

Sensitivity analysis of parameters affecting cutting speed and dimensional deviation of wire electrical discharge machining

Hamed Faraji ^a Moein Taheri ^{b*}

^{a,b} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Faraji H, Taheri M. Sensitivity analysis of parameters affecting cutting speed and dimensional deviation of wire electrical discharge machining. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2022; 2:310-327.

 <https://10.52547/masm.2.3.310>

KEYWORDS

Sensitivity Analysis,
Wire electric discharge
machining,
Cutting Speed,
Dimensional deviation.

ABSTRACT

Wire electric discharge machining is one of the newest, most popular and most accurate non-traditional machining processes, which is being studied. The advantages of this process include precision machining of parts with different hardness or complex shapes. Due to the increasing applications of this type of machining and since increasing the cutting speed and reducing the dimensional deviation in this process are very important, the selection of optimal cutting parameters has an important role to achieve high cutting speed and low dimensional deviation. Improper selection of parameters leads to limitations in output parameters and ultimately reduces productivity; Therefore, in this study, using Sobol statistical sensitivity analysis method, which has the advantage of high accuracy over other methods and extracting a small amount of parameter effect, to investigate the effect of various input parameters, including pulse-on time, pulse-off time, servo gap voltage, peak current and wire tension on the two output parameters of cutting speed and dimensional deviation are discussed. The results obtained from the sensitivity analysis of the expression are that the parameters of the pulse off time and pulse on time are the most effective parameters on the cutting speed with 39% and 37%, respectively, and the servo gap voltage parameters and the pulse on time are the most effective parameters on the dimensional deviation with 59% and 31%, respectively.

Extended Abstract

1. Introduction

Wire electric discharge machining is a non-traditional and electrothermal machining method for cutting hard and conductive materials with the help of a moving electrode. This method uses a series of discrete sparks between the workpiece and the tool (electrode) floating in a liquid dielectric medium to separate the material from the workpiece. Also, this process is used for precise machining of parts with different hardness or complex shapes that are impossible or difficult with traditional machining methods and have sharp edges. The electrodes used in this method are copper, brass or tungsten wires. The diameter of these wires varies from 0.05 to 0.3 mm, and the distance between the tool and the workpiece varies from 0.025 to 0.05 mm [1]. The WEDM process is widely used in the aerospace and automotive industries. This process is not affected by the hardness of the material and does not experience any force. It also has the ability to achieve high accuracy [2]. The purpose of using WEDM is to achieve higher machining productivity with precision and better surface finish. The outputs of flat process are influenced by variables such as pulse on time, pulse off time, wire tension, servo gap voltage, peak current and peak current. The many variables and the complex and stochastic nature of this process mean that achieving optimal performance is rarely possible, even for a highly skilled operator. For this reason, the optimization of this process is of great importance [3]. In the past, extensive research has been done in order to study the effect of different parameters on the outputs of the WEDM process using different problem solving methods. Banerjee et al. have studied the effect of repeated breaking of the electrode wire on the cutting speed and surface accuracy of the workpiece. According to their observations, frequent wire breakage is one of the most important production limitations in the electrical discharge machining process. This phenomenon

* Corresponding author. Tel.: 09183616488

E-mail address: m-taheri@araku.ac.ir

DOI: <https://10.52547/masm.2.3.310>

Received: August 14, 2022; Received in revised form: October 31, 2022; Accepted: December 21, 2022.

2022 Published by Arak University Press. All rights reserved.



limits the cutting speed and increases the machining time. It also has a negative effect on the cutting accuracy of the workpiece surface. Thermal load, wire vibration and damage caused by short circuit are the most important factors of wire breakage. In their research, a simple computational model has been prepared that reports temperature values to measure the effect of parameters such as input power, pulse on time, speed and wire diameter [4]. Ramakrishnan and Karunamoorthy have investigated the effect of machining parameters of WEDM process including timely pulse, wire tension, delay time and intensity of combustion current on material removal rate, surface roughness and wire wear ratio. The experiment was designed using the Taguchi method [5]. Erden and Bilgin first studied the effect of copper-aluminum and iron-carbon abrasive powder mixed in dielectric fluid in EDM process. They have also suggested that the machining speed increases with the increase in the concentration of the abrasive powder mixture in the dielectric fluid due to the reduction of the time delay [6]. Jeswani suggested that by using a mixture of white oil with 4 grams of graphite powder as a dielectric fluid in the EDM process, the material removal rate is improved by about 60% and the electrode wear ratio can be reduced by about 15% [7]. Spedding and Wang have optimized process parameter settings using artificial neural network modeling to describe workpiece surfaces in the WEDM process. They have obtained the optimal combination of parameters such as pulse width, time between two pulses, wire tension and wire feeding space for maximum cutting speed, maintaining surface roughness within desired limits [8]. Sarkar et al have used incremental model in modeling their research. Based on the developed model, the effect of different input parameters on machining criteria was investigated. Also, they have observed that the surface roughness and dimensional deviation are independent of the pulse off time. This is very important because under specific machining conditions, the pulse off time can be changed based on the need to achieve optimal stability and accuracy without significantly affecting the dimensional accuracy and surface finish. The workpiece used in this research is made of aluminum-titanium alloy [9].

2. Modeling and formulation

In this section, electrical discharge machining with wire has been briefly discussed. also, the sensitivity analysis and its various methods based on the model form includes the graphic, mathematical and statistical method, and then, due to the need to investigate the interaction between different inputs, the statistical sensitivity analysis method has been chosen to analyze and analyze the effect of different parameters.

According to the results obtained from reference [13], the model of cutting speed and dimensional deviation will be coded according to machining input variables in the form of equation 1 and 2:

$$\begin{aligned} \text{CuttingSpeed} = & -71.66013 + 1.02336 \times T_{on} + 0.50630 \times T_{off} - 0.056081 \times SV - 0.063556 \times IP + 1.45932 \\ & \times WT - 3.26923E - 003 \times T_{on}^2 - 1.26374E - 003 \times T_{off}^2 - 3.31731E - 004 \times SV^2 \\ & - 4.01786E - 003 \times T_{on} \times T_{off} + 5.34722E - 004 \times T_{on} \times IP - 0.013229 \times T_{on} \times WT \\ & + 9.73214E - 004 \times T_{off} \times SV - 1.91964E - 003 \times T_{off} \times WT + 6.87500E - 005 \times SV \\ & \times IP + 2.03125E - 003 \times SV \times WT + 3.02083E - 004 \times IP \times WT \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{DimensionalDeviation} \\ = & 28.19385 - 0.51293 \times T_{on} - 2.45833E - 003 \times T_{off} + 0.053585 \times SV + 0.029653 \times IP \\ & + 0.015521 \times WT + 2.44544E - 003 \times T_{on}^2 + 3.20089E - 004 \times SV^2 - 8.06250E - 004 \\ & \times T_{on} \times SV - 2.68750E - 004 \times T_{on} \times IP \end{aligned} \quad (2)$$

1.1. Sensitivity analysis methods

The Sobel method is a precise method of statistical sensitivity analysis and compared to other statistical methods, including the E-fast method, it has been considered in this article due to its higher accuracy.

In this method for the model defined by the function $Y = F(X)$ that Y is the output of the model and $X_1(X_1, X_2, \dots, X_n)$ is the vector of input parameters and the output variance of the model (V) is the sum of the variances of each term analyzed in the form of equation 3:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i \leq j \leq n} V_{ij} + \dots + V_{i, \dots, n} \quad (3)$$

where in V_i First order effect for each input factor $x_i (V_i = V[E(Y | x_i)])$ and $(V_{ij} = V[E(Y | x_i, x_j)] - V_i - V_j)V_{ij}$ until the $V_{1, \dots, n}^2$, They show the interaction between n factors.

The sensitivity indices are obtained as the ratio of the variance of each order to the total variance ($S_i = \frac{V_i}{V}$ first-order sensitivity index, $S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V}$ second-order sensitivity index and . . .)

The overall sensitivity index or the overall effect of each parameter is obtained as the sum of all orders of the sensitivity index for that parameter in the form of equation 4:

$$S_{Ti} = S_i + \sum_{i \neq j} S_{ij} + \dots \quad (4)$$

1.2. General flowchart of the sensitivity analysis process

Figure 1 shows the general flowchart of the sensitivity analysis process. After selecting the input parameters, the range of changes of these parameters should be selected.

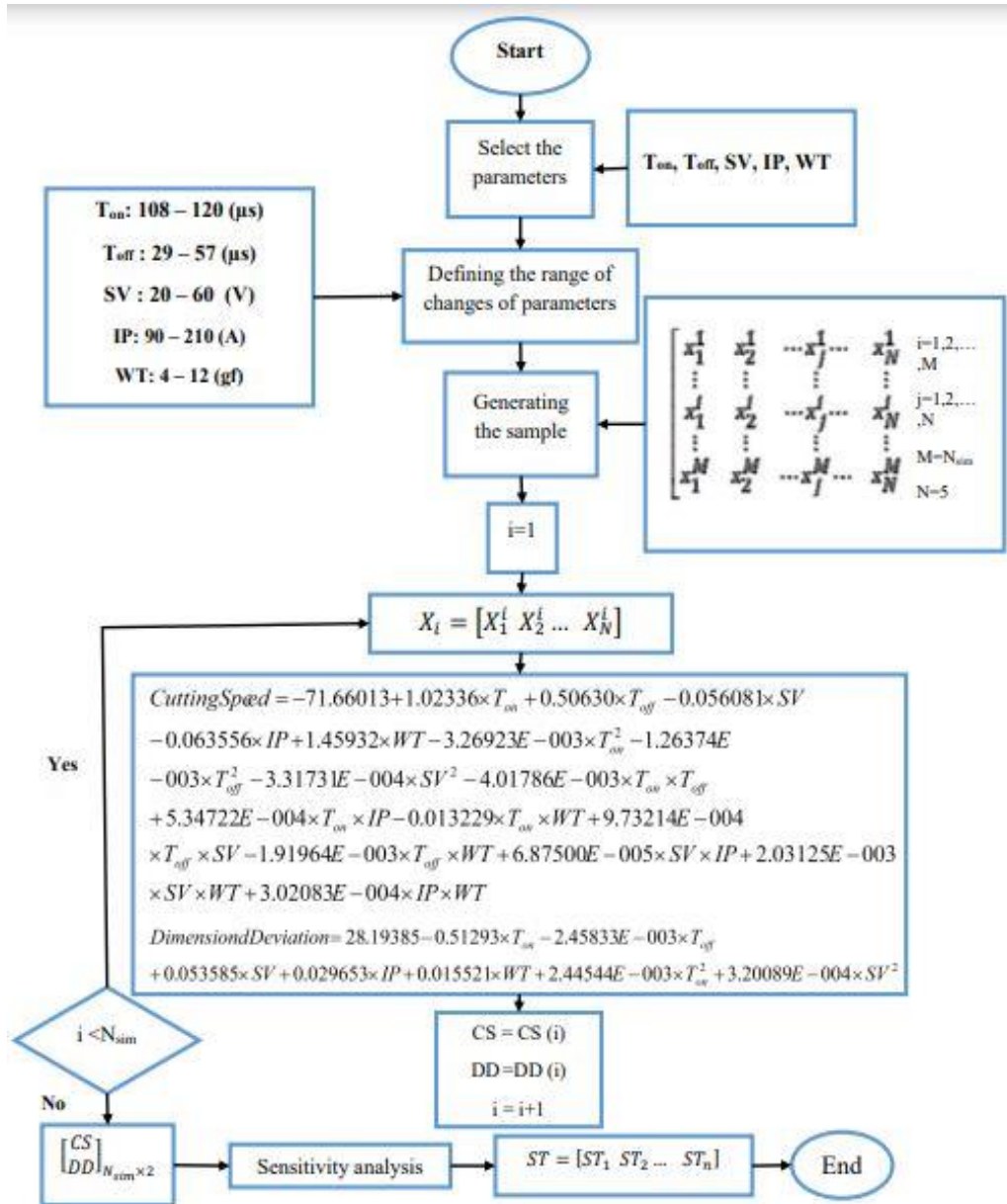


Figure 1 General flowchart of sensitivity analysis

3. Sensitivity analysis of parameters

In Figure 2, a quantitative comparison has been made between the percentage of the effect of different input factors on the cutting speed of the WEDM process. According to Figure 2, parameters of pulse off time with 39% and pulse on time with 37% influence have the greatest effect on cutting speed. Also, according to the results of Figure 2, it can be seen that after the parameters of the pulse on and off time, the servo gap voltage will be the third parameter affecting the cutting speed with a 14% effect. The results of Figure 2 also show the insignificant effect of wire tension and peak current parameters (each 5% effect) on cutting speed.

According to Figure 3, the parameters of servo gap voltage with 59% and pulse on time with 31% influence have the greatest effect on dimensional deviation. Servo gap voltage parameters with 59% and pulse on time with 31% effect have the most effect on dimensional deviation. Also, according to the results of Figure 3, it can be seen that after the parameters of servo gap voltage and pulse on time, the peak current with 6% influence as the third parameter, will have a relatively acceptable effect on the cutting speed. The results of Figure 3 also show the insignificant effect of wire tension parameters and pulse off time with 3% and 1% effect respectively on the cutting speed and these two can be called as insensitive parameters.

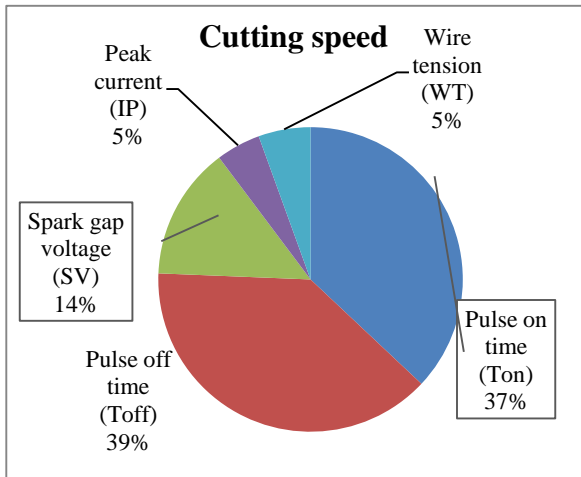


Figure 2. Effect of different input parameters on cutting speed

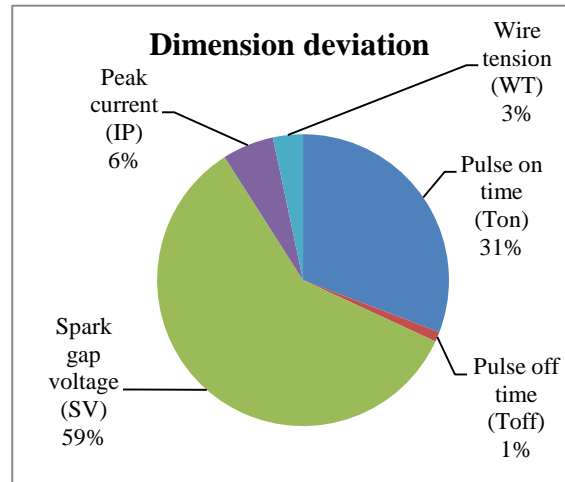


Figure 3. Effect of different input parameters on dimensional deviation

4. Summary and Conclusion

The investigations carried out in this research show that: The pulse off time and pulse on time parameters are the most effective parameters on the cutting speed in the investigated range. The contribution of these two parameters are 39% and 37%, respectively. Servo gap voltage parameter with 14% impact has been seen as the second influencing parameter on cutting speed. The parameters of wire tension and peak current each have a negligible effect on the cutting speed with 5%. Servo gap voltage parameters and pulse on time are the most effective parameters on dimensional deviation in the investigated range. The contribution of these two parameters are 59% and 31%, respectively. The parameters of wire tension, peak current and pulse off time can be considered as the least effective parameters on dimensional deviation.



تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر سرعت برشی و انحراف ابعادی ماشین کاری تخلیه الکتریکی باسیم

حامد فرجی الف، معین طاهری ب*

الف دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، hamedfarajiau@gmail.com

ب دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، m-taheri@araku.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
ماشین کاری تخلیه الکتریکی باسیم یکی از جدیدترین، محبوب‌ترین و دقیق‌ترین فرآیندهای ماشین کاری غیر سنتی می‌باشد که مطالعه بر روی آن در حال گسترش است. از جمله مزایای این فرآیند می‌توان به مواردی نظیر ماشین کاری دقیق قطعات با سختی متفاوت یا شکل‌های پیچیده اشاره کرد. با توجه به کاربردهای رو به افزایش این نوع ماشین کاری و از آنجاکه افزایش سرعت برشی و کاهش انحراف ابعادی در این فرآیند از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشند، انتخاب پارامترهای بهینه‌ی برش، نقش مهمی برای به دست آوردن سرعت برشی بالا و انحراف ابعادی کم دارد. انتخاب نادرست پارامترها، منجر به محدودیت در پارامترهای خروجی و در نهایت کاهش بهره‌وری می‌شود؛ لذا در این پژوهش با استفاده از روش تحلیل حساسیت آماری سوبل، که نسبت به سایر روش‌ها دارای مزیت دقت بالا و استخراج مقدار کمی تأثیر پارامترهاست، به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی مختلف، شامل زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ گپ سروو، جریان اوج و کشش سیم بر روی دو پارامتر خروجی سرعت برشی و انحراف ابعادی پرداخته شده است. نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت بیان‌گر این است که پارامترهای زمان خاموشی و روشنی پالس به ترتیب با ۳۹٪ و ۳۷٪، اثرگذارترین پارامترها بر سرعت برشی و پارامترهای ولتاژ گپ سروو و زمان روشنی پالس به ترتیب با ۵۹٪ و ۳۱٪، اثرگذارترین پارامترها بر انحراف ابعادی می‌باشند.	تحلیل حساسیت، ماشین کاری تخلیه الکتریکی، سرعت برشی، انحراف ابعادی.
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۳
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۰۹
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

۱- مقدمه

ماشین کاری تخلیه الکتریکی باسیم^۱، یک روش ماشین کاری غیر سنتی و الکتروحرارتی برای برش مواد سخت و رسانا به کمک الکتروود متحرک می‌باشد. این روش به کمک یک سری جرقه گسسته بین قطعه کار و ابزار (الکتروود) شناور در یک محیط دی‌الکتریک مایع، مواد را از قطعه کار جدا می‌سازد. همچنین این فرآیند برای ماشین کاری دقیق قطعات با سختی‌های متفاوت یا اشکال پیچیده‌ای که به روش ماشین کاری سنتی غیرممکن یا دشوارند و دارای لبه‌های تیز هستند استفاده می‌شود. الکتروودهای استفاده شده در این روش، سیم‌هایی از جنس مس، برنج یا تنگستن می‌باشند. قطر این سیم‌ها از ۰/۰۵ تا ۰/۳ و همچنین فاصله بین ابزار و قطعه کار از ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۵ میلی‌متر متغیر می‌باشد [۱].

از فرآیند WEDM به‌طور گسترده در صنایع هوافضا و خودرو استفاده می‌شود. این فرآیند تحت تأثیر سختی مواد قرار نمی‌گیرد و هیچ نیرویی را تجربه نمی‌کند. همچنین توانایی دستیابی به دقت بالا را دارد [۲]. هدف استفاده از WEDM رسیدن به بهره‌وری

^۱ Wire electric discharge machining (WEDM)

بالاتر ماشین کاری توأم با دقت و پرداخت سطح بهتر می‌باشد. خروجی‌های فرآیند تخت تأثیر متغیرهایی چون زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، کشش سیم، ولتاژ گپ سروو، جریان پیک و جریان اوج قرار دارد. متغیرهای زیاد و ماهیت پیچیده و تصادفی این فرایند به این معنی است که دستیابی به عملکرد بهینه، حتی برای یک اپراتور بسیار ماهر به ندرت امکان‌پذیر است. به همین دلیل بهینه‌سازی این فرایند از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد [۳]. در گذشته تحقیقات گسترده‌ای به منظور مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف بر خروجی‌های فرایند WEDM با استفاده از روش‌های مختلف حل مسئله انجام شده است.

بانرجی و همکاران به بررسی تأثیر پارگی مکرر سیم الکتروود بر روی سرعت برشی و دقت سطح قطعه کار پرداخته‌اند. طبق مشاهدات آن‌ها پارگی مکرر سیم یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های تولید در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی^۲ می‌باشد. این پدیده سرعت برشی را محدود و زمان ماشین کاری را افزایش می‌دهد. همچنین بر روی دقت برش سطح قطعه کار تأثیر منفی می‌گذارد. بار حرارتی، لرزش سیم و خرابی ناشی از اتصال کوتاه، از مهم‌ترین عوامل پارگی سیم می‌باشند. در تحقیقات آن‌ها یک مدل محاسباتی ساده تهیه شده است که مقادیر دما را برای سنجش میزان تأثیر پارامترهایی مانند قدرت ورودی، زمان روشنی پالس، سرعت و قطر سیم گزارش می‌دهد [۴].

راماگریشنان و کارونامورتی به بررسی تأثیر پارامترهای ماشین کاری فرآیند WEDM از جمله پالس به موقوع، کشش سیم، زمان تأخیر و شدت جریان احتراق بر روی نرخ براده برداری، زبری سطح و نسبت سایش سیم پرداخته‌اند. طراحی آزمایش به کمک روش تاگوچی صورت گرفته است [۵].

اردن و بیلگین در ابتدا اثر پودر ساینده مس-آلومینوم و آهن-کربن مخلوط شده در سیال دی‌الکتریک در فرآیند EDM را مطالعه کرده‌اند. همچنین پیشنهاد کرده‌اند که سرعت ماشین کاری با افزایش غلظت مخلوط پودر ساینده در سیال دی‌الکتریک به دلیل کاهش تأخیر زمانی افزایش می‌یابد [۶].

جسوانی پیشنهاد کرد که با استفاده از مخلوط نفت سفید با ۴ گرم پودر گرافیت به عنوان سیال دی‌الکتریک در فرآیند EDM، سرعت حذف مواد حدود ۶۰٪ بهبود یافته و می‌توان نسبت سایش الکتروود را حدود ۱۵٪ کاهش داد [۷].

اسپدینگ و وانگ تنظیمات پارامتر فرآیند را با استفاده از مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی برای توصیف سطوح قطعه کار در فرآیند WEDM بهینه کرده‌اند. آن‌ها ترکیب بهینه پارامترهایی چون عرض پالس، زمان بین دو پالس، کشش سیم و فضای تغذیه سیم را برای حداکثر سرعت برش، حفظ ناهمواری‌های سطح در محدوده‌های مورد نظر، به دست آورده‌اند [۸].

سرکار و همکاران در مدل‌سازی پژوهش خود از مدل افزایشی استفاده کرده‌اند. بر اساس مدل توسعه یافته، تأثیر پارامترهای مختلف ورودی بر معیارهای ماشین کاری بررسی شد. همچنین آن‌ها مشاهده کرده‌اند که زبری سطح و انحراف ابعادی مستقل از زمان خاموش شدن پالس می‌باشد. این موضوع بسیار مهم می‌باشد زیرا تحت شرایط خاص ماشین کاری، زمان خاموش شدن پالس می‌تواند بر اساس نیاز تغییر کند تا به ثبات و دقت بهینه برسد بدون اینکه بر دقت ابعادی و پرداخت سطح به طور قابل توجهی تأثیر بگذارد. قطعه کار بکار برده شده در این پژوهش از جنس آلیاژ آلومینیوم-تیتانیوم می‌باشد [۹].

سانچز و همکاران به مطالعه هندسه گوشه ایجاد شده توسط برش‌های متوالی پرداخته‌اند. در مناطق مختلف گوشه‌ها، خطاها بررسی شده و مشخص شده است که این خطاها مربوط به مواد حذف شده در طول هر برش بوده است. همچنین دریافته‌اند که مقدار محدودیت سرعت برشی بر متغیرهای متفاوت همچون ضخامت قطعه کار، شعاع گوشه و تعداد برش‌ها، بستگی دارد. در نتیجه با افزایش تعداد برش‌های پرداخت، خطا تا حد زیادی کاهش می‌یابد؛ اما به طور کلی دستیابی به برش بهینه در گوشه‌ها وجود ندارد، زیرا مقدار مواد حذف شده توسط برش‌های قبلی ثابت نیست [۱۰].

موناپیان به مطالعه تأثیر پارامترهای فرآیند WEDM از جمله زمان خاموش شدن پالس، ولتاژ تنظیم شکاف، جریان پیک، کشش سیم و تغذیه سیم بر روی سرعت برشی پرداخته‌اند. طبق مطالعات آن‌ها تأثیر پارامترهای تغذیه و کشش سیم بر سرعت برشی ناچیز می‌باشد. پالس در زمان، زمان خاموشی پالس و ولتاژ تنظیم شکاف به ترتیب بیشترین میزان اثرگذاری بر سرعت برشی را خواهند داشت. طراحی آزمایش بر اساس روش تاگوچی صورت گرفته است. قطعه کار مورد استفاده در این مطالعه از

² Electric discharge machining (EDM)

جنس کامپوزیت هیبریدی ریخته‌گری می‌باشد [۱۱].

پوری و باتاچاریا با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی در فرآیند WEDM تأثیر پارامترهای زمان روشنی پالس، زمان خاموش شدن پالس، جریان پیک، ولتاژ پیک، سرعت جریان دی‌الکتریک، ولتاژ تنظیم شکاف و چرخه سروو و کشش سیم را بر روی میانگین سرعت برشی، مشخصه پرداخت سطح و عدم دقت هندسی ناشی از تغییر سیم را بررسی کرده‌اند. طبق تحقیقات آن‌ها، مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر میانگین سرعت برشی در طول برش ناهموار، پالس در زمان، زمان خاموش شدن پالس و جریان پیک می‌باشند [۱۲].

نیرج شارما و همکاران به بررسی تأثیر پارامترهایی چون زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ گپ سروو، کشش سیم و جریان اوج بر روی سرعت برشی و انحراف ابعادی برای فرآیند WEDM پرداخته‌اند. قطعه کار مورد استفاده در این پژوهش از جنس فولاد کم آلیاژ با استحکام بالا (HSLA) می‌باشد. فولاد کم آلیاژ با استحکام بالا به دلیل داشتن خواصی چون استحکام، چقرمگی، خواص مقاومت در برابر خوردگی بالا کاربرد بسیاری در صنایع هوافضا، خودرو و قالب‌سازی دارد. از روش پاسخ سطح برای بهینه‌سازی پارامترهای ورودی مؤثر بر سرعت برشی و انحراف ابعادی و برای انجام آزمایش‌ها از طرح چرخشی مرکب مرکزی و همچنین برای تحقیق و بررسی عوامل مهم از تجزیه و تحلیل واریانس استفاده شده است. طبق نتایج به دست آمده، زمان روشنی پالس مهم‌ترین پارامتر ورودی برای سرعت برشی و انحراف ابعادی می‌باشد. مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر روی سرعت برشی، زمان روشنی و زمان خاموشی پالس و تأثیر متقابل زمان روشنی و خاموشی پالس - زمان روشنی پالس و کشش سیم می‌باشند. اثرات متقابل، زمان خاموشی پالس و ولتاژ گپ سروو - زمان روشنی پالس و جریان اوج - ولتاژ گپ سروو و کشش سیم و همچنین عملکرد درجه دوم زمان روشنی پالس و ولتاژ گپ سروو تأثیر قابل توجهی بر روی سرعت برش نداشته‌اند. زمان روشنی پالس و ولتاژ گپ سروو به عنوان پارامترهای پراثر برای انحراف ابعادی و جریان تخلیه و کشش سیم و تأثیر متقابل زمان روشنی پالس و ولتاژ گپ سروو - زمان روشنی پالس و جریان اوج و همچنین عملکرد درجه دوم جریان اوج و ولتاژ گپ سروو پارامترهای کم اثر معرفی شده‌اند [۱۳].

ساحا و همکاران از یک مدل رگرسیون چند متغیره و همچنین مدل شبکه عصبی پس انتشار به منظور پیش‌بینی زبری سطح و سرعت برشی در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی باسیم استفاده کرده‌اند. قطعه کار مورد استفاده در این تحقیق از مواد کامپوزیتی کاربید تنگستن کبالت بوده است. طبق تحقیقات آن‌ها دیده شده است که افزایش در پارامتر جریان پیک و ظرفیت خانی منجر به افزایش سرعت برشی و زبری سطح در محدوده مورد بررسی می‌شود [۱۴].

رائو و سارکار به بررسی تأثیر، جریان تخلیه، ولتاژ، سرعت سیم و کشش سیم بر روی ضخامت‌های مختلف برنج به عنوان قطعه کار پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که سرعت برشی با افزایش ضخامت کاهش می‌یابد. برای قطعه کدهایی با ضخامت کمتر، تأثیر جریان تخلیه بر روی سرعت برشی به مراتب بیشتر می‌باشد [۱۵].

محمد اعظم و همکاران اثر ۵ پارامتر پالس به موقع، زمان خاموشی پالس، فرکانس پالس، توان و سرعت سیم را بر سرعت برشی بررسی نموده‌اند. آزمایش‌های انجام شده روی فولاد کم آلیاژ با استحکام بالا با استفاده از سیم مولیبدن به عنوان الکتروود انجام شده است. طبق مطالعات آن‌ها مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر سرعت برشی توان، فرکانس پالس و زمان خاموشی پالس می‌باشند [۱۶].

تحلیل حساسیت روشی است که به وسیله آن تأثیر تغییرات ضرایب موجود در مدل‌ها را بر نتایج حاصل از آن‌ها می‌توان بررسی نمود. بررسی و مقایسه‌ی نتایج موجب افزایش دقت نتایج و صرفه‌جویی در وقت و هزینه می‌شود. همچنین تحلیل حساسیت، عدم قطعیت در خروجی یک مدل را بررسی نموده و بیان می‌نماید که این عدم قطعیت در خروجی چگونه به عدم قطعیت در ورودی مرتبط می‌گردد [۱۷]. از این روش به منظور شناسایی پارامترهای تأثیرگذار و غیر مؤثر در مدل خروجی استفاده می‌شود. مدل‌های تحلیل حساسیت در دو نوع محلی و عمومی طبقه‌بندی می‌شوند [۱۸]. روش ای - فست توسط کوکیر و همکارانش [۱۹] ارائه شده و سالتلی و همکارانش [۲۰] این روش را بهبود داده‌اند. تاکنون از روش‌های آماری تحلیل حساسیت جهت بررسی دقیق و کمی میزان تأثیرگذاری پارامترهای مختلف بر سرعت برشی و انحراف ابعادی در فرآیند WEDM

استفاده نشده است. در این مقاله ابتدا به بررسی کلی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی باسیم و تشریح روش‌های مختلف تحلیل حساسیت پرداخته شده است. پس از آن برای نخستین بار با استفاده از روش تحلیل حساسیت آماری سوبل اثر پارامترهای مختلف شامل ۵ پارامتر زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ گپ سروو، جریان اوج و کشش سیم بر ۲ پارامتر خروجی شامل سرعت برشی و انحراف ابعادی در فرآیند WEDM مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت آماری نشان می‌دهد که از بین پارامترهای ورودی، پارامترهای زمان خاموشی و روشنی پالس اثرگذارترین پارامترها بر سرعت برشی و پارامترهای ولتاژ گپ سروو و زمان روشنی پالس اثرگذارترین پارامترها بر انحراف ابعادی هستند.

۲- مدل سازی و فرمول بندی

در این بخش ابتدا به طور مختصر به ماشین کاری تخلیه الکتریکی باسیم پرداخته شده است. همچنین تحلیل حساسیت و روش‌های مختلف آن بر حسب فرم مدل شامل روش گرافیکی، ریاضی و آماری به طور مختصر بررسی شده و سپس با توجه به نیاز به بررسی تأثیر متقابل بین ورودی‌های مختلف، روش تحلیل حساسیت آماری سوبل، جهت تحلیل و بررسی اثر پارامترهای مختلف، انتخاب گشته و به شرح مختصر آن پرداخته شده است.

۲-۱- ماشین کاری تخلیه الکتریکی باسیم

ماشین کاری تخلیه الکتریکی باسیم یکی از پرکاربردترین روش‌های ماشین کاری غیر سنتی می‌باشد که تحقیق و مطالعه بر روی آن به سرعت در حال گسترش و پیشرفت است. سرعت برش و انحراف ابعادی از جمله خروجی‌های بسیار مهم در طی فرآیند WEDM بوده است.

با توجه به نتایج به دست آمده از مرجع [۱۳] مدل سرعت برشی و انحراف ابعادی به صورت کد^۳ شده بر حسب متغیرهای ورودی ماشین کاری به صورت رابطه ۱ و ۲ خواهد بود.

$$\begin{aligned} \text{CuttingSpeed} = & -71.66013 + 1.02336 \times T_{on} + 0.50630 \times T_{off} - 0.056081 \times SV \\ & - 0.063556 \times IP + 1.45932 \times WT - 3.26923E - 003 \times T_{on}^2 \\ & - 1.26374E - 003 \times T_{off}^2 - 3.31731E - 004 \times SV^2 - 4.01786E \\ & - 003 \times T_{on} \times T_{off} + 5.34722E - 004 \times T_{on} \times IP - 0.013229 \\ & \times T_{on} \times WT + 9.73214E - 004 \times T_{off} \times SV - 1.91964E - 003 \\ & \times T_{off} \times WT + 6.87500E - 005 \times SV \times IP + 2.03125E - 003 \\ & \times SV \times WT + 3.02083E - 004 \times IP \times WT \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{DimensionalDeviation} = & 28.19385 - 0.51293 \times T_{on} - 2.45833E - 003 \times T_{off} \\ & + 0.053585 \times SV + 0.029653 \times IP + 0.015521 \times WT \\ & + 2.44544E - 003 \times T_{on}^2 + 3.20089E - 004 \times SV^2 - 8.06250E \\ & - 004 \times T_{on} \times SV - 2.68750E - 004 \times T_{on} \times IP \end{aligned} \quad (2)$$

۲-۲- روش‌های آنالیز حساسیت

تحلیل حساسیت ابزاری جهت بررسی سیستم‌ها و تعیین تأثیر پارامترهای ورودی بر روی متغیرهای خروجی سیستم‌ها می‌باشد. آنالیز حساسیت را به چند طریق طبقه‌بندی می‌کنند. بر حسب کاربرد که به نوع قطعی یا احتمالی است یا بر حسب فرم مدل، که به روش‌های گرافیکی، ریاضی و آماری طبقه‌بندی می‌شود.

روش گرافیکی: در این روش تحلیل حساسیت، 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.

روش ریاضی: در روش ریاضی، 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.

³ Coded unit

روش آماری: این 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 این روش‌ها حساسیت خروجی مدل به ازای یک یا چندین ورودی ارزیابی می‌شود. در این روش‌ها علاوه بر اینکه امکان مقایسه کیفی نتایج و مشاهده خروجی‌ها وجود دارد، می‌توان به مقایسه کمی نتایج نیز پرداخت و پارامترهای حساس و غیر حساس را شناسایی نمود [۲۱].

روش تحلیل حساسیت سوبل یک روش آماری بوده و از روش‌هایی بر پایه واریانس پارامترهای ورودی سیستم بر روی تغییرهای خروجی سیستم می‌باشد. با استفاده از این روش می‌توان میزان اثرگذاری پارامترهای ورودی را بر خروجی سیستم محاسبه نمود. از این روش می‌توان برای توابع و مدل‌های غیرخطی و غیریکنواخت استفاده نمود [۲۲].

روش سوبل یک روش دقیق تحلیل حساسیت آماری بوده و در مقایسه با روش‌های آماری دیگر از جمله روش ای-فست به دلیل داشتن دقت بالاتر مورد توجه این مقاله قرار گرفته است.

در این روش برای مدل تعریف شده با تابع $Y = F(X)$ که Y خروجی مدل و $X_1(X_1, X_2, \dots, X_n)$ بردار پارامترهای ورودی می‌باشد و واریانس خروجی مدل (V) به صورت مجموع واریانس‌های هر ترم تجزیه شده به صورت رابطه ۳ می‌باشد:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i \leq j \leq n} V_{ij} + \dots + V_{i, \dots, n} \quad (3)$$

که در آن، V_i تأثیر مرتبه‌ی اول برای هر فاکتور ورودی x_i ($V_i = V[E(Y | x_i)]$) و V_{ij} ($V_{ij} = V[E(Y | x_i, x_j)] - V_i - V_j$) تا $V_{1, \dots, n}^2$ برهمکنش بین n فاکتور را نشان می‌دهند.

شاخص‌های حساسیت به صورت نسبت واریانس هر مرتبه به واریانس کلی به دست می‌آیند $S_i = \frac{V_i}{V}$ شاخص حساسیت مرتبه‌ی اول، $S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V}$ شاخص حساسیت مرتبه‌ی دوم و...

شاخص حساسیت کلی یا همان تأثیر کلی هر پارامتر به صورت مجموع همه‌ی مرتبه‌های شاخص حساسیت برای آن پارامتر به صورت رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$S_{Ti} = S_i + \sum_{i \neq j} S_{ij} + \dots \quad (4)$$

معادلات و روابط روش سوبل در مرجع [۲۳] به طور کامل ارائه شده است.

۳-۲- فلوجارت کلی فرایند تحلیل حساسیت

شکل ۱ نشان‌دهنده فلوجارت کلی فرایند تحلیل حساسیت می‌باشد. پس از انتخاب پارامترهای ورودی باید دامنه تغییرات این پارامترها انتخاب شوند. پارامترهای ورودی در این پژوهش شامل، پارامترهای زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ گپ سروو، جریان اوج و کشش سیم هستند. پس از تولید نمونه‌ها به کمک نرم‌افزار سیملب^۴ پارامترهای خروجی تولید می‌شوند سپس مقدار آن‌ها نیز در نرم‌افزار متلب^۵ تعیین می‌گردند و مجدداً اندیس‌های حساسیت با استفاده از روش سوبل توسط نرم‌افزار سیملب تولید خواهند شد.

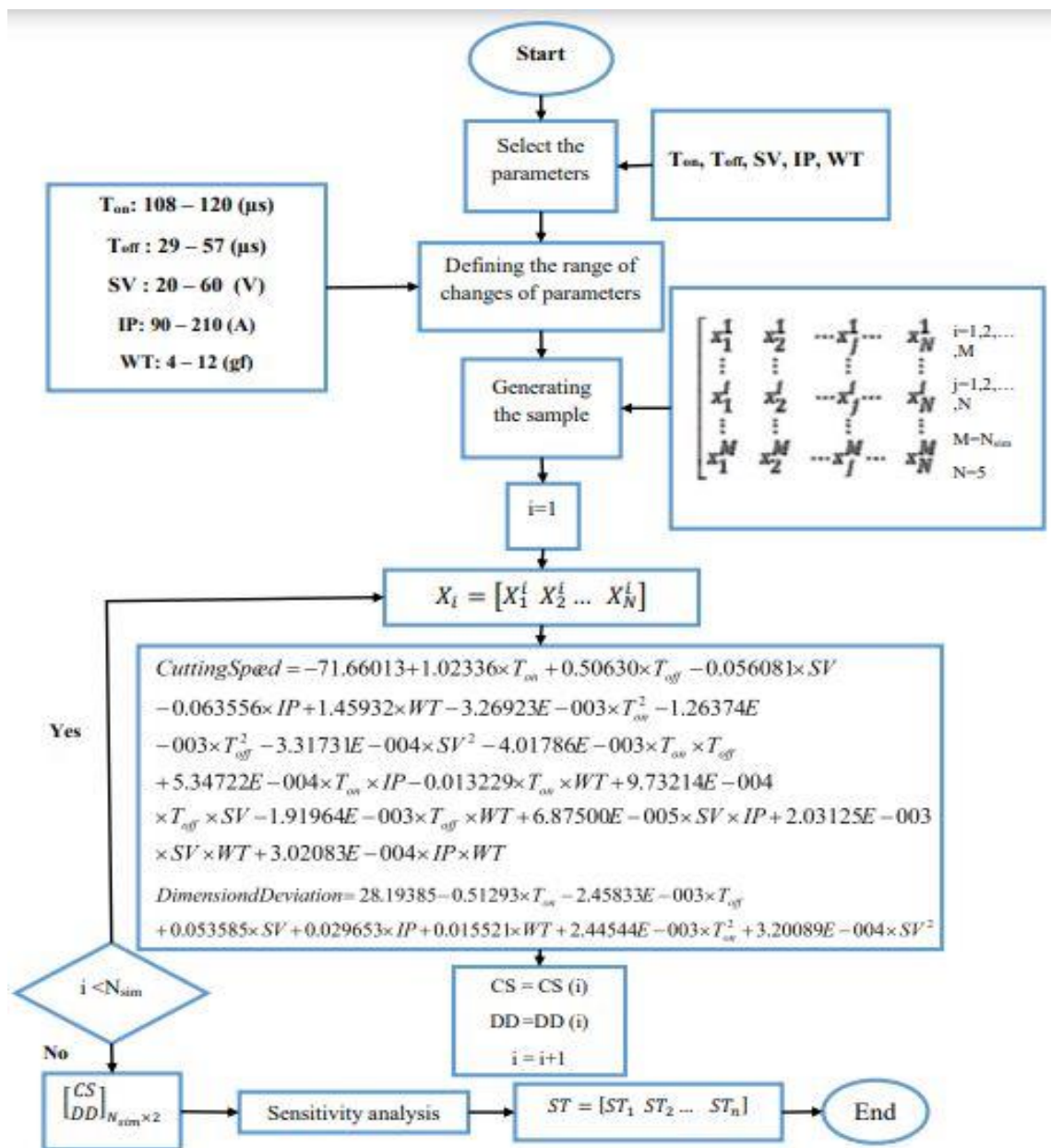
۳- تحلیل حساسیت پارامترها

در این بخش به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف فرآیند WEDM شامل زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ گپ سروو، کشش سیم و جریان اوج بر روی سرعت برشی و انحراف ابعادی پرداخته شده است. شکل‌های ۲ و ۳ پراکندگی نقاط

^۴ Simlab

^۵ MATLAB

سرعت برشی و انحراف ابعادی با تغییرات همزمان ۵ پارامتر ورودی را نشان می‌دهد. نقاط پراکنده موجود در این شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزار سیملب و به روش سوپل استخراج شده‌اند. در روش سوپل برخلاف روش‌های گرافیکی که در آن تمامی ورودی‌ها به‌جز یک ورودی ثابت است، با استفاده از الگوریتمی خاص تمامی پارامترها به‌طور همزمان تغییر می‌نمایند [۲۲].



شکل ۱ فلوجارت کلی تحلیل حساسیت

۳-۱- بررسی اثر پارامترهای ورودی مختلف بر سرعت برشی

شکل ۲ تحلیل حساسیت را با توجه به شاخص‌های آماری مورد مطالعه برای مدل‌های ورودی، که خروجی آن‌ها سرعت برشی می‌باشد اما ورودی آن‌ها به ترتیب زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ گپ سروو، جریان اوج و کشش سیم می‌باشد، را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۲-الف با افزایش زمان روشنی پالس، سرعت برشی به‌صورت خطی افزایش خواهد یافت. دلیل آن این است که مقدار بالاتر انرژی تخلیه باعث ایجاد جرقه‌های شدید میان قطعه کار و الکتروود متحرک می‌شود این جرقه‌ها باعث فرسایش

سریع‌تر مواد و همچنین افزایش سرعت برشی فرآیند می‌شوند.

شکل ۲-ب تأثیر زمان خاموشی پالس بر میزان سرعت برشی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش زمان خاموشی پالس، میزان سرعت برشی به‌صورت تقریباً خطی کاهش می‌یابد. توضیح این نکته ضروری است که با افزایش زمان خاموشی پالس زمان بیشتری برای روشن ماندن جریان وجود خواهد داشت یعنی تعداد تخلیه‌های بیشتری در هر ثانیه اتفاق می‌افتد. به این معنی است که فرسایش فلز سریع‌تر صورت می‌گیرد و سرعت برشی افزایش می‌یابد.

شکل ۲-ج نیز بیانگر این موضوع است که با افزایش ولتاژ گپ سروو، میزان سرعت برشی به‌صورت تقریباً خطی کاهش خواهد یافت. دلیل آن این است که با افزایش ولتاژ گپ سروو، زمان لازم برای تخلیه‌ی جرقه‌ها بیشتر می‌شود و به دنبال آن سرعت ماشین‌کاری کاهش می‌یابد.

شکل ۲-د تأثیر پارامتر جریان اوج بر میزان سرعت برشی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که جریان اوج تأثیر چندانی بر میزان سرعت برشی ندارد و افزایش جریان اوج باعث کاهش یا افزایش میزان سرعت برشی نشده است.

شکل ۲-ه نیز نشان‌دهنده اثر ناچیز کشش سیم بر سرعت برشی بوده و نشان‌دهنده این امر است که می‌توان این پارامتر را در گروه مؤلفه‌های غیر حساس بر سرعت برشی قرارداد. توضیح این نکته ضروری است که اگر کشش سیم کم باشد، سیم در نزدیکی ناحیه برش ممکن است شل شود و باعث انحراف ناخواسته سیم از مسیر خود می‌شود. به همین دلیل محل برخورد جرقه ممکن است نامووار شود. به‌طور مثال جرقه بعدی ممکن است بخشی از قطعه کار را که قبلاً توسط جرقه‌های قبلی بریده شده است را برش دهد.

۳-۲- بررسی اثر پارامترهای ورودی مختلف بر انحراف ابعادی

شکل ۳ پراکندگی نقاط متغیرهای پاسخ با تغییرات هم‌زمان پارامترهای ورودی را نشان می‌دهند. از روش سوبل برای استخراج نقاط پراکنده موجود در این شکل‌ها استفاده شده است.

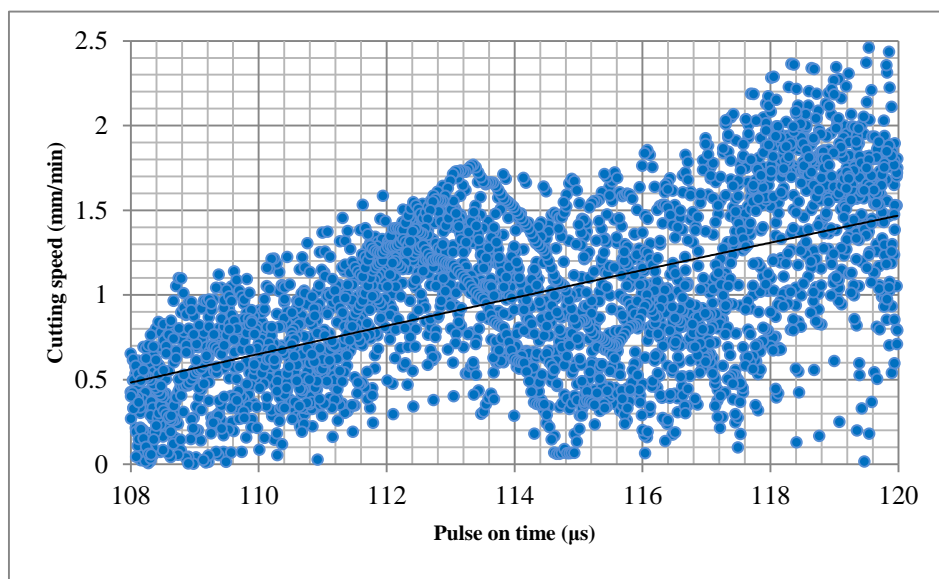
مطابق شکل ۳-الف با افزایش زمان روشنی پالس، انحراف ابعادی کاهش خواهد یافت. دلیل احتمالی آن ممکن است این باشد که با افزایش زمان روشنی پالس، انرژی تخلیه افزایش می‌یابد. در طول هر تخلیه‌ی جرقه، سیم ضربه‌ای را تجربه می‌کند که در جهت معکوس وقوع تخلیه جرقه عمل می‌کند بنابراین انحراف ابعادی کاهش می‌یابد.

پارامتر تأثیرگذار بعدی زمان خاموشی پالس است. همان‌طور که در شکل ۳-ب مشاهده می‌شود زمان خاموشی پالس با انحراف ابعادی رابطه عکس دارد، یعنی با افزایش زمان خاموشی پالس انحراف ابعادی کاهش می‌یابد ولی تأثیر این پارامتر ورودی بسیار ناچیز بوده و نشان‌دهنده این امر است که می‌توان این پارامتر را در گروه مؤلفه‌ی غیر حساس بر انحراف ابعادی قرار داد.

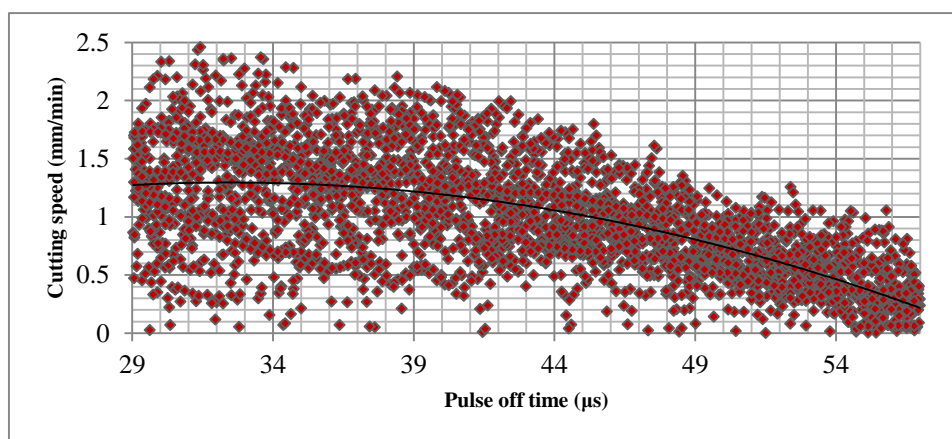
شکل ۳-ج تأثیر ولتاژ گپ سروو بر میزان انحراف ابعادی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش ولتاژ گپ سروو، میزان انحراف ابعادی با شیب قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش ولتاژ گپ سروو، نرخ برش کاهش می‌یابد. به دلیل کاهش سرعت برشی، روند فرسایش کند می‌شود و اگر فرآیند فرسایش کند تر اتفاق بیافتد، دقت ابعادی خوبی به دست می‌آید.

پارامتر بعدی جریان اوج می‌باشد که تأثیر این پارامتر در شکل ۳-د آورده شده است. با توجه به شکل، مانند تأثیر پارامتر زمان خاموشی پالس، با افزایش جریان اوج میزان انحراف ابعادی با شیب بسیار کمی کاهش می‌یابد. ولی تأثیر پارامتر جریان اوج نسبت به زمان خاموشی پالس بیشتر است. توضیح این نکته ضروری است که میزان انحراف ابعادی با افزایش جریان بیشینه کاهش می‌یابد، زیرا چگالی تخلیه جرقه نیز بسته به جریان بیشینه تغییر می‌کند.

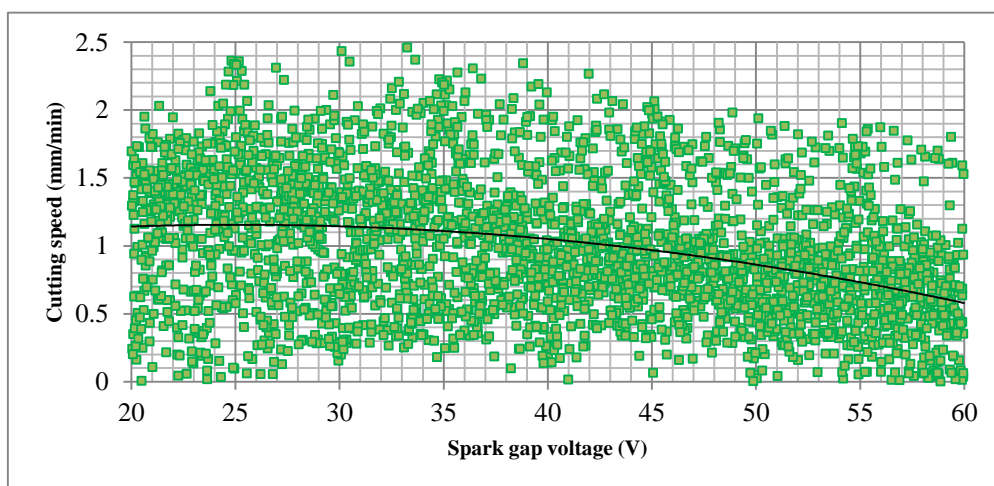
پارامتر بعدی که تأثیر آن مشاهده شده است تأثیر کشش سیم بر انحراف ابعادی است. همان‌طور که در شکل ۳-ه مشاهده می‌شود کشش سیم بر انحراف ابعادی تأثیر مثبتی خواهد داشت و با افزایش کشش سیم میزان نرخ براده برداری افزایش می‌یابد ولی اثر آن نسبت به پارامترهای زمان روشنی پالس و ولتاژ گپ سروو بسیار کم و ناچیز می‌باشد.



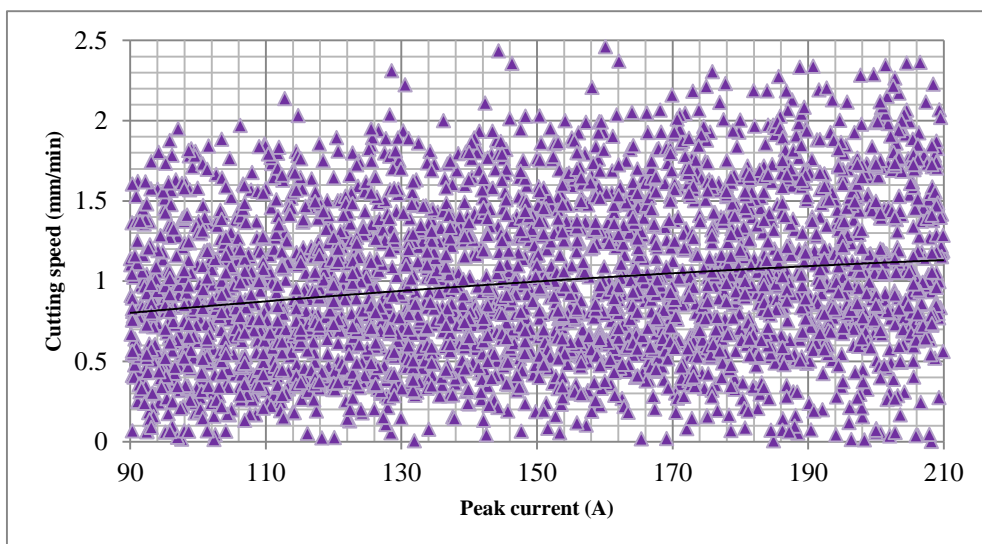
الف- اثر زمان روشنی پالس بر سرعت برشی



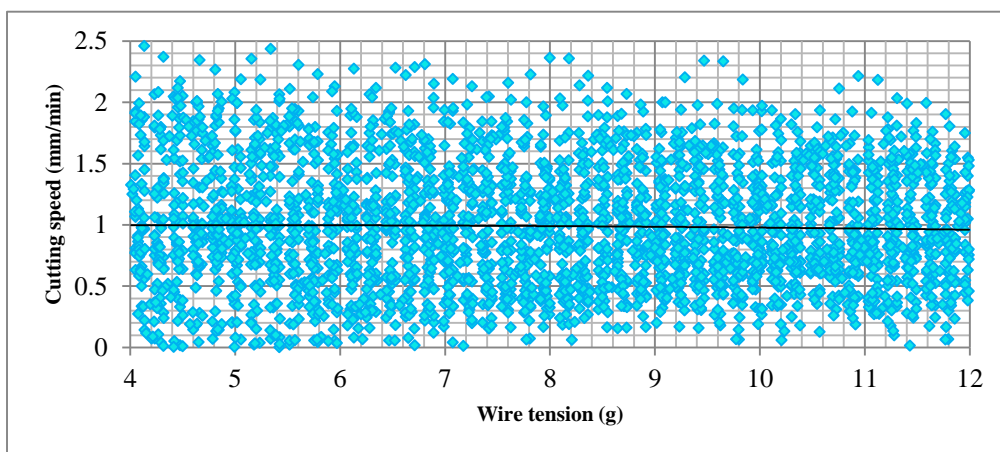
ب- اثر زمان خاموشی پالس بر سرعت برشی



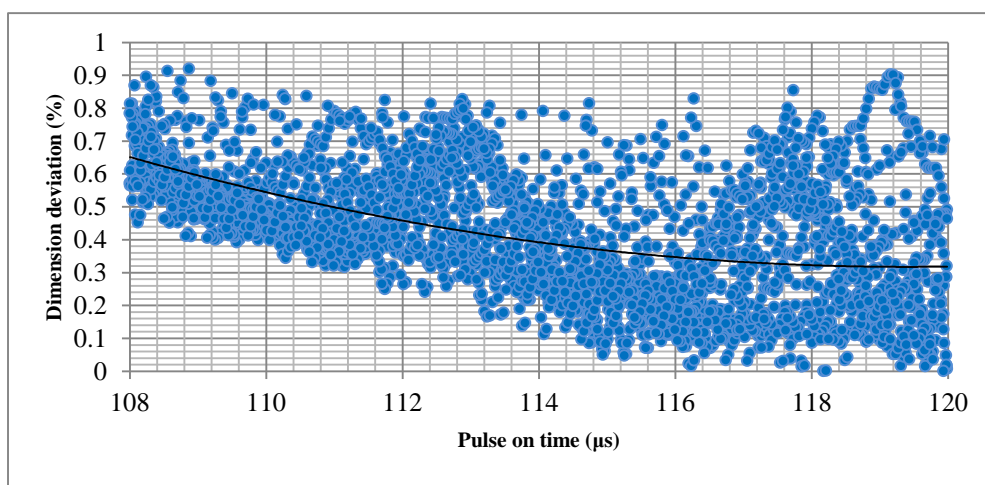
ج- اثر ولتاژ گپ سروو بر سرعت برشی



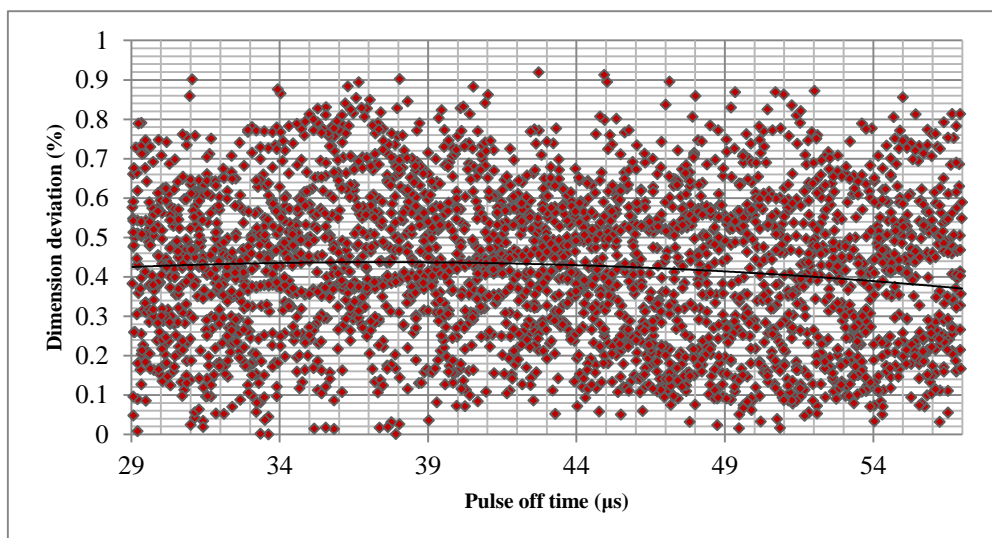
د- اثر جریان اوج بر سرعت برشی



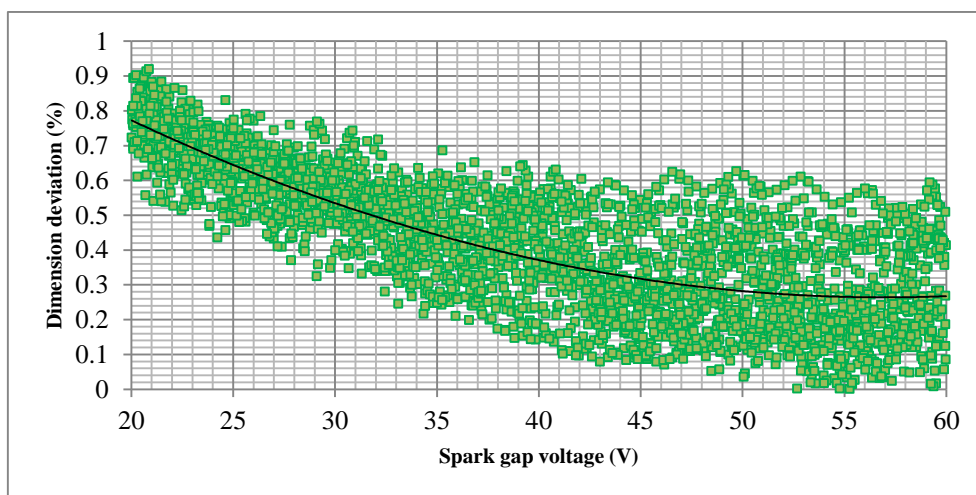
ه- اثر کشش سیم بر سرعت برشی
شکل ۲ اثر پارامترهای مختلف بر سرعت برشی



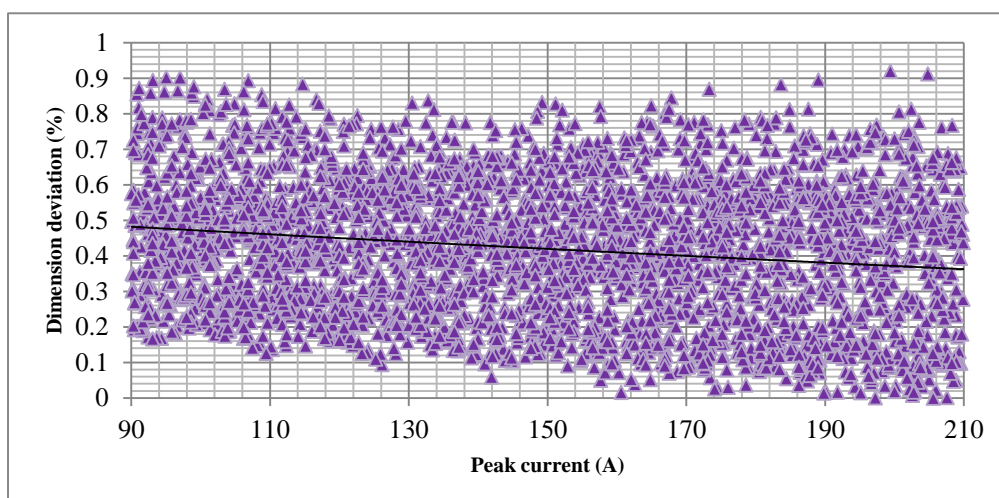
الف- اثر زمان روشنی پالس بر انحراف ابعادی



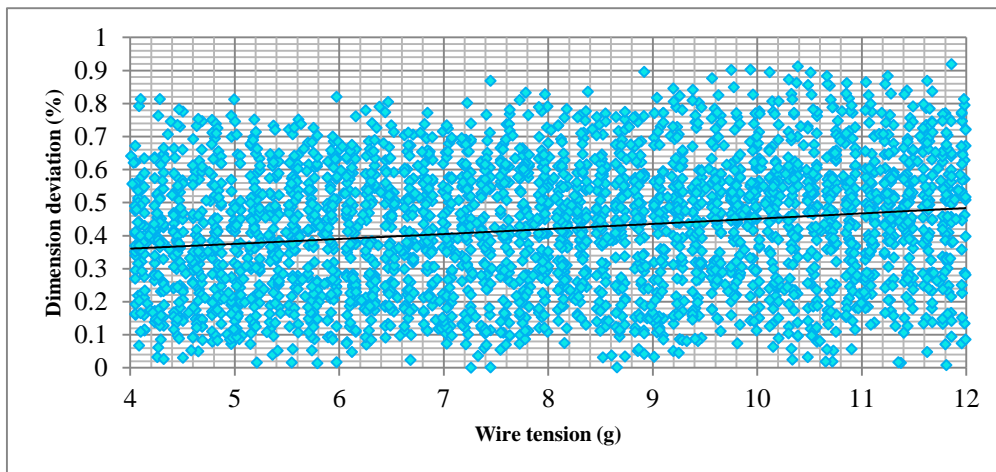
ب- اثر زمان خاموشی پالس بر انحراف ابعادی



ج- اثر ولتاژ گپ سروو بر انحراف ابعادی



د- اثر جریان اوج بر انحراف ابعادی

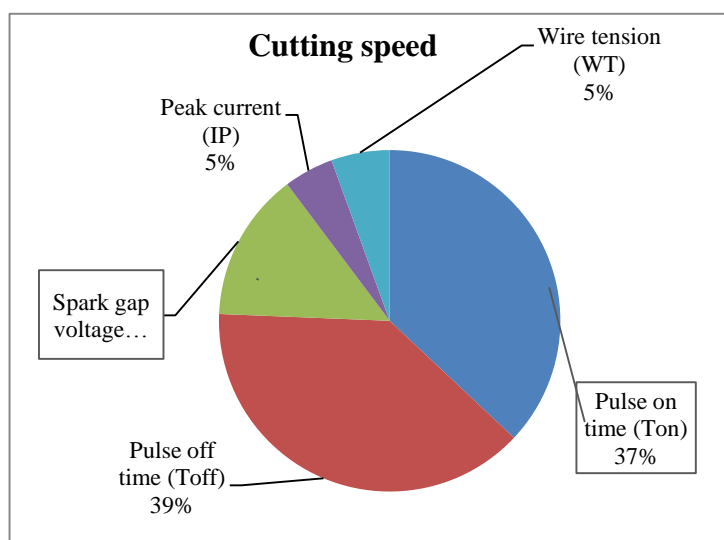


ه- اثر کشش سیم بر انحراف ابعادی

شکل ۳ اثر پارامترهای مختلف بر انحراف ابعادی

۳-۳- مقایسه کمی اثر پارامترهای ورودی مختلف بر سرعت برشی با استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل

در این بخش نتایج به صورت کیفی از تحلیل حساسیت سوبل به دست آمده‌اند. در شکل ۴ مقایسه کمی بین درصد تأثیر فاکتورهای مختلف ورودی بر سرعت برشی فرآیند WEDM صورت پذیرفته است. با توجه به شکل ۴، پارامترهای زمان خاموشی پالس با ۳۹٪ و زمان روشنی پالس با ۳۷٪ تأثیر، بیشترین اثر را بر سرعت برشی دارند. همچنین با توجه به نتایج شکل ۴ مشاهده می‌شود که پس از پارامترهای زمان روشنی و خاموشی پالس، ولتاژ گپ سروو با ۱۴٪ تأثیر به عنوان سومین پارامتر تأثیرگذار بر سرعت برشی خواهد بود. نتایج شکل ۴ همچنین نشان‌دهنده تأثیر ناچیز پارامترهای کشش سیم و جریان اوج (هرکدام ۵٪ تأثیر) بر سرعت برشی می‌باشد.

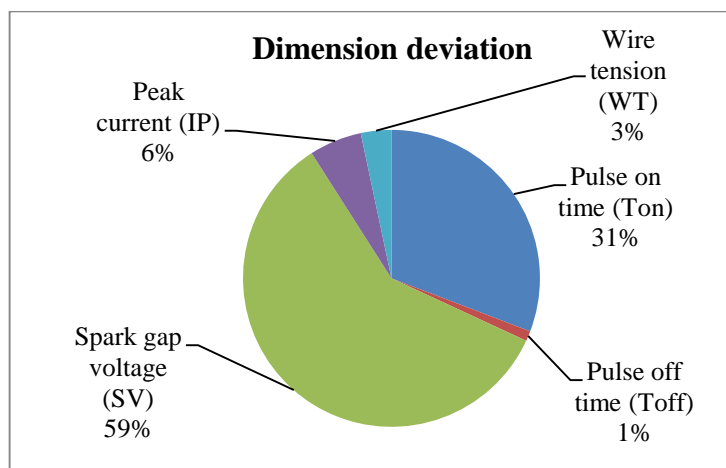


شکل ۴ اثر پارامترهای ورودی مختلف بر سرعت برشی

۳-۴- مقایسه کمی اثر پارامترهای ورودی مختلف بر انحراف ابعادی با استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل

در این بخش نتایج به صورت کیفی از تحلیل حساسیت سوبل به دست آمده‌اند. در شکل ۵ مقایسه کمی بین درصد تأثیر فاکتورهای مختلف ورودی بر انحراف ابعادی فرآیند WEDM صورت پذیرفته است. با توجه به شکل ۵، پارامترهای ولتاژ گپ سروو با ۵۹٪ و زمان روشنی پالس با ۳۱٪ تأثیر، بیشترین اثر را بر انحراف ابعادی دارند. همچنین با توجه به نتایج شکل ۵ مشاهده می‌شود که پس از پارامترهای ولتاژ گپ سروو و زمان روشنی پالس، جریان اوج با ۶٪ تأثیر به عنوان سومین پارامتر، با

تأثیرگذاری نسبتاً قابل قبولی بر سرعت برشی خواهد بود. نتایج شکل ۵ همچنین نشان‌دهنده تأثیر ناچیز پارامترهای کشش سیم و زمان خاموشی پالس به ترتیب با ۳٪ و ۱٪ تأثیر، بر سرعت برشی می‌باشد و می‌توان از این دو به‌عنوان پارامترهای غیر حساس نام برد.



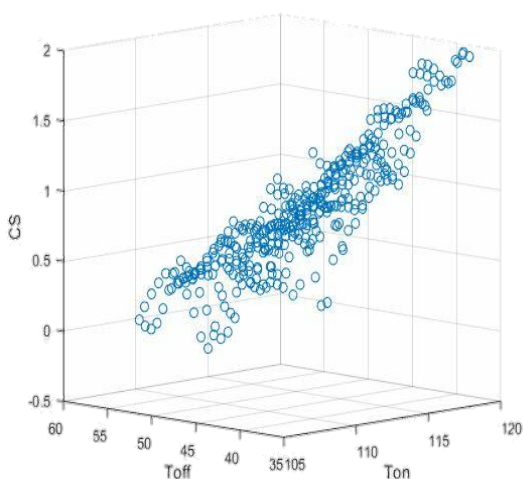
شکل ۵ اثر پارامترهای ورودی مختلف بر انحراف ابعادی

۴- صحت و امکان‌سنجی نتایج

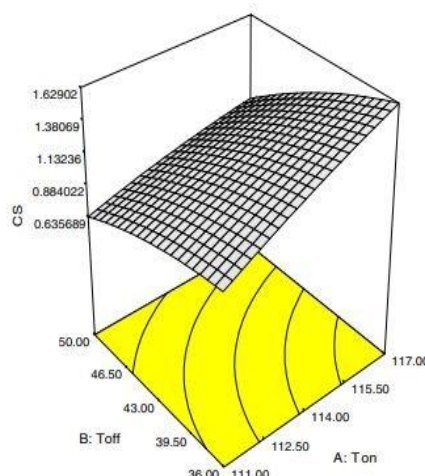
به‌منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل‌شده در این مقاله، نتایج موجود برای طراحی آزمایش‌ها در یک مرجع [۱۳] به‌کاربرده شد که در آن از روش سطح پاسخ، به‌ویژه طراحی مرکب مرکزی برای ایجاد یک رابطه تجربی بین پارامترهای فرآیند مختلف و پاسخ‌های خروجی یعنی سرعت برشی و انحراف ابعادی برای تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی استفاده شده است. در این روش اثرات اصلی فاکتورها و برهمکنش بین آن‌ها بررسی شده اما میزان سهم هر فاکتور به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار نگرفته بنابراین در این پژوهش از مدل آنالیز حساسیت سوپل استفاده شده است.

شکل ۶ مقایسه بین نتایج مقاله مرجع و این مقاله را برای صحت‌سنجی و تطابق آسان نتایج نشان می‌دهد که به‌منظور اختصار نتایج، مقایسه بین فاکتورهای زمان روشنی و خاموشی پالس برای فاکتور خروجی سرعت برشی و فاکتورهای زمان روشنی پالس و ولتاژ گپ سروو صورت گرفته است.

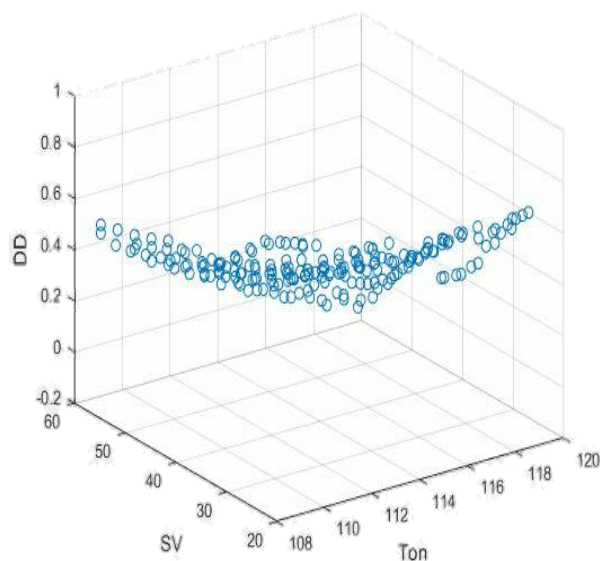
نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله نشان می‌دهد که همانند مرجع [۱۳] پارامترهای زمان روشنی و خاموشی پالس اثرگذارترین پارامترها بر سرعت برشی و پارامترهای زمان روشنی پالس و ولتاژ گپ سروو اثرگذارترین پارامترها بر انحراف ابعادی هستند. لذا با توجه به روند اثرگذاری سایر پارامترها می‌توان به‌طور کلی نتیجه گرفت که نتایج به‌دست‌آمده از صحت و سوق مناسبی برخوردار هستند.



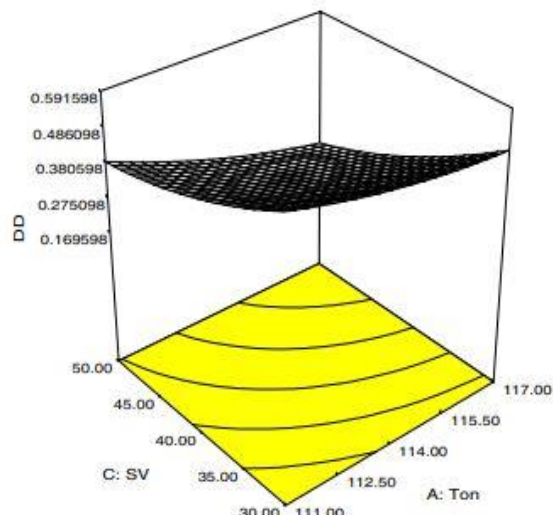
مقاله موجود



مقاله مرجع [۱۳]



مقاله موجود



مقاله مرجع [۱۳]

شکل ۶ - مقایسه نتایج مقاله موجود و مقاله مرجع

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روش تحلیل حساسیت آماری سوبل که نسبت به سایر روش‌های آماری تحلیل حساسیت از دقت بالایی برخوردار می‌باشد، برای اولین بار به بررسی کمی تأثیر پنج پارامتر ورودی شامل، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ گپ سروو، جریان اوج و کشش سیم بر سرعت برشی و انحراف ابعادی در فرآیند WEDM پرداخته شده است. در روش سوبل برخلاف روش‌های گرافیکی که در آن‌ها تمامی ورودی‌ها به‌جز یک ورودی ثابت است، با استفاده از الگوریتمی خاص تمامی پارامترها به‌طور هم‌زمان تغییر می‌نمایند و در نتیجه اثرگذاری پارامترهای مؤثر در فرآیند به نحو دقیق‌تری به دست می‌آیند. بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش بیانگر این است که:

پارامترهای زمان خاموشی و روشنی پالس اثرگذارترین پارامتر بر سرعت برشی در بازه‌ی موردبررسی می‌باشند. سهم اثرگذاری این دو پارامتر به ترتیب ۳۹٪ و ۳۷٪ می‌باشند. پارامتر ولتاژ گپ سروو با ۱۴٪ تأثیر به‌عنوان دومین پارامتر تأثیرگذار بر سرعت برشی دیده شده است.

پارامترهای کشش سیم و جریان اوج هرکدام با ۵٪، تأثیر ناچیزی بر سرعت برشی دارند. پارامترهای ولتاژ گپ سروو و زمان روشنی پالس اثرگذارترین پارامتر بر انحراف ابعادی در بازه‌ی موردبررسی می‌باشند. سهم اثرگذاری این دو پارامتر به ترتیب ۵۹٪ و ۳۱٪ می‌باشند. پارامترهای کشش سیم، جریان اوج و زمان خاموشی پالس را می‌توان کم‌اثرترین پارامتر بر انحراف ابعادی دانست.

۷- فهرست علائم

زمان روشنی پالس (μs)	T_{on}
زمان خاموشی پالس (μs)	T_{off}
ولتاژ گپ سروو (V)	SV
جریان اوج (A)	IP
کشش سیم (g)	WT
سرعت برشی	CS
انحراف ابعادی	DD

- [1] Jain VK. Advanced machining processes: Allied publishers, 2009.
- [2] Dauw DF, Beltrami I. High-Precision Wire-EDM by Online Wire Positioning Control. *CIRP Annals*. 1994;43:193-7.
- [3] Rao RV, Pawar PJ. Modelling and optimization of process parameters of wire electrical discharge machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2009;223:1431-40.
- [4] Banerjee S, Prasad BVSSS, Mishra PK. A simple model to estimate the thermal loads on an EDM wire electrode. *Journal of Materials Processing Technology*. 1993;39:305-17.
- [5] Ramakrishnan R, Karunamoorthy L. Multi response optimization of wire EDM operations using robust design of experiments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006;29:105-12.
- [6] Erden A, Bilgin S. Role of Impurities in Electric Discharge Machining. *Proceedings of the Twenty-First International Machine Tool Design and Research Conference: Springer*; 1981. p. 345-50.
- [7] Jeswani ML. Effect of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining. *Wear*. 1981;70:133-9.
- [8] Spedding TA, Wang ZQ. Parametric optimization and surface characterization of wire electrical discharge machining process. *Precision Engineering*. 1997;20:5-15.
- [9] Sarkar S, Mitra S, Bhattacharyya B. Parametric analysis and optimization of wire electrical discharge machining of γ -titanium aluminide alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;159:286-94.
- [10] Sanchez JA, Rodil JL, Herrero A, de Lacalle LNL, Lamikiz A. On the influence of cutting speed limitation on the accuracy of wire-EDM corner-cutting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;182:574-9.
- [11] Muniappan A, Jayakumar V, Ajithkumar R, Veerabhadra SK, Prasanna R. Optimization of WEDM Process Parameters for Cutting Speed using Taguchi technique. *Materials Today: Proceedings*. 2019;18:332-41.
- [12] Puri AB, 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;43:151-9.
- [13] Sharma N, Khanna R, Gupta RD, Sharma R. Modeling and multiresponse optimization on WEDM for HSLA by RSM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;67:2269-81.
- [14] Saha P, Singha A, Pal SK, Saha P. Soft computing models based prediction of cutting speed and surface roughness in wire electro-discharge machining of tungsten carbide cobalt composite. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008;39:74-84.
- [15] Rao C, Sarcar M. Evaluation of optimal parameters for machining brass with wire cut EDM. 2009.
- [16] Azam M, Jahanzaib M, Abbasi JA, Wasim A. Modeling of cutting speed (CS) for HSLA steel in wire electrical discharge machining (WEDM) using moly wire. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. 2016;39:802-8.
- [17] Tahmasbi V, Ghoreishi M, Taheri MJMME. Sensitivity analysis of material removal rate in dry electro-discharge machining process. 2016;15:382-6.
- [18] Saltelli A, Chan K, Scott E. *Wiley series in probability and statistics, in sensitivity Analysis*. Wiley New York; 2000.
- [19] Cukier R, Levine H, Shuler KJJocp. Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems. 1978;26:1-42.
- [20] Saltelli A, Tarantola S, Chan KPS. A Quantitative Model-Independent Method for Global Sensitivity Analysis of Model Output. *Technometrics*. 1999;41:39-56.
- [21] Taheri MJMME. Investigation and sensitivity analysis of dimensional parameters and velocity in the 3D nanomanipulation dynamics of carbon nanotubes using statistical Sobol method. 2019;19:125-35.
- [22] Taheri M, Tahmasbi V. The effect of various parameters on material removal rate in brass drilling operations using statistical sensitivity analysis. 2016.
- [23] Korayem M, Rastegar ZJIJoN, Nanotechnology. Application of nano-contact mechanics models in manipulation of biological nano-particle: FE simulation. 2012;8:35-50.