Mechanics of Advanced and Smart Materials Journal 2(2) (2022) 202 - 219



Mechanics of Advanced and Smart **Materials Journal** http://masm.araku.ac.ir



### Analysis of the sensitivity of the parameters affecting the rate of removal, surface roughness and width in the wire electrical discharge machining

Fardin Shabani<sup>a</sup>, Siavash Fathollahi Dehkordi<sup>b\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran <sup>b</sup> Department of Mechanic Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz, Ahwaz, 6135783151, Iran

**Original Article** 



### **KEYWORDS**

Wire Electrical Discharge Machining Material Removal Rate Roughness Surface The width of the gap Sensitivity analysis

Citation: Shabani F, Dehkordi S F. Analysis of the sensitivity of the parameters affecting the rate of removal, surface roughness and width in the wire electrical discharge machining. Mechanics of Advanced and Smart Materials. 2022;2(2): 202-219.

https://10.52547/masm.2.2.202.

### ABSTRACT

One of the most attractive modern machining methods is electrical discharge machining, which was introduced in the late 1960s. Electric discharge machining with wires has a number of uses, including high accuracy machining of all conductive materials such as metals, metal alloys, graphite, and ceramics, as well as aerospace, automotive, and other industries. In order to increase the rate and reduce surface roughness and gap width, optimal cutting parameters play a crucial role in selecting output parameters. In this study, input parameters (discharge, pulse duration, pulse frequency, wire speed, wire tension, and dielectric current velocity) were compared to output variables (cutting rate, surface filter, and width). The sensitivity analysis shows that pulse duration parameters, wire speed, and discharge flow are most effective parameters for cutting rate, and pulse duration parameters, dielectric rate, and discharge flow are most effective parameters for surface roughness, as well as pulse duration, wire speed, and discharge current for gap width. Pulse duration with 72%, wire speed with 14%, and discharge current with 10% has the greatest impact on the chip removal rate.

#### **Extended Abstract**

#### 1. Introduction

eramics, composites, polymers, and super-alloys are important engineering materials in modern production, especially in aircraft manufacturing, automobile manufacturing, cutting tools, and molding. Accurate design requirements are one of the basic challenges in their manufacturing industries. For example, precise machining, drilling at micron or nanometer levels, machining at non-circular holes, and so on. In this paper, our focus is on the wire electrical discharge machining (WEDM) process [1]. The electric discharge machining (EDM) with wire was introduced in the late 1960s, this is one of the most attractive modern machining methods in the last 60 years and has countless advantages to offer [2]. A WEDM is a non-traditional form of EDM in which a conductive wire's electrode moves continuously. Discrete sparks are fired between the work and a thin copper wire electrode (0.25-0.50 mm diameter), separated by a thin film of dielectric liquid (deionized water). It is continuously fed to the machining area to remove the eroded particles, and the hardness of the workpiece does not affect cutting. Workpiece shape and accuracy are controlled numerically by the movement of the wire [3].

..... \* Corresponding author. Tel.: 09124891075 E-mail address: sfdehkordi@scu.ac.ir DOI: https://10.52547/masm.2.2.202. Received: July 18, 2022; Received in revised form: August 3, 2022; Accepted: August 16, 2022. 2022 Published by Arak University Press. All rights reserved.



#### 203 Fardin Shabani, Siavash Fathollahi Dehkordi

In order to meet the needs of newer materials and more complex shapes, EDM with wire is increasingly being used [4]. EDM process with wire has applications in all types of conductive materials, including metals, alloys, graphite, and ceramics of any hardness, used in aerospace, automotive, etc. [5]. As a result of electrical discharge between a wire and a workpiece, it is absolutely crucial to maintain the wire in a fixed position against the object. The wire is typically held in place by pin guides at the top and bottom of the workpiece. Wires are usually thrown away after use. To increase the accuracy of the work, some problem-solving points should be considered. Due to its thermal device technique, this process has relatively low machining speeds compared to other non-traditional machining processes such as laser. Process performance is affected by discharge current, pulse duration, wire feeding speed, and dielectric current speed [6].

The process of EDM with wire is affected by a variety of factors, which have been the subject of extensive research by various researchers and are discussed in this section. To determine the optimal control parameters in WEDM for machining performance measures such as chipping rate and final surface smoothness, Rajurkar and Boena used a factorial design method. EDM with wire machining was significantly influenced by discharge current, duration of pulses, and pulse frequency according to this study [7]. Rajurkar and Wang analyzed the wire tearing phenomena with a thermal model and experimental research, their results indicated that the chip removal rate in the WEDM process initially increases with the reduction of the pulse time. However, in a very short pulse off time, the gap becomes unstable, which leads to a decrease in the machining rate [8]. Toussaint et al investigated the effects of cutting parameters on the size of the erosion hole (diameter and depth) on the wire electrode. Inspection of the wire electrode opening is very important to understand the wire breakage, gap width size and workpiece surface roughness. The larger size of the openings on the wire increases the risk of wire breakage and also leads to poor surface quality and low machining accuracy. The results show that the increase in the duration of the pulse, open-circuit voltage and wire feeding speed increases the gap, while increasing the dielectric washing pressure decreases the gap size [9]. Singh and Garg, in a study on WEDM, concluded that the chip removal rate increases directly with increasing pulse on time and peak current, while it decreases with increasing pulse off time and open circuit voltage. Wire feeding and wire tension are neutral parameters [4]. Shah et al investigated the effect of workpiece thickness on the chip removal rate, it was expected that this factor is important, while according to this research, the thickness of the workpiece is not an important factor for the chip removal rate [10]. Liao et al conducted an experimental study to determine the change of machining components in machining rate, slot width and surface roughness. In their study, although an attempt was made to determine the importance of machining factors in the chip removal rate, the level of importance of gap width and surface roughness was not introduced [11].

Generally, machine tool manufacturers use machining component tables to set up machining components. This process relies on the experience of the operators. In practice, it is very difficult to use the optimal functions of a machine due to the existence of adjustable machining parameters. With the aim of simplification, I have a simple method Reliable based on statistical tests designed to investigate the effects of various process components on chipping rate, surface roughness and gap width, it determines the optimal settings of the process. In this article, the data obtained from laboratory operations with randomly selected factor combinations have been collected. A quadratic model for identifying the process is derived in order to establish an approximate relationship between the various components of the process as well as the response variables. The presented mathematical models have been used to generate data according to the Taguchi model. Finally, the gray-based Taguchi technique is adopted to evaluate the optimal process environment [12].

Complex environmental models are controlled by a large number of parameters. It is almost impossible to accurately estimate the values of all these parameters. The results of the sensitivity analysis allow the selection of parameters to be included in a calibration method, but can also help identify model processes. In addition, sensitivity analysis can provide important information about the use and meaning of model parameters. The use of the Sobol method makes it possible to calculate the first-order effects and other effects, the linear model is not assumed, and the sensitivity values are presented numerically. In the Sobol method, the coefficients are determined in such a way that the method can be used for all distributions with any range [13]. By using Sobol's statistical sensitivity analysis method, which has the advantage of extracting a small amount of the effect of parameters compared to other methods, the effect of input parameters on the force output parameter in the bone drilling process has been studied and the effect of each input parameter has been carefully studied [14]. Also, using the Sobol sensitivity analysis method, which is based on variance, eleven influencing factors on the optimization of the hydroforming process loading path have been investigated [15].

#### 2. Modeling

In this article, modeling consists of two parts, which are:

- 1) Designing experiments using the response surface method along with the Taguchi Methods
- 2) Checking Sobol's sensitivity analysis

Mechanics of Advanced and Smart Materials Journal 2(2) (2022) 202 - 219

Analysis of the sensitivity of the parameters affecting the rate of removal, surface roughness and width in the wire ... 204

#### 2.1. Designing experiments using the Taguchi Methods

In the analysis of the Taguchi Methods, the experimental data, that is, the measured characteristics of the quality features, are first normalized from zero to one. This process is known as gray relational emergence. In the next step, based on the normal experimental data, the coefficient of the gray relation is calculated to show the correlation between the intended and actual test data. Then the gray degree is generally determined by the average coefficient of the gray relation related to the selected answers. The overall performance distinctive of the multiple response process depends on the degree of the calculated gray relation. This approach transforms a multiple response process optimization problem into a single response optimization. The optimal parameter combination is then evaluated, which leads to the highest degree of gray relation. Setting the optimal factor to maximize the degree of overall gray relation is done by Taguchi method.

The input and constant parameters used in the present study are listed in Table 1. The above parameters have been selected through research and experience. Different settings of discharge current, pulse duration, pulse frequency, wire speed, wire tension and dielectric flow rate used in the experiments are shown in Table 2.

Table 1. Setting Parameters			
Symbol			
$X_1$			
$X_2$			
$X_3$			
X4			
$X_5$			
X <sub>6</sub>			

#### Table 2. Control coefficients and their limits (experiment scope)

		Level		
	unit	1	2	3
Control coefficients	Amp	16.00	24.00	32.00
Discharge current	secµ	3.20	6.40	12.80
Pulse duration	KHz	40.00	50.00	60.00
Pulse frequency	m/min	7.60	8.60	9.20
Wire speed	1000.00	1000.00	1100.00	1200.00
Wire tension	1.20	1.20	1.30	1.40

The response function indicating each of the six responses can be expressed as described in equation (1):

$$Y = f(X_1 . X_2 . X_3 . X_4 . X_5 . X_6)$$

where Y is the reaction and X is the agent.

#### 2.2. Checking Sobol's sensitivity analysis

In this section, the sensitivity analysis graphs and the effects of each of the input variables in Table 1 on the output factors (chipping rate, slot width, and surface roughness) have been analyzed using the Sobol sensitivity analysis method and analysis in Simlab software. has been A sensitivity analysis method that is popular in many fields is the variance-based Sobol method. The output variance of the model (V) is the sum of the variances of each term analyzed in the form of equation (2).

$$V(Y) = \sum_{i=1}^{n} V_i + \sum_{i \le j \le n}^{n} V_{ij} + \dots + V_{1,2,\dots,n}$$

#### 3. Simulation

In this section, the statistical relationships and sensitivity analysis that are stated in the modeling section have been investigated using Simlab's sensitivity analysis and simulation software.

Figure 1 shows the effect of the input parameters on the chip removal rate. The results of the Sobel sensitivity analysis show that pulse duration with 72%, wire speed with 14% and discharge current with 10% had the greatest effect on the chip removal rate.

Figure 2 quantitatively shows the effect of input parameters on surface roughness, which results are obtained from Sobol sensitivity analysis. According to Figure 2, it can be concluded that pulse duration with 87%, dielectric rate with 7% and discharge current with 4% had the greatest effect on surface roughness.

Figure 3 quantitatively shows the effect of input parameters on gap width, which results are obtained from Sobol sensitivity analysis. According to Figure 3, it can be concluded that pulse duration with 47%, wire speed with 24% and discharge current with 20% had the greatest effect on the gap width.

Mechanics of Advanced and Smart Materials Journal 2(2) (2022) 202 - 219

## Archive of SID.ir

(2)

(1)

205 Fardin Shabani, Siavash Fathollahi Dehkordi



Figure 3. Quantitative comparison of the effect of input parameters on gap width

#### 4. Conclusion

In this paper, using the Sobol sensitivity analysis method, which has high accuracy compared to other sensitivity analysis methods, for the first time, the effect of six input parameters including discharge current, pulse duration, pulse frequency, wire speed, Wire tension and dielectric rate have been studied on chipping rate, surface roughness and gap width in the EDM process with wire. The investigations carried out in this research show that: parameters of pulse duration, wire speed and discharge current are the most effective parameters on the chip removal rate in the investigated period. The parameters of pulse frequency, wire tension and dielectric rate have a negligible effect on the chip removal rate. Pulse duration parameters, dielectric rate and discharge current are the most effective parameters on surface roughness, discharge current parameters, pulse frequency and wire tension can be considered the least effective parameters on surface roughness. The parameters of pulse frequency, wire speed and discharge current are the most effective parameters on the gap width, the parameters of pulse frequency, wire tension and dielectric rate and effective parameters on the gap width, the parameters of pulse frequency, wire tension and discharge current are the most effective parameters on the gap width, the parameters of pulse frequency, wire tension and dielectric rate can be considered the least effective parameters on the gap width. Pulse duration with 72%, wire speed with 14% and discharge current with 10% have the most effect on the chip removal rate.

Mechanics of Advanced and Smart Materials Journal 2(2) (2022) 202 - 219

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند، دوره ۲، شماره ۲، سال ۱۴۰۱، صفحات ۲۰۲ تا ۲۱۹



مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند



# آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر نرخ براده برداری، زبری سطح و عرض شکاف در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی

فردین شعبانی<sup>انی</sup>، سیاوش فتحالهی دهکردی<sup>ب\*</sup>

<sup>الف</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، ایران، ایران، آیران، <u>fardin.shabani98@gmail.com</u> <u>-</u>استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، <u>sfdehkordi@scu.ac.ir</u>

چکیدہ	واژگان کلیدی
یکی از جذابترین روشهای ماشینکاری مدرن، ماشینکاری تخلیه الکتریکی است که در اواخر دهه ۱۹۶۰	ماشیــنکـاری تخلیه
معرفی شد. ماشین کاری تخلیه الکتریکی با سیم کاربردهای مختلفی دارد، ازجمله ماشین کاری با دقت بالا در	الکتریکی با سیم نرخ براده برداری
تمام مواد رسانا مانند فلزات، آلیاژهای فلزی، گرافیت و سرامیک و همچنین صنایع هوافضا، خودروسازی و	زبری سطح
سایر صنایع. بهمنظور افزایش سرعت و کاهش زبری سطح و عرض شکاف، پارامترهای برش بهینه نقش مهمی	عرض شکاف آنالیز حساسیت
در انتخـاب پـارامترهای خروجی دارند. در این مطالعه، پارامترهای ورودی (دبی، مدت پالس، فرکانس پالس،	تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۷
سرعت سیم، کشش سیم و سرعت جریان دیالکتریک) با متغیرهای خروجی (نرخ برش، فیلتر سطح و عرض)	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۱۲
مقایسـه شـد. نتایج بهدستآمده از تحلیل حساسیت بیانگر این است که پارامترهای مدتزمان پالس، سرعت	تاریخ بذبوش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵
سیم و جریان تخلیه اثرگذارترین پارامترها بر نرخ براده برداری و پارامترهای مدتزمان پالس، نرخ دیالکتریک	
و جریان تخلیه اثرگذارترین پارامترها بر زبری سـطح میباشـند، همچنین مدتزمان پالس، سـرعت سـیم و	
جریان تخلیه اثرگذارترین پارامترها بر عرض شـکاف میباشـند. مدتزمان پالس با ۷۲ درصد، سرعت سیم با	
۱۴ درصد و جریان تخلیه با ۱۰ درصد بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری داشتهاند.	

### ۱– مقدمه

مواد مهندسی پیشرفته مانند سرامیکها، کامپوزیتها، پلیمرها، و سوپر آلیاژها نقش مهمی در تولید بهروز بهویژه در صنایع هواپیماسازی، خودروسازی، ابزارهای برش، قالبسازی و ... دارند. الزامات طراحی دقیق یکی از چالشهای اساسی در صنایع تولیدی آنها میباشد، این الزامات شامل ماشینکاری دقیق، الزامات سوراخکاری (سوراخهای غیردایروی، کوچک در حد میکرون و ...)، ماشینکاری در سطوح میکرون یا نانومتر و ... میباشد . در این مقاله، تمرکز ما بر روی فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی با سیم ('MEDM) میباشد [۱]. روش ماشینکاری تخلیه الکتریکی با سیم در اواخر دهه ۱۹۶۰ معرفی شد، این روش یکی از جذابترین روشهای ماشینکاری مدرن در ۶۰ سال گذشته میباشد و مزایای بی شماری برای ارائه دارد [۲]. ماشینکاری تخلیه الکتریکی با سیم یک شکل خاص از فرآیند غیر سنتی ماشینکاری تخلیه الکتریکی (<sup>\*</sup>رایای بی شماری برای ارائه دارد [۲]. ماشینکاری تخلیه الکتریکی با سیم یک شکل خاص از فرآیند غیر سنتی ماشینکاری تخلیه الکتریکی (<sup>\*</sup>رایا) است که در آن الکترود یک سیم

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۲۴۸۹۱۰۷۵ آدرس پست الکترونیک: <u>sfdehkordi@scu.ac.ir</u>

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Wire Electrical Discharge Machining

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Electrical discharge machining

#### فردین شعبانی، سیاوش فتحالهی دهکردی ۲۰۷

نازک (قطر ۰/۵۰–۰/۲۵ میلیمتر) جدا شده توسط یک فیلم نازک از مایع دیالکتریک (آب دی یونیزه شده) که بهطور مداوم به منطقهی ماشین کاری برای از بین بردن ذرات فرسایش یافته تغذیه می شود و سختی قطعه کار تأثیری روی فرآیند برش ندارد. حرکت سیم برای دستیابی به شکل و دقت سهبعدی موردنظر برای قطعه کار به صورت عددی کنترل می شود [۳].

از آنجاکه همواره مواد جدیدتر کشف و تولید می شوند و شکل های پیچیده تری ارائه می شود، عملیات ماشین کاری معمولی با محدودیت هایی روبه رو بود به همین دلیل استفاده از روش ماشین کاری تخلیه الکتریکی با سیم با افزایش روبرو شد [۴]. از جمله کاربردهای فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با سیم می توان به ماشین کاری با دقت بالا از تمام مواد رسانا مانند فلزات، آلیاژهای فلزی، گرافیت یا حتی برخی از مواد سرامیکی از هر گونه سختی، استفاده در صنایع هوافضا، خودرو و ... اشاره نمود [۵].

بدیهی است که نگهداشتن سیم در یک موقعیت تعیینشده در برابر جسم کاملاً ضروری است زیرا سیم نوسانات پیچیدهای را به دلیل تخلیه الکتریکی بین سیم و قطعه کار تکرار می کند. به طور معمول، سیم توسط یک راهنمای پین در قسمتهای فوقانی و پایین قطعه کار نگهداشته می شود. در بیشتر موارد سیم پس از استفاده دور ریخته می شود. بااین حال، نکات مشکل سازی وجود دارد که باید به منظور افزایش دقت کار در نظر گرفته شود. نقطه ضعف اصلی این فرآیند سرعت نسبتاً کم ماشین کاری است، در مقایسه با سایر فرآیندهای ماشین کاری غیر سنتی مانند لیزر که عمدتاً به دلیل تکنیک دستگاه حرارتی آن می باشد. مؤلفههای خروجی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با سیم عبارتاند از نرخ براده برداری<sup>۱</sup> (MRR)، صافی سطح نهایی<sup>۲</sup> (RA) و عرض برش. جریان تخلیه، مدت زمان روشنی و خاموشی پالس، سرعت تغذیه سیم و سرعت جریان دی الکتریک مؤلفههای ماشین کاری

عوامل مختلفي در فرآیند ماشین کاري تخلیه الکتریکي با سیم تأثیر گذار مي باشند و محققین مختلفي بر روي آن ها تحقیقات گستردهای انجام دادهاند، که در این بخش مورد بررسی قرار می گیرند. راجورکار و بوینا برای تعیین ترکیب بهینه از پارامترهای کنترل در ماشین کاری تخلیه الکتریکی با سیم با توجه به اقدامات عملکرد ماشین کاری بهعنوان نرخ براده برداری و صافی سطح نهایی از یک روش طراحی فاکتوریل استفاده کردند. نتایج این مطالعه به این گونه بود که جریان تخلیه، مدتزمان روشنی و خاموشی پالس و فرکانس پالس عوامل کنترلی قابلتوجهی در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با سیم میباشند [۷]. راجورکار و وانگ پدیدههای پارگی سیم را با یک مدل حرارتی و تحقیقات تجربی تجزیهوتحلیل کردند، نتایج آنها مشخص کرد که نرخ براده برداری در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی با سیم در ابتدا با کاهش زمان پالس افزایش مییابد. بااینحال در یکزمان خاموشی پالس بسیار کوتاه، شکاف ناپایدار میشود که منجر به کاهش نرخ ماشینکاری میشود [۸]. توسن و همکاران اثرات پارامترهای برش را بر اندازه دهانه فرسایش (قطر و عمق) بر الکترود سیم بررسی کردند. بررسی دهانه الکترود سیم برای درک پارگی سیم، اندازه عرض شکاف و زبری سطح قطعه کار بسیار مهم است. اندازه بزرگتر دهانهها روی سیم خطر پارگی سیم را افزایش میدهد و همچنین منجر به کیفیت سطح کار ضعیف و دقت ماشین کاری کم می شود. نتایج نشان میدهد که افزایش مدتزمان روشنی و خاموشی پالس، ولتاژ مدارباز و سرعت تغذیه سیم باعث افزایش دهانه می شود، درحالی که افزایش فشار شستشوی دیالکتریک باعث کاهش اندازه دهانه میشود [۹]. سینگ و گارگ در یک مطالعه در خصوص فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی با سیم، به این نتیجه رسیدند که نرخ براده برداری مستقیماً با افزایش زمان روشنی پالس و جریان اوج افزایش مییابد درحالی که با افزایش زمان خاموشی پالس و ولتاژ مدارباز کاهش مییابد. تغذیه سیم و تنشهای سیم پارامترهای خنثی میباشند [۴]. شاه و همکاران تأثیر ضخامت قطعه کار بر نرخ براده برداری را مورد بررسی قرار دادند، انتظار میرفت که این عامل مهم باشد درحالی که طبق این پژوهش ضخامت قطعه کار عامل مهمی برای نرخ براده برداری نیست [۱۰]. لیائو و همکاران یک مطالعه تجربی برای تعیین تغییر مؤلفههای ماشین کاری در نرخ براده برداری، عرض شکاف و زبری سطح انجام دادند. در مطالعهی آنها اگرچه تلاش شد تا میزان اهمیت عوامل ماشین کاری در نرخ براده برداری تعیین شود، اما سطح اهمیت عرض شکاف و زبری سطح معرفی نشده است [۱۱].

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Material Removal Rate

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Roughness Surface

#### ۲۰۸ آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر نرخ براده برداری، زبری سطح و عرض شکاف در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی

بهطورکلی، سازندگان ابزار ماشین آلات جدول مؤلفههای ماشین کاری را برای تنظیم مؤلفههای ماشین کاری استفاده می کنند. این روند متکی به تجربه اپراتورها میباشد. در عمل، استفاده از توابع بهینه یک دستگاه به دلیل وجود پارامترهای ماشین کاری قابل تنظیم بسیار دشوار است. با هدف سادهسازی، یک روش ساده اما قابل اعتماد بر اساس آزمایشهای آماری طراحی شده برای بررسی اثرات مؤلفههای مختلف فر آیند بر نرخ براده برداری، زبری سطح و عرض شکاف پیشنهادشده و تنظیمات بهینه فر آیند را تعیین می کند. در این مقاله، دادههای حاصل از عملیات آزمایشگاهی با ترکیبات فاکتور که بهطور تصادفی انتخاب شدهاند، جمع آوری شده است. یک مدل درجه دوم برای شناسایی فر آیند به منظور ایجاد ارتباط تقریبی بین مؤلفههای مختلف فر آیند و همچنین متغیرهای پاسخ استخراج شده است. از مدلهای ریاضی ارائهشده، برای تولید دادهها طبق الگوی تاگوچی<sup>۱</sup> استفاده شده است. سرانجام، تکنیک تاگوچی مبتنی بر خاکستری برای ارزیابی محیط بهینه فر آیند اتخاذ شده است [۱۲].

مدلهای پیچیده محیطی توسط تعداد زیادی از پارامترها کنترل میشوند. تخمین دقیق مقادیر همه این پارامترها تقریباً غیرممکن است. نتایج تجزیهوتحلیل حساسیت باعث میشوند، انتخاب پارامترها در یک روش کالیبراسیون گنجانده شود، اما همچنین میتواند در شناسایی فرآیندهای مدل کمک کند. علاوه بر این، تجزیهوتحلیل حساسیت میتواند اطلاعات مهمی در مورد استفاده و معنی پارامترهای مدل داشته باشد. استفاده از روش سوبل<sup>۲</sup> باعث میشود، اثرات مرتبه اول و سایر اثرات را محاسبه شوند، مدل خطی فرض نشده و مقادیر حساسیت به صورت عددی ارائه گردند. در روش سوبل، نحوه تعیین ضرایب به گونهای انجام شده است که روش برای همه توزیعها با هر محدودهای قابل استفاده باشد [۱۳]. با بهره گیری از روش تحلیل حساسیت آماری سوبل که نسبت به سایر روشها دارای مزیت استخراج مقدار کمی تأثیر پارامترهاست، به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر روی پارامتر خروجی نیرو در فرآیند سوراخکاری استخوان پرداخته شده و چگونگی تأثیر هریک از پارامترهای ورودی بهدقت بررسی شده است [14]. همچنین با استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل که مبتنی بر واریانس است، به بررسی یازده واکتور تأثیرگذار بر روی بهینه سازی مسیر بارگذاری فرآیند هیدروفرمینگ<sup>۳</sup> پرداخته شده است [10].

در تحقیق حاضر، با استفاده از روشهای رگرسیون مرتبه دوم خطی و سطح پاسخ به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی (جریان تخلیه، مدت پالس، فرکانس پالس، سرعت سیم، کشش سیم و سرعت جریان دیالکتریک) بر متغیرهای خروجی (نرخ براده برداری، صافی سطح و عرض شکاف) فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی با سیم پرداخته شده است. علاوه بر این، با استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل، میزان حساسیت فرآیند نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

### ۲- مدلسازی

در این مقاله مدلسازی از دو بخش تشکیل شده است که عبارتاند از: ۱) طراحی آزمایشها با استفاده از روش سطح پاسخ همراه با تکنیک تاگوچی-خاکستری ۲) بررسی آنالیز حساسیت سوبل

### ۲-۱- طراحی آزمایشها با استفاده از تکنیک تاگوچی-خاکستری

طراحی آزمایشها با استفاده از تکنیک تاگوچی خاکستری در ادامه توضیح داده خواهد شد. در تجزیه وتحلیل رابطه خاکستری، دادههای تجربی یعنی ویژگیهای اندازه گیری شده از ویژگیهای کیفیت ابتدا از صفر تا یک نرمال میشوند. این فرآیند بهعنوان پیدایش رابطه ای خاکستری شناخته میشود. در مرحله بعد، بر اساس دادههای تجربی عادی، ضریب رابطه خاکستری محاسبه میشود تا همبستگی بین دادههای آزمایش موردنظر و واقعی را نشان دهد. سپس درجه خاکستری به طورکلی با میانگین ضریب رابطه خاکستری مربوط به پاسخهای انتخابشده تعیین میشود. مشخصه عملکرد کلی فرآیند پاسخ چندگانه به درجه رابطه خاکستری محاسبهشده بستگی دارد. این رویکرد یک مشکل بهینه سازی فرآیند پاسخ چندگانه را به یک وضعیت بهینه سازی پاسخ واحد تبدیل میکند. ترکیب پارامتری بهینه سپس ارزیابی میشود که به بالاترین درجه رابطه خاکستری منجر میشود.

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Taguchi Method

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Sobol Sensitivity Analysis

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Hydroforming Method

209	دهکردی	فتحالهى	سياوش	شعبانی،	فردين
-----	--------	---------	-------	---------	-------

تنظیم فاکتور بهینه برای به حداکثر رساندن درجه رابطه خاکستری کلی با روش تاگوچی انجام می شود.

پارامترهای ورودی و ثابت مورد استفاده در مطالعه حاضر در جدول ۱ ذکر شده است. پارامترهای فوق از طریق بررسی تحقیقات و تجربیات انتخاب شدهاند. تنظیمات مختلف جریان تخلیه، مدتزمان پالس، فرکانس پالس، سرعت سیم، تنش سیم و سرعت جریان دیالکتریک مورد استفاده در آزمایشها در جدول ۲ نشان داده شده است.

نشان	ضرایب کنترل			
$X_1$	جريان تخليه			
X_2	مدت زمان پالس			
X3	فركانس پالس			
X4	۔ سرعت سیم			
X5	۔ تنش سیم			
X <sub>6</sub>	سرعت جریان دی الکتریک			

تنظىم	های	رامتر	61	جدول
•	<u> </u>			

دول ۲ ضرایب کنترل و محدودیت آنها (دامنه آزمایش)	ج
---	---

سطح					
واحد	٣	٢	١	ضرايب كنترل	
Amp	۳۲/۰۰	۲۴/۰۰	۱۶/۰ ۰	جريان تخليه	
μsec	۱۲/۸۰	۶/۴۰	۳/۲۰	مدت زمان پالس	
KHz	۶ • / • •	۵ • / • •	۴ • / • •	فركانس پالس	
m/min	۹/۲ ۰	٨/۶٠	٧/۶٠	سرعت سيم	
G	17	))/	\ • • • / • •	تنش سيم	
bars	١/۴٠	١/٣٠	١/٢٠	سرعت جریان دی الکتریک	

معادلات مربوط به بهینهسازی با استفاده از تکنیک تاگوچی-خاکستری به شرح زیر میباشد.

تابع پاسخ نشاندهنده هریک از شش پاسخ را میتوان به شرح معادله (۱) بیان کرد:

$$Y = f(X_1 . X_2 . X_3 . X_4 . X_5 . X_6)$$

(1)

مدل سطح پاسخ مرتبه دوم برای شش پارامتر انتخاب شده توسط معادله (۲) آورده شده است:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{6} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{6} \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{6} \beta_{ij} X_i X_j$$
(7)

مدل سطح پاسخ مرتبه دوم فوق می تواند به شرح معادله (۳) نیز باشد:

$$\begin{split} Y &= \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 \\ &+ \beta_{44} X_4^2 + \beta_{55} X_5^2 + \beta_{66} X_6^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{16} X_1 X_6 \end{split} \tag{(7)}$$
and the set of the

$$\begin{split} MRR &= 3.337 - 0.2111X_1 + 0.2537X_2 + 0.00694X_3 - 0.4206X_4 - 0.000108X_5 \\ &\quad - 0.0000X_6 + 0.02522X_1X_4 - 0.02467X_2X_4 - 0.000000X_3X_5 \end{split} \tag{f}$$

$$Ra = 4.317 + 0.00951X_1 + 0.07152X_2 - 0.00194X_3 + 0.0558X_4 - 0.000144X_5 - 0.944X_6$$
 ( $\Delta$ )

$$Kerf = 11.53 - 0.726X_1 + 0.716X_2 + 0.0166X_3 - 1.438X_4 - 0.00029X_4 + 0.011X_6 + 0.0843X_1X_4 - 0.0750X_2X_4 + 0.00008X_2X_5$$
(?)

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲

### ۲-۲- بررسی روش آنالیز حساسیت آماری سوبل

تجزیهوتحلیل حساسیت میتواند اطلاعات مهمی در مورد استفاده و معنی پارامترهای مدل داشته باشد. روشهای آنالیز حساسیت به سه دسته تقسیم میشوند که شامل روش آماری، روش ریاضیاتی و روش گرافیکی میباشند.

در روش آماری تحلیل حساسیت بهصورت توزیع احتمالی به شبیهسازی ورودی میپردازد، سپس تأثیر این ورودی را بر خروجی ارزیابی میکند. در این روش میتوان اثر متقابل بین چندین ورودی را بر روی خروجی مشخص کرد.

در روش ریاضیاتی حساسیت را از روی تغییرات خروجی برحسب تغییرات ورودی به دست میآورند. این روشها عموماً درگیر محاسباتی هستند که به بررسی خروجی به ازای مقدار کمی تغییر در ورودی میپردازد.

در روش گرافیکی حساسیت را در فرمهایی بهصورت نمودار و جدول یا سطوح نمایش میدهند. از روش گرافیکی عموماً برای نشان دادن تغییرات خروجیها تحت تأثیر ورودیها استفاده میشود.

در این بخش به بررسی نمودارهای گرافیکی آنالیز حساسیت پرداخته شده و اثرات هر یک از متغیرهای ورودی جدول ۱ بر روی عوامل خروجی (نرخ براده برداری، عرض شکاف و زبری سطح) با استفاده از روش آنالیز حساسیت سوبل و در نرم افزار سیملب<sup>۱</sup> تحلیل و بررسی شده است. یک روش تجزیهوتحلیل حساسیت که در بسیاری از زمینهها محبوب است، روش سوبل مبتنی بر واریانس میباشد.

در این روش برای مدل تعریفشده با تابع Y = f(x)، که Y خروجی مدل و (X1, X2, ..., Xn) X بردار پارامترهای ورودی میباشد و واریانس خروجی مدل (V) بهصورت مجموع واریانسهای هر ترم تجزیهشده بهصورت رابطه (Y) میباشد:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^{n} V_{i} + \sum_{i \le j \le n}^{n} V_{ij} + \dots + V_{1.2...n}$$
(Y)  

$$V_{ij}(V_{ij} = V \left[ E \left( \frac{Y}{X_{i}X_{j}} \right) \right] - V_{i} - V_{j}) \quad ext{ } V_{i}(V_{i} = V[E(Y \mid X_{i})] \quad ext{ } V_{i} = V \left[ E \left( \frac{Y}{X_{i}X_{j}} \right) \right] + V_{i}(V_{i} = V[E(Y \mid X_{i})] \quad ext{ } V_{i} = V \left[ E \left( \frac{Y}{X_{i}X_{j}} \right) \right] + V_{i}(V_{i} = V[E(Y \mid X_{i})] \quad ext{ } V_{i} = V \left[ E \left( \frac{Y}{X_{i}X_{j}} \right) \right] + V_{i}(V_{i} = V[E(Y \mid X_{i})] \quad ext{ } V_{i} = V \left[ E \left( \frac{Y}{X_{i}X_{j}} \right) \right] + V_{i}(V_{i} = V[E(Y \mid X_{i})] \quad ext{ } V_{i} = V \left[ E \left( \frac{Y}{X_{i}} \right) \right]$$

*V<sub>1.2...</sub>n ب*رهمکنش بین n تا فاکتور را نشان میدهند.

شاخصهای حساسیت بهصورت نسبت واریانس هر مرتبه به واریانس کلی به دست می آیند. شاخص حساسیت کلی یا همان تأثیر کلی پارامتر بهصورت مجموع همهی مرتبههای شاخص حساسیت بر آن پارامتر بهصورت معادله (۸) به دست می آید.

$$S_{Ti} = S_i + \sum_{i \neq j} S_{ij} + \cdots$$
(A)

معادلات و روابط روش سوبل در مرجع [18] بهطور کامل ارائه شده است.

### ۳- شبیه سازی

در این بخش به بررسی نمودارهای گرافیکی و آماری آنالیز حساسیت پرداخته شده است و اثر هریک از متغیرهای ورودی جدول ۱ بر روی سه خروجی (نرخ براده برداری، زبری سطح و عرض شکاف) تحلیل و بررسی شده است. روابط آماری و آنالیز حساسیت که در بخش مدلسازی بیان شده است با استفاده از نرمافزار تحلیل حساسیت و شبیهسازی سیملب مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۱- اثر متغیرهای ورودی بر روی نرخ براده برداری

اولین پارامتر تأثیر گذار بر نرخ براده برداری، مدتزمان پالس میباشد. از نتایج بهدست آمده و با کمک رسم نمودار تأثیر مدتزمان پالس در شکل ۱ بررسی شده است، همان طور که ملاحظه می شود با افزایش مدتزمان پالس نرخ براده برداری افزایش

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Simlab Software

فردین شعبانی، سیاوش فتحالهی دهکردی ۲۱۱



می یابد. این میزان افزایش در نرخ براده برداری نسبت مستقیم با افزایش مدتزمان پالس دارد.

شکل ۱ بررسی اثر مدت زمان پالس بر نرخ براده برداری

پارامتر اثرگذاری مورد بررسی بعدی بر نرخ براده برداری، فرکانس پالس میباشد. همانطور که در شکل ۲ مشاهده میشود، با افزایش فرکانس پالس نرخ براده برداری با شیبی ملایم ( ۰٫۰۰۵) افزایش مییابد.



شکل ۲ بررسی اثر فرکانس پالس بر نرخ براده برداری

در شکل ۳ تأثیر پارامتر کشش سیم بر نرخ براده برداری مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که ملاحظه می شود با افزایش کشش سیم، نرخ براده برداری با شیب ملایم کاهش می یابد. اگرچه با توجه به تغییر نیروی کشش سیم می توان از اثر آن بر نرخ براده برداری صرف نظر نمود اما با توجه به حساسیت موجود، اثر آن ملحوظ می شود.



شکل ۳ بررسی اثر کشش سیم بر نرخ براده برداری

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲

۲۱۲ آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر نرخ براده برداری، زبری سطح و عرض شکاف در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی

شکلهای ۴، ۵ و ۶ نشاندهندهی اثر ناچیز پارامترهای جریان تخلیه، سرعت سیم و نرخ جریان دیالکتریک بر روی نرخ براده برداری میباشند. نتایج بهدستآمده نشاندهندهی این امر است که میتوان این سه پارامتر را در گروه مؤلفههای غیر حساس بر نرخ براده برداری قرار داد.



شکل ۴ بررسی اثر جریان تخلیه برروی نرخ براده برداری



شکل ۵ بررسی اثر سرعت سیم بر نرخ براده برداری



شکل ۶ بررسی اثر نرخ جریان دی الکتریک بر نرخ براده برداری

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲

#### فردین شعبانی، سیاوش فتحالهی دهکردی ۲۱۳

شکل ۷ به بررسی کمی میزان تأثیر پارامترهای ورودی بر نرخ براده برداری را نشان میدهد. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت سوبل میباشند به ترتیب مدتزمان پالس با ۷۲ درصد، سرعت سیم با ۱۴ درصد و جریان تخلیه با ۱۰ درصد بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری داشتهاند.



شکل ۷ مقایسه کمی تاثیر پارامترهای ورودی بر نرخ براده برداری

### ۲-۳- اثر متغیرهای ورودی بر روی زبری سطح

اولین پارامتر تأثیرگذار بر زبری سطح مدتزمان پالس میباشد. از نتایج بهدستآمده و با کمک رسم نمودار تأثیر مدتزمان پالس در شکل ۸ بررسی شده است، همانطور که ملاحظه میشود با افزایش مدتزمان پالس زبری سطح افزایش مییابد.

در شکل ۹ تأثیر پارامتر نرخ دیالکتریک بر زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که ملاحظه می شود، با افزایش نرخ دیالکتریک زبری سطح کاهش مییابد.



شکل ۸ بررسی اثر مدت زمان پالس بر زبری سطح



شکل ۹ بررسی اثر نرخ دی الکتریک بر زبری سطح

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲

۲۱۴ آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر نرخ براده برداری، زبری سطح و عرض شکاف در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی

در شکل ۱۰ تأثیر پارامتر جریان تخلیه بر زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که ملاحظه میشود با افزایش جریان تخلیه، زبری با شیب ملایم افزایش مییابد.



شکل ۱۰ بررسی اثر جریان تخلیه بر زبری سطح

در شکل ۱۱ تأثیر پارامتر سرعت سیم بر زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که ملاحظه میشود، با افزایش سرعت سیم زبری سطح نیز با شیب ملایم افزایش مییابد.





شکلهای ۱۲ و ۱۳ نشاندهندهی اثر ناچیز پارامترهای فرکانس پالس و کشش سیم بر روی زبری سطح میباشند و نشاندهندهی این امر است که میتوان این دو پارامتر را در گروه مؤلفههای غیر حساس بر زبری سطح قرار داد.



شکل ۱۲ بررسی اثر فرکانس پالس بر زبری سطح

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲

فردین شعبانی، سیاوش فتحالهی دهکردی ۲۱۵



شکل ۱۳ بررسی اثر کشش سیم بر زبری سطح

شکل ۱۴ به بررسی کمی میزان تأثیر پارامترهای ورودی بر زبری سطح را نشان میدهد که نتایج از آنالیز حساسیت سوبل بهدستآمدهاند. با توجه به شکل ۱۴ این نتیجه به دست میآید که به ترتیب مدتزمان پالس با ۸۷ درصد، نرخ دیالکتریک با ۷ درصد و جریان تخلیه با ۴ درصد بیشترین تأثیر را بر زبری سطح داشتهاند.



شکل ۱۴ مقایسه کمی تاثیر پارامترهای ورودی بر زبری سطح

### ۳-۳- اثر متغیرهای ورودی بر روی عرض شکاف

اولین پارامتر تأثیرگذار بر عرض شکاف مدتزمان پالس میباشد. از نتایج بهدستآمده و با کمک رسم نمودار تأثیر مدتزمان پالس در شکل ۱۵ بررسی شده است، همانطور که ملاحظه میشود با افزایش مدتزمان پالس زبری سطح افزایش مییابد.

در شکل ۱۶ تأثیر پارامتر فرکانس پالس بر عرض شکاف مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که ملاحظه میشود، با افزایش فرکانس پالس عرض شکاف نیز با شیب ملایم افزایش مییابد.

در شکل ۱۷ تأثیر پارامتر جریان تخلیه بر عرض شکاف مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که ملاحظه میشود، با افزایش جریان تخلیه عرض شکاف کاهش مییابد.

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲



شکل ۱۵ بررسی اثر مدت زمان پالس بر عرض شکاف



شکل ۱۶ بررسی اثر فرکانس پالس بر عرض شکاف



شکل ۱۷ بررسی اثر جریان تخلیه بر عرض شکاف

شکلهای ۱۸، ۱۹ و ۲۰ نشاندهندهی اثر ناچیز پارامترهای سرعت سیم، کشش سیم و نرخ دیالکتریک بر روی عرض شکاف میباشند و نشاندهندهی این امر است که میتوان این سه پارامتر را در گروه مؤلفههای غیر حساس بر زبری سطح قرار داد.

فردین شعبانی، سیاوش فتحالهی دهکردی ۲۱۷



شکل ۱۸ بررسی اثر سرعت سیم بر عرض شکاف



شکل ۱۹ بررسی اثر کشش سیم بر عرض شکاف



شکل ۲۰ بررسی اثر نرخ دی الکتریک بر عرض شکاف

شکل ۲۱ به بررسی کمی میزان تأثیر پارامترهای ورودی بر عرض شکاف را نشان میدهد که نتایج از آنالیز حساسیت سوبل به دست آمدهاند. با توجه به شکل ۲۱ این نتیجه به دست می آید که به ترتیب مدتزمان پالس با ۴۷ درصد، سرعت سیم با ۲۴ درصد و جریان تخلیه با ۲۰ درصد بیشترین تأثیر را بر عرض شکاف داشتهاند.

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲

۲۱۸ آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر نرخ براده برداری، زبری سطح و عرض شکاف در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی



شکل ۲۱ مقایسه کمی تأثیر پارامترهای ورودی بر عرض شکاف

### ۴- نتایج

در این پژوهش با استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل، که از دقت بالایی نسبت به سایر روشهای تحلیل حساسیت برخوردار میباشد برای نخستین بار به بررسی کمی تأثیر شش پارامتر ورودی شامل جریان تخلیه، مدتزمان پالس، فرکانس پالس، سرعت سیم، کشش سیم و نرخ دیالکتریک بر نرخ براده برداری، زبری سطح و عرض شکاف در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با سیم پرداخته شده است. بررسیهای صورت گرفته در این پژوهش بیانگر این است که: پارامترهای مدتزمان پالس، سرعت سیم و نرخ دیالکتریک بر نرخ براده برداری، زبری سطح و عرض شکاف در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با سیم پرداخته شده است. بررسیهای صورت گرفته در این پژوهش بیانگر این است که: پارامترهای مدتزمان پالس، سرعت سیم و جریان تخلیه اثرگذارترین پارامترهای مورت گرفته در این پژوهش بیانگر این است که: پارامترهای فرکانس پالس، سرعت سیم و خرخ دیالکتریک تأثیر ناچیزی بر نرخ براده برداری در بازه ی مورد بررسی میباشند. پارامترهای فرکانس پالس، کشش سیم و نرخ دیالکتریک تأثیر ناچیزی بر نرخ براده برداری در بازهی مورد بررسی میباشند. پارامترهای فرکانس پالس، تخلیه اثرگذارترین پارامترها بر نرخ براده برداری در بازه ی مورد بررسی میباشند. پارامترهای فرکانس پالس، نرخ دیالکتریک و جریان تخلیه اثرگذارترین پارامترها بر زبری سطح میباشند، پارامترهای جریان تخلیه، فرکانس پالس و کشش سیم را میتوان کم اثرترین پارامترها بر زبری سطح میباشند، پارامترهای مردان یالس، سرعت سیم و جریان تخلیه اثرگذارترین پارامترها بر زبری سطح میباشند، پارامترهای مدتزمان پالس، سرعت سیم و جریان تخلیه ایر گرارترین پارامترها بر عرض شکاف میباشند، پارامترهای فرکانس پالس، کشش سیم و نرخ دیالکتریک را میتوان کم ایرترین پارامترهای فرکانس پالس، مرعن سیم و نرخ دیالکتریک را میتوان کم ایرترین پارامترهای فرکانس پالس، کشش سیم و نرخ دیالکتریک را میتوان کم ایرترین پارامترهای فرکنس پاره مرداری خرم شکاف می باند، پارامترها بر عرض شکاف میباشند، پارامترهای فرکانس پالس، کشش سیم و نرخ دیالکتریک را میتوان کم ایرترین پارامترهای بر خرص شکاف میباشد، پارامترهای با ۲۷ درصد، سرعت میم با ۱۰ درصد بیشترین تأثیر دی بازه برداری در درم برداری در درمان بازه درمان بری بازه برداری در درمان بری در درمان بازه بازه برداری در درمان بازه درمان بازه در درمان بره برد درمان بازه درمان بازه درمان بای بازه در د

### ۵- مراجع

- Groover M P. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems. John Wiley & Sons. 2020.
- [2] Kuriakose S, Shunmugam M S. Characteristics of wire-electro discharge machined Ti6Al4V surface. Materials Letters. 2004;58:2231-2237.
- [3] Puri A B, Bhattacharyya B. An analysis and optimisation of the geometrical inaccuracy due to wire lag phenomenon in WEDM. International journal of Machine tools and manufacture. 2003;43:151-159.
- [4] Singh H, Garg R. Effects of process parameters on material removal rate in WEDM. Journal of achievements in materials and manufacturing engineering. 2009;32:70-74.
- [5] Puertas I, Luis C J. A study on the machining parameters optimisation of electrical discharge machining. Journal of materials processing technology. 2003;143:521-526.
- [6] Mahapatra S S, Patnaik A. Parametric optimization of wire electrical discharge machining (WEDM) process using Taguchi method. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2006;28:422-429.

219	دهکردی	فتحالهى	سياوش	شعبانی،	فردين
-----	--------	---------	-------	---------	-------

- [7] Scott D, Boyina S, Rajurkar K P. Analysis and optimization of parameter combinations in wire electrical discharge machining. The International Journal of Production Research. 1991;29:2189-2207.
- [8] Rajurkar K P, Wang W M. Thermal modeling and on-line monitoring of wire-EDM. Journal of materials processing technology. 1993;38:417-430.
- [9] Tosun N, Cogun C. An investigation on wire wear in WEDM. Journal of materials processing technology. 2003;134:273-278.
- [10] Shah A, Mufti N A, Rakwal D, Bamberg E. Material removal rate, kerf, and surface roughness of tungsten carbide machined with wire electrical discharge machining. Journal of materials engineering and performance. 2011;20:71-76.
- [11] Liao Y S, Huang J T, Su H C. A study on the machining-parameters optimization of wire electrical discharge machining. Journal of materials processing technology. 1997;71:487-493.
- [12] Datta S, Mahapatra S. Modeling, simulation and parametric optimization of wire EDM process using response surface methodology coupled with grey-Taguchi technique. International Journal of Engineering, Science and Technology. 2010;2:162-183.
- [13] Motaghed S, Yazdani A, Nicknam A, Khanzadi M. Sobol sensitivity generalization for engineering and science applications. Journal of Modeling in Engineering. 2018;16:217-226.
- [14] Majid Ghoreishi M Z, Vahid Tahmasbi. Sobol Sensitivity Analysis, Modeling and Optimization Effective Parameters of Force in Bone Drilling Processes. Mechanical Engineering Journal of Tabriz University. 2018;48:229-237. (In Persian)
- [15] Bathaee S H, Sabzevari M, Moslemi Naeini H. Investigation of hydroforming process loading paths based on experimental and improvement based on Sobol sensitivity analysis. Mechanic of Advanced and Smart Materials. 2022;2:53-72.DOI: 10.52547/masm.2.1.53. (In Persian)
- [16] Saltelli A, Sobol I M. About the use of rank transformation in sensitivity analysis of model output. Reliability Engineering & System Safety. 1995;50:225-239.