

مطالعه‌ی شدت جریان شکاف فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی سوپر آلیاژ اینکونل ۶۲۵

معین طاهری^۱، زهرا سادات اقدامی^۲ حامد فرجی^۳

۱- دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

چکیده

سوپر آلیاژ اینکونل ۶۲۵ از جمله آلیاژهای پایه نیکل دارای دارای خواص مکانیکی عالی بوده و در صنایع شیمیایی و هوافضا کاربرد فراوانی دارند. با توجه به مقاومت بالای این آلیاژ به خوردگی و خستگی، برای ماشین‌کاری آن از فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم استفاده می‌شود. ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم یک فرآیند ماشین‌کاری حرارتی تخصصی است که در آن الکتروود یک سیم رسانای الکتریکی (ساخته شده از مس نازک، برنج یا تنگستن با قطر ۰.۰۵ - ۰.۳ میلی‌متر) با حرکت مداوم منجر به ایجاد جرقه می‌شود. در این پژوهش با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست به بررسی کمی و همزمان میزان اثرگذاری پارامترهای ورودی، شامل زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ سروو و نرخ تغذیه سیم به طور همزمان بر روی پارامتر خروجی جریان شکاف برای سوپر آلیاژ اینکونل ۶۲۵ پرداخته شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که زمان خاموشی پالس با ۳۵ درصد و به دنبال آن با اختلاف ناچیزی، ولتاژ سروو با ۳۴ درصد مؤثرترین پارامترها بر روی شدت جریان شکاف در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم معرفی شده است. زمان روشنی پالس با ۲۵ درصد پارامتر تاثیر گذار بعدی می‌باشد. در نهایت نرخ تغذیه سیم با ۶ درصد کم‌ترین تاثیر را بر جریان شکاف خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم- جریان شکاف- روش تاگوچی- آنالیز حساسیت- ای فست

۱- مقدمه

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم^۱ (WEDM) یک فرآیند ماشین‌کاری حرارتی تخصصی است که قادر به ماشین‌کاری دقیق قطعات رسانا با سختی متفاوت یا اشکال پیچیده است. این فرآیند مهم، شکل ویژه‌ای از فرآیند تخلیه الکتریکی سنتی است که در آن الکتروود یک سیم رسانای الکتریکی (ساخته شده از مس نازک، برنج یا تنگستن با قطر ۰.۰۵ - ۰.۳ میلی‌متر) با حرکت مداوم منجر به ایجاد جرقه می‌شود [۱].

گوبال با مطالعه بر روی سوپر آلیاژ اینکونل ۶۲۵ بیان کرد که این آلیاژ ماده‌ای مهم برای صنایع خودروسازی و هوافضا است. آلیاژسازی، ذوب و فرآوری اینکونل ۶۲۵ مقاومت مطلوبی را در برابر چرخه پایین و خستگی حرارتی فراهم می‌کند. آلیاژهای سوپر اینکونل ۶۲۵ دارای خواص مکانیکی عالی بوده و در صنایع شیمیایی و هوافضا کاربرد فراوانی دارند [۲].

کاویمانی و همکاران به منظور بررسی تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر روی پاسخ‌های خروجی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم بر روی کامپوزیت زمینه فلزی پایه منیزیم از روش تاگوچی و تحلیل رابطه‌ای

استفاده کرده‌اند. در نتیجه نمونه کامپوزیت با حداقل درصد وزنی r-GO حداکثر مقدار نرخ براده برداری را در ترکیب پارامتر فرآیند زمان روشنی پالس (۴۰ میکرو ثانیه)، زمان خاموشی پالس (۱۴ میکرو ثانیه) و تغذیه سیم ۶ متر بر دقیقه به دست آورده‌اند [۳]. کومار و همکاران از تحلیل رابطه خاکستری^۲ برای بهینه‌سازی پارامتر ماشین‌کاری در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم استفاده کرده‌اند [۴]. بیسواس و همکاران از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر غالب ترکیبی و شبکه عصبی مصنوعی برای بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی استفاده کرده‌اند [۵]. گوسوامی و کومار بررسی یکپارچگی سطح، سرعت حذف مواد و نسبت سایش سیم Nimonic 80 A را با استفاده از فرآیند در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم ارائه کرده‌اند. برای برنامه ریزی و طراحی آزمایش‌ها از روش طراحی آزمایشات تاگوچی استفاده شده است. همه پارامترهای ورودی و برهم‌کنش دو عامل از نظر تأثیر آنها بر پاسخ مورد علاقه از نظر استاتیکی معنی دار هستند. میکروسکوپ روبشگر الکترونی بر روی نمونه‌های ماشین‌کاری شده برای بررسی اثر و ریزساختار نمونه‌ها پس از ماشین‌کاری انجام شده است. تنظیم زمان پالس بالاتر منجر به لایه ضخیم‌تر ریخته‌گری مجدد می‌شود. در مقدار کمتر زمان پالس و مقدار بیشتر زمان خاموشی، رسوب سیم روی سطح ماشین‌کاری شده کم است [۶]. سینگ و همکاران توسعه مدل‌های ریاضی برای ارتباط بین پارامترهای مختلف ماشین‌کاری و پارامترهای عملکردی ماشین‌کاری بر روی فولاد با استفاده از روش سطح پاسخ را مورد مطالعه قرار داده‌اند.

پارامترهای بهینه مشاهده شده براساس مطلوبیت کامپوزیت (۶۱.۴٪) پالس در زمان ۱۱۲.۶۶ میکروثانیه، زمان خاموشی پالس ۴۵ میکروثانیه، ولتاژ شکاف جرقه ۴۶.۹۵ ولت، تغذیه سیم ۲ میلی‌متر بر دقیقه و جریان پیک ۹۹.۹۹ آمپر برای رسیدن به حداکثر شکاف می‌باشند [۷]. ماجومدر و میتی پارامترهای ورودی بهینه بر آلیاژ حافظه شکل Ni-Ti را بررسی نموده‌اند. در نتیجه ترکیب پارامتر ورودی زمان روشنی پالس ۱۲۰ میکرو ثانیه، زمان خاموشی پالس ۵۵ میکروثانیه، تغذیه سیم ۳ متر در دقیقه و کشش سیم ۸ کیلوگرم-نیرو برای تولید نتایج بهینه یافت شده است [۸]. موتوکومار و همکاران بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی سوپر آلیاژ Incoloy800 با ویژگی‌های عملکردی متعدد مانند نرخ حذف مواد، زبری سطح و کرف بر اساس روش خاکستری- تاگوچی را بررسی نموده‌اند [۹]. لودهی و همکاران مطالعات خود را در جهت بهینه‌سازی شرایط ماشین‌کاری برای زبری سطح بر اساس روش تاگوچی انجام داده‌اند. آزمایش‌ها تحت زمان‌های مختلف پالس، زمان پالس خاموش، جریان پیک و تغذیه سیم انجام شد. در نتیجه مشاهده شد که جریان تخلیه بیشترین تأثیر را بر زبری سطح دارد [۱۰]. راماکریشنان و

² Grey Relational Analysis (GRA)

¹ Wire Electrical Discharge Machining

$$\begin{aligned}
 & 9.57 + 0.1868T_{on} - 0.3378T_{off} - 0.2986SV \\
 & - 0.626WF - 0.001425T_{on} \times T_{off} \\
 & - 0.002199T_{on} \times SV \\
 & - 0.000003T_{on} \times WF + 0.00905T_{off} \times SV \quad (1) \\
 & 0.0064T_{off} \times WF + 0.00555SV \times WF
 \end{aligned}$$

۴- آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت روشی برای شناسایی پارامترهایی با بیشترین اثر را روی خروجی می‌باشند. از این روش به منظور شناسایی متغیرهای ورودی مؤثر و غیر مؤثر در پاسخ خروجی استفاده می‌شود. روش‌های تحلیل حساسیت عبارتند از روش ترسیمی، روش ریاضیاتی و روش آماری. از بین این روش‌ها، روش آماری متغیرهای ورودی سیستم را بر اساس توزیع احتمالی شبیه‌سازی می‌کند؛ بنابراین می‌توان اثر متقابل بین پارامترهای مختلف ورودی را بر روی پاسخ خروجی سیستم ارائه کرد [۱۴-۱۵].

روش ای-فست یکی از روش‌های آنالیز حساسیت آماری و مستقل از مدل است که بر پایه‌ی تجزیه واریانس می‌باشد. از این روش می‌توان برای توابع و مدل‌های غیرخطی و غیریکپارچه استفاده کرد. کاربرد روش ای-فست در چند مرحله ارائه می‌شود.

مرحله اول: انتخاب مجموعه‌ای از n فرکانس که تعداد پارامترهای ورودی n مدل می‌باشد.

مرحله دوم: نسبت دادن به‌دنبالخواه یک فرکانس از مجموعه فرکانس‌ها برای هر پارامتر ورودی.

مرحله سوم: معرفی منحنی جستجو که فضای همه پارامترهای ورودی را کاوش می‌کند.

مرحله چهارم: محاسبه اندیس‌های حساسیت مرتبه اول و مرتبه کلی به‌وسیله تحلیل فوریه برای خروجی [۱۶].

روش ای-فست با تعریف تابع انتقال، انتگرال‌های چندبعدی را به انتگرال‌های تک‌بعدی تبدیل کرده و موجب ساده‌سازی روند محاسبه شاخص‌های حساسیت می‌گردد.

به منظور استفاده از روش ای-فست ورودی X_i در فرمول (۲) به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned}
 x_i &= G_i(\sin(\omega_i s + \varphi_i)) = \\
 & \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1}(\sin(\omega_i s + \varphi_i)) \quad (2)
 \end{aligned}$$

که فرکانس مرتبط با X_i به صورت ω_i و φ_i نقطه شروع منحنی تعریف شده‌اند. S نیز متغیری در بازه $-\pi$ تا π است.

$$\begin{aligned}
 V(Y) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2(s) ds - \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) ds \right]^2 \\
 &\approx \sum_{j=-\infty}^{\infty} (A_j^2 + B_j^2) - (A_0^2 + B_0^2) \approx 2 \sum_{j=1}^N (A_j^2 + B_j^2) \quad (3)
 \end{aligned}$$

G ها توابع انتقال، A_j و B_j ضرایب فوریه می‌باشند که در فرمول‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است.

$$A_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \cos(js) ds \quad (4)$$

کارونامورتنی به بررسی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم از جمله پالس به موقع، 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 [۱۱]. محمد اعظم و همکاران اثر پنج 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 الکترود انجام شده است. طبق مطالعات آن‌ها مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر سرعت برشی توان، فرکانس پالس و زمان خاموشی پالس می‌باشند [۱۲].

۲- بیان اهداف و نوآوری

با توجه به کاربرد Inconel 625 در صنایع مختلف صنایع هوایی، هوافضا، هسته‌ای، شیمیایی، پتروشیمی و دریایی بررسی و تحلیل پارامترهای مؤثر بر آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در پژوهش‌های پیشین پارامترهای اصلی شامل زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ سروو و نرخ تغذیه سیم در پردازش Inconel 625 برای ارزیابی اثرات آن‌ها با هدف به حداقل رساندن جریان شکاف و زبری سطح حداکثر رساندن سرعت برشی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این پژوهش برای نخستین بار از روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست به منظور بررسی کمی و دقیق چگونگی تأثیر همزمان پارامترهای ورودی فرآیند شامل زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ سروو و نرخ تغذیه سیم بر روی پارامتر خروجی جریان شکاف برای سوپر آلیاژ Inconel 625 نمونه‌ها پرداخته شده است. هدف اصلی این پژوهش شناخت مؤثرترین پارامتر ورودی بر خروجی جریان شکاف در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم می‌باشد.

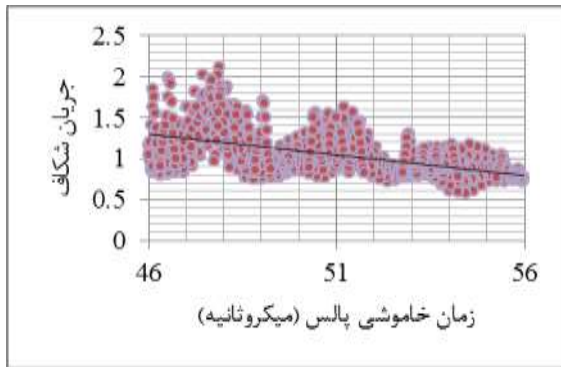
۳- تعیین معادله رگرسیون جریان شکاف

طراحی آزمایش‌ها به منظور دستیابی به بهینه‌ترین تعداد آزمایش، با هدف صرفه‌جویی در هزینه و وقت به دو روش ANOM و روش آنالیز نسبت سیگنال به نویز انجام می‌شوند. همچنین می‌تواند با استفاده از یک تابع ضرر، اثربخشی محصول یا فرآیند را به طور مؤثر بهبود بخشد و به محصولی با کیفیت قوی از نظر طراحی پارامتر دست یابد. علاوه بر این، از تحلیل واریانس (ANOVA) برای تخمین خطای واریانس و تعیین پارامترهای معنی‌دار استفاده می‌شود [۱۳]. به منظور طراحی آزمایش به کمک روش تاگوچی، متغیرهای ورودی مورد بررسی در سه سطح به همراه سطوح آن‌ها در جدول ۱ به نمایش گذاشته شده است.

جدول ۱- مقادیر سطح‌های مختلف پارامترهای ورودی

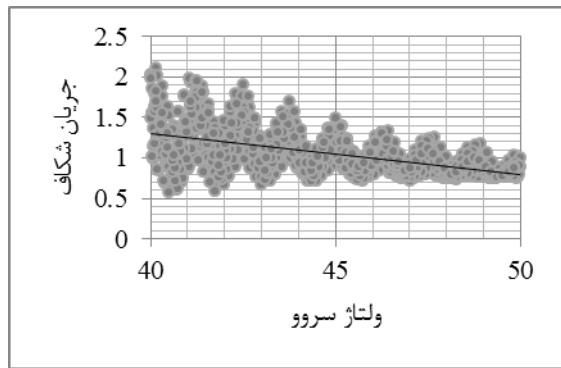
متغیر	نماد	واحد	-۱	۰	۱
زمان روشنی پالس	T_{on}	μs	۹۶	۱۱۱	۱۲۶
زمان خاموشی پالس	T_{off}	μs	۴۶	۵۱	۵۶
ولتاژ سروو	SV	V	۴۰	۴۵	۵۰
نرخ تغذیه سیم	WF	mm/min	۴	۶	۸

همچنین معادله رگرسیون حاصل از پارامترهای جدول ۱ به صورت معادله ۱ نمایش داده شده است.



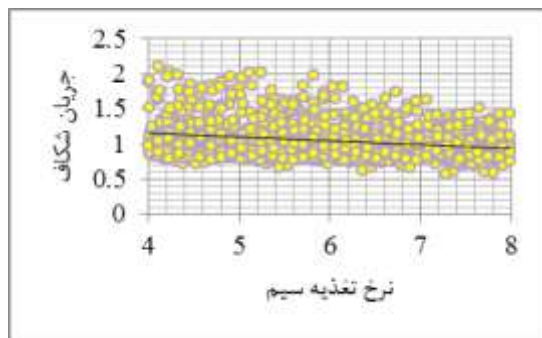
شکل ۲- تأثیر زمان خاموشی پالس بر شدت جریان شکاف

با توجه به شکل ۳ که بیانگر تأثیر ولتاژ سروو بر شدت جریان شکاف می‌باشد، هرچه این ولتاژ افزایش یابد، شدت جریان شکاف با شیب نسبتاً تندی کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۳- تأثیر ولتاژ سروو بر شدت جریان شکاف

شکل ۴ تأثیر آخرین پارامتر ورودی در این پژوهش را بر شدت جریان شکاف نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار افزایش نرخ تغذیه سیم شدت جریان شکاف را کاهش می‌دهد.



شکل ۴- تأثیر نرخ تغذیه سیم بر شدت جریان شکاف

۶- مقایسه کمی اثر پارامترهای ورودی مختلف بر جریان شکاف در این بخش از پژوهش تأثیر فاکتورهای مختلف ورودی بر جریان شکاف فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم به صورت کمی مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به نمودار به دست آمده از روش ای-فست در

$$B_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \sin(js) ds \quad (5)$$

با محاسب ضرایب فوریه برای فرکانس پایه ω_i و هارمونیک‌های بالاتر آن می‌توان واریانس جزئی مرتب اول ورودی X_i را به دست آورد.

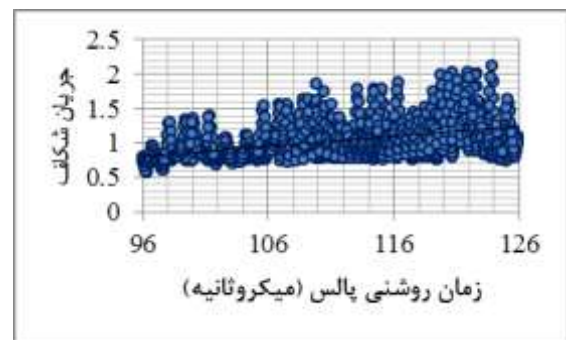
$$V_i = \sum_{p \in z^0} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) = 2 \sum_{p=1}^{\infty} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) \quad (6)$$

برای محاسبه شاخص حساسیت اصلی مانند روش سوئل از نسبت واریانس جزئی مرتبه اول به واریانس کلی استفاده می‌کنیم. شاخص حساسیت کلی نیز از فرمول (۷) به دست می‌آید [۱۷]:

$$ST_i = 1 - \frac{F_{-i}}{F} \quad (7)$$

۵- تحلیل نتایج

جریان شکاف بین قطعه در حال ماشین‌کاری و ابزار مورد استفاده از عوامل موثر بر کیفیت در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم می‌باشد. جریان شکاف در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم تحت تأثیر عوامل متعددی می‌باشد. در شکل‌های ۱ تا ۴ پراکندگی نقاط جریان شکاف با تغییرات هم‌زمان چهار پارامتر ورودی به روش ای-فست و با استفاده از نرم‌افزار سیم‌لب نشان داده شده است. شکل ۱ نمودار تأثیر زمان روشنایی پالس را بر جریان شکاف را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار با افزایش زمان روشنایی پالس، میزان جریان شکاف افزایش می‌یابد.

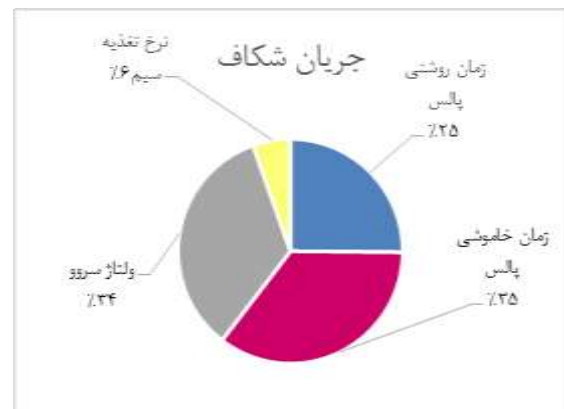


شکل ۱- تأثیر زمان روشنایی پالس بر شدت جریان شکاف

شکل ۲ به بررسی تأثیر زمان خاموشی پالس بر شدت جریان شکاف پرداخته است. نمودار حاصل بیان می‌کند که به دنبال افزایش زمان خاموشی پالس، شدت جریان شکاف با شیب زیادی کاهش پیدا می‌کند.

- Manufacturing Processes, vol. 20, pp. 33-39, 2015.
- [5] M. S. Biswas, K. Mandal, and S. Sarkar, "MOGA approach in WEDM of advanced aluminium alloy," *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 887-890, 2020.
- Today:Proceedings, vol. 26, pp. 887-890, 2020.
- [6] A. Goswami and J. Kumar, "Investigation of surface integrity, material removal rate and wire wear ratio for WEDM of Nimonic 80A alloy using GRA and Taguchi method," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 173-184, 2014.
- [7] V. Singh, R. Bhandari, and V. K. Yadav, "An experimental investigation on machining parameters of AISI D2 steel using WEDM," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 93, no. 1, pp. 203-214, 2017.
- [8] H. Majumder and K. Maity, "Multi-response optimization of WEDM process parameters using taguchi based desirability function analysis," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 338, no. 1: IOP Publishing, p. 012004.
- [9] B. K. Lodhi and S. Agarwal, "Optimization of machining parameters in WEDM of AISI D3 Steel using Taguchi Technique," *Procedia CIRP*, vol. 14, pp. 194-199, 2014.
- [10] M. K. Va, S. B. Ab, V. Rc, and R. Md, "Optimization of the WEDM parameters on machining Incoloy800 super alloy with multiple quality characteristics," *Optimization*, vol. 2, no. 6, pp. 1538-1547, 2010.
- [11] R. Ramakrishnan and L. Karunamoorthy, "Multi response optimization of wire EDM operations using robust design of experiments," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 29, no. 1, pp. 105-112, 2006.
- [12] M. Azam, M. Jahanzaib, J. A. Abbasi, and A. Wasim, "Modeling of cutting speed (CS) for HSLA steel in wire electrical discharge machining (WEDM) using moly wire," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 39, no. 7, pp. 802-808, 2016.
- [13] A. Atarodi, H. Karami, A. Ardeshir, and K. Hosseini, "Optimization of the Geometric Parameters of the Protective Spur Dike using Taguchi Method and GRA," *JWSS-Isfahan University of Technology*, vol. 24, no. 1, pp. 13-26, 2020.
- [14] M. Qasemi, M. Sheikhi, V. Tahmasbi, and M. Zolfaghari, "Experimental analysis, mathematical modeling and Sobol sensitivity analysis of surface roughness in orthopedic milling process (polymethylmethacrylate)," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 11, no. 1, pp. 139-152, 2021.
- [15] G. Qian and A. Mahdi, "Sensitivity analysis methods in the biomedical sciences," *Mathematical biosciences*, vol. 323, p. 108306, 2020.
- [16] R. Cukier, H. Levine, and K. Shuler, "Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems," *Journal of computational physics*, vol. 26, no. 1, pp. 1-42, 1978.
- [17] T. Homma and A. Saltelli, "Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 52, no. 1, pp. 1-17, 1996.

شکل ۵ از میان چهار پارامتر موردبررسی در این فرآیند، زمان خاموشی پالس با ۳۵ درصد به عنوان و به دنبال آن با اختلاف ناچیزی، ولتاژ سروو با ۳۴ درصد موثرترین پارامترها بر روی شدت جریان شکاف در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با سیم معرفی شده است. زمان روشنی با ۲۵ درصد پارامتر تاثیرگذار بعدی می باشد. در نهایت نرخ تغذیه سیم با ۶ درصد کم ترین تاثیر را بر جریان شکاف خواهد داشت.



شکل ۵- مقایسه کمی پارامترهای ورودی بر جریان شکاف

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

در پژوهش انجام شده پس از استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست به بررسی تأثیر ۴ پارامتر ورودی، شامل زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ سروو و نرخ تغذیه سیم بر جریان شکاف در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با سیم پرداخته شده است. نتایج به دست آمده در این پژوهش بیان می کند که از میان چهار پارامتر موردبررسی، پارامتر زمان خاموشی پالس با ۳۵ درصد تأثیر بر روی زبری سطح به عنوان تأثیرگذارترین پارامتر شناخته شده است. همچنین با وجود اختلاف زیاد میان پارامترها، نرخ تغذیه با ۶ درصد کمترین تاثیر را بر جریان شکاف در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با سیم می باشد.

۸- مراجع

- [1] K. Ishfaq, N. A. Mufti, N. Ahmed, M. P. Mughal, and M. Q. Saleem, "An investigation of surface roughness and parametric optimization during wire electric discharge machining of clad material," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, no. 9, pp. 4065-4079, 2018.
- [2] A. Goyal, "Investigation of material removal rate and surface roughness during wire electrical discharge machining (WEDM) of Inconel 625 super alloy by cryogenic treated tool electrode," *Journal of King Saud University-Science*, vol. 29, no. 4, pp. 528-535, 2017.
- [3] V. Kavimani, K. S. Prakash, T. Thankachan, S. Nagaraja, A. Jeevanantham, and J. P. Jhon, "WEDM parameter optimization for silicon@ r-GO/magnesium composite using taguchi based GRA coupled PCA," *Silicon*, vol. 12, no. 5, pp. 1161-1175, 2020.
- [4] S. S. Kumar et al., "Parametric optimization of wire electrical discharge machining on aluminium based composites through grey relational analysis," *Journal of*