

# 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

Use your device to scan and read the article online



**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.>

## KEYWORDS

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

## 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

Ceramics, 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](mailto: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.



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

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 situation. 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

Control coefficients	Symbol
Discharge current	X <sub>1</sub>
Pulse duration	X <sub>2</sub>
Pulse frequency	X <sub>3</sub>
Wire speed	X <sub>4</sub>
Wire tension	X <sub>5</sub>
Dielectric flow rate	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):

$$Y = f(X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 \cdot X_6) \tag{1}$$

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).

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

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.

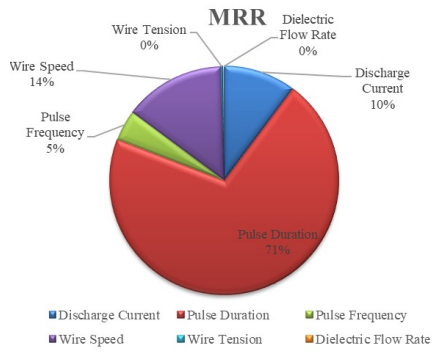


Figure 1. Quantitative comparison of the effect of input parameters on chipping rate

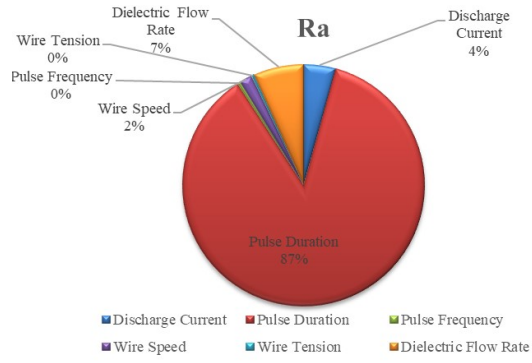


Figure 2. Quantitative comparison of the effect of input parameters on surface roughness

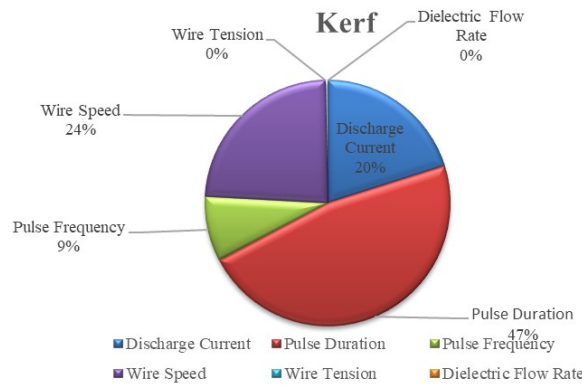


Figure 3. Quantitative comparison of the effect of input parameters on gap width

#### 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 duration, wire speed 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.



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

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

<sup>الف</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، [fardin.shabani98@gmail.com](mailto:fardin.shabani98@gmail.com)  
<sup>ب</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، اهواز، ایران، [sfdehkordi@scu.ac.ir](mailto:sfdehkordi@scu.ac.ir)

چکیده	واژگان کلیدی
یکی از جذاب‌ترین روش‌های ماشین‌کاری مدرن، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی است که در اواخر دهه ۱۹۶۰ معرفی شد. ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم کاربردهای مختلفی دارد، از جمله ماشین‌کاری با دقت بالا در تمام مواد رسانا مانند فلزات، آلیاژهای فلزی، گرافیت و سرامیک و همچنین صنایع هوافضا، خودروسازی و سایر صنایع. به منظور افزایش سرعت و کاهش زبری سطح و عرض شکاف، پارامترهای برش بهینه نقش مهمی در انتخاب پارامترهای خروجی دارند. در این مطالعه، پارامترهای ورودی (دبی، مدت پالس، فرکانس پالس، سرعت سیم، کشش سیم و سرعت جریان دی‌الکتریک) با متغیرهای خروجی (نرخ برش، فیلتر سطح و عرض) مقایسه شد. نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت بیانگر این است که پارامترهای مدت زمان پالس، سرعت سیم و جریان تخلیه اثرگذارترین پارامترها بر نرخ براده برداری و پارامترهای مدت زمان پالس، نرخ دی‌الکتریک و جریان تخلیه اثرگذارترین پارامترها بر زبری سطح می‌باشند، همچنین مدت زمان پالس، سرعت سیم و جریان تخلیه اثرگذارترین پارامترها بر عرض شکاف می‌باشند. مدت زمان پالس با ۷۲ درصد، سرعت سیم با ۱۴ درصد و جریان تخلیه با ۱۰ درصد بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری داشته‌اند.	ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم نرخ براده برداری زبری سطح عرض شکاف آنالیز حساسیت
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۷
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۱۲
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵

### ۱- مقدمه

مواد مهندسی پیشرفته مانند سرامیک‌ها، کامپوزیت‌ها، پلیمرها، و سوپر آلیاژها نقش مهمی در تولید به‌روز به‌ویژه در صنایع هوابیماسازی، 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 (WEDM<sup>۱</sup>) 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 بی‌شماری برای ارائه دارد [۲]. ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم یک شکل خاص از فرآیند غیر سنتی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (EDM<sup>۲</sup>) است که در آن الکتروود یک سیم رسانا به‌طور مداوم در حال حرکت است. مواد از قطعه کار توسط یک سری جرقه‌های گسسته بین قطعه کار و الکتروود سیم مس

<sup>۱</sup> Wire Electrical Discharge Machining

<sup>۲</sup> Electrical discharge machining

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

از آنجاکه همواره مواد جدیدتر کشف و تولید می‌شوند و شکل‌های پیچیده‌تری ارائه می‌شود، عملیات ماشین‌کاری معمولی با محدودیت‌هایی روبه‌رو بود به همین دلیل استفاده از روش ماشین‌کاری تخلیه الکتريکی با سیم با افزایش روبرو شد [۴]. از جمله کاربردهای فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتريکی با سیم می‌توان به ماشین‌کاری با دقت بالا از تمام مواد رسانا مانند فلزات، آلیاژهای فلزی، گرافیت یا حتی برخی از مواد سرامیکی از هرگونه سختی، استفاده در صنایع هوافضا، خودرو و ... اشاره نمود [۵].

بدیهی است که نگره‌داشتن سیم در یک موقعیت تعیین‌شده در برابر جسم کاملاً ضروری است زیرا سیم نوسانات پیچیده‌ای را به دلیل تخلیه الکتريکی بین سیم و قطعه کار تکرار می‌کند. به‌طورمعمول، سیم توسط یک راهنمای پین در قسمت‌های فوقانی و پایینی قطعه کار نگه‌داشته می‌شود. در بیشتر موارد سیم پس از استفاده دور ریخته می‌شود. با این حال، نکات مشکل‌سازی وجود دارد که باید به‌منظور افزایش دقت کار در نظر گرفته شود. نقطه ضعف اصلی این فرآیند سرعت نسبتاً کم ماشین‌کاری است. در مقایسه با سایر فرآیندهای ماشین‌کاری غیر سنتی مانند لیزر که عمدتاً به دلیل تکنیک دستگاه حرارتی آن می‌باشد. مؤلفه‌های خروجی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتريکی با سیم عبارت‌اند از نرخ براده برداری<sup>۱</sup> (MRR)، صافی سطح نهایی<sup>۲</sup> (Ra) و عرض برش. جریان تخلیه، مدت‌زمان روشنی و خاموشی پالس، سرعت تغذیه سیم و سرعت جریان دی‌الکتریک مؤلفه‌های ماشین‌کاری هستند که بر عملکرد فرآیند تأثیرگذار می‌باشند [۶].

عوامل مختلفی در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتريکی با سیم تأثیرگذار می‌باشند و محققین مختلفی بر روی آن‌ها تحقیقات گسترده‌ای انجام داده‌اند، که در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرند. راجورکار و بوینا برای تعیین ترکیب بهینه از پارامترهای کنترل در ماشین‌کاری تخلیه الکتريکی با سیم با توجه به اقدامات عملکرد ماشین‌کاری به‌عنوان نرخ براده برداری و صافی سطح نهایی از یک روش طراحی فاکتوریل استفاده کردند. نتایج این مطالعه به این‌گونه بود که جریان تخلیه، مدت‌زمان روشنی و خاموشی پالس و فرکانس پالس عوامل کنترلی قابل توجهی در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتريکی 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 الکتريکی با سیم در ابتدا با کاهش زمان پالس افزایش می‌یابد. با این حال 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 الکتروود سیم بررسی کردند. بررسی دهانه الکتروود 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 ماشین‌کاری کم می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مدت‌زمان روشنی و خاموشی پالس، ولتاژ مدارباز و سرعت تغذیه سیم باعث افزایش دهانه می‌شود، درحالی‌که افزایش فشار شستشوی دی‌الکتریک باعث کاهش اندازه دهانه می‌شود [۹]. سینگ و گارگ در یک مطالعه در خصوص فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتريکی با سیم، به این نتیجه رسیدند که نرخ براده برداری مستقیماً با افزایش زمان روشنی پالس و جریان اوج افزایش می‌یابد درحالی‌که 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 درحالی‌که طبق این پژوهش ضخامت قطعه کار عامل مهمی برای نرخ براده برداری نیست [۱۰]. لیاثو و همکاران یک مطالعه تجربی برای تعیین تغییر مؤلفه‌های ماشین‌کاری در نرخ براده برداری، عرض شکاف و زبری سطح انجام دادند. در مطالعه‌ی آن‌ها اگرچه تلاش شد تا میزان اهمیت عوامل ماشین‌کاری در نرخ براده برداری تعیین شود، اما سطح اهمیت عرض شکاف و زبری سطح معرفی نشده است [۱۱].

<sup>1</sup> Material Removal Rate

<sup>2</sup> Roughness Surface

به‌طور کلی، سازندگان ابزار ماشین‌آلات جدول مؤلفه‌های ماشین‌کاری را برای تنظیم مؤلفه‌های ماشین‌کاری استفاده می‌کنند. این روند متکی به تجربه اپراتورها می‌باشد. در عمل، استفاده از توابع بهینه یک دستگاه به دلیل وجود پارامترهای ماشین‌کاری 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 فرآیند بر نرخ براده برداری، زبری سطح و عرض شکاف پیشنهاد شده و تنظیمات بهینه فرآیند را تعیین می‌کند. در این مقاله، داده‌های حاصل از عملیات آزمایشگاهی با ترکیبات فاکتور که به‌طور تصادفی انتخاب شده‌اند، جمع‌آوری شده است. یک مدل درجه دوم برای شناسایی فرآیند به‌منظور ایجاد ارتباط تقریبی بین مؤلفه‌های مختلف فرآیند و همچنین متغیرهای پاسخ استخراج شده است. از مدل‌های ریاضی ارائه شده، برای تولید داده‌ها طبق الگوی تاگوچی<sup>۱</sup> استفاده شده است. سرانجام، تکنیک تاگوچی مبتنی بر خاکستری برای ارزیابی محیط بهینه فرآیند اتخاذ شده است [۱۲].

مدل‌های پیچیده محیطی توسط تعداد زیادی از پارامترها کنترل می‌شوند. تخمین دقیق مقادیر همه این پارامترها تقریباً غیرممکن است. نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت باعث می‌شوند، انتخاب پارامترها در یک روش کالیبراسیون گنجانده شود، اما همچنین می‌تواند در شناسایی فرآیندهای مدل کمک کند. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل 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 به‌صورت عددی ارائه گردند. در روش سوبل، نحوه تعیین ضرایب به‌گونه‌ای انجام شده است که روش برای همه توزیع‌ها با هر محدوده‌ای قابل استفاده باشد [۱۳]. با بهره‌گیری 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 هر یک از پارامترهای ورودی به‌دقت بررسی شده است [۱۴]. همچنین با استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل که مبتنی بر واریانس است، به بررسی یازده فاکتور تأثیرگذار بر روی بهینه‌سازی مسیر بارگذاری فرآیند هیدروفرمینگ<sup>۳</sup> پرداخته شده است [۱۵].

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 و تحلیل رابطه خاکستری، داده‌های تجربی یعنی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده از ویژگی‌های کیفیت ابتدا از صفر تا یک نرمال می‌شوند. این فرآیند به‌عنوان پیدایش رابطه‌ای 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 به‌طور کلی با میانگین ضریب رابطه خاکستری مربوط به پاسخ‌های انتخاب شده تعیین می‌شود. مشخصه عملکرد کلی فرآیند پاسخ چندگانه به درجه رابطه خاکستری محاسبه شده بستگی دارد. این رویکرد یک مشکل بهینه‌سازی فرآیند پاسخ چندگانه را به یک وضعیت بهینه‌سازی پاسخ واحد تبدیل می‌کند. ترکیب پارامتری بهینه سپس ارزیابی می‌شود که به بالاترین درجه رابطه خاکستری منجر می‌شود.

<sup>1</sup> Taguchi Method

<sup>2</sup> Sobol Sensitivity Analysis

<sup>3</sup> Hydroforming Method

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

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، مدت زمان پالس، فرکانس پالس، سرعت سیم، تنش سیم و سرعت جریان دی‌الکترونیک مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱ پارامترهای تنظیم

ضرایب کنترل	نشان
جریان تخلیه	X <sub>1</sub>
مدت زمان پالس	X <sub>2</sub>
فرکانس پالس	X <sub>3</sub>
سرعت سیم	X <sub>4</sub>
تنش سیم	X <sub>5</sub>
سرعت جریان دی الکترونیک	X <sub>6</sub>

جدول ۲ ضرایب کنترل و محدودیت آنها (دامنه آزمایش)

ضرایب کنترل	سطح			واحد
	۱	۲	۳	
جریان تخلیه	۱۶/۰۰	۲۴/۰۰	۳۲/۰۰	Amp
مدت زمان پالس	۳/۲۰	۶/۴۰	۱۲/۸۰	μsec
فرکانس پالس	۴۰/۰۰	۵۰/۰۰	۶۰/۰۰	KHz
سرعت سیم	۷/۶۰	۸/۶۰	۹/۲۰	m/min
تنش سیم	۱۰۰۰/۰۰	۱۱۰۰/۰۰	۱۲۰۰/۰۰	G
سرعت جریان دی الکترونیک	۱/۲۰	۱/۳۰	۱/۴۰	bars

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

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

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) \quad (1)$$

که در آن  $Y$  واکنش و  $X$  عامل می‌باشد.

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

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

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

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{44} X_4^2 + \beta_{55} X_5^2 + \beta_{66} X_6^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{16} X_1 X_6 \quad (3)$$

معادله‌های کاهش یافته نهایی برای MRR، Ra و Kerf در معادلات ۴ تا ۶ ارائه شده است:

$$MRR = 3.337 - 0.2111X_1 + 0.2537X_2 + 0.00694X_3 - 0.4206X_4 - 0.000108X_5 - 0.0000X_6 + 0.02522X_1X_4 - 0.02467X_2X_4 - 0.000000X_3X_5 \quad (4)$$

$$Ra = 4.317 + 0.00951X_1 + 0.07152X_2 - 0.00194X_3 + 0.0558X_4 - 0.000144X_5 - 0.944X_6 \quad (5)$$

$$Kerf = 11.53 - 0.726X_1 + 0.716X_2 + 0.0166X_3 - 1.438X_4 - 0.00029X_5 + 0.011X_6 + 0.0843X_1X_4 - 0.0750X_2X_4 + 0.000008X_2X_5 \quad (6)$$

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

تجزیه و تحلیل 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 به صورت 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 بر حسب 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 به صورت 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 تجزیه و تحلیل حساسیت که در بسیاری از زمینه‌ها محبوب است، روش سوبل مبتنی بر واریانس می‌باشد.

در این روش برای مدل تعریف شده با تابع  $Y = f(x)$ ، که  $Y$  خروجی مدل و  $X (X_1, X_2, \dots, X_n)$  بردار پارامترهای ورودی می‌باشد و واریانس خروجی مدل ( $V$ ) به صورت مجموع واریانس‌های هر ترم تجزیه شده به صورت رابطه ( $V$ ) می‌باشد:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i \leq j \leq n} V_{ij} + \dots + V_{1.2 \dots n} \quad (7)$$

که در آن،  $V_i$  تأثیر مرتبه‌ی اول برای هر فاکتور ورودی  $X_i (V_i = V[E(Y | X_i)] - V_i - V_j)$  و  $V_{ij} (V_{ij} = V[E(\frac{Y}{X_i X_j})] - V_i - V_j)$  تا  $V_{1.2 \dots n}$  برهمکنش بین  $n$  فاکتور را نشان می‌دهند.

شاخص‌های حساسیت به صورت نسبت واریانس هر مرتبه به واریانس کلی به دست می‌آیند. شاخص حساسیت کلی یا همان تأثیر کلی پارامتر به صورت مجموع همه‌ی مرتبه‌های شاخص حساسیت بر آن پارامتر به صورت معادله (۸) به دست می‌آید.

$$S_{Ti} = S_i + \sum_{i \neq j} S_{ij} + \dots \quad (8)$$

معادلات و روابط روش سوبل در مرجع [۱۶] به طور کامل ارائه شده است.

## ۳- شبیه سازی

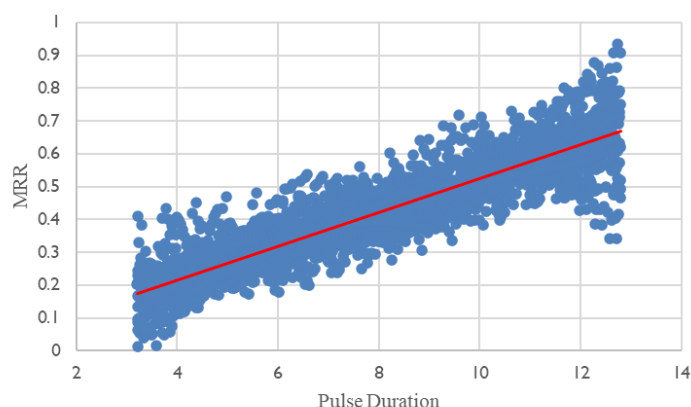
در این بخش به بررسی نمودارهای گرافیکی و آماری آنالیز حساسیت پرداخته شده است و اثر هر یک از متغیرهای ورودی جدول ۱ بر روی سه خروجی (نرخ براده برداری، زبری سطح و عرض شکاف) تحلیل و بررسی شده است. روابط آماری و آنالیز حساسیت که در بخش مدل‌سازی بیان شده است با استفاده از نرم‌افزار تحلیل حساسیت و شبیه‌سازی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

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

اولین پارامتر تأثیرگذار بر نرخ براده برداری، مدت‌زمان پالس می‌باشد. از نتایج به دست آمده و با کمک رسم نمودار تأثیر مدت‌زمان پالس در شکل ۱ بررسی شده است، همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مدت‌زمان پالس نرخ براده برداری افزایش

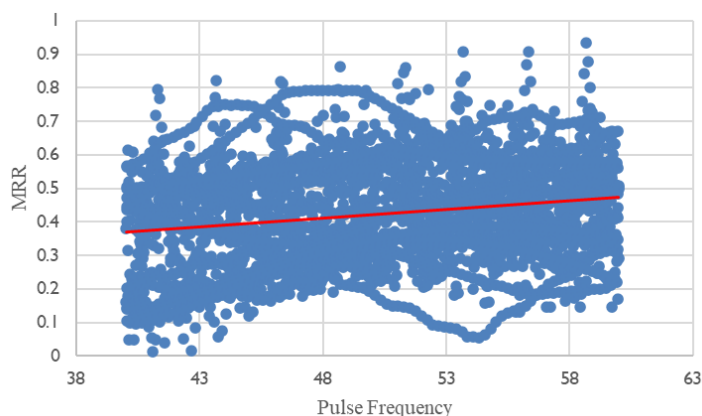
<sup>1</sup> Simlab Software

می‌یابد. این میزان افزایش در نرخ براده برداری نسبت مستقیم با افزایش مدت زمان پالس دارد.



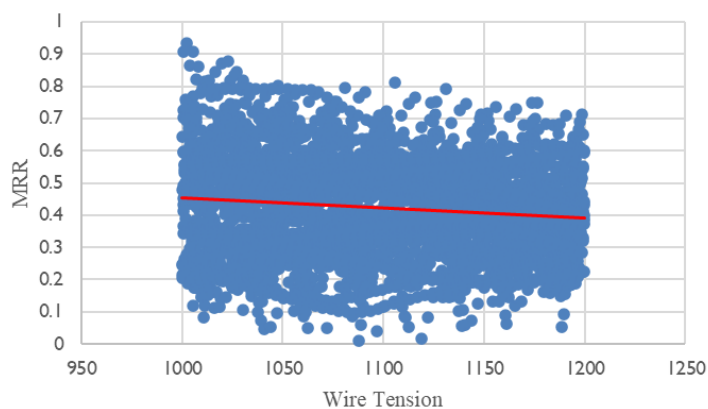
شکل ۱ بررسی اثر مدت زمان پالس بر نرخ براده برداری

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.



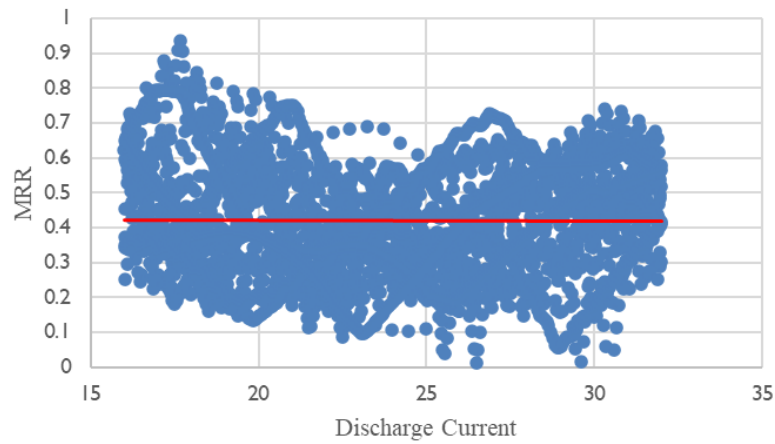
شکل ۲ بررسی اثر فرکانس پالس بر نرخ براده برداری

در شکل ۳ تأثیر پارامتر کشش سیم بر نرخ براده برداری مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش کشش سیم، نرخ براده برداری با شیب ملایم کاهش می‌یابد. اگرچه با توجه به تغییر نیروی کشش سیم می‌توان از اثر آن بر نرخ براده برداری صرف‌نظر نمود اما با توجه به حساسیت موجود، اثر آن ملحوظ می‌شود.

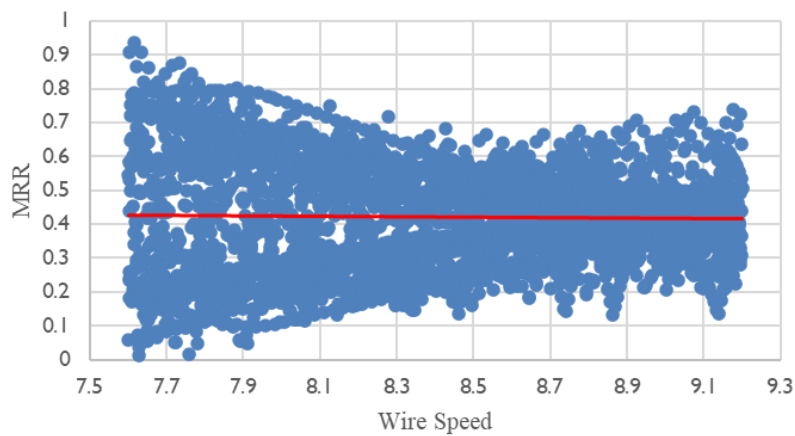


شکل ۳ بررسی اثر کشش سیم بر نرخ براده برداری

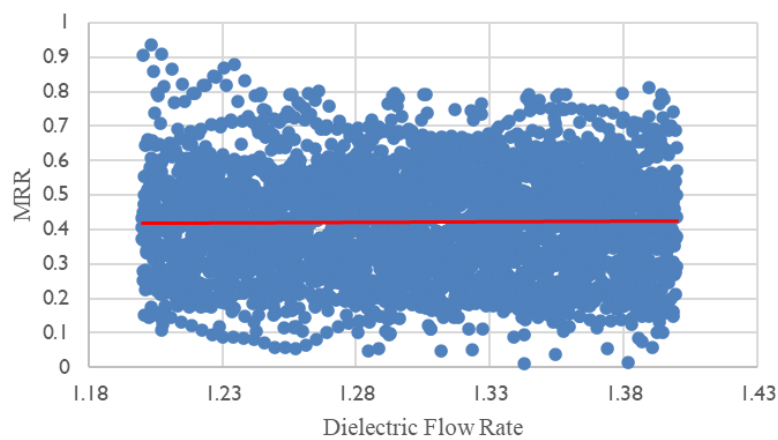
شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نشان‌دهنده‌ی اثر ناچیز پارامترهای جریان تخلیه، سرعت سیم و نرخ جریان دی‌الکتریک بر روی نرخ براده برداری می‌باشند. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده‌ی این امر است که می‌توان این سه پارامتر را در گروه مؤلفه‌های غیر حساس بر نرخ براده برداری قرار داد.



شکل ۴ بررسی اثر جریان تخلیه بر روی نرخ براده برداری

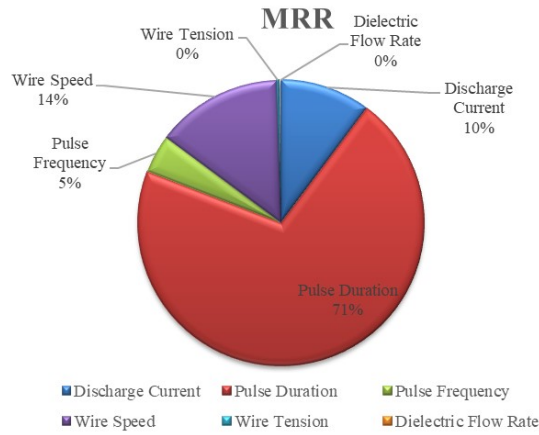


شکل ۵ بررسی اثر سرعت سیم بر نرخ براده برداری



شکل ۶ بررسی اثر نرخ جریان دی‌الکتریک بر نرخ براده برداری

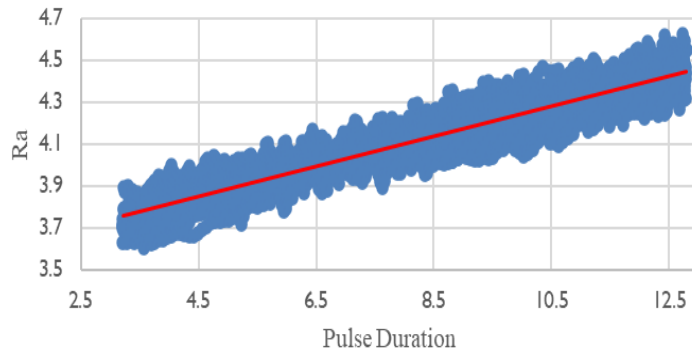
شکل ۷ به بررسی کمی میزان تأثیر پارامترهای ورودی بر نرخ براده برداری را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت سوبل می‌باشند به ترتیب مدت‌زمان پالس با ۷۲ درصد، سرعت سیم با ۱۴ درصد و جریان تخلیه با ۱۰ درصد بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری داشته‌اند.



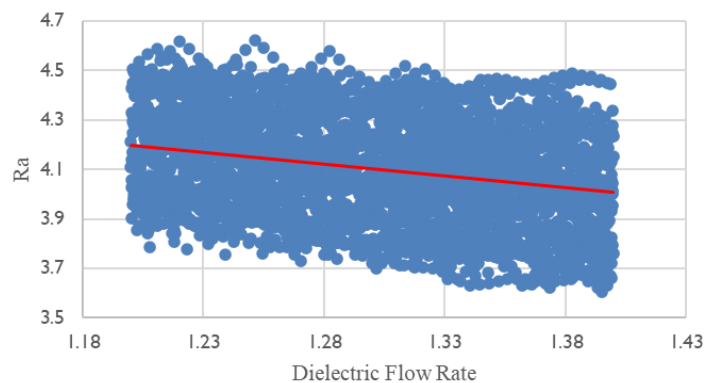
شکل ۷ مقایسه کمی تأثیر پارامترهای ورودی بر نرخ براده برداری

### ۳-۲- 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. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش نرخ دی‌الکتریک زبری سطح کاهش می‌یابد.

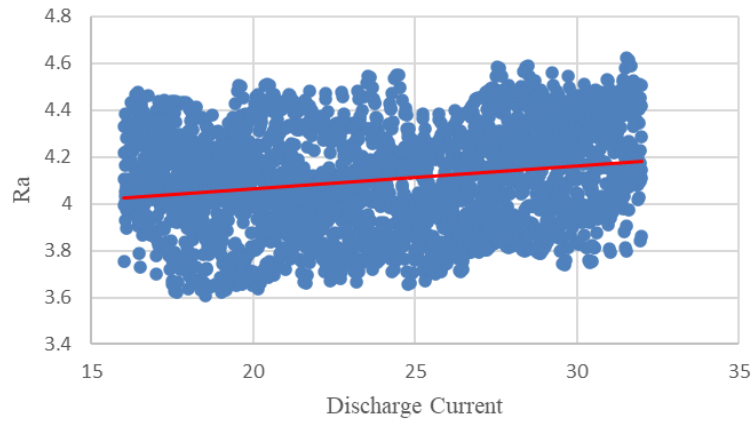


شکل ۸ بررسی اثر مدت زمان پالس بر زبری سطح



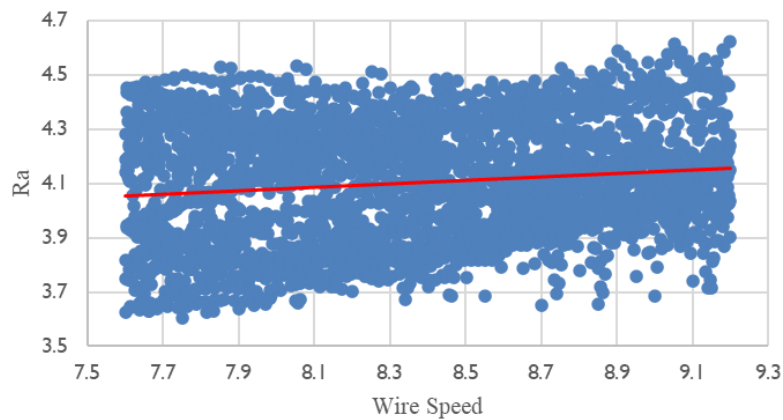
شکل ۹ بررسی اثر نرخ دی‌الکتریک بر زبری سطح

در شکل ۱۰ تأثیر پارامتر جریان تخلیه بر زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که ملاحظه می شود با افزایش جریان تخلیه، زبری با شیب ملایم افزایش می یابد.



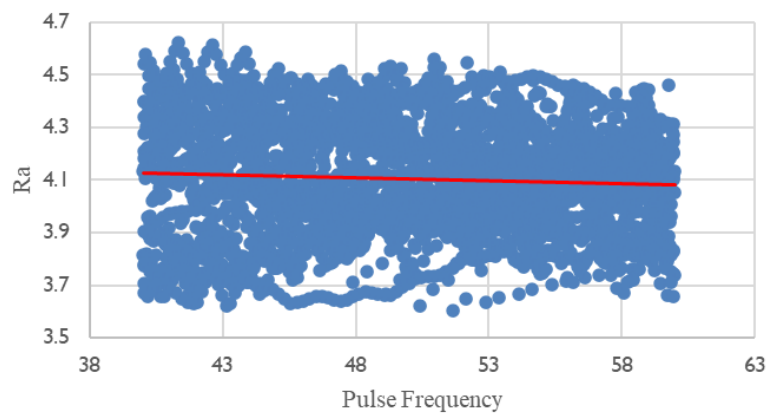
شکل ۱۰ بررسی اثر جریان تخلیه بر زبری سطح

در شکل ۱۱ تأثیر پارامتر سرعت سیم بر زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که ملاحظه می شود، با افزایش سرعت سیم زبری سطح نیز با شیب ملایم افزایش می یابد.

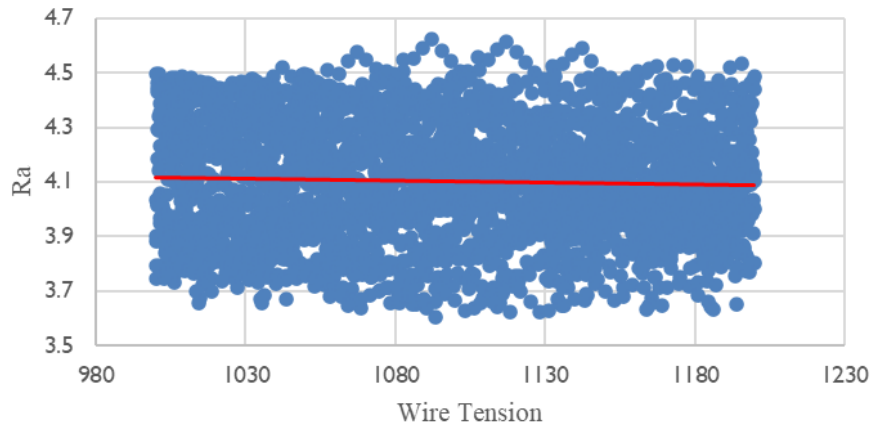


شکل ۱۱ بررسی اثر سرعت سیم بر زبری سطح

شکل های ۱۲ و ۱۳ نشان دهندهی اثر ناچیز پارامترهای فرکانس پالس و کشش سیم بر روی زبری سطح می باشند و نشان دهندهی این امر است که می توان این دو پارامتر را در گروه مؤلفه های غیر حساس بر زبری سطح قرار داد.

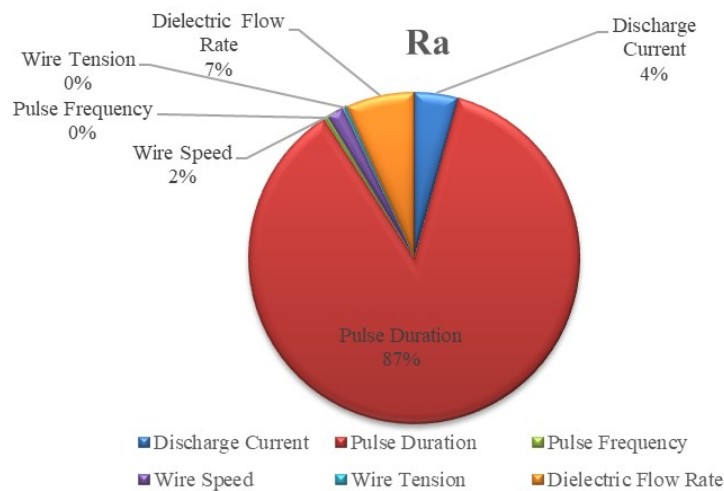


شکل ۱۲ بررسی اثر فرکانس پالس بر زبری سطح



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.



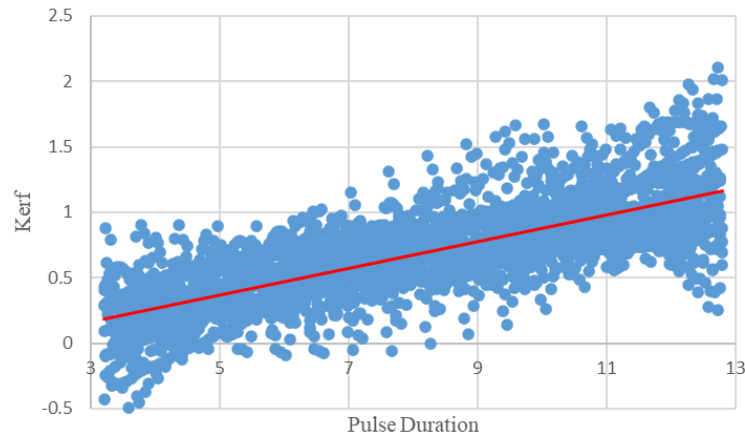
شکل ۱۴ مقایسه کمی تأثیر پارامترهای ورودی بر زبری سطح

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

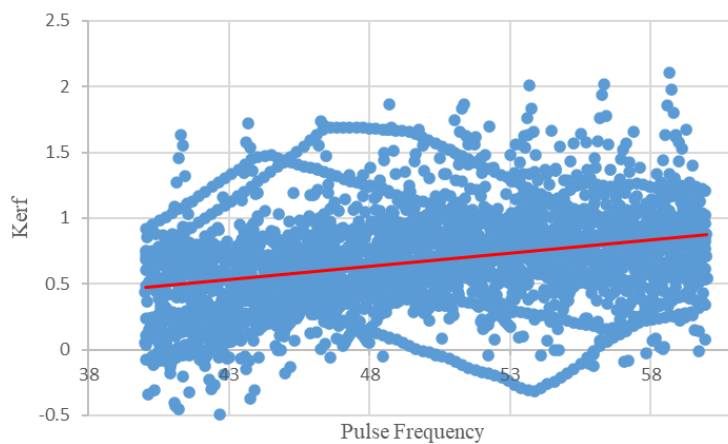
اولین پارامتر تأثیرگذار بر عرض شکاف مدت‌زمان پالس می‌باشد. از نتایج به‌دست‌آمده و با کمک رسم نمودار تأثیر مدت‌زمان پالس در شکل ۱۵ بررسی شده است، همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مدت‌زمان پالس زبری سطح افزایش می‌یابد.

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.

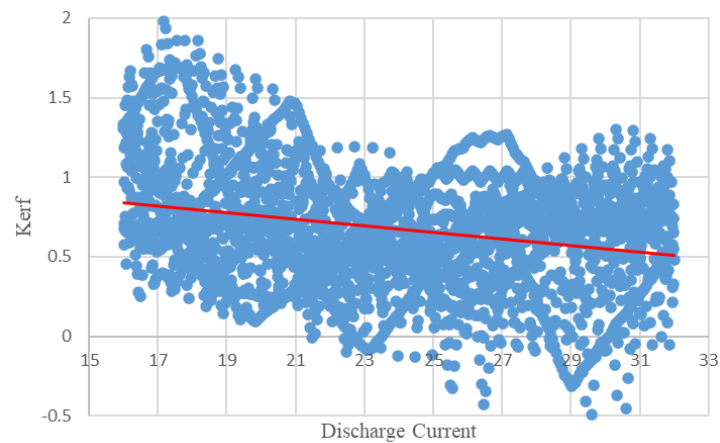
در شکل ۱۷ تأثیر پارامتر جریان تخلیه بر عرض شکاف مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش جریان تخلیه عرض شکاف کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵ بررسی اثر مدت زمان پالس بر عرض شکاف

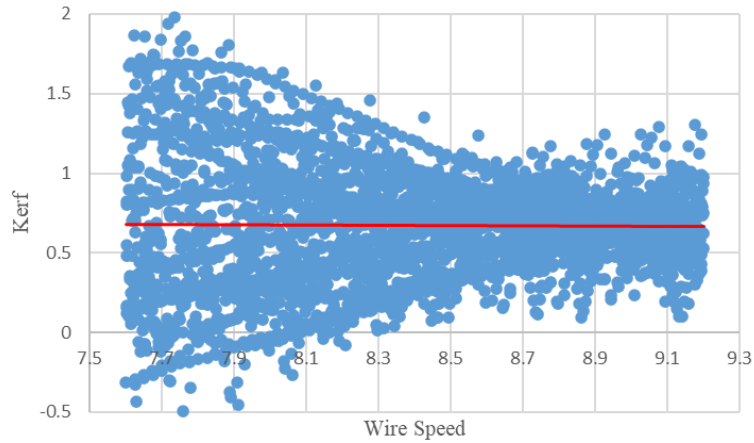


شکل ۱۶ بررسی اثر فرکانس پالس بر عرض شکاف

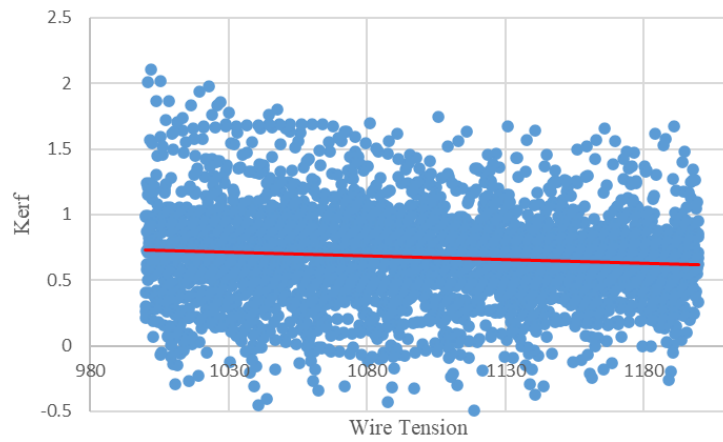


شکل ۱۷ بررسی اثر جریان تخلیه بر عرض شکاف

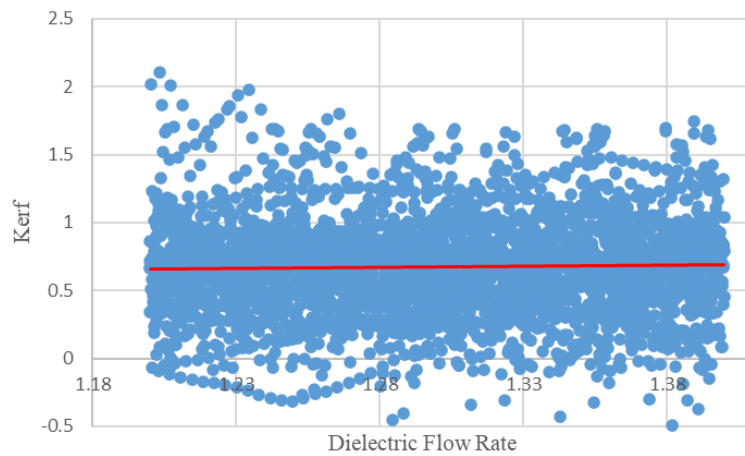
شکل‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰ نشان‌دهنده‌ی اثر ناچیز پارامترهای سرعت سیم، کشش سیم و نرخ دی‌الکتریک بر روی عرض شکاف می‌باشند و نشان‌دهنده‌ی این امر است که می‌توان این سه پارامتر را در گروه مؤلفه‌های غیر حساس بر زبری سطح قرار داد.



شکل ۱۸ بررسی اثر سرعت سیم بر عرض شکاف

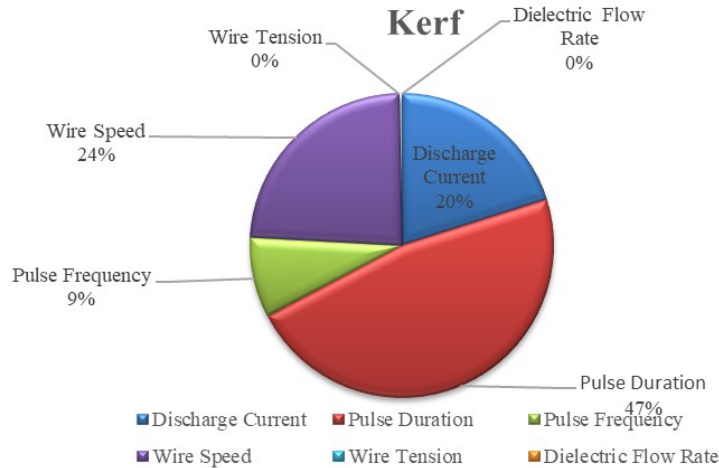


شکل ۱۹ بررسی اثر کشش سیم بر عرض شکاف



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 می‌آید 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.



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 ماشین‌کاری 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 پارامترها بر نرخ براده برداری در بازه‌ی مورد بررسی می‌باشند. پارامترهای فرکانس پالس، کشش سیم و نرخ دی‌الکتریک تأثیر ناچیزی بر نرخ براده برداری دارند. پارامترهای مدت‌زمان پالس، نرخ دی‌الکتریک و جریان تخلیه اثرگذارترین پارامترها بر زبری سطح می‌باشند، پارامترهای جریان تخلیه، فرکانس پالس و کشش سیم را می‌توان کم‌اثرترین پارامترها بر زبری سطح دانست. پارامترهای مدت‌زمان پالس، سرعت سیم و جریان تخلیه اثرگذارترین پارامترها بر عرض شکاف می‌باشند، پارامترهای فرکانس پالس، کشش سیم و نرخ دی‌الکتریک را می‌توان کم‌اثرترین پارامترها بر عرض شکاف دانست. مدت‌زمان پالس با ۷۲ درصد، سرعت سیم با ۱۴ درصد و جریان تخلیه با ۱۰ درصد بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری داشته‌اند.

#### ۵- مراجع

- [1] 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.

- [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.