

بررسی عددی و تجربی فرآیند سوراخکاری لیزری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ و بهینه سازی آن توسط روش رویه پاسخ

محمود مرادی*

احسان گلچین

علی خرم

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله به شبیه‌سازی فرآیند سوراخکاری لیزر فیبری سوپر آلیاژ اینکونل 718 به ضخامت ۱ میلی‌متر، با روش اجزاء محدود پرداخته شده‌است. با استفاده از روش رویه پاسخ تاثیر پارامترهای فرکانس پالس لیزر (۱۵۰ تا ۵۵۰ هرتز)، توان لیزر (۲۰۰ تا ۵۰۰ وات)، موقعیت صفحه کانونی لیزر (۰/۵- تا ۰/۵+ میلی‌متر) و درصد زمان روشنی پالس (۳۰ تا ۷۰ درصد) به عنوان متغیرهای ورودی در ۵ سطح و دو پارامتر خروجی قطر ورودی سوراخ و زاویه مخروطی به عنوان پاسخ‌های طرح بررسی شدند. نتایج تحلیل‌های آماری نشان دادند که پارامترهای ورودی و خروجی دارای نسبت مستقیم هستند. با افزایش متغیرهای ورودی قطر سوراخ ورودی و زاویه مخروطی سوراخ افزایش یافت. صحت گذاری مدل توسط نتایج آزمایشگاهی فرآیند انجام پذیرفت. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی و تحلیل‌های صورت گرفته، فرآیند سوراخکاری لیزری به کمک روش تابع مطلوبیت کل، بهینه‌سازی گردید. در نهایت شبیه‌سازی تنش‌های پسماند این فرآیند در حالت پارامترهای بهینه انجام شد. مقدار تنش پسماند ایجاد شده روی سطح ورق، دارای بیشترین مقدار (۰/۱۴ مگاپاسکال) می‌باشد و با افزایش فاصله از سطح قطعه کار، مقدار تنش پسماند کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: سوراخکاری لیزری، سوپرآلیاژ اینکونل 718، روش رویه پاسخ، روش اجزاء محدود، تنش پسماند.

Numerical and experimental investigation of laser drilling process of Inconel 718 superalloy and optimization of it by response surface methodology

M. Moradi

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

E. Golchin

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

A. Khorram

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, the simulation of fiber-laser drilling process of Inconel 718 superalloy with the thickness of 1mm is investigated through the Finite Element Method. The influence of process parameters i.e. laser pulse frequency (150 to 550 Hz), laser power (200 to 500 watts), laser focal plane position (-0.5 to +0.5 mm) and the duty cycle (30 to 70%) were investigated in 5 levels and two external parameters i.e. the hole's entrance diameter and hole taper angle, were observed to be the process output responses. By performing the statistical analysis, the input and output parameters were found to have a direct relation with each other. By an increase in each of the input variables, the hole's entrance diameter and the hole taper angle increase. Verification of model was performed by experimental results. The results of the conducted simulations and statistical analyses having been used, the laser drilling process were optimized by means of the desire ability approach. Finally, residual stress simulation of this process was carried out at optimum setting. The residual stress value on the surface of sheet is maximum (0.14 MPa) and this value decreases with increasing distance from the surface of the sample.

Keywords: Laser Drilling, Inconel 718 nickel base super alloy, Response Surface Method (RSM), Finite Element Method, Residual stress

۱- مقدمه

می‌کند. حفره به سبب بازتاب‌های متعدد یک افزایش ناگهانی در قابلیت جذب پیدا می‌کند و سریعاً گود می‌شود فشار گاز باعث زدودن ماده مذاب می‌گردد. در این هنگام بخار تشکیل شده و آزاد می‌شود، ضایعات به بیرون حفره می‌ریزد و دیواره‌های گداخته دور حفره شکل می‌گیرد [۳]. انتخاب پارامترهای ورودی فرآیند به منظور به دست آوردن سوراخ‌هایی با مشخصات هندسی مطلوب است. انجام آزمایش بر اساس روش آزمون و خطا، آزمایش‌ها را زمان‌بر می‌کند و اثر متقابل پارامترها را در نظر نمی‌گیرد و باعث خطاهای زیادی می‌شود. استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها در کارهای آزمایشگاهی مختلف اخیراً

در سال‌های اخیر روش استاندارد برای ایجاد سوراخ‌های خنک‌کننده در اجزای هوافضا، فرآیند سوراخ‌کاری لیزری است [۲،۱]. سوراخ‌کاری لیزری یکی از مهم‌ترین روش‌های فرآوری لیزری مواد با موارد بالایی از کاربردها می‌باشد. از خصوصیات این روش می‌توان به سرعت بالا، بازده و هزینه اقتصادی به‌صرفه آن اشاره کرد. سوراخ‌کاری لیزر به ذوب و تبخیر ماده متکی است، پرتو متمرکز شده نخست سطح را تا نقطه ذوب گرم می‌کند و یک حفره راهنما ایجاد

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: moradi.malayeru@gmail.com

تحلیل آماری بر روی آن‌ها توسط نرم افزار minitab17 انجام شد. شبیه‌سازی فرآیند سوراخکاری لیزری سوپر آلیاژ اینکونل 718 به ضخامت ۱ میلی‌متر، با روش اجزاء محدود صورت پذیرفت. پارامترهای قطر ورودی و زاویه مخروطی سوراخ به عنوان کمیت‌های تطابقی فرآیند شبیه‌سازی در نظر گرفته شدند. سپس در گام آخر مقاله، با بهینه‌سازی فرآیند به روش تابع مطلوبیت کل پارامترهای بهینه فرآیند بدست آمدند. صحت گذاری مدل نیز توسط نتایج آزمایشگاهی فرآیند انجام پذیرفت. شبیه‌سازی تنش‌های پسماند این فرآیند در حالت پارامترهای بهینه انجام شد.

۲- طراحی آزمایش‌ها

روش رویه پاسخ، یک مجموعه از تکنیک‌های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل‌های تجربی است. هدف در طرح‌های رویه پاسخ، بهینه‌سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) می‌باشد. در هر آزمایش تغییرات در متغیرهای ورودی به منظور تعیین علل تغییرات در متغیر پاسخ ایجاد می‌شوند و هدف این است که ارتباط خروجی‌ها با ورودی‌ها (پاسخ‌ها و پارامترها) با حداقل خطا در قالب یک مدل ریاضی به دست آید [۲۲،۲۱]. در مقاله حاضر روش رویه پاسخ به‌عنوان شیوه طراحی آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. وقتی تمام متغیرهای مستقل در حین آزمایش قابل اندازه‌گیری و کنترل باشند، رویه پاسخ بصورت تابع رابطه (۱) بیان می‌گردد:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \quad (1)$$

در اینجا k تعداد متغیرهای مستقل است. پیدا کردن تابعی منطقی جهت ارتباط متغیرهای مستقل با پاسخ ضروری است. لذا معمولاً تابع چندجمله‌ای مرتبه دو ارائه شده در معادله (۲) در روش رویه پاسخ به کار می‌رود.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2)$$

در معادله بالا β_0 مقدار ثابت، β_i ضرایب خطی، β_{ii} ضرایب مرتبه دو، β_{ij} ضرایب تعامل اثر و ϵ مقدار خطای پارامترهای معادله رگرسیون به‌دست‌آمده می‌باشند.

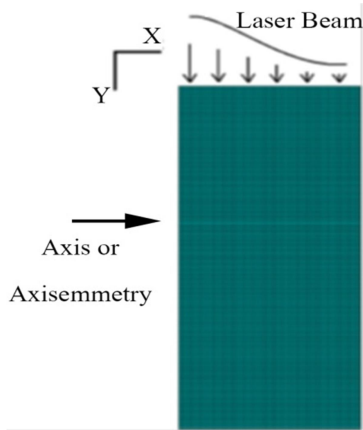
در پژوهش حاضر فرکانس پالس لیزر، درصد زمان روشنی پالس، توان لیزر و موقعیت کانونی لیزر به‌عنوان پارامترهای مستقل ورودی در نظر گرفته شدند. جدول ۱ چهار متغیر ورودی آزمایش، مقادیر کد شده و واقعی سطوح آن‌ها را نشان می‌دهد. جهت انجام آزمایش‌ها در این مقاله از طرح مرکزی رویه پاسخ با چهار پارامتر و هر کدام در پنج سطح، استفاده گردید.

توسعه‌یافته است. روش طراحی آزمایش‌ها کاربرد فراوانی در صنایع مختلف و فرآیندهای متفاوت مانند جوشکاری لیزر، جوشکاری ترکیبی لیزر- قوس، سوراخکاری لیزری، برشکاری لیزری و لحیم کاری لیزری دارد [۹-۴].

در مقاله‌ای مرادی و همکاران به بررسی تاثیر پارامترهای سوراخکاری لیزر فیبری سوپر آلیاژ اینکونل 718 به روش آزمایشگاهی پرداختند [۱۰]. میشرها و همکاران [۱۱] با مطالعه تاثیر پارامترهای لیزر، بر روی مخروطی شدن سوراخ و ناحیه متأثر از گرما و عمق براده برداری ورق سوپر آلیاژ پایه نیکل، دریافتند که تاثیر پارامتر فرکانس پالس بر روی مخروطی شدن سوراخ از دیگر پارامترها بیشتر می‌باشد. ان جی و همکاران [۱۲] به مطالعه تاثیر پارامترهای عرض پالس و توان در مدور شدن سوراخ در فرآیند سوراخکاری لیزری پرداخته و دریافتند بیشترین دایروی بودن سوراخ با کاهش عرض پالس و افزایش توان لیزر به دست می‌آید و قطر سوراخ وابسته به عرض پالس می‌باشد. اسچوندربیک و همکاران [۱۳] با استفاده از لیزر نیمه‌هادی با طول پالس‌های ۹ تا ۱۵۰ نانوثانیه، ورق‌های نیکل و آلومینیوم را سوراخکاری کردند. جایتو و همکاران [۱۴] به بررسی مشخصات آزمایشگاهی سوراخکاری لیزری با پالس‌های میکروثانیه کوتاه توسط لیزر فیبری ۳۰۰ وات موج پیوسته حالت تک مد پرداختند. لو و همکاران [۱۵] تاثیر گازهای مختلف را بر رفتار و مشخصات پاشش جرقه بر روی سطح و لایه تشکیل مجدد در سوراخکاری ورق‌های آلیاژی نیومونیک ۲۶۳ با استفاده از لیزر Nd:YAG بررسی کردند. مشخص شد که گاز محافظ آرگون، در ساختار لایه تشکیل مجدد موثر است. لایه تشکیل مجدد شامل چندین لایه می‌باشد که به‌طور متناوب به موازات دیوار سوراخ‌ها تشکیل شده است.

گنش و همکاران [۱۶] تحقیقی تحت عنوان مدلی برای سوراخکاری لیزری انجام دادند که در آن به ارائه معادلات میدانی جریان سیال و انتقال گرما پرداخته شده است. ژانگ و همکاران [۱۷] مدلسازی و شبیه‌سازی سوراخکاری لیزری با لیزر پالس بلند را انجام دادند و نتایج سوراخکاری در زمان‌های مختلف را ارائه نمودند. یان و همکاران [۱۸] پژوهشی با عنوان مطالعه آزمایشگاهی و عددی سوراخکاری لیزری چندپالسی آلومینیوم انجام دادند. بعد از شبیه‌سازی سوراخکاری لیزری، مقایسه قطر ورودی و قطر خروجی برای توان‌ها و پالس‌های مختلف برای حالت‌های شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی انجام شد و در نهایت ثابت شد که مدل شبیه‌سازی شده، قطر ورودی و خروجی کمتری را نسبت به نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند. کولینس و همکاران [۱۹] پژوهشی با عنوان یک مدل ساده برای سوراخکاری لیزری انجام دادند و به بیان معادلات انتقال گرما و مکانیکی حاکم بر فرآیند پرداختند. ژانگ و همکاران [۲۰] تحقیقی با عنوان مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی دینامیک سوراخ کلیدی در طی فرآیند سوراخکاری لیزری انجام دادند و به مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی بوسیله نرم افزار انسیس و نتایج آزمایشگاهی سوراخکاری لیزری بر روی شیشه پرداختند.

در این پژوهش، به منظور بررسی میزان و چگونگی اثر پارامترهای ورودی (توان لیزر، فرکانس پالس لیزر، درصد زمان روشنی پالس لیزر و موقعیت صفحه کانونی لیزر) بر دو پارامتر خروجی قطر سوراخ ورودی و زاویه مخروطی سوراخ، ۲۵ آزمایش به روش رویه پاسخ طراحی و



شکل ۱- مدل المان محدود فرآیند سوراخکاری لیزری [۱۸]

دمای اولیه مدل را برای دمای محیط T_0 در نظر می‌گیریم. پس $T(r, z, 0) = T_0$. در زمان $t=0$ ، انرژی ورودی به جسم، برابر با حرارت ورودی می‌باشد. با توجه به رابطه (۳) و اعمال شرایط اولیه، شرایط مرزی گرمایی حاکم بر مدل به شرح زیر می‌باشد. در روابط ۴ تا ۶، τ زمان روشنی پالس و t_p زمان کل پالس می‌باشد.

هرگاه $0 < t < \tau$:

$$k(T) \frac{\partial(r, z, t)}{\partial z} = \begin{cases} h(T(r, z, t) - T_0) & \text{for } r > R \text{ on } B_1 \\ q_{in} & \text{for } r \leq R \text{ on } B_1 \end{cases} \quad (4)$$

هرگاه $\tau < t < t_p$:

$$k(T) \frac{\partial(r, z, t)}{\partial z} = h(T(r, z, t) - T_0) \text{ on } B_1 \quad (5)$$

هرگاه $t > 0$:

$$k(T) \frac{\partial(r, z, t)}{\partial n} = 0 \text{ on } B_2, B_3 \text{ and } B_4 \quad (6)$$

هر ماده‌ای که دارای دمای بالاتر از دمای محیط پیرامون خود باشد، از خود انرژی ساطع می‌کند. در فرآیند سوراخکاری لیزری نیز، دمای سطح جسم دارای تغییرات بسیار شدیدی خواهد بود. از این رو تابش یک عامل بسیار مهم در این فرآیند می‌باشد. شار گرمایی ساطع شده از سطح ماده توسط قانون استفان - بولتزمن بیان می‌شود.

$$q_{rad} = \sigma \epsilon (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (7)$$

که در معادله (۷) σ ثابت بولتزمن است که برابر 5.67×10^{-8} و ϵ ضریب تابش برابر با $0/9$ در نظر گرفته شده است. همچنین T_s و T_∞ به ترتیب دمای سطح جسم و دمای محیط می‌باشد. دمای محیط در شبیه‌سازی‌های انجام شده برابر با 298 کلوین در نظر گرفته شده است. برای در نظر گرفتن تلفات حرارت در اثر جت گاز خنک کننده، ضریب انتقال گرمایی همرفتی به مقدار $200 \frac{W}{m^2K}$ در نظر گرفته شده - است. شار گرمایی همرفتی توسط قانون سرد شدن نیوتون به شکل رابطه (۸) بیان می‌شود.

$$q = Ah(T_s - T_\infty) \quad (8)$$

جدول ۱- پارامترهای ورودی لیزر و سطوح مورد استفاده

پارامترها	علامت	واحد	۱	۰	-۱	-۲
فرکانس	LF	[Hz]	۴۵۰	۳۵۰	۲۵۰	۱۵۰
توان	LP	[W]	۴۲۵	۳۵۰	۲۷۵	۲۰۰
موقعیت صفحه کانونی	FPP	[mm]	+۰/۵	+۰/۲۵	۰	-۰/۲۵
درصد زمان روشنی پالس	D	[%]	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰

۳- شبیه سازی به کمک روش اجزا محدود

۳-۱- معادلات حاکم و شرایط مرزی

سوراخکاری لیزری دارای پیچیدگی‌های بسیار زیادی مانند تغییر ناگهانی فاز، گرادین دمای شدید و تولید پلاسما می‌باشد. برای شبیه سازی این فرآیند لازم است که مدل مورد استفاده به شکل ساده‌تری نسبت به حالت واقعی فرآیند تبدیل شود. فرضیات زیر برای انجام شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است.

- ۱) مدل بصورت همگن و مشابه (یک جنس) در نظر گرفته شده است.
- ۲) از تولید پلاسما صرف نظر می‌شود.
- ۳) از بازتابش‌های چندگانه در داخل سوراخ صرف نظر می‌شود.
- ۴) تولید موج‌های شوک ناچیز هستند.
- ۵) جذب نیرو توسط ماده مذاب نادیده گرفته می‌شود.
- ۶) از انتقال گرما در حوضچه مذاب صرف نظر می‌شود.
- ۷) خواص ماده بصورت متناسب با دما در نظر گرفته می‌شوند.

شکل ۱، شکل کلی تحلیل فرآیند سوراخکاری لیزری به روش اجزا محدود را نشان می‌دهد. تحلیل‌های انجام شده در این مقاله صرفاً از نوع حرارتی بوده که هدف از انجام این تحلیل، بدست آوردن دمای المان‌ها در نقاط و زمان‌های مختلف می‌باشد. دما در نقاط مختلف، تابع دو عامل گرمای ورودی و خواص گرمایی ماده می‌باشد. طبق قانون فوریه، دمای هر نقطه از جسم، با استفاده از رابطه (۳) بدست می‌آید. رابطه (۳)، معادله انتقال گرمای فوریه را در فرم استوانه-ای بیان می‌کند.

$$k(T) \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2(r, z, t)}{\partial z^2} \right] = \rho(T) C(T) \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} \quad (3)$$

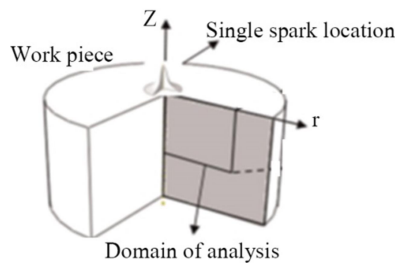
$\rho(T)$ چگالی وابسته به دما، $C(T)$ گرمای ویژه وابسته به دما و $K(T)$ رسانایی گرمایی وابسته به دما می‌باشد. خواص اشاره شده، برای مواد همگن در تمامی جهات ثابت هستند که در این مقاله نیز، مواد استفاده شده همگن می‌باشند.

گردید. در پژوهش پیش رو نیز، از توزیع برتر این مقاله جهت شبیه سازی استفاده شده است.

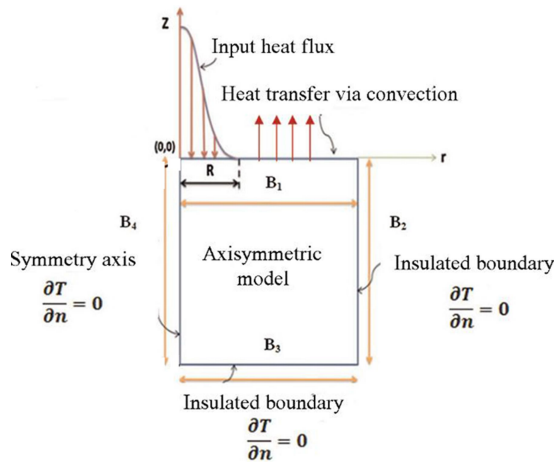
$$Q_{in} = \frac{2AP}{\pi R^2} \exp\left(-2\frac{r^2}{R^2}\right) \quad (10)$$

$$R = \frac{d}{2} \left[1 + \left(4 \frac{M^2 L (z+f)}{\pi d^2} \right) \right]$$

در رابطه بالا Q_{in} مقدار انرژی ورودی، P توان متوسط لیزر، A مقدار ضریب جذب، R شعاع موثر لیزر، r فاصله شعاعی از مقطع لیزر، d قطر پرتو لیزر، L طول موج لیزر، z عمق و f موقعیت کانونی لیزر می باشد. M^2 یکی از پارامترهای مربوط به دستگاه لیزر می باشد که دستگاه لیزر مورد در این مقاله دارای مقدار $1/0.5$ و مقدار ضریب جذب برابر 0.4 بوده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳- مدل حرارتی فرآیند سوراخکاری لیزری (الف) نمایش طرحواره قطعه کار (ب) مدل متقارن محوری

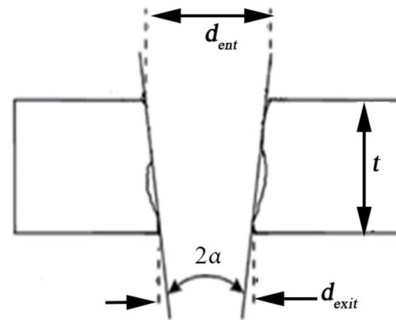
۳-۳- خواص ماده

جهت انجام فرآیند آزمایشگاهی و شبیه سازی از ماده سوپر آلیاژ اینکونل 718 استفاده شد. خواص وابسته به دمای این ماده در جدول- های شماره ۲ و ۳ ارائه شده است.

در رابطه (۸)، A مساحت ناحیه مورد نظر، h ضریب انتقال گرمای جابجایی، T_s دمای سطح ماده و T_{∞} دمای محیط می باشد که برابر با ۲۹۸ کلوین در نظر گرفته شده است.

۳-۲- روش شبیه سازی

در این مرحله، قطره های ورودی، خروجی و زاویه مخروطی سوراخ به عنوان کمیت های تطابقی مورد ارزیابی قرار گرفته اند. با استفاده از قطره های ورودی و خروجی، مقدار زاویه مخروطی نیز با توجه به شکل ۲ و رابطه (۹) بدست می آید.



شکل ۲- نمایش مشخصات هندسی در مقطع عرضی سوراخ

$$\text{Taper}(\text{°}) = \frac{d_{\text{entrance}} - d_{\text{exit}}}{2t} \times \frac{180}{\pi} \quad (9)$$

در رابطه (۹) قطر سوراخ ورودی، d_{entrance} قطر سوراخ خروجی و t ضخامت ماده است.

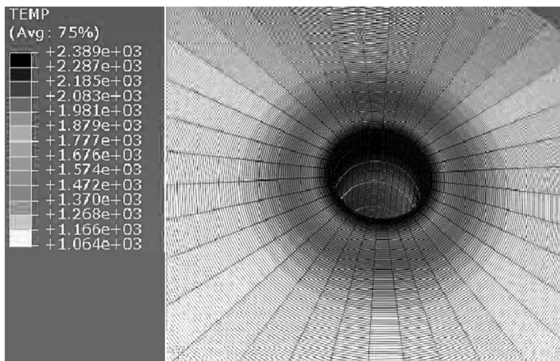
در این قسمت نیز مقدار طول المان ها برابر با ۵ میکرومتر می باشد که مقدار آن با روش سعی و خطا مشخص شده است. همچنین نوع المان مورد استفاده از نوع DCAX4 می باشد.

بدلیل دایروی بودن مقاطع سوراخ و پرتو لیزر، می توان فرآیند را بصورت متقارن محوری مدل سازی کرد. مهم ترین مزیت مدل سازی به روش متقارن محوری، کاهش تعداد المان ها و به پیروی از آن، کاهش زمان حل مساله می باشد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، شار حرارتی مورد نیاز جهت سوراخکاری به سطح بالایی مدل اعمال می شود. (شکل ۳ب) نحوه اعمال شار حرارتی به مدل را نشان می دهد. شبیه سازی های انجام شده در این مقاله با استفاده از نرم افزار ABAQUS انجام شده اند. نرم افزارهای اجزاء محدود قابلیت شبیه سازی شار گرمایی لیزر را دارا نمی باشند. سابروتین dflux که برای شبیه سازی منابع حرارتی غیریکنواخت بکار می رود و با زبان فرترن تعریف می شود، برای شبیه سازی پرتو لیزر مورد استفاده قرار گرفته است. جهت حذف المان هایی که دمای آن ها از نقطه تبخیر عبور کرده است نیز از تکنیک مرگ المان استفاده شده است.

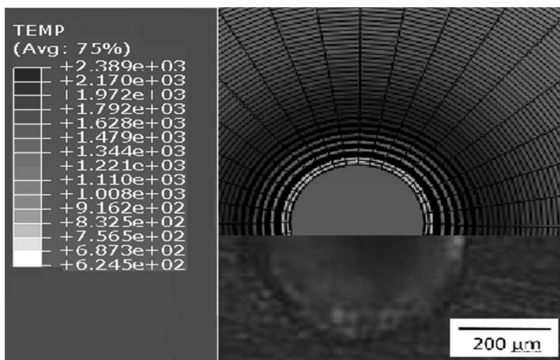
در مقاله پیشین نویسندگان [۲۳] پژوهشی با عنوان شبیه سازی فرآیند سوراخکاری لیزری شیشه به روش اجزاء محدود و انتخاب توزیع گوسین لیزر مناسب انجام دادند که طی آن ۳ مورد شبیه سازی با توزیع های گوسی متفاوت انجام شد و در نهایت یک توزیع بعنوان توزیع برتر جهت انجام شبیه سازی فرآیند سوراخکاری لیزری انتخاب

توسط میکروسکوپ نوری Axioskop 40 با بزرگنمایی $\times 940$ عکسبرداری شدند و با نرم افزار imagej مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقادیر اندازه و میزان دایروی بودن سوراخ ورودی و خروجی و زاویه مخروطی سوراخ مورد بررسی قرار گرفتند.

شکل ۴ مدل را تحت بار حرارتی پس از تمام شدن فرآیند و اعمال مرگ المان (مربوط به آزمایش سوم) نشان می‌دهد. در شکل ۵ شکل نهایی سوراخ و مقایسه آن با سوراخ حالت آزمایشگاهی ارائه شده است. در جدول ۴، مقادیر بدست آمده از فرآیند آزمایشگاهی، شبیه سازی و میزان خطا برای قطر سوراخ ورودی، قطر سوراخ خروجی و زاویه مخروطی ارائه شده است. با توجه به مقدار خطای نرم افزار، می‌توان گفت که مدل ارائه شده به خوبی توانایی شبیه‌سازی فرآیند سوراخکاری لیزری را دارا می‌باشد. یکی از دلایل وجود اختلاف بین نتایج نرم‌افزاری و آزمایشگاهی، وجود خطا در اندازه‌گیری قطرهای ورودی و خروجی در حالت آزمایشگاهی می‌باشد. از دیگر دلایل عدم تطابق کامل نرم‌افزار، دقیق نبودن پارامترهای ورودی آزمایش می‌باشد. بعنوان مثال ممکن است شعاع پرتو لیزر در حالت واقعی کمتر از حالت اسمی آن باشد. باتوجه به نکات یاد شده، می‌توان از مدل ارائه شده در شبیه‌سازی فرآیند سوراخکاری لیزری بهره برد.



شکل ۴- توزیع دما پس از انجام فرآیند سوراخکاری لیزری سوپراآلیاژ اینکونل 718



شکل ۵- مقایسه حالت آزمایشگاهی و شبیه سازی سوراخکاری لیزری سوپراآلیاژ اینکونل 718

جدول ۲- خواص مکانیکی وابسته به دمای سوپراآلیاژ اینکونل 718

[۲۴]		
مدول الاستیک (Gpa)	تنش تسلیم (Mpa)	دما (K)
۲۰۰	۱۱۸۵	۲۹۴
۱۷۱	۱۰۶۵	۸۱۳
۱۶۳	۱۰۲۰	۹۲۳
۱۵۴	۷۴۰	۱۰۳۳
۱۳۹	۳۳۰	۱۱۴۳

جدول ۳- خواص ترموفیزیکی وابسته به دمای سوپراآلیاژ اینکونل 718

[۲۴]			
دما (K)	چگالی (Kg.m ³)	گرمای ویژه (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)	رسانایی گرمایی (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
۲۹۸	۸۲۴۰	۴۳۹	۱۰/۳
۳۷۳	۸۲۲۱	۴۵۴	۱۱/۵
۴۷۳	۸۲۹۳	۴۷۳	۱۳/۲
۵۷۳	۸۱۶۲	۴۹۳	۱۵/۰
۶۷۳	۸۱۳۰	۵۱۲	۱۶/۹
۷۷۳	۸۰۹۵	۵۳۲	۱۸/۸
۸۷۳	۸۰۵۸	۵۵۱	۲۰/۹
۹۷۳	۸۰۱۹	۵۸۲	۲۲/۸
۱۰۷۳	۷۹۷۸	۶۰۴	۲۳/۸
۱۱۷۳	۷۹۳۴	۶۲۶	۲۵/۹
۱۲۷۳	۷۸۸۹	۶۴۸	۲۸/۰
۱۳۷۳	۷۸۴۱	۶۷۰	۳۰/۲
۱۴۷۳	۷۷۹۲	۶۹۲	۳۲/۴
۱۵۷۳	۷۷۶۱	۷۰	۳۳/۷
۱۶۲۸	۷۴۲۰	۶۷۷	۲۹
۱۶۷۳	۷۳۶۳	۶۷۷	۲۹
۱۷۷۳	۷۲۸۰	۶۷۷	۲۹

۴- فرآیند آزمایشگاهی و اعتبار سنجی مدل

به منظور اعتبار سنجی مدل ارائه شده، ۳ آزمایش تجربی سوراخکاری لیزری بر روی سوپراآلیاژ اینکونل 718 به ضخامت یک میلی‌متر انجام شد. لیزر مورد استفاده از نوع Fiber با قطر پرتو ۸۰ میکرومتر در هر ۳ آزمایش، زمان روشنی پالس نیز ۵۰ درصد و موقعیت کانونی لیزر برابر ۱ میلی‌متر و زمان کل سوراخکاری برای هر ۳ آزمایش ۰/۱ ثانیه بوده است. اکسیژن به‌عنوان گاز محافظ آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای مربوط به هر آزمایش در جدول شماره ۵ نشان داده شده است. پس از انجام آزمایش‌ها و به‌منظور حذف پاشش جرقه از روی سطح، صیقل کاری سطح توسط سنباده‌های ۴۰۰ و سپس ۱۲۰۰ درجه صورت گرفت سوراخ‌های ورودی و خروجی

برخورد با سطح قطعه کار افزایش می‌یابد که این امر نیز موجب افزایش مساحت منطقه متاثر از گرما و به پیروی از آن افزایش قطر سوراخ ورودی می‌شود.

جدول ۴- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و نرم‌افزاری سوپرآلیاز اینکونل 718

شماره آزمایش	تنظیمات			قطر ورودی			زاویه مخروطی		
	توان (W)	فرکانس (Hz)	موقعیت کانونی (mm)	آزمایشگاهی	شبه سازی	خطا (%)	آزمایشگاهی	شبه سازی	خطا (%)
۱	۴۰۴	۲۴۸	۱	۴۰۴	۴۸۰	-۹/۰۹	۳/۹	۴/۸۶	-۲۴/۶۱
۲	۴۲۵	۲۰۰	۱	۴۴۹	۴۲۰	۶/۹	۳/۸	۳/۴۳	۹/۷۳
۳	۳۸۳	۲۷۴	۱	۴۸۰	۴۶۰	۴/۱۶	۳/۴	۴	-۱۷/۶۴

بررسی عددی و تجربی فرآیند سوراخکاری لیزری ...

جدول ۵- طرح ماتریس مورد استفاده و نتایج بدست آمده

ردیف	ورودی						خروجی	
	فرکانس	توان	کانونی	موقعیت صفحه پالس	درصد زمان روشنی	قطر ورودی (µm)	زاویه مخروطی	
۱	۰	۰	۰	۲	۴۸۰	۷/۱۶		
۲	۲	۰	۰	۰	۴۹۰	۷/۷۳		
۳	۰	۰	۰	۰	۴۰۰	۶/۵۸		
۴	۱	-۱	۱	-۱	۴۱۰	۷/۱۶		
۵	۰	۲	۰	۰	۵۴۰	۷/۹۹		
۶	۱	-۱	-۱	۱	۴۰۰	۷/۱۶		
۷	۱	-۱	۱	۱	۴۴۰	۷/۷۳		
۸	-۱	۱	-۱	-۱	۴۶۰	۷/۴۴		
۹	-۱	-۱	-۱	۱	۳۹۰	۶/۵۸		
۱۰	۱	۱	-۱	-۱	۳۸۰	۴/۸۶		
۱۱	-۱	-۱	۱	۱	۴۲۰	۷/۴۴		
۱۲	۰	۰	-۲	۰	۳۴۰	۶/۳۰		
۱۳	-۱	۱	۱	-۱	۴۸۰	۸/۰۱		
۱۴	-۱	۱	۱	۱	۴۹۰	۸/۳۰		
۱۵	۱	-۱	-۱	-۱	۳۹۰	۶/۸۷		
۱۶	-۱	-۱	۱	-۱	۳۹۰	۶/۵۸		
۱۷	۱	۱	۱	-۱	۴۹۰	۸/۰۱		
۱۸	-۲	۰	۰	۰	۳۲۰	۶/۰۱		
۱۹	۰	۰	۲	۰	۴۶۰	۷/۴۴		
۲۰	-۱	۱	-۱	۱	۴۷۰	۷/۲۳		
۲۱	۰	۰	۰	-۲	۳۱۰	۶/۳۰		
۲۲	۱	۱	۱	۱	۶۲۰	۸/۳۰		
۲۳	-۱	-۱	-۱	-۱	۳۰۰	۵/۱۵		
۲۴	۱	۱	۱	-۱	۵۰۰	۸/۰۱		
۲۵	۰	-۲	۰	۰	۲۵۰	۴/۲۹		

۵- بررسی تاثیر پارامترها

همان‌طور که اشاره شد نتایج اندازه‌گیری قطر سوراخ ورودی و زاویه مخروطی سوراخ به‌عنوان پاسخ‌های طرح انتخاب شدند. در این تحلیلها از چند جمله‌ای مرتبه دو کامل استفاده شد. به منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر فرآیند سوراخ‌کاری لیزری و تحلیل نتایج، آنالیز واریانس به کمک نرم‌افزار Minitab صورت پذیرفت. در جدول ۵ طرح ماتریس مورد استفاده و نتایج به دست آمده نشان داده شده است.

۵-۱- قطر سوراخ ورودی

در جداول آنالیز واریانس، مقدار p-Value میزان حساسیت پارامتر خروجی به پارامترهای ورودی را بیان می‌کند که با کمتر شدن این مقدار میزان حساسیت بیشتر خواهد شد. پارامترهای ورودی که دارای مقدار P-Value کمتر از ۰/۰۵ داشته باشند روی پارامتر خروجی تاثیرگذار هستند. همچنین مقدار T-Value میزان تاثیر پارامترهای ورودی بر پارامترهای خروجی را بیان می‌کند که با افزایش این مقدار میزان تاثیر بیشتر خواهد شد. با توجه به مطالب عنوان شده، و جدول ۶، پارامترهای توان لیزر (LP)، فرکانس پالس لیزر (LF)، درصد زمان روشنی پالس (D) و موقعیت صفحه کانونی لیزر (FPP) به ترتیب بیشترین تاثیر را قطر سوراخ ورودی داشته‌اند و همگی جملات خطی مؤثر شناخته شدند. هیچ یک از جملات مرتبه دوم و تعامل اثرها مؤثر نمی‌باشند. معادله رگرسیون به دست آمده به صورت زیر می‌باشد:

$$D_{\text{Entrance}} = 428.80 + 27.92 LF + 59.58 LP + 24.58 FPP + 27.92 D \quad (11)$$

در شکل‌های ۶ و ۷ نمودارهای رویه پاسخ پارامترهای توان لیزر و فرکانس پالس لیزر و همچنین اثر تعاملی درصد زمان روشنی پالس و موقعیت صفحه کانونی لیزر، به ترتیب نشان داده شده‌است. با توجه به شکل ۶، با افزایش فرکانس و توان لیزر قطر سوراخ ورودی افزایش خواهد یافت. با افزایش این دو پارامتر، پالس‌های اعمالی بر سطح قطعه کار با فاصله زمانی کمتر و انرژی بیشتر به قطعه کار برخورد می‌کنند که موجب دریافت گرمای بیشتر توسط سطح و در نتیجه ذوب بیشتر ماده و افزایش قطر سوراخ ورودی خواهد شد. با توجه به شکل ۷ افزایش پارامترهای درصد زمان روشنی پالس لیزر و موقعیت صفحه کانونی لیزر موجب افزایش قطر سوراخ ورودی خواهد شد. با افزایش درصد زمان روشنی پالس مقدار حرارت جذب شده در هر پالس افزایش می‌یابد که افزایش قطر سوراخ ورودی را در پی خواهد داشت. همچنین با افزایش موقعیت صفحه کانونی لیزر، شعاع پرتو اعمالی در محل

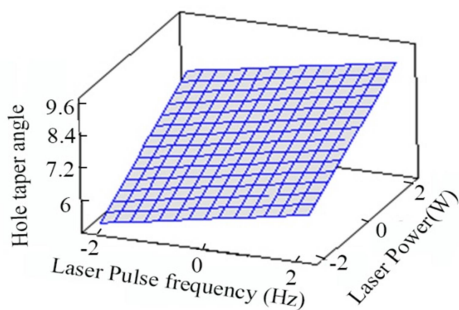
شدند معادله رگرسیون نهایی پاسخ زاویه مخروطی بر اساس پارامترهای مؤثر به صورت رابطه ۱۲ می باشد:

$$\text{Taper } (^{\circ}) = 7.111 + 0.332 \text{ LF} + 0.668 \text{ LP} + 0.307 \text{ FPP} \quad (12)$$

جدول ۷- آنالیز واریانس مدل اصلاح شده برای زاویه مخروطی

P-Value	F-Value	T-Value	Adj MS	Adj SS	Df	Source
۰/۰۰۰	۱۴/۴۵	---	۵/۲۰۵۷	۱۵/۶۱۷	۳	مدل
۰/۰۰۰	۱۴/۴۵	---	۵/۲۰۵۷	۱۵/۶۱۷	۳	خطی
۰/۰۱۳	۷/۳۳	۲/۷۱	۲/۶۴۰۱	۲/۶۴۰	۱	فرکانس لیزر
۰/۰۰۰	۲۹/۷۷	۵/۴۶	۱۰/۷۲۰	۱۰/۷۲۰	۱	توان لیزر
۰/۰۲۱	۶/۲۷	۲/۵۰	۲/۲۵۷۱	۲/۲۵۷	۱	موقعیت صفحه کانونی
			۰/۳۶۰۲	۷/۵۶۳	۲۱	خطا
				۲۳/۱۸۰	۲۴	جمع کلی
R-sq = ۶۳/۳۷% R-sq (adj) = ۶۲/۷۱%						

شکل ۸ اثر تعاملی پارامترهای توان و فرکانس لیزر بر زاویه مخروطی سوراخ را نشان می دهد. افزایش فرکانس لیزر، توان لیزر و موقعیت صفحه کانونی لیزر، موجب افزایش قطرهای ورودی و خروجی سوراخ خواهد شد. با توجه به بیشتر بودن میزان افزایش قطر سوراخ ورودی نسبت به قطر سوراخ خروجی، زاویه مخروطی سوراخ نیز افزایش می یابد. افزایش درصد زمان روشنایی پالس موجب افزایش قطرهای سوراخ های ورودی و خروجی به نسبت های مساوی شده که موجب می شود زاویه مخروطی سوراخ تغییر چندانی نداشته باشد. پس می توان از پارامتر درصد زمان روشنایی پالس، بعنوان یک پارامتر غیر مؤثر بر میزان زاویه مخروطی سوراخ یاد کرد.



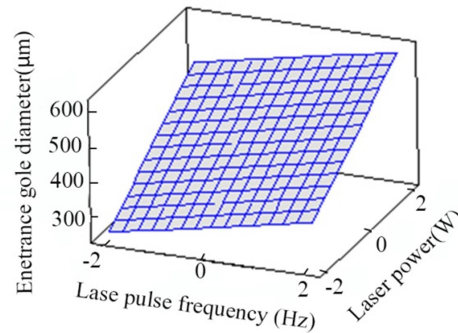
شکل ۸- نمودار رویه پاسخ مقدار زاویه مخروطی سوراخ بر حسب پارامترهای توان لیزر و فرکانس پالس لیزر

۶- بهینه سازی

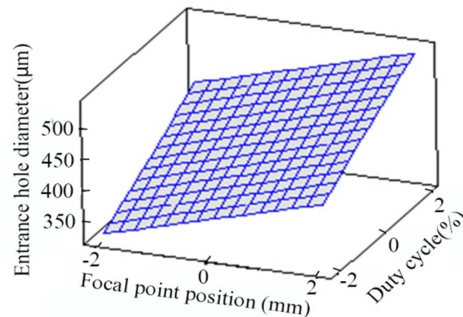
توجه همزمان به چندین پاسخ ابتدا شامل ایجاد یک مدل رویه پاسخ مناسب برای هر پاسخ و سپس تلاش برای پیدا کردن یک مجموعه شرایط کاری می باشد به گونه ای که تمام پاسخ ها را بهینه می کند یا حداقل آنها را در دامنه مورد نظر نگه می دارد. بهینه سازی

جدول ۶- آنالیز واریانس مدل اصلاح شده برای قطر سوراخ ورودی

P-Value	F-Value	T-Value	Adj MS	Adj SS	Df	Source
۰/۰۰۰	۲۳/۸۵	---	۳۴۲۷۹	۱۳۷۱۱۷	۴	مدل
۰/۰۰۰	۲۳/۸۵	---	۳۴۲۷۹	۱۳۷۱۱۷	۴	خطی
۰/۰۰۲	۱۳/۰۱	۳/۶۱	۱۸۷۰۴	۱۸۷۰۴	۱	فرکانس لیزر
۰/۰۰۰	۵۹/۲۸	۷/۷۰	۸۵۲۰۴	۸۵۲۰۴	۱	توان لیزر
۰/۰۰۵	۱۰/۰۹	۳/۱۸	۱۴۵۰۴	۱۴۵۰۴	۱	موقعیت صفحه کانونی
۰/۰۰۲	۱۳/۰۱	۳/۶۱	۱۸۷۰۴	۱۸۷۰۴	۱	درصد زمان روشنایی پالس
			۱۴۳۷	۲۸۷۴۷	۲۰	خطا
				۱۶۵۸۶۴	۲۴	جمع کلی
R-sq = ۸۲/۶۷% R-sq (adj) = ۷۹/۲۰%						



شکل ۶- نمودار رویه پاسخ قطر سوراخ ورودی - پارامترهای توان لیزر و فرکانس پالس لیزر



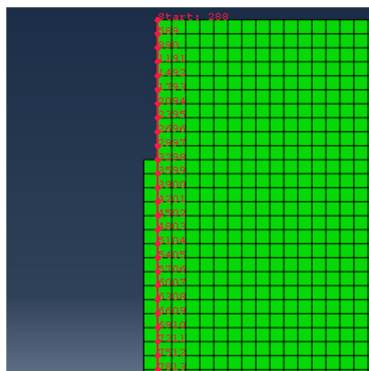
شکل ۷- نمودار رویه پاسخ قطر سوراخ ورودی بر حسب پارامترهای درصد زمان روشنایی پالس و موقعیت صفحه کانونی لیزر

۵-۲- زاویه مخروطی

جدول ۷ نشان دهنده آنالیز واریانس زاویه مخروطی است. در این تحلیل با در نظر گرفتن مقدار P-Value کمتر از ۰/۰۰۵، در میان جملات اصلی توان لیزر و تعامل اثر پارامترهای درصد زمان روشنایی پالس، موقعیت کانونی لیزر و توان مؤثر و بقیه پارامترها غیر مؤثر شناخته

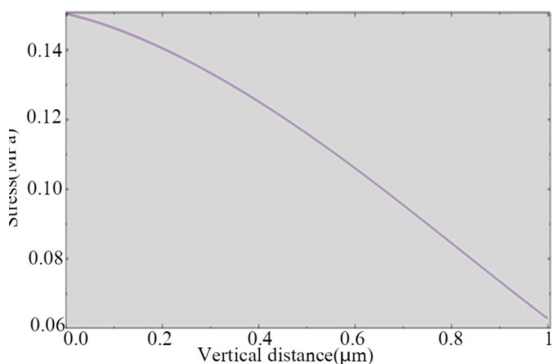
۷- تنش پسماند

در سوراخکاری لیزری نیز همانند سایر فرآیندهای صنعتی، به دلیل اعمال بارهای مختلف در طول فرآیند تنش‌هایی بعد اتمام عملیات در قطعه کار باقی می‌ماند. استفاده از قطعات سوراخکاری شده بوسیله لیزر در صنایع هوایی و فضایی، اهمیت تنش‌های پسماند را دو چندان می‌کند. جهت محاسبه تنش‌های پسماند این فرآیند، آزمایش نهایی که جهت محاسبه پارامترهای بهینه انجام شده بود، انتخاب شده است. برای محاسبه تنش‌های پسماند یک مسیر عمودی مطابق شکل ۹ در نظر گرفته شده است. مسیر عمودی روی مرز سوراخ می‌باشد.



شکل ۹- مسیر عمودی جهت محاسبه تنش‌های پسماند

در شکل ۱۰ نمودار تنش پسماند ناشی از فرآیند سوراخکاری لیزری پس از مدت زمان خنک‌کاری ۳۰ دقیقه نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقدار تنش پسماند ایجاد شده روی سطح ورق، دارای بیشترین مقدار (۰/۱۴ مگاپاسکال) می‌باشد و با افزایش فاصله از سطح قطعه کار، مقدار تنش پسماند کاهش می‌یابد. زیرا بیشترین مقدار جذب گرما توسط سطح قطعه کار صورت می‌گیرد در نتیجه تنش‌های مکانیکی ایجاد شده توسط شار گرمایی بیشتر خواهد بود.



شکل ۱۰- نمودار تنش پسماند روی مرز سوراخ

۸- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:
 (۱) با افزایش توان لیزر، فرکانس پالس لیزر، درصد زمان روشن پالس لیزر و موقعیت صفحه کانونی لیزر، قطر سوراخ ورودی و زاویه مخروطی سوراخ افزایش می‌یابند.

پارامترهای فرآیند در نرم افزار Minitab 17 انجام شد. در جدول ۸ محدوده و معیار پارامترهای ورودی و پاسخها جهت محاسبه مقدار بهینه آمده است. حالت بهینه به معنای بهترین حالت برای دو خروجی می‌باشد. دلیل عدم بحث بر روی بهینه‌سازی قطرخروجی، این بوده است که این پارامتر وابسته به قطر ورودی و مقدار زاویه مخروطی می‌باشد. به این معنا که هرگاه قطر ورودی و زاویه مخروطی در حالت بهینه باشند، قطر خروجی نیز در حالت بهینه هستند.

شبیه سازی در حالت بهینه پاسخ های قطر سوراخ ورودی و زاویه مخروطی انجام پذیرفت و نتایج آن با نتایج به دست آمده از نرم افزار بهینه سازی مقایسه گردید. در جدول ۹ مقادیر بهینه پیش‌بینی و شبیه‌سازی شده و همچنین درصد خطای موجود بین آن‌ها ارائه شده است.

جدول ۸- محدوده و معیار پارامترهای ورودی و پاسخها

ردیف	پارامترهای ورودی / پاسخها	هدف	کمترین مقدار	هدف	بیشترین مقدار
۱	فرکانس	در محدوده	۱۵۰	---	۵۵۰
۲	درصد زمان روشنی پالس	در محدوده	۳۰	---	۷۰
۳	موقعیت صفحه کانونی	در محدوده	-۰/۵	---	+۰/۵
۴	توان	در محدوده	۲۰۰	---	۵۰۰
۵	قطر ورودی	کمترین مقدار	۲۵۰	۲۵۰	۶۲۰
۶	زاویه مخروطی	کمترین مقدار	۴/۲۹	۴/۲۹	۸/۳

جدول ۹- مقایسه مقادیر پیشنهادی بهینه و شبیه‌سازی

ردیف	پارامترهای بهینه ورودی					
	فرکانس (Hz)	توان (W)	درصد زمان روشنی پالس (mm)	موقعیت صفحه کانونی	نوع پاسخ	قطر ورودی
۱	۱۵۰	۲۰۰	۳۰	-۰/۵	پیش بینی	۱۴۸/۸
	۱۵۰	۲۰۰	۳۰	-۰/۵	شبیه سازی	۱۷۰
	۱۵۰	۲۰۰	۳۰	-۰/۵	درصد خطا	-۱۴/۲۴

- [11] Mishra S., Yadava V., Modeling and optimization of laser beam percussion drilling of thin aluminum sheet. *Optics & Laser Technology*, Vol.48, pp. 461-474, 2013.
- [12] Ng G.K.L., Li L., The effect of laser peak power and pulse width on the hole geometry repeatability in laser percussion drilling. *Optics & Laser Technology*, Vol.33, No.6, pp. 393-402, 2001.
- [13] Schoonderbeek A., Biesheuvel C.A, Hofstra R.M., Boller K.J., Meijer J., The influence of the pulse length on the drilling of metals with an excimer laser. *Journal of Laser Applications*, Vol.16, No.2, pp. 85-91, 2004.
- [14] Tu J., Paleocrassas A.G., Reeves N., Rajule N., Experimental characterization of a micro-hole drilling process with short micro-second pulses by a CW single-mode fiber laser. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol.55, pp. 275-283, 2014.
- [15] Low D.K.Y., Li L., Corfe A.G., Effects of assist gas on the physical characteristics of spatter during laser percussion drilling of NIMONIC 263 alloy. *Applied Surface Science*, Vol. 154-155, pp. 689-695, 2000.
- [16] Ganesh R.K., Bowley W.W., Bellantone R.R., Hahn Y., A Model for Laser Hole Drilling in Metals. *Journal of Computational Physics*, Vol.125, pp. 161-176, 1996 .
- [17] Zhang Y., Shen Z., Ni X., Modeling and simulation on long pulse laser drilling processing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.73, pp. 429-437, 2014.
- [18] Yan Y., Ji L., Bao Y., Jiang Y., An experimental and numerical study on laser percussion drilling of thick-section alumina. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No.6, pp. 1257-1270, 2012.
- [19] Collins J., Gremaud P., A simple model for laser drilling, *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol.81, No.8, pp. 1541-1552, 2001.
- [20] Zhang Y., Li S., Chen G., Mazumder J., Experimental observation and simulation of keyhole dynamics during laser drilling. *Optics & Laser Technology*, Vol.48, pp. 405-414, 2013.
- [21] Moradi M., Salimi N., Ghoreishi M., Abdollahi H., Shamsborhan M., Parameter dependencies in laser hybrid arc welding by design of experiments and by a mass balance. *Journal of laser applications*, Vol. 26, No. 2, 022004, 2014.
- [22] Khorram A., Ghoreishi M., Soleymani Yazdi M.R. and Moradi M., Optimization of Bead Geometry in CO2 Laser Welding of Ti 6Al 4V Using Response Surface Methodology. *Scientific research (Engineering)*, Vo.3, pp.708-712, 2011.
- [23] Golchin E., Moradi M., Shamsaei S., Laser drilling simulation of glass by using finite element method and selecting the suitable Gaussian distribution, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 13, pp. 416-420, 2015.
- [24] Mills K.C., *Recommended values of thermo physical properties for commercial alloys*, Wood head Publishing Limited, Abington, 2002.

- (۲) پارامتر درصد زمان روشنی پالس بر مقدار زاویه مخروطی سوراخ غیر موثر شناخته شد.
- (۳) با انجام فرآیند بهینه سازی با استفاده از روش تابع مطلوبیت، فرکانس ۱۵۰ هرتز، توان ۲۰۰ وات، درصد زمان روشنی پالس ۳۰ و موقعیت صفحه کانونی ۵/۰- میلیمتر به عنوان تنظیمات بهینه فرآیند سوراخ کاری به کمک لیزر مشخص شدند.
- (۴) با توجه به مقدار خطای نرم افزار، می توان گفت که مدل ارائه شده به خوبی توانایی شبیه سازی فرآیند سوراخکاری لیزری را دارا می باشد. یکی از دلایل وجود اختلاف بین نتایج نرم افزار و آزمایشگاهی، وجود خطا در اندازه گیری قطرهای ورودی و خروجی در حالت آزمایشگاهی می باشد.
- (۵) مقدار تنش پسماند ایجاد شده روی سطح ورق، دارای بیشترین مقدار (۰/۱۴ مگاپاسکال) می باشد و با افزایش فاصله از سطح قطعه کار، مقدار تنش پسماند کاهش می یابد. زیرا بیشترین مقدار جذب گرما توسط سطح قطعه کار صورت می گیرد در نتیجه تنش های مکانیکی ایجاد شده توسط شار گرمایی بیشتر خواهد بود.

۹- مراجع

- [1] Van Dijk M.H., *Drilling of aero-engine components: Experiences from the shop floor*. New York, 1992.
- [2] Corfe A., Why a laser is better than EDM for drilling. *Production Engineer*, Vo.62, No.12, pp.13-14, 1983.
- [3] Fakhar Ebrahimi A., Ahmadi Kia H., Study the phenomenon of evaporation, melting and thermal conductivity in the process of laser Drilling. In *7th Students Conference on Mechanical Engineering*, Tehran, Iran, 1392.
- [4] Moradi M., Ghoreishi M., Influences of Laser Welding Parameters on the Geometric Profile of Ni-Base Superalloy Rene 80 Weld-Bead. *International Journal of advanced manufacturing Technology*, Vo.55, No.11, pp.205-215, 2011.
- [5] Moradi M., Ghoreishi M., Torkamany M.J., Modeling and Optimization of Nd:YAG Laser-TIG Hybrid Welding of Stainless Steel. *Journal of lasers in Engineering*, Vol.27, No. 3-4, pp. 211-230, 2014.
- [6] Moradi M., Mohazab pak A., Statistical modelling and optimization of laser percussion micro-drilling on Inconel 718 sheet using response surface methodology (RSM). *Journal of lasers in Engineering*, Article in press.
- [7] Abdollahi H., Mahdavinjad R., Ghambari M., Moradi M., Investigation of green properties of iron/jet-milled grey cast iron compacts by response surface method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 228, No. 4, pp. 493-503, 2014.
- [8] Moradi M., Mehrabi O., Azdast T., Benyounis K.Y., Enhancement of low power CO2 laser cutting process for injection molded polycarbonate, *Optics & Laser Technology*, Vol. 96, pp. 208-218, 2017.
- [9] Khorram A., Ghoreishi M., Laser Assisted Brazing of Inconel 718: The Effects of Process Parameters and Subsequent Optimization, *Journal of lasers in Engineering*, Vol. 31, pp. 333-350, 2015.
- [10] Moradi M., Mohazab Pak A., Khorram A., An Experimental Investigation of the Effects of Fiber Laser Percussion Drilling: Influence of Process Parameters. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 9. No.4, pp. 7-12, 2016.