و R^2 (pred) برای پاسخ زاویه مخروطی، به‌ترتیب، برابر با ۹۸/۷۰ و ۹۷/۳۹ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده درجه بالایی از برازش مدل با پاسخ و همچنین اثرگذاری مدل در پیش‌بینی مقدار پاسخ است.

با توجه به اطلاعات مدل پیشنهادی برای پاسخ زاویه مخروطی که در جدول (۹) آمده است، مقدار پارامتر P مربوط به مدل، جابجایی و فاصله کانونی تقریباً برابر با صفر است که بیان‌کننده صفر درصد احتمال انحراف از داده‌های تجربی را دارد. بر اساس مقادیر پارامتر F برای مدل و دو پارامتر جابجایی



شکل ۷- تأثیر پارامترهای جابجایی و فاصله کانونی بر قطر خروجی سوراخ ایجادشده.



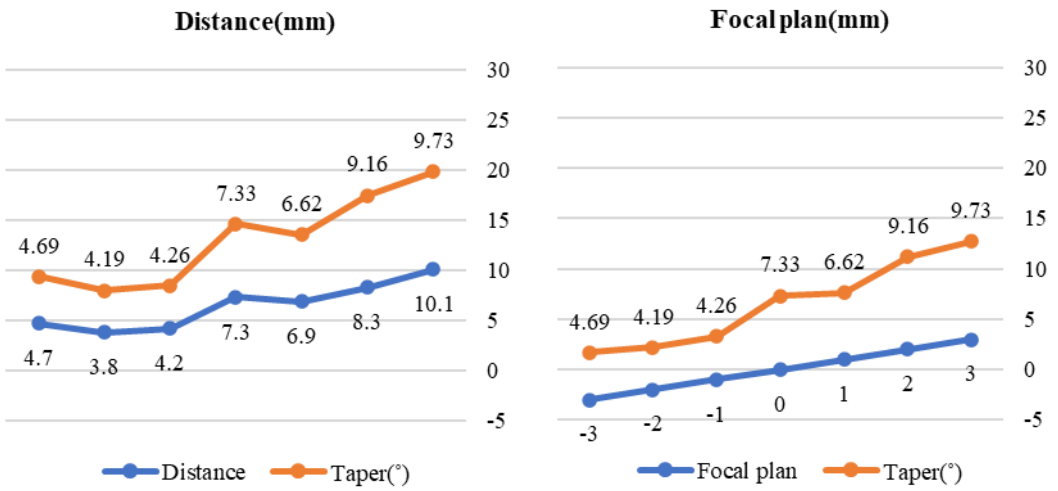
شکل ۸- تأثیر هم‌زمان پارامترهای جابجایی و فاصله کانونی بر قطر ورودی: الف) نمودار سه‌بعدی و ب) نقشه دوبعدی.

جدول ۸- خلاصه اطلاعات مدل جهت پاسخ زاویه مخروطی

R^2	R^2 (adj)	R^2 (pred)
99.35%	98.70%	97.39%

جدول ۹- آنالیز واریانس پاسخ زاویه مخروطی

Source	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	69	34.205	154.32	0.000	significant
A-Focal length	6	107.242	483.83	0.000	
B-distance	9	116.609	526.09	0.000	
Distance*Focal plane	54	12.355	55.74	0.000	
Error	70	0.222			
Total	139				

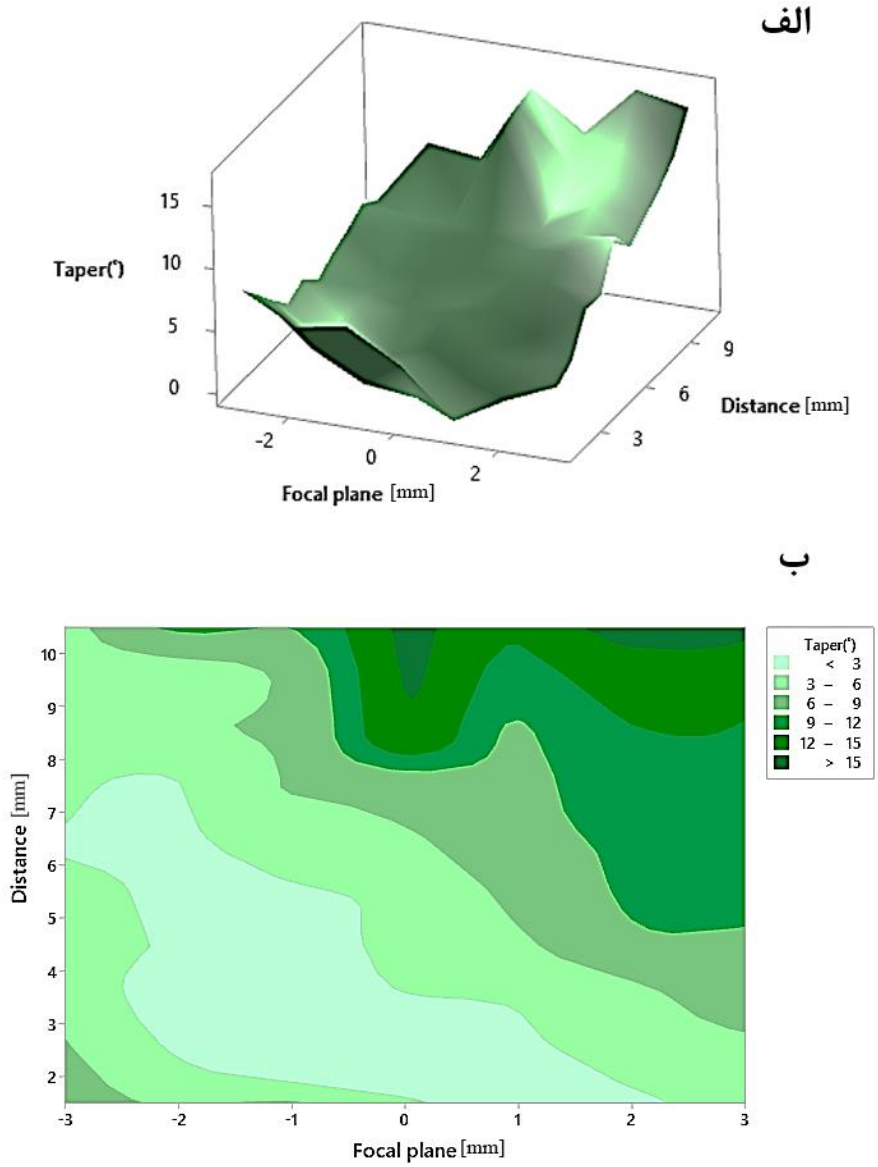


شکل ۹- تأثیر پارامترهای جابجایی و فاصله کانونی بر زاویه مخروطی.

فاصله نازل و فاصله کانونی و همچنین ترکیب این دو پارامتر که به‌ترتیب برابر با ۱۵۴٫۳۲، ۵۲۶٫۰۹، ۴۸۳٫۸۳ و ۵۵٫۷۴ می‌باشد، نشان می‌دهد که مدل‌های ارائه‌شده برای مشخصه هندسی یادشده، براساس مقادیر F معنی‌دار و مؤثر هستند.

نحوه تغییرات زاویه مخروطی با پارامترهای جابجایی و فاصله کانونی در شکل (۹) نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش مقادیر جابجایی و همچنین فاصله کانونی، زاویه مخروطی افزایش می‌یابد. دلیل افزایش زاویه مخروطی با افزایش جابجایی، واگرایی پرتو و عدم تمرکز آن برای ایجاد سوراخ استوانه در ضخامت ورق می‌باشد که به همین علت قطر ورودی و خروجی سوراخ دارای اختلاف می‌شوند و این عامل با زاویه مخروطی نشان داده می‌شود. این روند بر فاصله کانونی هم حاکم است. چون فاصله نازل از ورق به همراه جابجایی هد می‌باشد و تغییرات فاصله کانونی را نیز سبب می‌شود (۱۴).

پیش‌بینی مدل ارائه‌شده در مورد پارامترهای جابجایی و



شکل ۱۰- تأثیر هم‌زمان پارامترهای جابجایی و فاصله کانونی بر زاویه مخروطی: الف) نمودار سه‌بعدی و ب) نقشه دوبعدی.

جدول ۱۰- خلاصه اطلاعات خطای عدم گردی سوراخ ورودی

R^2	R^2 (adj)	R^2 (pred)
97.30%	94.65%	89.22%

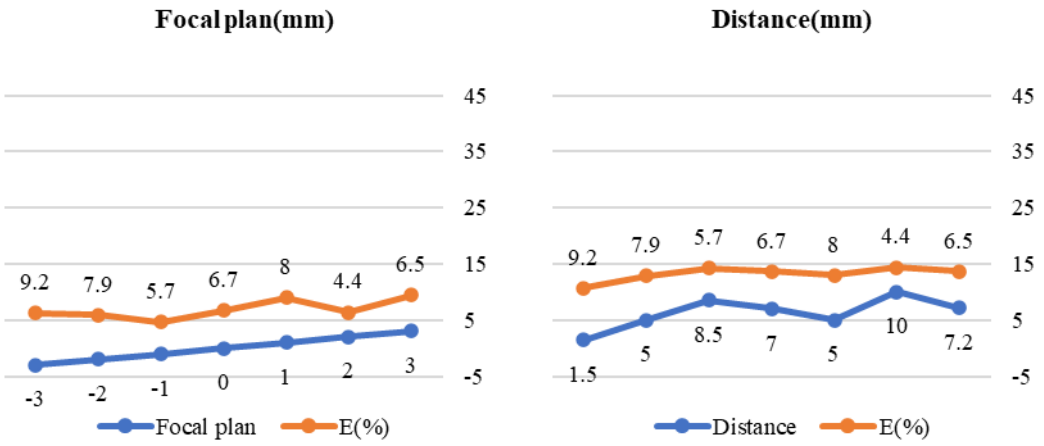
فاصله کانونی بر پاسخ زاویه مخروطی به‌صورت سه‌بعدی و دوبعدی در شکل (۱۰-الف و ب) نشان داده‌شده است. رفتار نمودار توسط آنالیز واریانس (جدول ۹) و همچنین شکل (۸) موردتأیید می‌باشد. افزایش میزان زاویه مخروطی‌شدن با افزایش مقادیر جابجایی و فاصله کانونی توسط دیگر محققان نیز تأیید شده است (۱۸).

۳-۴- خطای عدم گردی سوراخ ورودی

آخرین پاسخ مورد بررسی در این طراحی آزمایش خطای عدم گردی سوراخ ورودی می‌باشد که در این پاسخ بر اساس جدول (۱۰)، مقدار R^2 برابر با ۹۷٫۳۰ درصد می‌باشد که حاکی از انطباق زیاد بین نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل است.

جدول ۱۱- آنالیز واریانس پاسخ عدم گردی سوراخ ورودی

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	69	0.097794	0.001417	36.63	0.000
Distance	9	0.037511	0.004168	107.71	0.000
Focal length	6	0.031892	0.005315	137.36	0.000
Distance*Focal plane	54	0.028390	0.000526	13.59	0.000
Error	70	0.000039			
Total	139	0.100503			

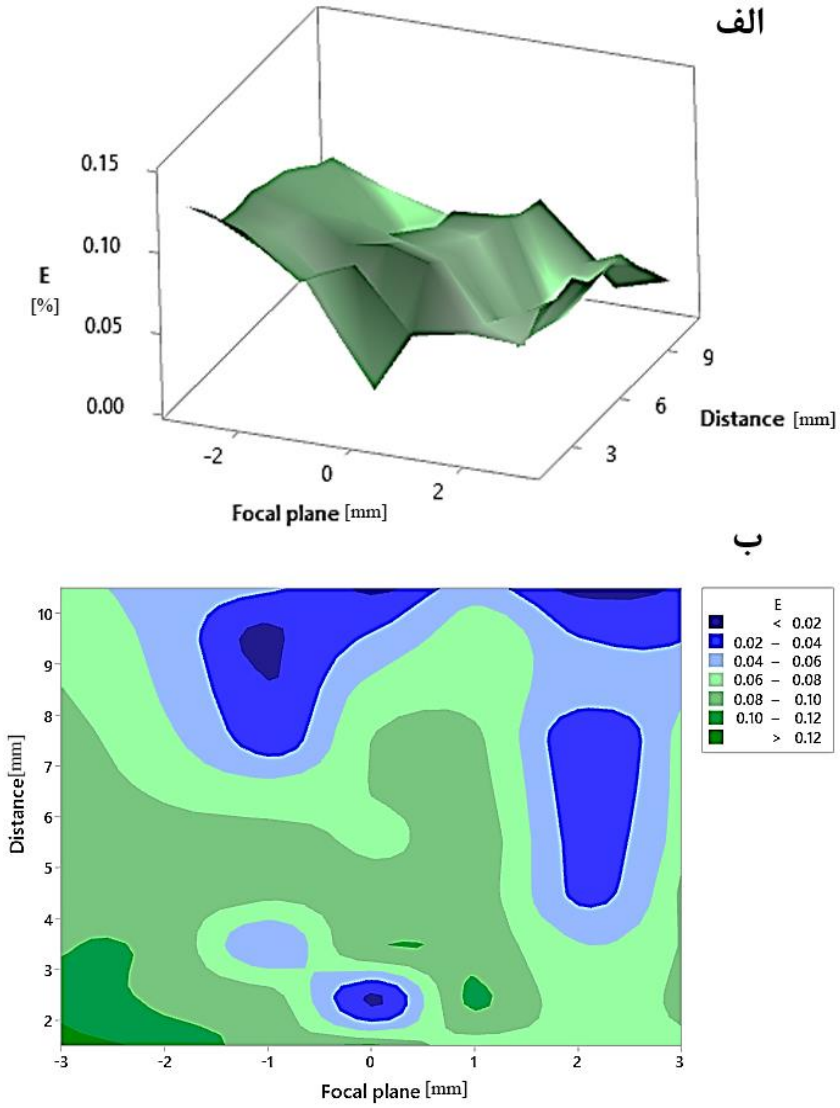


شکل ۱۱- تأثیر پارامترهای جابجایی و فاصله کانونی بر عدم گردی سوراخ ورودی.

مقادیر R^2 (adj) و R^2 (pred) به‌ترتیب برابر با ۹۴٫۶۵ و ۸۹٫۲۲ درصد هستند که بیان‌کننده درجه بالایی از برازش مدل با پاسخ و همچنین میزان دقت پاسخ پیش‌بینی‌شده نسبت به واقعیت می‌باشند.

اطلاعات مربوط به جدول آنالیز واریانس این پاسخ در جدول (۱۱) نشان داده‌شده است. مقادیر P مربوط به مدل، جابجایی و فاصله کانونی که برای پاسخ عدم گردی سوراخ ورودی صفر محاسبه‌شده است، نشان‌دهنده سطح اطمینان بالای این مؤلفه‌ها در مدل ارائه‌شده هستند. مقادیر پارامتر F نیز به‌ترتیب برای مدل، جابجایی و فاصله کانونی برابر با ۳۶٫۶۳، ۱۰۷٫۷۱ و ۱۳۷٫۳۶ می‌باشند که نشان‌دهنده اثرگذاری بالا بر مدل پیشنهادی هستند و این مؤلفه‌ها بر اساس پارامتر F کاملاً معنی‌دار هستند.

تأثیر پارامترهای جابجایی و فاصله کانونی بر عدم گردی سوراخ ورودی در شکل (۱۱) نشان داده‌شده است. در این نمودار مشاهده می‌شود با افزایش جابجایی شاهد گردی بهتری در قطر ورودی هستیم و مواد خارج‌شده از قطر سوراخ، به دلیل کم‌شدن فشار گاز محافظ دارای پاشش کمتری به بیرون می‌باشند و این عامل باعث بهبود گردی سوراخ ورودی می‌گردد. به دلیل اینکه در فاصله کانونی منفی نقطه کانونی در زیر ورق شکل می‌گیرد با تغییر به‌سمت منفی یک پرتو همگراتر می‌شود و این عامل باعث گردی بهتر می‌شود در نقطه صفر و یک پرتو دارای تمرکز بالاست به همین خاطر انرژی بیش‌تری دارد و پاشش مواد مذاب به بیرون باعث ایجاد عدم گردی می‌شود. در ورودی سوراخ و در فاصله کانونی مثبت سه، به دلیل اینکه تمرکز پرتو بالاتر از سطح ورق هست انرژی کمتری دارد و درنتیجه پاشش مواد مذاب کمتری دارد و گردی بهتری حاصل می‌گردد (۱۰).



شکل ۱۲- تأثیر هم‌زمان پارامترهای روشنی پالس و حداکثر توان بر خطای عدم گردی سوراخ ورودی: الف) نمودار سه‌بعدی و ب) نقشه دوبعدی.

پیش‌بینی مدل ارائه‌شده در مورد پارامترهای جابجایی و فاصله کانونی بر پاسخ خطای عدم گردی سوراخ ورودی به‌صورت ۳سه‌بعدی و دوبعدی در شکل (۱۲-الف و ب) نشان داده شده است. رفتار نمودار توسط جدول آنالیز واریانس (جدول ۱۱) و همچنین شکل (۱۰) مورد تأیید می‌باشد.

۳-۵- بهینه‌سازی

با توجه به مدل‌سازی انجام‌شده و بهینه‌سازی عددی پارامترهای فرایند سوراخ‌کاری لیزری در جدول (۱۲) ارائه‌شده است. این مدل‌سازی و معادلات حاصل از آن، کمک شایانی در تعیین بهترین سوراخ ازنظر مشخصات هندسی می‌کند. به‌طورکلی با استفاده از معادلات می‌توان با توجه به مشخصات هندسی (پارامترهای پاسخ) سوراخ‌کاری موردنظر، پارامترهای اصلی فرایند (P,V,F) را پیش‌بینی کرد. این کار می‌تواند به‌صورت برعکس برای پیش‌بینی مشخصات هندسی سوراخ‌کاری لیزری با توجه به پارامترهای فرایند موردنظر نیز انجام گیرد.

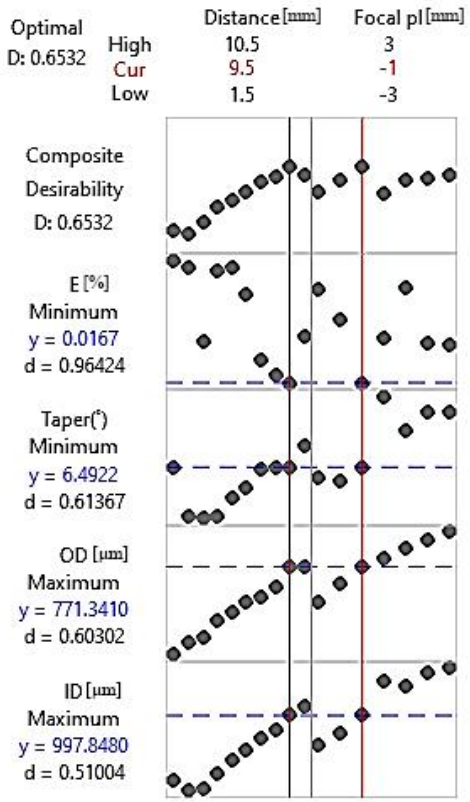
بر اساس طراحی آزمایش و مدل‌های ارائه‌شده در این قسمت، جهت رسیدن به بزرگ‌ترین سوراخ ایجادشده،

جدول ۱۲- پارامترهای بهینه‌سازی طراحی آزمایش

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
E	Minimum		0.01	0.1337	1	1
Taper (˚)	Minimum		0.04	16.7344	1	1
OD	Maximum	51.913	1244.95		1	1
ID	Maximum	183.523	1780.12		1	1

جدول ۱۳- پارامترهای بهینه‌سازی

Solution	Distance	Focal length	E	Taper (˚)	OD	ID	Composite Desirability
1	9.5	-1	0.0166794	6.49224	771.341	997.848	0.653151



شکل ۱۳- محدوده گرافیکی پارامترهای بهینه‌سازی شده.

پارامترهای جابجایی و فاصله کانونی بهینه شدند. مقادیر پاسخ‌های مورد انتظار و همچنین شرایط بهینه‌سازی پارامترها در جدول (۱۲) نشان داده‌شده است.

جهت بهینه‌سازی قطر ورودی و قطر خروجی در حداکثر مقدار و همچنین زاویه مخروطی و عدم گردی در حداقل مقدار، نتیجه به شرح جدول (۱۳) حاصل گردید.

محدوده گرافیکی بهینه‌سازی طراحی آزمایش در شکل (۱۳) آمده است. در این شکل، احتمال حصول نتیجه حداکثر مقدار قطر ورودی سوراخ با ۵۱ درصد عدد ۹۹۷٫۸۴۸ میکرومتر، برای حداکثر قطر خروجی سوراخ عدد ۷۷۱٫۳۴۱ با ۶۰ درصد، زاویه سوراخ عدد ۶٫۴۹۲ درجه با ۶۱ درصد و درنهایت خطای عدم گردی عدد ۰٫۰۱۶۷ با ۹۶ درصد پیش‌بینی‌شده است.

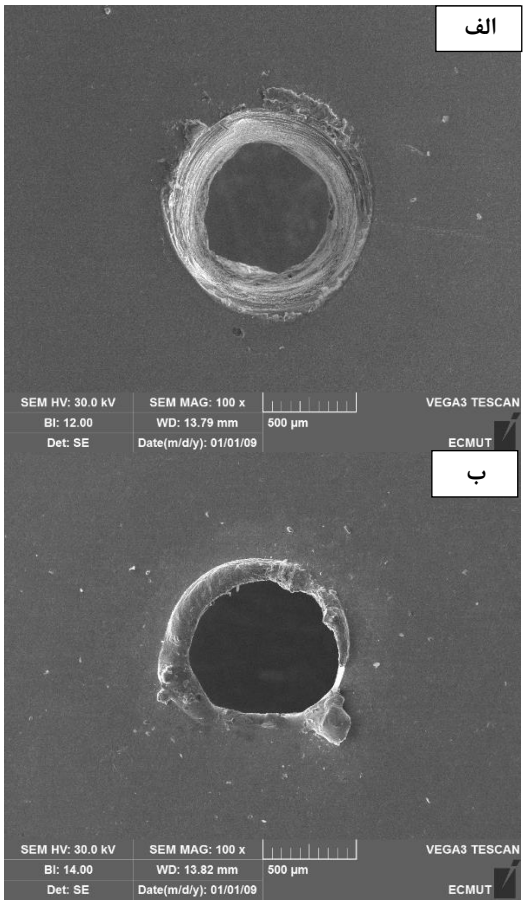
نتایج تجربی حاصل از انجام پارامترهای بهینه‌سازی در شکل (۱۴) نشان داده‌شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای پیش‌بینی شرایط بهینه از مدل آماری- تجربی استفاده‌شده است. این روش امکان این امر را میسر نمود تا نتایج دقیق و درنتیجه کار تحقیقاتی منحصربه‌فردی شکل گیرد. در این تحقیق نتایج زیر حاصل شد.

۱. در این تحقیق هر دو پارامتر جابجایی فاصله نازل و فاصله کانونی بر قطر ورودی و خروجی مؤثر بودند و با افزایش این دو پارامتر قطر ورودی و خروجی افزایش یافت.

۲. با افزایش جابجایی فاصله نازل، مقادیر پاسخ‌های زاویه مخروطی و خطای عدم گردی افزایش یافت و با افزایش فاصله کانونی، این پاسخ‌ها علی‌رقم نوسان، به‌صورت کلی افزایش یافتند.



شکل ۱۴- الف) قطر ورودی سوراخ بهینه‌سازی شده و ب) قطر خروجی سوراخ بهینه‌سازی شده.

۳. در بهینه‌سازی انجام‌شده، حداکثر مقدار قطر ورودی سوراخ ۹۹۷٫۸۴۸ میکرومتر، حداکثر قطر خروجی سوراخ ۷۷۱٫۳۴۱ میکرومتر، زاویه سوراخ عدد ۶٫۴۹۲ درجه و درنهایت خطای عدم گردی ۰٫۰۱۶۷ مشخص شد.

۴. حداکثر قطر ورودی ۱۷۶۸٫۱۸ میکرومتر و حداقل قطر ورودی ۱۸۳٫۵۲۳ میکرومتر در نمونه‌های تجربی حاصل گردید. روش تک‌پالس همانند تحقیق حاضر تابه‌حال انجام‌نشده است و روش‌های چرخشی و چرخشی مارپیچی گزارش‌شده است. به همین علت این دستاورد یک روش ابتکاری است که با کمترین هزینه با استفاده از یک هد تک‌پالس با هزینه کمتر موفق به اجرای قطرهای متنوع با ابعاد بزرگ می شود.

تشکر و سپاسگزاری

این تحقیق حمایت خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

سهم نویسندگان

مصطفی قدیمی دفرازی: جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل و تفسیر داده‌ها، نوشتن مقاله. **سیدرضا شجاع رضوی:** طراحی و ایده‌پردازی مطالعه، اعتبارسنجی نتایج، نوشتن مقاله، مدیریت منابع، راهنمایی پروژه. **سیدمسعود برکت:** طراحی و ایده‌پردازی مطالعه، نوشتن مقاله، مدیریت منابع، راهنمایی پروژه. **علی خرم:** مشاوره در تحلیل و تفسیر نتایج. **محمد عرفان‌منش:** مشاوره در تحلیل و تفسیر نتایج.

واژه‌نامه

1. grey relational analysis (GRA)
2. positive material identification (PMI)
3. pulse width modulation (PWM)
4. focal length
5. P-value
6. F-value

مراجع

1. Chen M-F, Hsiao W-T, Wang M-C, Yang K-Y, Chen Y-F,A theoretical analysis and experimental verification of a laser drilling process for a ceramic substrate. Int J Adv Manuf Tech. 2015;81:1723-1732. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7219-7
2. Bharatish A, Murthy HN, Anand B, et al. Laser

microdrilling of thermal barrier coatings. Procedia Mater Sci. 2014;5:1005-1014. https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.389
3. Yilbas BS, Sami M. Liquid ejection and possible nucleate boiling mechanisms in relation to the laser drilling process. J Phys D Appl Phys. 1997; 30(14): 1996. https://doi.org/10.1088/0022-3727/30/14/006
4. Voisey K, Cheng C, Clyne T. Quantification of melt ejection phenomena during laser drilling. Mater Res Soc Symp Proc. 2000;617:J5. 6. https://doi.org/10.1557/PROC-617-J5.6
5. Yao YL, Chen H, Zhang W. Time scale effects in laser material removal: a review. Int J Adv Manuf Tech. 2005; 26:598-608. https://doi.org/10.1007/s00170-003-2026-y
6. Von Allmen M. Laser drilling velocity in metals. J Appl Phys. 1976;47(12):5460-5463. https://doi.org/10.1063/1.322578
7. Bahar N, Marimuthu S, Yahya W, editors. Pulsed Nd: YAG laser drilling of aerospace materials (Ti-6Al-4V). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2016: IOP Publishing.
8. Tu J, Paleocrassas AG, Reeves N, Rajule N. Experimental characterization of a micro-hole drilling process with short micro-second pulses by a CW single-mode fiber laser. Opt Lasers Eng. 2014; 55:275-283. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.11.002
9. Bright R, Jacobs P, Aindow M, Marcus H, editors. The influence of pulse parameters on the laser drilling of Hastelloy X. International Laser Safety Conference; 2007: AIP Publishing.
10. Sivaprasad P, Noorul Haq A. Accuracy and surface integrity analysis of micro holes drilled on Hastelloy-X alloy using a laser source with optimization. Surf Rev Lett. 2020;27(02):1950109. https://doi.org/10.1142/S0218625X19501099
11. Mishra S, Yadava V. Modeling and optimization of laser beam percussion drilling of nickel-based superalloy sheet using Nd: YAG laser. Opt Lasers Eng. 2013;51(6):681-695. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.01.006
12. Moradi M, MOHAZA PA, Khoram A. An experimental investigation of the effects of fiber laser percussion drilling: Influence of process parameters. Int J Adv Des Manuf Technol. 2016;9(4):7-12.
13. Ng G, Li L. The effect of laser peak power and pulse width on the hole geometry repeatability in laser percussion drilling. Opt Laser Technol. 2001;33(6):393-402. https://doi.org/10.1016/S0030-3992(01)00048-2
14. Aghaei Attar M, Razmkhah O, Ghoreishi M, Moradi M. A novel numerical modeling of microsecond laser beam percussion micro-drilling of Hastelloy X: experimental validation and multi-objective optimization. Int J Adv Manuf Tech. 2024;132(1): 193-215. https://doi.org/10.1007/s00170-023-12936-3
15. Phanphet S, Bangphan S. Application of full factorial design for optimization of production process by turning machine. J Tianjin Univ Sci Technol. 2021;54:35-55. https://doi.org/10.17605/OSF.IO/3TESD
16. Montgomery DC. Design and analysis of experiments. John wiley & sons; 2017.
17. Guru Mahesh G, Kandasamy J. Optimization of CO_2 laser drilling process parameters of GFRP/Al2O3/perlite composites. Mater Today Commun. 2023/06/01/;35: 105962. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105962
18. Du T, Liang X, Yu Y, et al. Optimization of femtosecond laser drilling process for DD6 single crystal alloy. Metals. 2023;13(2):333. https://doi.org/10.3390/met13020333
19. Nawaz S, Kashif M, Abbas N, et al. Effect of defocused plane on entrance and exit hole geometry of high grade steel 18CrNi8 during percussion drilling by Nd:YAG millisecond laser system. Mater Res Express 2020/01/13; 7(1): 016556. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab654c