



بررسی پارامترهای برش لیزر بر کیفیت زبری سطح فولاد ضد زنگ ۳۰۴ با استفاده از روش سطح پاسخ

سید محمد ابطحی^۱

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید-دانشگاه صنعتی اراک

وحید آئینی

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید-دانشگاه صنعتی اراک

محمدحسین قاندرشرف

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک تبدیل انرژی-دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

چکیده

فولاد ضد زنگ یک ماده بسیار مهم در صنایع است که برش آن با روش های مرسوم دشوار است. با این حال، می توان آن را به راحتی با برش لیزری ماشین کاری کرد. برش لیزری یک فرآیند ماشینکاری حرارتی پیشرفته است که می تواند تقریباً هر ماده ای با هندسه پیچیده را با دقت بالا برش دهد. مطالعه حاضر بر روی بررسی برش لیزری فولاد ضد زنگ ۳۰۴ متمرکز است. تأثیر پارامترهای فرآیند، یعنی توان لیزر، سرعت برش و فشار گاز، بر کیفیت زبری سطح مواد برش لیزری فولاد ۳۰۴ از روش سطح پاسخ (RSM) مورد مطالعه قرار گرفته است. بهینه سازی پارامترهای فرآیند نیز با استفاده از رویکرد مطلوبیت برای به حداقل رساندن زبری سطح انجام می شود. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که داده ها با مدل رگرسیون مطابقت دارند و از دقت بسیار بالایی برخوردار است. کمترین زبری سطح در توان ۵ کیلو وات و فشار گاز ۸ بار و سرعت برش ۲۲۰ میلیمتر بر دقیقه بدست آمد.

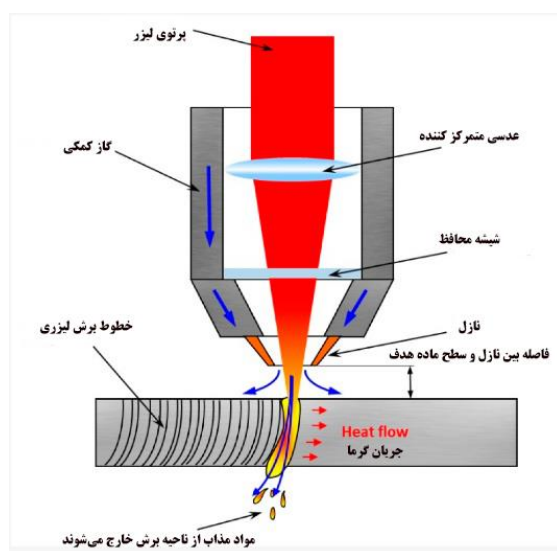
واژگان کلیدی: برش لیزری، روش سطح پاسخ، زبری سطح، فولاد ضد زنگ ۳۰۴

^۱ نویسنده مسئول



مقدمه

فولاد ضد زنگ ۳۰۴ به طور گسترده در صنایع و کاربردهای مختلف استفاده می شود (Akkurt, 2014). به دلیل خواص استحکام مکانیکی بالا، مقاومت در برابر خوردگی و شیمیایی، ماشین کاری فولاد ضد زنگ به صورت سنتی بسیار سخت است. ماشینکاری مواد سخت برش با فرآیندهای ماشینکاری سنتی، باعث کاهش سرعت حذف مواد، زبری سطح بالا و عمر کمتر ابزار می شود. برش لیزری یکی از فرآیندهای نوین ماشینکاری است که شامل پرتو لیزر به عنوان منبع حرارت است. در واقع این یک فرآیند غیر تماسی است که شامل هیچ نیروی برشی مکانیکی و سایش ابزار نمی شود (Kotadiya and Pandya, 2016). در این فرآیند، مواد به صورت موضعی توسط منبع لیزری مورد نظر ذوب شده و سپس مذاب با کمک گاز کمکی از محل برش ماده خارج می شود (Chryssoulouris, 2013). در عملیات برش فلز، از گاز کمکی اکسیژن یا نیتروژن استفاده می شود، شکل ۱ نحوه فرآیند برش کاری لیزر را نشان می دهد.



شکل ۱: نمایشی از فرآیند برش کاری لیزر (Genna et al, 2020)

گزارش شده است که مهم ترین پارامترهای فرآیندی که در برش لیزر بر کیفیت زبری سطح تأثیر می گذارند شامل توان، فشار گاز کمکی و سرعت برش لیزر هستند (Dubey and Yadava, 2008) (Dong-Gyu and Kyung-Won, 2009). چن (Chen, 1999). با پژوهش روی فولادهای زنگ نزن مشاهده کرد که مقدار زبری سطح با افزایش فشار گاز با نیتروژن و آرگون کاهش می یابد، اما با فشار هوای بیش از ۶ بار، زبری سطح ضعیفی به دست می آید. همچنین، سطح خوبی را در سرعت های برش بالاتر ایجاد کرد. غنی و نیوشی (Ghany and Newishy, 2005) به طور تجربی زبری سطح در فولاد ضد زنگ را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که افزایش سرعت و فرکانس زبری سطح برش را کاهش می دهد و زمانی که قدرت لیزر و فشار گاز بیشتر باشد افزایش می یابد. همچنین نیتروژن سطح بهتری نسبت به اکسیژن می دهد. التواهنی و همکاران (Eltawahni et al, 2010) اثر تأثیرگذار پارامترهای فرآیند را بر روی پهنای برش و زبری سطح در برش لیزر فولاد ضد زنگ مورد مطالعه قرار داد. مشخص شد که زبری با افزایش سرعت برش و قدرت لیزر افزایش می یابد. بنابراین، بهینه سازی فرآیند برش ضروری است. کوتادیا و همکاران (Kotadiya and Pandya, 2016) به بررسی پارامترهای فرآیند بر زبری سطح فولاد ۳۰۴ با برش



لیزر پرداخته و تاثیر هر پارامتر به پاسخ خروجی با استفاده از آنالیز واریانس مورد بررسی قرار گرفت و با انجام روش سطح پاسخ، اثر هر پارامتر را مطالعه و بهینه سازی انجام شد.

طراحی آزمایش

برای طراحی آزمایش ها از روش سطح پاسخ (RSM) استفاده شد. در روش سطح پاسخ دو روش وجود دارد که آزمایش ها را مشخص می نماید. یکی از روش ها روش طرح مرکب مرکزی (CCD) و دیگری طرح باکس-بنکن (BBD) است. در اینجا از روش باکس-بنکن (BBD) با سطح های مشخص شده پارامترهای جدول ۱ برای دوسطح و در مجموع ۱۷ آزمایش همانند جدول ۲ انجام شده است. پنج نقطه مرکزی هم به جهت بررسی خطای سیستم در نظر گرفته می شود. از نرم افزار Minitab 21.4 جهت طراحی آزمایش ها استفاده گردید.

جدول ۱: فاکتورهای برش لیزر و سطح های آزمایش [۱۰]

علامت نمایش	فاکتورهای برش	سطح ۱	سطح ۲
P	قدرت لیزر (کیلو وات)	5	5.5
Gas	فشار گاز (بار)	8	12
SPEEd	سرعت برش (میلیمتر بر دقیقه)	210	230

جدول ۲: نتایج و جدول آزمایش ها برای زبری سطح (Jadhav and Kumar, 2019)

شماره آزمایش	قدرت لیزر (kw)	فشار گاز (bar)	سرعت برش (mm/min)	زبری سطح (micron)
1	5	8	220	3.647
2	5.5	8	220	5.356
3	5	12	220	6.349
4	5.5	12	220	5.655
5	5	10	210	5.232
6	5.5	10	210	7.216
7	5	10	230	6.182
8	5.5	10	230	6.562
9	5.25	8	210	6.566
10	5.25	12	210	6.242
11	5.25	8	230	5.563
12	5.25	12	230	6.853
13	5.25	10	220	5.787
14	5.25	10	220	6.484
15	5.25	10	220	6.266
16	5.25	10	220	6.513
17	5.25	10	220	6.322

آزمایش های تجربی

آزمایش ها با دستگاه لیزر فایبر Bystronic دارای طول موج ۱۰۶ میکرو متر و حداکثر توان خروجی لیزر ۶ کیلو وات است. فاصله کانونی لنز مورد استفاده ۱۲۷ میلی متر و قطر نازل ۲ میلی متر در طول آزمایش ثابت نگه داشته شد از فولاد ضد زنگ ۳۰۴ به ضخامت ۲۰ میلی متر به عنوان ماده قطعه کار استفاده شده است. برای آزمایش های تجربی، ۱۷ نمونه در ابعاد ۳۰×۳۰ میلی متر برش داده شد. ترکیب شیمیایی فولاد ۳۰۴ معمولاً حاوی ۱۷.۵-۱۹.۵٪ کروم، ۸-۱۰.۵٪ نیکل، ۲٪ منگنز، ۱٪ سیلیکون، ۰.۱۱٪ نیتروژن، ۰.۰۷٪ کربن، ۰.۰۵٪ فسفر و ۰.۰۳٪ گوگرد است. زبری سطح با استفاده از دستگاه زبری سنج (Mitutoyo Surf test SJ 210) اندازه گیری شده است. در این فرآیند، مقادیر زبری سطح در سه ناحیه مختلف، یعنی بالا، وسط و پایین اندازه گیری می شود و مقادیر میانگین زبری سطح برای تجزیه و تحلیل استفاده می شود.

نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل تأثیر پارامترهای فرآیند بر زبری سطح اندازه های بدست آمده در آزمایش های طراحی شده انجام شد. با اعمال آنالیز واریانس (ANOVA) بر روی داده های تجربی، تأثیر هر پارامتر و کفایت داده ها به دست می آید. خلاصه ای از تجزیه و تحلیل آنالیز واریانس در جدول ۳ نشان داده شده است. در این جدول مقادیر ستون P-VAL، درصد سهم هر عامل و تعاملات مختلف را نشان می دهد. مشخص شده است که توان لیزر و فشار گاز پارامترهای مهمی هستند. دقت اصلاح شده مدل (R-sq) برابر با ۸۹.۱۸٪ است که دقت بسیار خوبی است.

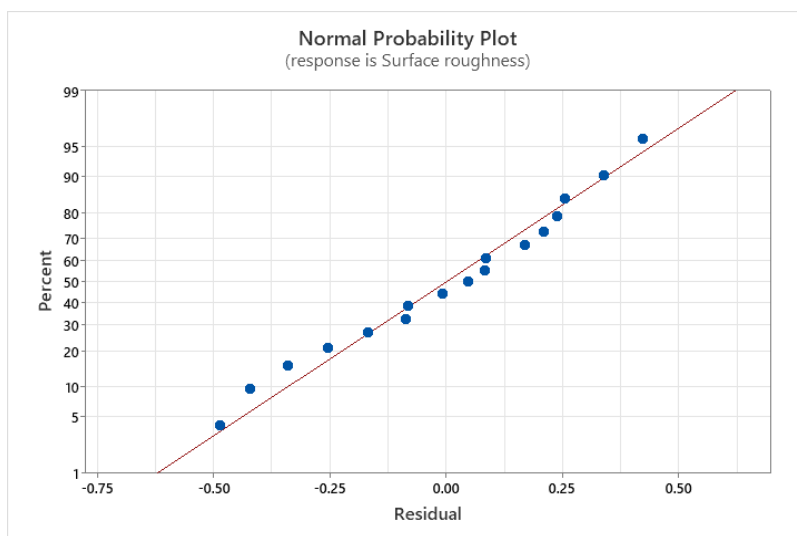
جدول ۳ : آنالیز واریانس (ANOVA)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	9.4421	1.04912	6.41	0.011
Linear	3	3.3955	1.13183	6.92	0.017
P (kw)	1	1.4272	1.42721	8.72	0.021
Gas (bar)	1	1.9671	1.96714	12.03	0.010
SPEED (mm/min)	1	0.0012	0.00115	0.01	0.935
Square	3	3.3086	1.10286	6.74	0.018
P (kw)*P (kw)	1	1.1181	1.11815	6.84	0.035
Gas (bar)*Gas (bar)	1	1.0837	1.08370	6.62	0.037
SPEED (mm/min)*SPEED (mm/min)	1	1.2229	1.22291	7.48	0.029
2-Way Interaction	3	2.7381	0.91269	5.58	0.028
P (kw)*Gas (bar)	1	1.4436	1.44360	8.83	0.021
P (kw)*SPEED (mm/min)	1	0.6432	0.64320	3.93	0.088
Gas (bar)*SPEED (mm/min)	1	0.6512	0.65125	3.98	0.086
Error	7	1.1451	0.16358		
Lack-of-Fit	3	0.8043	0.26810	3.15	0.149
Pure Error	4	0.3408	0.08519		
Total	16	10.5872			
R-sq=89.18%		R-sq(adj)= 75.28%			

معادله رگرسیون اصلاح شده زبری سطح بر حسب پارامترها مد نظر به صورت رابطه (۱) است:

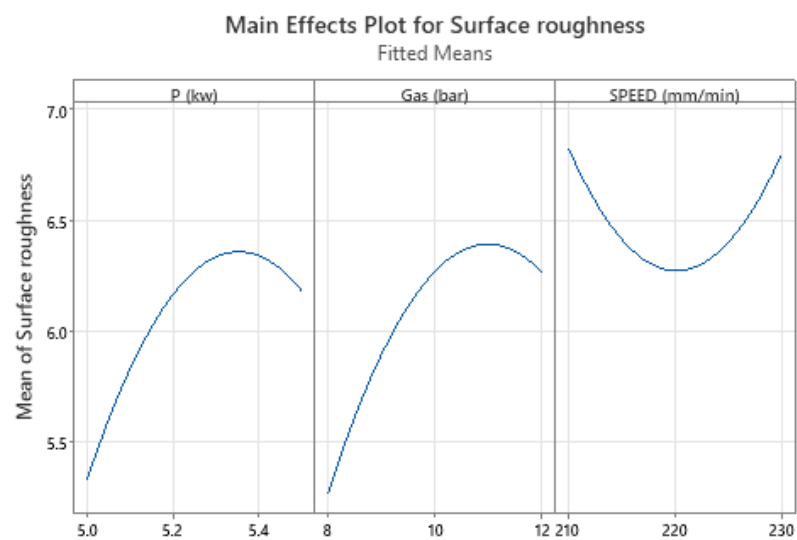
$$\begin{aligned} \text{Surface roughness} = & -47 + 100.3 P \text{ (kw)} + 9.09 \text{ Gas (bar)} - 2.37 \text{ SPEED (mm/min)} \\ & - 8.25 P \text{ (kw)} * P \text{ (kw)} - 0.1268 \text{ Gas (bar)} * \text{Gas (bar)} \\ & + 0.00539 \text{ SPEED (mm/min)} * \text{SPEED (mm/min)} - 1.201 P \text{ (kw)} * \text{Gas (bar)} \end{aligned} \quad (1)$$

رابطه بین مقادیر واقعی و پیش بینی شده آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است. مشاهده می شود که مدل توسعه یافته و نتایج پیش بینی شده مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد.



شکل ۲: نمودار تعیین صحت آماری زبری سطح

اثر تکی سه پارامتر، توان لیزر و فشار گاز و سرعت برش، بر زبری سطح در شکل ۳ نشان داده شده است. افزایش توان لیزر و فشار گاز باعث افزایش زبری سطح در یک نقطه خاص می شود و سپس کمی کاهش می یابد. از این نتایج، اشاره می شود که فشار گاز باعث تغییر زبری سطح در مقطع برش می شود. فشار گاز بیشتر باعث می شود که مواد مذاب با سرعت بسیار بیشتری خارج شوند و در نتیجه زبری افزایش یابد. هنگامی که قدرت لیزر افزایش می یابد، زبری سطح مواد نیز افزایش می یابد. قدرت بیشتر باعث می شود مواد بیشتری ذوب شده و چگالی توان بالاتر باعث ذوب شدن بیشتر از حد و ناهمواری سطح فلز خواهد شد.



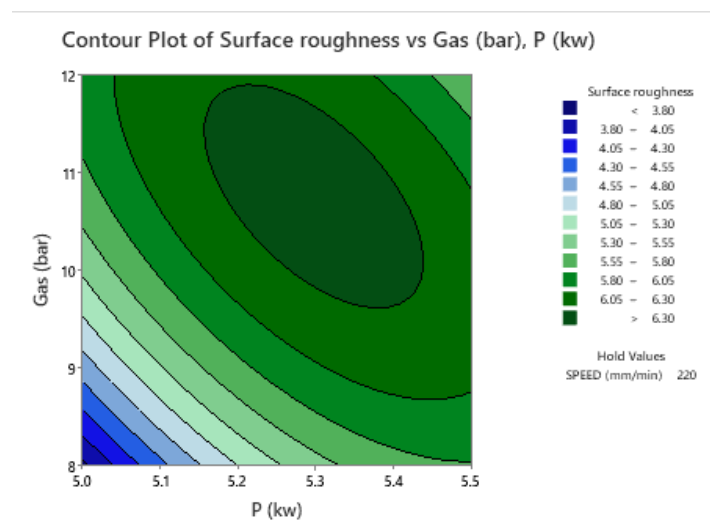
شکل ۳: اثر تکی پارامترهای برش لیزر

طبق شکل ۳ مشاهده می گردد که افزایش توان لیزر باعث افزایش ناهمواری و زبری سطح و سپس کاهش آن می شود و اثر مشابهی با افزایش فشار گاز نیز مشاهده می شود. با افزایش توان لیزر و فشار گاز، زبری سطح افزایش می یابد و سپس سطح اشباع به دست می آید. با افزایش سرعت برش، زبری سطح در ابتدا کاهش پیدا کرده و با سرعت برش بالاتر به طور قابل



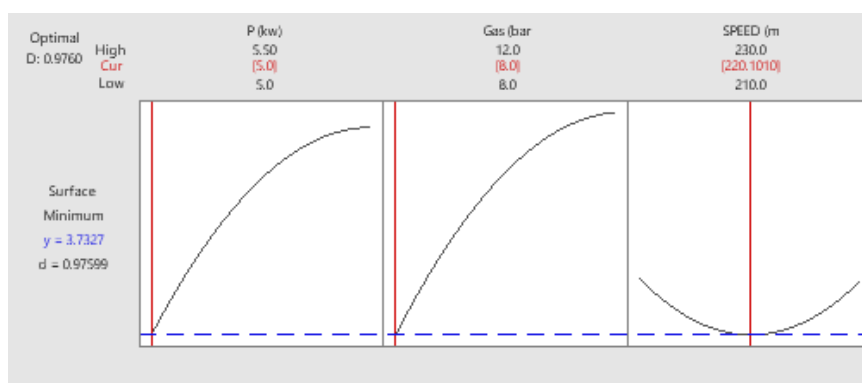
توجهی زبری سطح را افزایش می دهد. افزایش سرعت از یک حد مشخص بالاتر و عدم توازن با توان لیزر و فشار گاز کمکی می تواند باعث برش ناقص هم گردد.

طبق شکل ۴ طرح کانتور برهم کنش پارامترهای توان و فشار گاز برای کمترین زبری سطح در کمترین مقدار تنظیمی آنها می باشد و با افزایش مقدار توان و فشار گاز، زبری سطح افزایش می یابد.



شکل ۴: طرح کانتور پارامترهای موثر توان و گاز کمکی

در شکل ۵ مشاهده می شود، در کمترین مقدار توان و کمترین مقدار فشار گاز و میانه سرعت برش لیزر بهینه ترین زبری سطح بدست خواهد آمد. بهینه سازی پارامترهای فرآیند بر اساس رویکرد مطلوبیت به منظور به حداقل رساندن زبری سطح انجام شد و طبق مقادیر پارامترهای توان ۵ کیلو وات و فشار گاز ۸ بار و سرعت برش ۲۲۰ میلی متر بر دقیقه به کیفیت سطح ۳.۷۳ میکرون بدست می آید.



شکل ۵: نمودارهای بهینه سازی زبری سطح در برش لیزر

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، کار تجربی مربوط به مطالعه برش لیزری مواد فولاد ضد زنگ ۳۰۴ شرح داده شده است. برای بهینه سازی پارامترهای فرآیند از روش طرح باکس-بنکن (BBD) مبتنی بر روش سطح پاسخ استفاده شد و تأثیر پارامترهای فرآیند بر زبری سطح فولاد ضد زنگ ۳۰۴ بررسی گردید. مشخص شد که توان لیزر و فشار گاز پارامترهای مهمی هستند. با افزایش



قدرت لیزر و فشار گاز، زبری افزایش می یابد. با افزایش زیاد سرعت برش، زبری سطح افزایش می یابد. مشخص شد که پیش‌بینی‌های مدل مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارند. با استفاده از روش تحلیل رگرسیون، مقادیر بهینه پارامترهای فرآیند برای حداقل زبری سطح پیدا می‌شود. مقدار بهینه برای زبری ۳.۷۳ میکرون در توان لیزر ۵ کیلووات، فشار گاز ۸ بار و سرعت برش ۲۲۰ میلی‌متر بر دقیقه به‌دست می‌آید.

مراجع و منابع

- Akkurt, A. (2009). Surface properties of the cut face obtained by different cutting methods from AISI 304 stainless steel materials.
- Kotadiya, D. J., & Pandya, D. H. (2016). Parametric analysis of laser machining with response surface method on SS-304. *Procedia Technology*, 23, 376-382.
- Chrysosolouris, G. (2013). *Laser machining: theory and practice*. Springer Science & Business Media.
- Dubey, A. K., & Yadava, V. (2008). Multi-objective optimisation of laser beam cutting process. *Optics & Laser Technology*, 40(3), 562-570.
- Dong-Gyu, A. H. N., & Kyung-Won, B. Y. U. N. (2009). Influence of cutting parameters on surface characteristics of cut section in cutting of Inconel 718 sheet using CW Nd: YAG laser. *Transactions of nonferrous metals society of China*, 19, s32-s39.
- Chen, S. L. (1999). The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO2 laser cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 88(1-3), 57-66.
- Ghany, K. A., & Newishy, M. (2005). Cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd: YAG laser. *Journal of Materials Processing Technology*, 168(3), 438-447.
- Eltawahni, H. A., Olabi, A. G., & Benyounis, K. Y. (2010). Effect of process parameters and optimization of CO2 laser cutting of ultra high-performance polyethylene. *Materials & Design*, 31(8), 4029-4038.
- Genna, S., Menna, E., Rubino, G., & Tagliaferri, V. (2020). Experimental investigation of industrial laser cutting: The effect of the material selection and the process parameters on the kerf quality. *Applied sciences*, 10(14), 4956.
- Jadhav, A., & Kumar, S. (2019). Laser cutting of AISI 304 material: an experimental investigation on surface roughness. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 5(3), 429-437.

Analyzing the Effect of Laser Cutting Parameters on the Surface Roughness Quality of 304 Stainless Steel Using Response Surface Methodology

Seyed Mohammad Abtahi²

Vahid aeeni

**PhD student of mechanical engineering
Manufacturing and production, Arak University of
Technology**

**PhD student of mechanical engineering
Manufacturing and production, Arak University of
Technology**

Mohammad Hussein Qaedsharaf

**PhD student of mechanical engineering energy conversion malek-e-ashtar university of technology
Isfahan**

1-1-

1-2- Abstract

Stainless steel is a material of paramount importance in a wide spectrum of industries. Its cutting using conventional methods presents significant challenges. However, laser cutting offers a viable solution for machining this material with remarkable ease. Laser cutting is an advanced thermal machining process that boasts the capability of cutting virtually any material with intricate geometries and exceptional precision. The present study delves into the investigation of laser cutting of 304 stainless steel. The influence of process parameters, namely laser power, cutting speed, and gas pressure, on the surface roughness quality of laser cutting 304 steel was meticulously examined using the response surface methodology (RSM). To minimize surface roughness, an optimization of process parameters was also conducted employing the desirability approach. The outcomes of the analysis of variance (ANOVA) confirmed that the data exhibited excellent agreement with the regression model and demonstrated high accuracy. The minimal surface roughness was attained at a laser power of 5 kW, a gas pressure of 8 bar, and a cutting speed of 220 mm/min.

Keywords: Laser Cutting, Response Surface Methodology (RSM), Surface Roughness, ۱-۳
Stainless Steel 304.

² Corresponding Author