

## مدل سازی تجربی فرآیند سوراخکاری ضربه ای لیزر یا قوت آلیاژ تیتانیوم (Ti6Al4V)

مجید قریشی<sup>1\*</sup>، امید روحانی رفتار<sup>2</sup>

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
\* تهران، صندوق پستی 1999143344، ghoreishi@kntu.ac.ir

### چکیده

سوراخکاری با استفاده از لیزر از جمله روش های نوین سوراخکاری است که مزایای بسیار آن، کاربرد این فرآیند را گسترش داده است. تحقیق حاضر به بررسی تجربی فرآیند سوراخکاری ضربه ای با استفاده از لیزر یا قوت بر روی آلیاژ Ti6Al4V با ضخامت های مختلف که پرکاربردترین آلیاژ تیتانیوم است می پردازد. در این مقاله اثر پارامترهای ورودی توان بیشینه، عرض پالس، فرکانس، نوع گاز کمکی، فشار گاز و ضخامت نمونه بر روی مهم ترین خروجی های هندسی سوراخ شامل قطر ورودی، قطر خروجی، زاویه مخروطی، میزان دایروی بودن ورودی و میزان دایروی بودن خروجی سوراخ مورد مطالعه قرار گرفته است. بر روی داده های حاصل از آزمایش، تحلیل های آماری انجام شده و پارامترهای مؤثر در هر خروجی ارائه گردیده است. برای انجام آزمایشات از روش "طراحی آزمایش ها" و برای مدل سازی از روش "رویه پاسخ" استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان می دهند که ضخامت ورق در تمام خروجی ها مؤثر است. پس از ضخامت، به ترتیب فرکانس و عرض پالس، توان بیشینه و نوع گاز کمکی مهم ترین پارامترهای مؤثر در خروجی های فرآیند می باشند. فشار گاز کمکی فقط در میزان دایروی بودن ورودی سوراخ مؤثر می باشد. در این آلیاژ برای دستیابی به سوراخی با ظرافت بالا توصیه می شود توان بیشینه، فرکانس و عرض پالس در سطح پایین و فشار گاز کمکی در سطح بالا قرار گیرد همچنین از گاز نیتروژن به عنوان گاز کمکی استفاده گردد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 21 بهمن 1396  
پذیرش: 27 اسفند 1396  
ارائه در سایت: 30 فروردین 1397

کلید واژگان:

سوراخکاری با لیزر  
آلیاژ تیتانیوم  
طراحی آزمایش ها  
روش رویه پاسخ

## Experimental Modelling of Nd:YAG Laser Percussion Drilling Process of Ti6Al4V Alloy

Majid Ghoreishi\*, Omid Rohani Raftar

Department of Mechanical Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran.  
\* P.O.B. 1999143344 Tehran, Iran, ghoreishi@kntu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 10 February 2018  
Accepted 18 March 2018  
Available Online 19 April 2018

### Keywords:

Laser percussion drilling  
Titanium alloy  
Design of Experiments  
Response Surface Methodology

### ABSTRACT

Laser percussion drilling is one of the advanced drilling processes that its numerous advantages have extended the applications of this process. This study focuses on experimental investigation of laser percussion drilling using Nd:YAG laser on titanium alloy Ti6Al4V sheets with various thickness which is widely used in industry. In this paper the effects of the input parameters peak power, pulse width, frequency, assist gas type, gas pressure and sheet thickness on the most important process outputs include hole entrance diameter, hole exit diameter, hole taper angle, hole entrance circularity and hole exit circularity were studied. Statistical analysis was employed to analyze the experimental data and significant parameters in each response are presented. For conducting the experiments "Design of Experiments" method and for modelling "Response Surface Methodology" were used. The results obtained show that sheet thickness affects all outputs. After that frequency and pulse width, peak power and assist gas type respectively are the most significant parameters influence process outputs. Gas pressure only affects the hole entrance circularity. For this alloy to achieve a hole with high quality, it is recommended to work at lower peak power and frequency, shorter pulse width and higher assist gas pressure with Nitrogen as assist gas.

### 1- مقدمه

استفاده از روش طراحی آزمایش ها<sup>۱</sup> اثر پارامترهای سرعت، توان لیزر و موقعیت صفحه کانونی<sup>۲</sup> را بر ابعاد هندسی و صافی سطح شیار مورد مطالعه قرار دادند. از نتایج این تحقیق می توان اشاره کرد که عرض پایین شیار با کاهش موقعیت کانونی و توان لیزر یا کاهش سرعت، کاهش می یابد. از دیگر کاربردهای فراوان لیزر در صنعت، در زمینه جوشکاری قطعات می باشد. در این زمینه نیز پژوهش های گسترده ای در جهت بهبود فرآیند، صورت پذیرفته است. به عنوان مثال در یک تحقیق اخیر از فرجی و همکاران

استفاده از لیزر برای فرآوری مواد<sup>۱</sup> در صنعت امروزه بسیار پرکاربرد شده است. انجام بسیار دقیق فرآیندهایی مانند برشکاری، جوشکاری، سوراخکاری، سخت کاری و ... تنها بخشی از عملیات های قابل انجام با لیزر می باشد. در به روزترین تحقیق های انجام شده در رابطه با کاربردهای صنعتی لیزر می توان به تحقیق مرادی و همکاران [1] در بهبود برشکاری لیزر دی اکسید کربن با توان پایین بر روی جنس پلی کربنات در سال 2017 اشاره کرد. آن ها با

<sup>2</sup> Design of Experiments (DOE)

<sup>3</sup> Focal Plane Position (FPP)

<sup>1</sup> Laser Material Processing

پالس‌هایی با انرژی بیشتر بوده و این موضوع باعث ایجاد آشفستگی در ورودی سوراخ می‌شود.

در مقاله‌ای دیگر قریشی و نجوانی در سال 2008 [13] به مدل سازی و بهینه سازی شش پارامتر ورودی با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک بر روی فولاد زنگ‌نزن با ضخامت 2.5mm پرداختند و تنظیمات بهینه برای دستیابی به سوراخی با کیفیت مورد نظر را ارائه دادند.

گل چین بیدگلی و همکاران [14] به شبیه سازی فرآیند سوراخکاری لیزری شیشه (GG17 glass) با استفاده از روش شبیه سازی اجزای محدود<sup>9</sup> و انتخاب توزیع گوسین مناسب با به کار بردن کدنویسی اختصاصی در نرم افزار آباکوس پرداختند. مهم ترین خروجی این شبیه سازی، دستیابی به عمق سوراخ است که با استفاده از آن می‌توان به سرعت سوراخکاری نیز دست یافت.

مرادی و همکاران در سال 2016 [15] به بررسی اثر پارامترهای فرآیند در سوراخکاری ضربه‌ای با لیزر فایبر بر روی سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل 718 به ضخامت 1mm پرداخته شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که فرکانس پالس تأثیر مستقیم بر قطر ورودی سوراخ دارد. همچنین افزایش چرخه کار<sup>10</sup> منجر به افزایش زاویه مخروطی و با افزایش توان لیزر قطر ورودی و زاویه مخروطی افزایش می‌یابد.

در یک پژوهش جدید از مرادی و گلچین [16] در سال 2017 به بررسی و بهینه سازی اثر پارامترهای فرآیند بر سوراخکاری ضربه‌ای لیزر با استفاده از روش شبیه سازی اجزای محدود پرداخته شده است. در این تحقیق، ماده مورد مطالعه سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل 718 به ضخامت 1mm بوده و پارامترهای ورودی شامل فرکانس، توان، موقعیت صفحه کانونی و چرخه کار می‌باشد. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش هر کدام از متغیرهای ورودی، قطر ورودی و خروجی، زاویه مخروطی و وزن ماده‌ی خارج شده از سوراخ افزایش می‌یابد.

در تحقیق حاضر به بررسی تجربی اثر پارامترهای لیزر بر مشخصات هندسی سوراخ‌های ایجاد شده به روش سوراخکاری ضربه‌ای با لیزر، بر روی پرکاربردترین آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V با ضخامت‌های مختلف پرداخته شده است. تأثیر همزمان پارامترهای کلیدی لیزر شامل توان بیشینه، فرکانس پالس، عرض پالس، نوع گاز کمکی، فشار گاز کمکی و ضخامت نمونه به همراه تعامل اثر<sup>11</sup> بین پارامترها بر مشخصات هندسی سوراخ‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. خروجی‌های فرآیند شامل قطر ورودی سوراخ، قطر خروجی، زاویه مخروطی، میزان دایروی بودن ورودی و میزان دایروی بودن خروجی سوراخ می‌باشد. ابتدا با استفاده از روش رویه پاسخ به مدل سازی فرآیند پرداخته شده سپس با استفاده از روش تحلیل واریانس<sup>12</sup> [17] تأثیر هر کدام از پارامترهای ورودی در خروجی مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای مؤثر مشخص گردیده‌اند.

## 2- روش انجام آزمایش‌ها

جنس ماده مورد آزمایش آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V با ضخامت‌های 1mm، 2mm و 3mm می‌باشد. برای انجام آزمایش‌ها دستگاه لیزر صنعتی Nd:YAG پالسی مدل IQL-20 با توان متوسط 400W و طول موج  $1.06\mu\text{m}$  مورد استفاده قرار گرفت. از گازهای نیتروژن و آرگون به عنوان

در سال 2017 [2] قابلیت جوشکاری ترکیبی قوسی-لیزری با جوشکاری لیزری تنها بر روی آلیاژ آلومینیوم AA2198 مورد مقایسه قرار گرفته است. آن‌ها با تغییر سرعت جوشکاری و جریان قوس در آزمایش‌های تجربی، اثر منبع حرارت را بر هندسه حوضچه مذاب بررسی کردند. از یافته‌های این پژوهش می‌توان ذکر کرد که در حالت جوشکاری لیزری تنها، حالت رسانش الکتریکی اتفاق افتاده و بخش سوراخ‌کلیدی حتی در سرعت‌های پایین نیز تشکیل نشده است و بنابراین عمق نفوذ بسیار پایین می‌باشد.

مطالعات در مورد سوراخکاری ضربه‌ای با پرتو لیزر توسط یلباس و همکاران در دهه 1980 و 1990 آغاز شد [3-5]. آن‌ها اثر پارامترهای لیزر مانند عرض پالس<sup>1</sup>، توان پالس<sup>2</sup>، تنظیمات کانونی<sup>3</sup> و ضخامت نمونه را روی مشخصات هندسی سوراخ‌های ایجاد شده مورد آزمایش تجربی قرار دادند و با رویکرد آماری و طرح‌های عملی<sup>4</sup> مدل‌های آماری حاکم بر این فرآیند را ارائه دادند.

بن‌دیپاده‌های و همکاران در سال 2002 [6] تأثیر فرکانس پالس و انرژی پالس بر مشخصات هندسی و خواص متالورژیکی سوراخ‌های ایجاد شده با لیزر را بر روی سوپرآلیاژ اینکونل 718 و آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V مورد بررسی قرار داده و دریافتند که کیفیت هندسی و متالورژیکی سوراخ‌ها به طور مهمی متأثر از جنس نمونه، ضخامت ورق، فرکانس پالس و انرژی پالس می‌باشد. در این تحقیق اثر پارامترهای توان بیشینه، عرض پالس، نوع و فشار گاز کمکی مورد مطالعه قرار نگرفته است و همچنین خروجی‌های، قطر خروجی سوراخ و میزان دایروی بودن آن بررسی نشده است.

در تحقیقی دیگر یلباس و علیم در سال 2004 [7] با استفاده از تحلیل آماری فرآیند سوراخکاری لیزری را مورد آزمون قرار داده و بازده حرارتی فرآیند را ارائه دادند. مطالعات آن‌ها نشان داد که فشار گاز کمکی، انرژی خروجی لیزر، فاصله کانونی عدسی<sup>5</sup> و ضخامت نمونه تأثیر زیادی در مشخصات هندسی سوراخ در فرآیند سوراخکاری لیزری دارند.

اسکندریبیک و همکاران در سال 2004 [8] سوراخکاری لیزری را با استفاده از لیزر اکسایمر بر روی ورق‌های از جنس نیکل و آلومینیوم انجام دادند. نتیجه مطالعات آن‌ها نشان داد که پالس‌های با عرض بیشتر سوراخ‌های با کیفیت بالاتری ایجاد می‌کند.

قریشی و همکاران در سال 2002 [9-11] با استفاده از طرح‌های مرکب مرکزی<sup>6</sup> و روش رویه پاسخ<sup>7</sup> به تحلیل تأثیر شش پارامتر ورودی و مقایسه اثر آن‌ها در فولاد نرم و فولاد زنگ نزن در سوراخکاری ضربه‌ای با لیزر پرداختند و تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند بر قطر ورودی، زاویه مخروطی و میزان دایروی بودن سوراخ‌ها را بیان کردند. آن‌ها نشان دادند که در توان بیشینه و عرض پالس پایین‌تر سوراخ‌های کوچکتری ایجاد کرده و در این شرایط استفاده از گاز کمکی در سطح بالا و صفحه کانونی منفی زاویه مخروطی سوراخ‌ها را کاهش می‌دهد.

قریشی در سال 2006 [12] بر روی تکرارپذیری<sup>8</sup> فرآیند سوراخکاری ضربه‌ای با لیزر بر روی فولاد نرم و فولاد زنگ‌نزن کار کرد. نتایج این مطالعه نشان داد که تکرارپذیری در سوراخ‌های با قطر کمتر بیشتر از سوراخ‌های با قطر بزرگتر است به دلیل این که برای ایجاد سوراخ‌های با قطر بیشتر نیاز به

<sup>1</sup> Pulse Width

<sup>2</sup> Pulse Power

<sup>3</sup> Focal Settings

<sup>4</sup> Factorial Design

<sup>5</sup> Focus Length of the Lens

<sup>6</sup> Central Composite Design (CCD)

<sup>7</sup> Response Surface Methodology (RSM)

<sup>8</sup> Repeatability

<sup>9</sup> Finite Element Method (FEM)

<sup>10</sup> Duty Cycle

<sup>11</sup> Interaction

<sup>12</sup> Analysis of Variance (ANOVA)

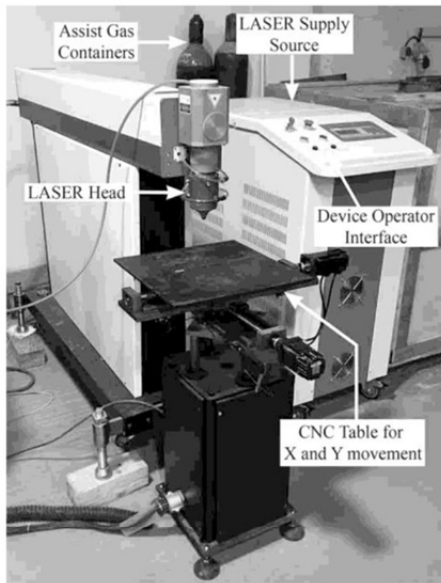


Fig. 1 Laser employed for performing the experiments with various components

شکل 1 دستگاه لیزر استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها به همراه اجزای مختلف

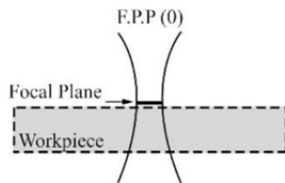


Fig. 2 Focal Plane Position (F.P.P) on the surface of the sheet

شکل 2 موقعیت صفحه کانونی روی سطح نمونه

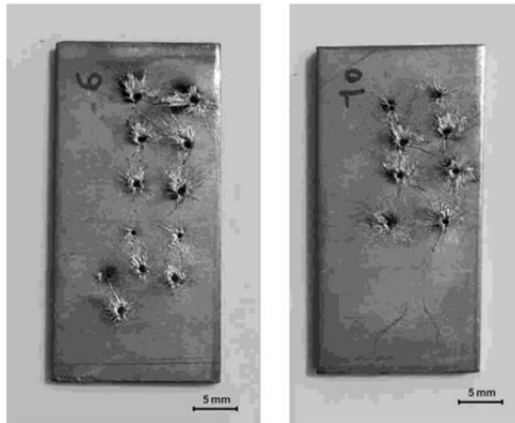


Fig. 3 Samples of the drilled sheets

شکل 3 نمونه‌هایی از ورق‌های سوراخکاری شده

جدول 1 متغیرهای مستقل ورودی و بازه تغییرات آن‌ها

Table 1 Independent input parameters and range of variation

متغیر	علامت	واحد	-1	0	+1
ضخامت ورق	A	mm	1	2	3
توان بیشینه	B	kW	3	4	5
فرکانس پالس	C	Hz	20	30	40
عرض پالس	D	ms	1.5	2.25	3
فشار گاز کمکی	E	bar	3	5	7

گازهای کمکی استفاده شده است. شکل 1 تصویری از دستگاه لیزر به همراه اجزای مختلف را نشان می‌دهد. در تمام آزمایش‌ها سوراخ‌های راه‌بر ایجاد گردید. به دلیل این که ترتیب انجام آزمایش‌ها و تکرار آن‌ها به صورت تصادفی بوده است، اثر متغیرهای غیرقابل کنترل و یا نوبت‌ها (مانند شرایط محیطی و شرایط دستگاه لیزر) که می‌توانند روی خروجی‌ها اثر بگذارند، فیلتر شده است [18].

## 1-2- طراحی آزمایش‌ها

با استفاده از روش رویه پاسخ ابتدا رابطه (1) برای هر یک از خروجی‌ها در نظر گرفته می‌شود [19]:

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

که در آن پارامترهای ورودی و  $\beta_i$  ها ضرایب مجهولی هستند که با انجام آزمایش‌های تجربی و تحلیل آن‌ها به دست می‌آیند. رابطه (1) شامل اثر اصلی متغیرها (توان اول)، توان دوم متغیرها و تعامل اثر پارامترها می‌باشد. برای برازش و یافتن ضرایب مجهول از طرح باکس-بنکن<sup>2</sup> استفاده شده است. در این طرح متغیرهای ورودی دارای سه سطح به فاصله‌های مساوی هستند. به دلیل این که یکی از متغیرهای مورد مطالعه، ضخامت ورق بوده و دسترسی به ورق با ضخامت‌های غیراستاندارد مشکل می‌باشد از این طرح استفاده شده است. از ویژگی‌های مهم این طرح تمرکز بر روی نقاط میانی در فضای طراحی آزمایش‌ها می‌باشد [19]. بر اساس طرح مذکور تعداد 46 عدد آزمایش انجام شده است. برای طراحی آزمایش‌ها و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار آماری دیزاین اکسپرت<sup>3</sup> استفاده شده است. سطوح و بازه تغییر هر یک از متغیرهای ورودی در جدول 1 آورده شده است.

با توجه به این که ضخامت نمونه در آزمایش‌ها متغیر است موقعیت صفحه کانونی روی سطح نمونه در نظر گرفته شده است، (شکل 2).

به دلیل این که نوع گاز کمکی متغیری کیفی می‌باشد برای بررسی اثر این متغیر، از بلوک‌بندی<sup>4</sup> روی نوع گاز کمکی استفاده شده است و آزمایش‌ها در دو بلوک طراحی شده‌اند.

## 2-2- اندازه‌گیری خروجی‌ها

برای اندازه‌گیری خروجی‌ها، از سطح بالا و زیر نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی<sup>5</sup> تصویربرداری شده است. شکل 3 نمونه‌ای از سوراخ‌های ایجاد شده روی ورق آلیاژ را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری قطر ورودی و خروجی سوراخ‌ها از شاخص قطر معادل<sup>6</sup> استفاده شده است. بدین صورت که مطابق رابطه (2)، قطر معادل برای ورودی و خروجی هر سوراخ، برابر با قطر دایره‌ای هم‌مساحت با آن در نظر گرفته شده است.

$$A = \pi \frac{D_{eq}^2}{4} \Rightarrow D_{eq} = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2)$$

با داشتن قطر ورودی، قطر خروجی و ضخامت ورق می‌توان مطابق شکل 42 و رابطه (3) زاویه مخروطی سوراخ را (برحسب درجه) محاسبه نمود.

$$\alpha(^{\circ}) = \left[ \tan^{-1} \left( \frac{D_{ent} - D_{exit}}{2t} \right) \right] \times \frac{360}{\pi} \quad (3)$$

<sup>1</sup> Through-hole

<sup>2</sup> Box-Behnken Design (BBD)

<sup>3</sup> Design Expert 10.0.7

<sup>4</sup> Blocking

<sup>5</sup> Scanning Electron Microscope (SEM)

<sup>6</sup> Equivalent Diameter

دوم و میزان دایروی بودن خروجی سوراخ نیاز به تغییر متغیر از نوع معکوس داشته است.

4- بحث

1-4- قطر ورودی سوراخ

در قطر ورودی سوراخ پارامترهای ضخامت ورق، توان بیشینه، فرکانس، عرض پالس و نوع گاز کمکی دارای تأثیر بسیار زیادی بر روی خروجی می باشند (جدول 2) و با توجه به شکل 7 با افزایش هر یک از این پارامترها قطر ورودی افزایش می یابد. با توجه به این که با کاهش توان بیشینه و عرض پالس، انرژی هر پالس کاهش می یابد و همچنین با کاهش فرکانس، انرژی کل دریافتی برای ایجاد سوراخ کاهش می یابد، مقدار ذوب و تبخیر ماده کاهش یافته در نتیجه سوراخ با قطر کمتر و ظریف تری ایجاد می گردد. با افزایش ضخامت ورق به دلیل این که ورودی سوراخ بیشتر در معرض سایش ناشی از خروج مواد قرار می گیرد قطر سوراخ افزایش می یابد. بنابراین برای ایجاد سوراخی با قطر ورودی کوچکتر توصیه می گردد که توان بیشینه، فرکانس، عرض پالس و ضخامت ورق در سطح پایین قرار داشته باشند. نتایج تحلیل آماری برای این خروجی نشان می دهد که در مواردی که هدف ایجاد سوراخ ظریف تری باشد گاز کمکی نیتروژن عملکرد بهتری نسبت به آرگون دارد. رابطه (4) معادله رگرسیون اصلاح شده حاکم بر قطر ورودی سوراخ را برحسب میکرون نشان می دهد.

$$D_{ent} = 541.03 + 49.70A + 42.09B + 53.74C + 107.89D \quad (4)$$

2-4- قطر خروجی سوراخ

در حالت کلی قطر خروجی کوچکتر از قطر ورودی می باشد. پارامترهای مؤثر در این خروجی ضخامت ورق (به همراه اثر مرتبه دوم)، توان بیشینه، فرکانس (به همراه اثر مرتبه دوم)، عرض پالس و نوع گاز کمکی می باشند (جدول 3). همچنین تعامل اثر بین ضخامت ورق و فشار گاز کمکی مؤثر در این خروجی می باشد. نمودار حساسیت فرآیند نشان می دهد که با افزایش ضخامت ورق، توان بیشینه و عرض پالس قطر خروجی افزایش می یابد، (شکل 8). فرکانس در نقطه های خاص بین سطح میانه و سطح بالا، سوراخ با بیشترین قطر خروجی را ایجاد می کند. شکل 9 نمودار دو بعدی<sup>8</sup> و منحنی رویه پاسخ<sup>9</sup> تعامل اثر ضخامت ورق و فشار گاز را نشان می دهد. وجود گاز کمکی با فشار بالا به خروج سریع تر مذاب از خروجی سوراخ کمک کرده و همچنین هنگامی

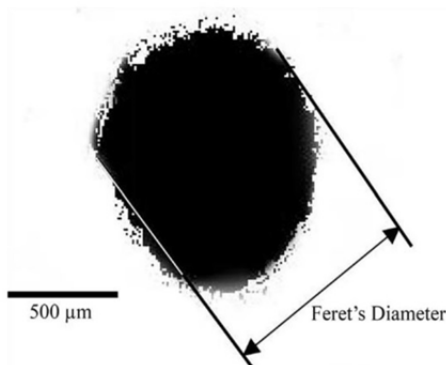


Fig. 5 Feret's diameter

شکل 5 قطر فرت

<sup>8</sup> Contour Plot  
<sup>9</sup> 3D Surface Plot

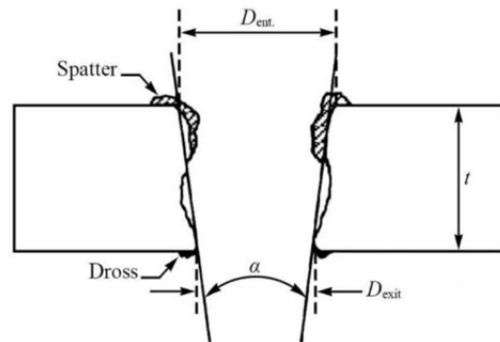


Fig. 4 Geometrical features of laser drilled hole

شکل 4 مشخصات هندسی سوراخ های ایجاد شده با پرتو لیزر

برای محاسبه میزان دایروی بودن ورودی و خروجی سوراخ ها از نسبت حداکثر به حداقل قطر فرت<sup>1</sup> استفاده شده است. قطر فرت عبارت است از فاصله بین دو صفحه موازی و مماس بر پروفیل سوراخ در یک امتداد مشخص، (شکل 5). قطر فرت در هر 3 درجه اندازه گیری شده است. بنابراین 60 قطر برای هر ورودی و خروجی سوراخ اندازه گیری شده و نسبت حداکثر به حداقل قطر فرت به عنوان شاخصی برای میزان دایروی بودن پروفیل سوراخ در نظر گرفته شده است. شکل 4 خروجی های قطر ورودی، قطر خروجی و زاویه مخروطی در سوراخ های ایجاد شده را نشان می دهد.

بعد از ایجاد سوراخ ها، پیش از اندازه گیری خروجی ها لازم است ابتدا پاشش مذاب<sup>2</sup> در اطراف ورودی سوراخ ها و قندیل های<sup>3</sup> ایجاد شده در خروجی سوراخ ها حذف گردند. برای این منظور سطح بالا و زیر نمونه ها سنگ زنی گردیده اند. برای تحلیل تصاویر از نرم افزار ایمج جی<sup>4</sup> استفاده شده است. شکل 6 ورودی و خروجی سوراخ ها را قبل (به همراه پاشش مذاب و قندیل ها) و بعد از تمیزکاری نشان می دهد.

3- مدل سازی آماری و تحلیل داده ها

با توجه به توضیحات بخش قبل پنج رابطه برای ارتباط بین متغیرهای مستقل ورودی و خروجی های فرآیند به دست می آید. مدل های ریاضی با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی چندگانه<sup>5</sup> ایجاد شده اند. مدل سازی برای هر خروجی براساس رابطه (1) یعنی مدل مرتبه دوم کامل شروع شده و اگر مشاهده شود که غیرخطی بودن مناسب نیست به مدل مرتبه اول یا خطی ساده می شود. ترم های مهم در هر مدل با استفاده از روش تحلیل واریانس و در نظر گرفتن بازه اطمینان  $\alpha = 0.05$  گزینش شده اند [20]. از روش حداقل مربعات برای محاسبه ضرایب رگرسیون رابطه (1) استفاده شده است [21].

جملات مهم برای هر خروجی در جداول (2) تا (6) نشان داده شده است. دقت مدل ها با تحلیل کامل باقی مانده ها<sup>6</sup> شامل بررسی پراکندگی نرمال باقی مانده ها، نقاط پرت، فاصله کوک و نقاط اهرمی سنجش گردیده است [21]. برای دستیابی به کمترین میزان باقی مانده در مدل سازی خروجی ها از تغییر متغیر توانی به روش باکس-کاکس<sup>7</sup> استفاده گردیده است [21]. براساس این بررسی خروجی زاویه مخروطی نیاز به تغییر متغیر از نوع ریشه

<sup>1</sup> Feret's Diameter  
<sup>2</sup> Spatter  
<sup>3</sup> Dross  
<sup>4</sup> ImageJ 1.44p (Image Analyzer Software)  
<sup>5</sup> Multiple Linear Regression Analysis  
<sup>6</sup> Residual Analysis  
<sup>7</sup> Box-Cox Power Transformation

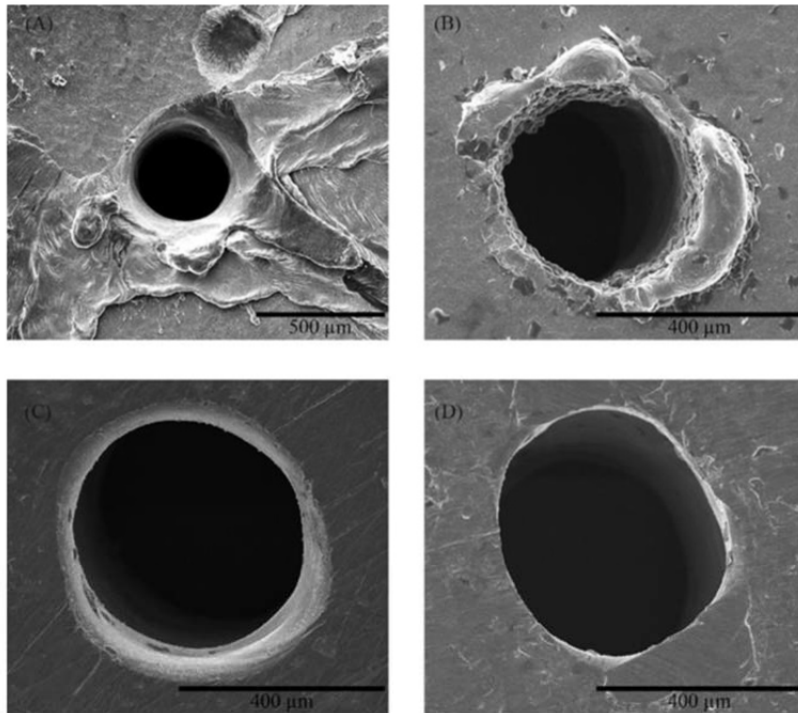


Fig.6 (A) Hole entrance and (B) hole exit with spatter and dross after drilling. (C) Hole entrance and (D) hole exit after removing spatter and dross

شکل 6 ورودی و خروجی سوراخها قبل (به همراه پاشش مذاب و قندیلها) و بعد از تمیزکاری

خروج مذاب از ورودی سوراخ، باعث ایجاد پدیده سایش دیواره می شود. همچنین توان پرتو لیزر در داخل ماده به دلیل واگرایی پرتو کاهش می یابد. به این دو دلیل اغلب سوراخ های ایجاد شده دارای زاویه مخروطی می باشند. با توجه به نتایج آنالیز واریانس، متغیرهای ضخامت ورق و عرض پالس بسیار مهم بوده و پس از آنها فرکانس و اثر مرتبه دوم ضخامت مؤثر در این خروجی می باشند (جدول 4).

با ثابت بودن انرژی پالس، کاهش عرض پالس باعث افزایش توان بیشینه شده و این باعث می شود پرتو انرژی بیشتری هنگام خروج از سوراخ داشته

که ضخامت ورق در سطح پایین قرار داشته باشد مقدار ماده مذاب خارج شده از خروجی نیز کاهش یافته و قطر خروجی کاهش می یابد. در این خروجی نیز مانند قطر ورودی، گاز کمکی نیتروژن باعث ایجاد سوراخ با قطر خروجی کمتر می گردد. رابطه (5) معادله رگرسیون اصلاح شده حاکم بر قطر خروجی سوراخ را برحسب میکرون نشان می دهد.

$$D_{exit} = +478.20 + 81.38A + 25.77B + 27.66C + 55.22D$$

$$D_{exit} = -2.32E + 49.03AE - 29.09A^2 - 31.93C^2 \quad (5)$$

### 3-4- زاویه مخروطی سوراخ

زاویه مخروطی وابسته به قطر ورودی، قطر خروجی و ضخامت ورق است.

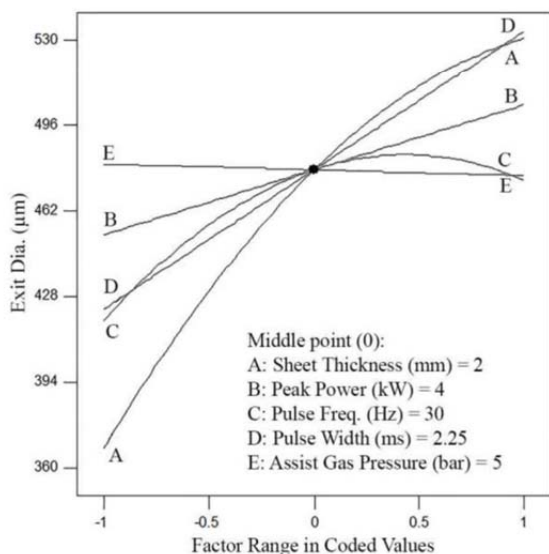


Fig. 8 Perturbation curve of parameters on the hole exit diameter

شکل 8 نمودار حساسیت قطر خروجی سوراخ نسبت به تغییر پارامترها

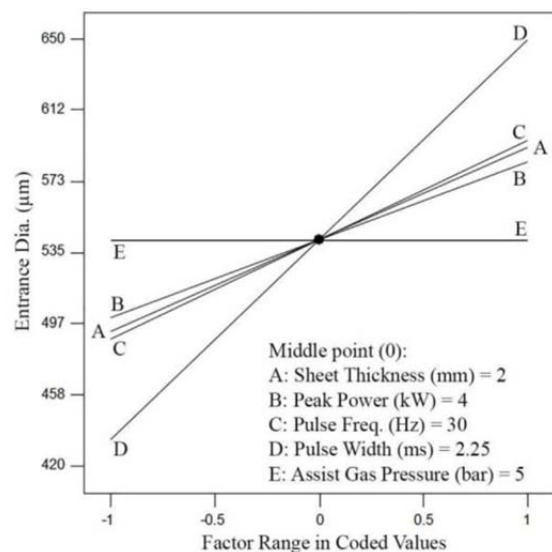


Fig. 7 Perturbation curve of parameters on the hole entrance diameter

شکل 7 نمودار حساسیت قطر ورودی سوراخ نسبت به تغییر پارامترها

<sup>1</sup> Wall Erosion

جدول 2 تحلیل واریانس اصلاح شده برای قطر ورودی سوراخ

Table 2 Modified ANOVA table of hole entrance diameter

متغیرها	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	شاخص F	شاخص P	اثر
نوع گاز کمکی	33638	1	33638	7.80	0.0079	بسیار مهم
ضخامت ورق	39525	1	39525	9.17	0.0043	بسیار مهم
توان بیشینه	28349	1	28349	6.58	0.0142	مهم
فرکانس	46200	1	46200	10.72	0.0022	بسیار مهم
عرض پالس	186249	1	186249	43.20	<0.0001	بسیار مهم
باقی مانده	172466	40	4312			
فقدان برازش	169045	36	4696	5.49	0.0538	نامؤثر
خطای خالص	3421	4	855			
کل	506428	45				

جدول 3 تحلیل واریانس اصلاح شده برای قطر خروجی سوراخ

Table 3 Modified ANOVA table of hole exit diameter

متغیرها	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	شاخص F	شاخص P	اثر
نوع گاز کمکی	27633	1	27633	20.62	<0.0001	بسیار مهم
ضخامت ورق	105971	1	105971	79.09	<0.0001	بسیار مهم
توان بیشینه	10628	1	10628	7.93	0.0078	بسیار مهم
فرکانس	12241	1	12241	9.14	0.0046	بسیار مهم
عرض پالس	48782	1	48782	36.41	<0.0001	بسیار مهم
ضخامت ورق <sup>2</sup>	10571	1	10571	6.44	0.0156	مهم
فرکانس <sup>2</sup>	12483	1	12483	7.76	0.0085	بسیار مهم
ضخامت×فشار	9617	1	9617	7.18	0.0111	مهم
باقی مانده	48238	36	1340			
فقدان برازش	46851	32	1464	4.22	0.084	نامؤثر
خطای خالص	1386	4	347			
کل	279755	45				

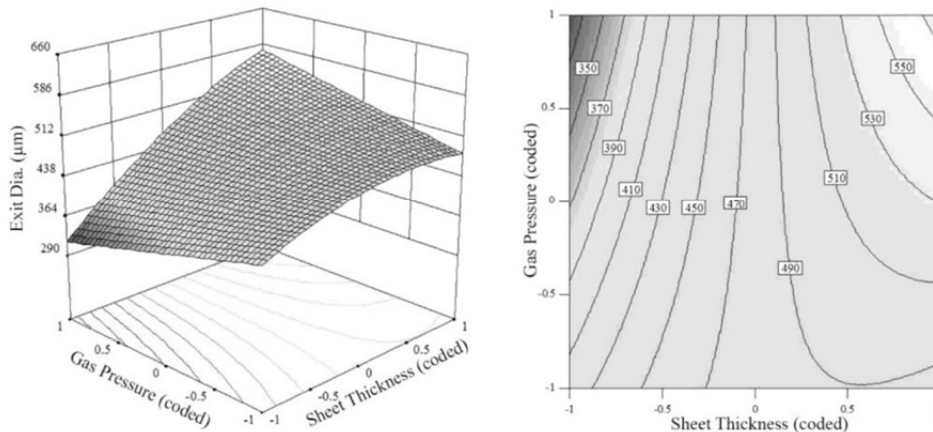


Fig.9 Contour and 3D Surface Plot of interaction between sheet thickness and gas pressure in hole exit diameter

شکل 9 نمودار دو بعدی و منحنی رویه پاسخ تعامل اثر ضخامت ورق و فشار گاز در قطر خروجی سوراخ

پالس در سطح پایین قرار داشته باشند (شکل 10). رابطه (6) معادله رگرسیون اصلاح شده حاکم بر زاویه مخروطی را برحسب درجه نشان می دهد.

$$\text{Taper}^{1/2} = +1.43 - 0.80A + 0.28C + 0.52D + 0.33A^2 \quad (6)$$

#### 4-4- میزان دایروی بودن ورودی سوراخ

نسبت حداکثر به حداقل قطر فرت اندازه گیری شده در ورودی سوراخ به عنوان شاخص برای اندازه گیری میزان دایروی بودن مورد استفاده قرار گرفته

باشد و مقدار مخروطی بودن کاهش یابد. همچنین مقدار فرکانس روی پاشش مذاب از ورودی سوراخ و ایجاد سایش در ورودی مؤثر بوده و بهتر است برای کاهش زاویه مخروطی فرکانس در سطح پایین قرار داشته باشد. نتایج این خروجی نشان می دهد که زاویه مخروطی با افزایش ضخامت ورق کاهش می یابد و این روند با رابطه (3) همخوانی دارد.

نمودار حساسیت فرآیند برای این خروجی نیز نشان می دهد که برای کاهش زاویه مخروطی باید ضخامت ورق در سطح بالا و فرکانس و عرض

جدول 4 تحلیل واریانس اصلاح شده برای زاویه مخروطی سوراخ

Table 4 Modified ANOVA table of hole taper angle

متغیرها	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F شاخص	P شاخص	اثر
ضخامت ورق	10.340	1	10.340	46.94	<0.0001	بسیار مهم
فرکانس	1.241	1	1.241	5.63	0.0225	مهم
عرض پالس	4.283	1	4.283	19.94	<0.0001	بسیار مهم
ضخامت ورق <sup>2</sup>	1.113	1	1.113	5.05	0.0302	مهم
باقی مانده	8.811	41	0.220			
فقدان برازش	8.488	36	0.236	3.65	0.0768	نامؤثر
خطای خالص	0.323	5	0.065			
کل	25.797	45				

توجه به جدول 6 و شکل 13 تنها پارامتر مؤثر در این خروجی ضخامت ورق می باشد و هیچ تعامل اثری بین پارامترها تأثیر در این خروجی ندارد. با توجه به این در بسیاری از تحقیق های انجام شده ضخامت ورق جزء عوامل مورد بررسی در فرآیند سوراخکاری ضربه ای با لیزر نبوده، احتمالاً به همین دلیل مطالعه ای روی میزان دایروی بودن خروجی سوراخ صورت نگرفته است. تأثیر این پارامتر را چنین می توان توجیه نمود که بیشتر مواد ذوب شده از ورودی سوراخ تخلیه شده و تنها بخشی از مواد از خروجی سوراخ خارج می شوند. در این حالت با افزایش ضخامت نمونه مقدار ماده خروجی از انتهای سوراخ نیز افزایش می یابد و باعث کاهش میزان دایروی بودن در خروجی سوراخ می شود. رابطه (8) معادله رگرسیون اصلاح شده حاکم بر میزان دایروی بودن خروجی سوراخ را نشان می دهد.

$$Cir_{exit}^{-1} = +0.88 - 0.068A \quad (8)$$

### 5- نتیجه گیری

در این مقاله تأثیر پارامترهای کلیدی سوراخکاری ضربه ای با پرتو لیزر شامل توان بیشینه، فرکانس، عرض پالس، فشار و نوع گاز کمکی همچنین ضخامت ورق روی مهم ترین خروجی های هندسی سوراخ های ایجاد شده روی آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V مورد تحقیق قرار گرفت. نتایج حاصل با استفاده از روش روبه پاسخ، طراحی آزمایش ها و تحلیل های آماری مورد ارزیابی قرار گرفت و

است. این نسبت همواره از 1 بزرگتر است و هر چه به آن نزدیک تر باشد نشان دهنده این است که پروفیل مورد بررسی به دایره نزدیک تر است. ضخامت ورق، فرکانس، عرض پالس و فشار گاز کمکی پارامترهای مؤثر در میزان دایروی بودن ورودی سوراخ می باشند (جدول 5). تنها تعامل اثر مؤثر در این خروجی تعامل اثر بین ضخامت ورق و عرض پالس می باشد. با توجه به شکل 11 برای دستیابی به بیشترین میزان دایروی بودن در ورودی سوراخ توصیه می گردد ضخامت ورق، فرکانس، عرض پالس و فشار گاز کمکی در سطح پایین قرار داشته باشند. شکل 12 نمودار دو بعدی و منحنی روبه پاسخ تعامل اثر ضخامت ورق و عرض پالس را نشان می دهد.

عرض پالس و فرکانس روی انرژی پالس و توان متوسط پرتو لیزر هنگام ورود به سطح نمونه مؤثر می باشند. با بالا رفتن انرژی پالس، ذوب و تبخیر ماده افزایش یافته و باعث ایجاد بی نظمی های بیشتری در ورودی سوراخ شده و از دایروی بودن ورودی سوراخ کاسته می شود. با افزایش ضخامت ورق مقدار ماده ذوب شده نیز افزایش یافته و به تبع آن پاشش در ورودی سوراخ افزایش می یابد. رابطه (7) معادله رگرسیون اصلاح شده حاکم بر میزان دایروی بودن ورودی سوراخ را نشان می دهد.

$$Cir_{ent} = +1.14 + 0.08A + 0.06C + 0.11D + 0.06E + 0.13AD \quad (7)$$

### 5-4- میزان دایروی بودن خروجی سوراخ

میزان دایروی بودن خروجی سوراخ در حالت کلی بهتر از ورودی می باشد. با

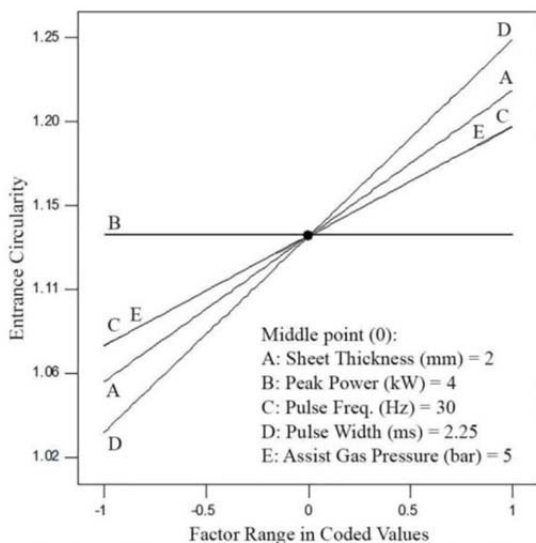


Fig. 11 Perturbation curve of parameters on the hole entrance circularity

شکل 11 نمودار حساسیت دایروی بودن ورودی سوراخ نسبت به تغییر پارامترها

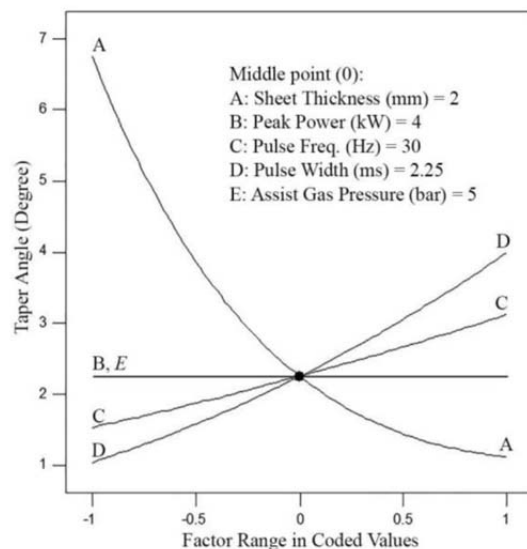


Fig. 10 Perturbation curve of parameters on the hole taper

شکل 10 حساسیت زاویه مخروطی سوراخ نسبت به تغییر پارامترها

جدول 5 تحلیل واریانس اصلاح شده برای دایروی بودن ورودی سوراخ

Table 5 Modified ANOVA table of hole entrance circularity

متغیرها	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	شاخص F	شاخص P	اثر
ضخامت ورق	0.102	1	0.102	10.24	0.0027	بسیار مهم
فرکانس	0.057	1	0.057	5.76	0.0213	مهم
عرض پالس	0.185	1	0.185	18.59	0.0001	بسیار مهم
فشار گاز	0.058	1	0.058	5.84	0.0204	مهم
ضخامت عرض	0.066	1	0.066	6.61	0.0141	مهم
باقی مانده	0.389	40	0.009	0.70	0.761	نامؤثر
فقدان برازش	0.323	35	0.009			
خطای خالص	0.066	5	0.0132			
کل	0.859	45				

جدول 6 تحلیل واریانس اصلاح شده برای دایروی بودن خروجی سوراخ

Table 6 Modified ANOVA table of hole exit circularity

متغیرها	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	شاخص F	شاخص P	اثر
ضخامت ورق	0.074	1	0.074	29.30	<0.0001	بسیار مهم
باقی مانده	0.112	44	0.003			
فقدان برازش	0.108	39	0.003	4.20	0.0578	نامؤثر
خطای خالص	0.002	5	0.001			
کل	0.186	45				

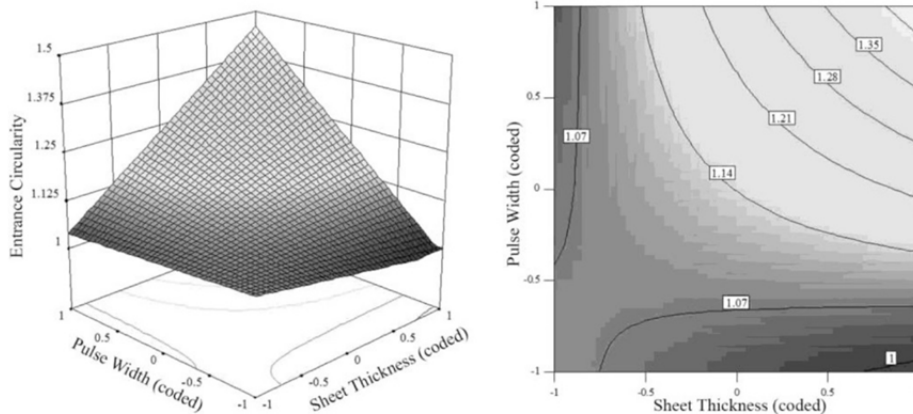


Fig.12 Contour and 3D Surface Plot of interaction between sheet thickness and pulse width in hole entrance circularity

شکل 12 نمودار دو بعدی و منحنی رویه پاسخ تعامل اثر ضخامت ورق و عرض پالس در میزان دایروی بودن ورودی سوراخ

نتایج به شرح ذیل استخراج گردید:

- 1- ضخامت ورق در تمامی خروجی های مورد بررسی جزء پارامترهای بسیار مهم شناخته شد و کیفیت تمامی خروجی ها متأثر از این پارامتر می باشد.
- 2- تنظیم پارامترهای ضخامت ورق، توان بیشینه، فرکانس و عرض پالس در سطح پایین سوراخی با قطر ورودی و خروجی کوچکتر ایجاد می کند. در قطر خروجی تعامل اثر ضخامت ورق با فشار گاز مهم بوده و توصیه می شود فشار گاز در سطح بالا قرار گیرد.
- 3- برای دستیابی به حداقل میزان زاویه مخروطی توصیه می شود ضخامت ورق در سطح بالا و فرکانس و عرض پالس در سطح پایین نگه داشته شوند. توان بیشینه و فشار گاز اثری بر زاویه مخروطی ندارند.
- 4- میزان دایروی بودن ورودی و خروجی سوراخ هر دو متأثر از ضخامت ورق هستند و برای ایجاد سوراخی با بیشترین میزان دایروی بودن در ورودی و خروجی بهتر است ضخامت ورق در سطح پایین قرار گیرد.

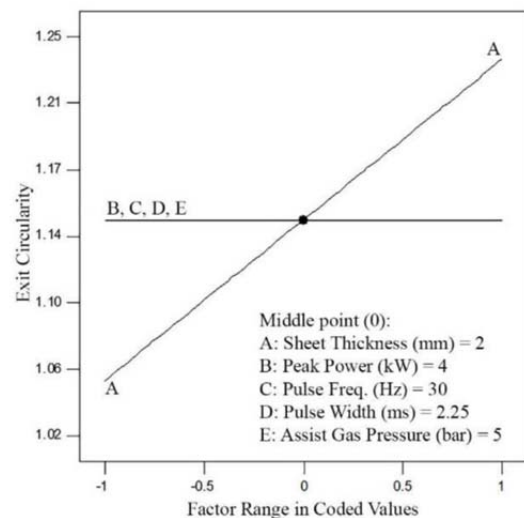


Fig. 13 Perturbation curve of parameters on the hole exit circularity

شکل 13 نمودار حساسیت دایروی بودن خروجی سوراخ نسبت به تغییر پارامترها



- laser, *Laser Applications*, Vol. 16, No. 2, pp. 85-91, 2004.
- [9] M. Ghoreishi, D. Low, L. Li, Comparative statistical analysis of hole taper and circularity in laser percussion drilling, *Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 9, pp. 985-995, 2002.
- [10] M. Ghoreishi, D. Low, L. Li, Statistical modelling of laser percussion drilling for hole taper and circularity control, *IMECHE Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 216, No. 3, pp. 307-319, 2002.
- [11] L. Li, D. Low, M. Ghoreishi, J. Crookall, Hole taper characterisation and control in laser percussion drilling, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 51, No. 1, pp. 153-156, 2002.
- [12] M. Ghoreishi, Statistical analysis of repeatability in laser percussion drilling, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 29, No. 1-2, pp. 70-78, 2006.
- [13] M. Ghoreishi, O. Nakhjavani, Optimisation of effective factors in geometrical specifications of laser percussion drilled holes, *Materials Processing Technology*, Vol. 196, No. 1, pp. 303-310, 2008.
- [14] E. Golchin Bidgoli, M. Moradi, S. Shamsaei, 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. (in Persian فارسی)
- [15] M. Moradi, A. Mohazab Pak, A. Khorram, An experimental investigation of the effects of fiber laser percussion drilling: influence of process parameters, *Advanced Design And Manufacturing Technology*, Vol. 9, No. 4, pp. 12-24, 2016.
- [16] M. Moradi, E. Golchin, Investigation on the effects of process parameters on laser percussion drilling using finite element methodology; statistical modelling and optimization, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 14, No. 3, pp. 464-484, 2016.
- [17] G. G. Vining, S. Kowalski, *Statistical Methods for Engineers*, Third Edition, pp. 380-411, Boston: Cengage Learning, 2010.
- [18] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, Eighth Edition, pp. 66-70, Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
- [19] R. H. Myers, D. C. Montgomery, C. M. Anderson-Cook, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, Third Edition, pp. 220-325, Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [20] D. C. Montgomery, G. C. Runger, N. F. Hubele, *Engineering Statistics*, Fifth Edition, pp. 164-170, Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [21] D. C. Montgomery, E. A. Peck, *Introduction to Linear Regression Analysis*, Fifth Edition, pp. 182-210, Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

همچنین برای دستیابی به بیشترین میزان دایروی بودن در ورودی سوراخ پارامترهای فرکانس، عرض پالس و فشار گاز در سطح پایین تنظیم گردند.

5- در حالت کلی با افزایش ضخامت ورق تنها میزان زاویه مخروطی بهبود می یابد.

6- در شرایطی که هدف ایجاد سوراخ با قطر ورودی و خروجی کوچکتر باشد، گاز کمکی نیتروژن مناسب تر از آرگون می باشد.

#### 6- مراجع

- [1] M. Moradi, O. Mehrabi, T. Azdast, K. Y. Benyounis, Enhancement of low power CO2 laser cutting process for injection molded polycarbonate, *Optics & Laser Technology*, Vol. 96, pp. 208-218, 2017.
- [2] A. H. Faraji, M. Moradi, M. Goodarzi, P. Colucci, C. Maletta, An investigation on capability of hybrid Nd:YAG laser-TIG welding technology for AA2198 Al-Li alloy, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 96, pp. 1-6, 2017.
- [3] B. S. Yilbas, Z. Yilbas, Parameters affecting hole geometry in laser drilling of nimonecs 75, *Proceedings of The Lasers in Motion for Industrial Applications Conference*, Los Angeles: SPIE, pp. 87-91, 1987.
- [4] B. S. Yilbas, Investigation into drilling speed during laser drilling of metals, *Optics & Laser Technology*, Vol. 20, No. 1, pp. 29-32, 1988.
- [5] B. S. Yilbas, Parametric study to improve laser hole drilling process, *Materials Processing Technology*, Vol. 70, No. 1, pp. 264-273, 1997.
- [6] S. Bandyopadhyay, J. Sundar, G. Sundararajan, S. Joshi, Geometrical features and metallurgical characteristics of Nd: YAG laser drilled holes in thick IN718 and Ti-6Al-4V sheets, *Materials Processing Technology*, Vol. 127, No. 1, pp. 83-95, 2002.
- [7] B. S. Yilbas, A. Aleem, Laser hole drilling quality and efficiency assessment, *IMECHE Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 218, No. 2, pp. 225-233, 2004.
- [8] A. Schoonderbeek, C. A. Biesheuvel, R. M. Hofstra, K. J. Boller, J. Meijer, The influence of the pulse length on the drilling of metals with an excimer