

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

بررسی و بهینه‌سازی تأثیر پارامترهای ورودی بر نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نانو

کامپوزیت A356 تقویت‌شده با آلومینا

محمد جواد حاج حسینی^۱، علی مختاریان^{۲*}، مجتبی رحیمی^۳، بهنام مسعودی^۴

مقاله پژوهشی

۱ و ۴- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، اصفهان، ایران.

۲ و ۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، اصفهان، ایران.

* mokhtarian@iaukhsh.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۲	در این پژوهش، تأثیر پارامترهای ورودی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی نانو کامپوزیت A356 تقویت شده با ۳/۵٪ آلومینا (Al_2O_3)، با رویکرد طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی بر مبنای آرایه متعامد L9 و تکنیک سطوح تکراری مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفت. پارامترهای ورودی این آزمایش‌ها شامل ولتاژ (دو سطحی)، شدت جریان (سه سطحی)، زمان روشنی پالس (سه سطحی) و زمان خاموشی پالس (سه سطحی) در نظر گرفته شد. همچنین، پارامترهای خروجی شامل نرخ براده برداری از قطعه کار، نرخ سایش ابزار ماشین‌کاری و زبری سطح قطعه کار بودند. تحلیل نتایج و بررسی نمودارهای سیگنال به نویز توسط نرم‌افزار انجام شد. همچنین با تعیین تابع زیان مقادیر نرمال شده کل پارامترهای خروجی بر مبنای ضرایب وزنی فرضی، سطح بهینه مربوط به هر پارامتر ورودی مشخص شد و با انجام آنالیز واریانس، میزان درصد سهم هر یک از پارامترهای ورودی در واریانس کل محاسبه شد. با توجه به نتایج حاصله، تأثیرگذارترین پارامتر ورودی بر روی نرخ براده برداری: زمان خاموشی پالس، بر روی نرخ سایش: ابزار شدت جریان و بر روی زبری سطح: زمان روشنی پالس تعیین شد. علاوه بر این، سطح اول ولتاژ (۸۰ ولت)، سطح اول شدت جریان (۱۰ آمپر)، سطح اول زمان روشنی پالس (۳۵ میکروثانیه) و سطح دوم زمان خاموشی پالس (۷۰ میکروثانیه) به عنوان سطوح بهینه پارامترهای ورودی تعیین شدند. درصد سهم پارامترهای ورودی در واریانس کل نیز برای ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس به ترتیب برابر ۱۲/۹۸، ۲۰/۹۶، ۵/۴۷ و ۶۰/۶۰ به دست آمدند.
کلید واژگان:	
ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی	
نانو کامپوزیت	
تاگوچی	
نسبت سیگنال به نویز	
آنالیز واریانس	

Investigation and Optimization of the Effect of Input Parameters on Material Removal Rate, Tool Wear Rate, and Surface Roughness in Electrical Discharge Machining of A356 Nano-Composite Reinforced By Alumina

Mohammad Javad HajHosseini¹, Ali Mokhtarin^{2*}, Mojtaba Rahimi³, Behnam Masoudi⁴

1, 2, 3, 4 - Department of Mechanical, Civil, and Architectural Engineering, Khomeinshahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinshahr/Isfahan, Iran.

* mokhtarian@iaukhsh.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Doi:

20.1001.1.24233226.1401.16.3.1.2

Keywords:

Electrical Discharge Machining

Nano-Composite

Taguchi Technique

Signal to Noise Ratio

Variance Analysis

Abstract

In this research, the effect of input parameters of Electrical Discharge Machining (EDM) on A356 nano-composite reinforced by 3.5% alumina (Al_2O_3) was examined and optimized by the Taguchi technique based on the L9 orthogonal array and duplicated levels technique. The input parameters of these experiments consisted of voltage (two-level), current intensity (three-level), pulse on-time (three-level), and pulse off-time (three-level). Moreover, the output parameters were comprised of the material removal rate of the workpiece, the tool wear rate of the machining, and the surface roughness of the workpiece. The analysis of the results and investigation of the signal-to-noise graphs (S/N) and variance analysis (ANOVA) were carried out by using software. Also, with the determination of the loss function of total normalized values of the output parameters based on appropriate weight coefficients, the optimum level of each input parameter was identified. Besides, with performing the variance analysis, the magnitude of contribution percentage of each of the input parameters in the total variance was calculated. Based on the obtained results, it was concluded that the most influential parameter on the material removal rate was the pulse off-time, on tool wear rate was the current intensity, and on the surface roughness was the pulse on-time. Furthermore, the first level of the voltage (80 V), the first level of the current intensity (10 A), the first level of the pulse on-time (35 μ s), and the second level of the pulse off-time (70 μ s) were determined as the optimum input parameters. The contribution percentage of the input parameters in the total variance for voltage, current intensity, pulse on-time, and pulse off-time was found to be 12.98, 20.96, 5.47, and 60.60, respectively.

برای ارجاع به این مقاله به عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Mohammad Javad HajHosseini, Ali Mokhtarin, Mojtaba Rahimi, Behnam Masoudi, Investigation and Optimization of the Effect of Input Parameters on Material Removal Rate, Tool Wear Rate, And Surface Roughness in Electrical Discharge Machining of A356 Nano-Composite Reinforced By Alumina, New Process in Material Engineering, 2022, 16(3), 1-12.

۱- مقدمه

نیاز گسترده به ماشین کاری فلزات و آلیاژهای سخت و مقاوم در مقابل گرما، به پیشرفت‌های مهندسی در این زمینه انجامیده است. از آن جمله می‌توان به ماشین کاری با روش تخلیه الکتریکی^۱ که کاربرد وسیعی به‌ویژه برای قطعات با سختی بالا یافته است اشاره کرد. فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به شکل صنعتی نخستین بار توسط دو دانشمند روس در سال ۱۹۴۳ با اختراع مدار رلاکسیون^۲ و در قالب ساخت یک دستگاه فرز به کار گرفته شد [۱-۲]. مطالعات انجام‌شده در ماشین کاری تخلیه الکتریکی، عمدتاً بر روی تغییر و کنترل تنظیمات بهینه پارامترهای ماشین کاری با توجه به جنس قطعه کار متمرکز بوده است. عمده تمرکز محققان نیز بر روی استفاده از روش‌های تحلیل آماری و بهینه‌سازی و به‌ویژه مبحث طراحی آزمایش‌ها بوده است. مطالعه مقدماتی بر روی این فرآیند توسط اردن و گین^۳ در سال ۱۹۸۰ صورت گرفته است. آن‌ها تأثیرات پودر مخلوط را در دی‌الکتریک ماشین کاری تخلیه الکتریکی بررسی کرده و اظهار داشتند که نرخ براده برداری^۴ با افزایش غلظت پودر افزایش می‌یابد. بعدها کانسال و همکاران^۵ [۴] تأثیر پودر سیال دی‌الکتریک را روی آلیاژ فولاد AISI 52100 بررسی نمودند و اظهار کردند که غلظت بالای پودر سیلیکون، نرخ براده برداری بیشتری ایجاد می‌کند و سختی سطح را افزایش می‌دهد. مینگ و هی^۶ [۵] تأثیر انواع مختلفی از مواد افزودنی را در مایع دی‌الکتریک در طی ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد کربن بالا بر نرخ براده برداری و زبری سطح^۷ قطعه کار مطالعه کردند. این پژوهش نشان داد که افزودنی‌ها، کیفیت سطح را بهبود بخشیده و می‌توانند نرخ براده برداری را افزایش داده و نرخ سایش ابزار^۸ را کاهش دهند. پاک و فتاحی^۶ [۶] اثرات افزودن انواع نانو پودر به دی‌الکتریک و اعمال نوسانات فراصوتی از طریق ابزار به‌طور هم‌زمان در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد H13 را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که استفاده هم‌زمان از ذرات نانو پودر و اعمال امواج فراصوتی به‌طور میانگین نرخ براده برداری را تا ۳۰ درصد

افزایش می‌دهد. سیدو و همکاران^۹ [۷] تأثیر مواد افزودنی پودر مس و گرافیت را بر ماشین کاری تخلیه الکتریکی سه نوع متفاوت از کامپوزیت با زمینه فلزی^{۱۰} بررسی کرده و گزارش کردند که رسانایی بالای ذرات معلق مس منجر به بزرگ شدن جرقه‌ها و کاهش در قدرت عایقی دی‌الکتریک برای کانال پلازما بین الکترودها می‌شود. موهن و همکاران^{۱۱} [۸] ماشین کاری تخلیه الکتریکی با الکتروود لوله‌ای خالی را برای سوراخ کردن کامپوزیت کاربید سیلیسیم 6025 بکار بردند. طبق مطالعات آن‌ها، الکتروود مدور، نرخ براده برداری را بهبود می‌بخشد و همچنین در ارتباط با شستشوی تزریقی، ماشین کاری تخلیه الکتریکی با الکتروود لوله‌ای، نرخ براده برداری بالاتر و نرخ سایش ابزار و زبری سطح قطعه کار پایین‌تری را به دنبال دارد. کوپن و همکاران^{۱۲} [۹] ماشین کاری تخلیه الکتریکی اینکونل ۷۱۸ همراه با دوران ابزار را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که دوران ابزار، نرخ براده برداری را به شدت افزایش می‌دهد. دو و همکاران^{۱۳} [۱۰] در پژوهش مشابهی تأثیرات پارامترهای ورودی مانند زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس بر پارامترهای خروجی از قبیل نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار در طی ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژهای مختلف را با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها بررسی کردند. جورج و همکاران^{۱۴} [۱۱] به مطالعاتی بر روی ماشین کاری تخلیه الکتریکی مواد مرکب کربنی پرداختند. نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که اگر پارامترهای ورودی در کمترین مقدار خود تنظیم شوند، نرخ سایش ابزار کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند و چنانچه همین پارامترها در بیشترین مقدار خود تنظیم شوند، نرخ براده برداری به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند. راجموهان و پروبهو^{۱۵} [۱۲] با در نظر گرفتن پارامترهای ولتاژ، شدت جریان و زمان روشنی و خاموشی پالس به‌عنوان پارامترهای ورودی، با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها تاگوچی به بهینه‌سازی نرخ براده برداری در ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد ضدزنگ ۳۰۴ پرداختند. پژوهش ایشان مبین آن است که

(که به علت سبکی و استحکام و سختی بالا در صنایع مختلف و حساس مورد استفاده قرار می‌گیرد)، تاکنون پژوهشی صورت نگرفته است. با توجه به پیشینه تحقیق و بررسی سایر مقالات و ذکر اینکه تعداد محدودی از مقالات از روش طراحی آزمایش و بهینه‌سازی با رویکرد تاگوچی در این حوزه استفاده کرده‌اند، تحلیل آماری و بهینه‌سازی ماشین کاری تخلیه الکتریکی این ماده نانو کامپوزیتی با این رهیافت خاص طراحی، هدف تحقیق حاضر قرار گرفته است. با استناد به نتایج آزمایش‌ها و با به کارگیری ابزارهای آماری، تأثیر پارامترهای فرآیند و اهمیت هر یک تعیین و با هم مقایسه شده‌اند. فاکتورها یا پارامترهای ورودی آزمایش‌ها شامل ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس و پارامترهای خروجی شامل نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح قطعه کار می‌باشند. جهت بررسی میزان تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر خروجی‌ها، گراف‌های نسبت سیگنال به نویز^{۱۷} هر یک از خروجی‌ها برحسب تغییرات پارامترهای ورودی و آنالیز واریانس^{۱۸} در نرم‌افزار Minitab@16 ترسیم شده است. همچنین با در نظر گرفتن تابع زیان مقادیر نرمال شده کل خروجی‌ها همراه با ضرایب وزنی مناسب اختصاص یافته به آن‌ها، سطح بهینه متناظر با هر یک از پارامترهای ورودی تعیین می‌شود. در پایان نیز با انجام تحلیل آنالیز واریانس، متناظر با تابع زیان کلی تعریف شده درصد سهم تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی در طراحی آزمایش‌ها مشخص شده است.

۲- مواد و روش انجام تحقیق

قطعه کار اولیه جهت انجام آزمایش‌ها از جنس نانو کامپوزیت A356 تقویت شده با Al_2O_3 ۳/۵٪ فراهم شده است. در این خصوص، عناصر تشکیل دهنده آلیاژ A356 به همراه درصد وزنی آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است که نمونه قطعه کار اولیه مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از یک کوره ذوب مقاومتی که دارای قابلیت کنترل دما و سرعت چرخش پروانه همزن قابل کنترل است، تولید شده است. برای ساخت نمونه ابتدا آلیاژ

شدت جریان و زمان خاموشی پالس بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری فولاد ضدزنگ ۳۰۴ دارند. همچنین آن‌ها نشان دادند با وجود تعداد کم آزمایش‌ها در روش تاگوچی طرح L9، این روش نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد. گوپالاکان و همکاران^{۱۶} [۱۳]، با استفاده از روش طراحی آزمایش مرکب مرکزی و با انجام ۳۰ آزمایش، تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی ماشین کاری تخلیه الکتریکی را بر روی نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح آلیاژ آلومینیوم 7075 بررسی کردند. در این تحقیق مشخص شد شدت جریان و زمان روشنی پالس بیشترین تأثیر را بر خروجی‌ها دارند، بدین ترتیب که با افزایش شدت جریان، نرخ براده برداری ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس، کیفیت سطح افزایش پیدا می‌کند. شهبازی و همکاران [۱۴] تأثیر وجود پودر آلومینا بر روی پارامترهای خروجی ماشین کاری تخلیه الکتریکی کامپوزیت آلومینیوم A413 تقویت شده با آلومینا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها گویای آن است که وجود پودر در دی‌الکتریک، موجب کاهش نرخ براده برداری، کاهش نرخ سایش ابزار و کاهش زبری سطح قطعه کار می‌شود. لطفی و دانشمند [۱۵] به بررسی تأثیر شدت جریان، ولتاژ، زمان روشنی و زمان خاموشی پالس و نانو ذرات اکسید تیتانیوم بر نرخ براده برداری، سایش ابزار و زبری سطح ماده مرکب آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات اکسید تیتانیوم در طی فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد با افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس، سایش ابزار و زبری سطح زیاد شده و با افزایش زمان خاموشی پالس سایش ابزار کم می‌شود.

از آنجا که تأثیر پارامترهای تنظیمی و تعیین سطوح بهینه آن‌ها وابسته به جنس قطعه کار و شرایط ماشین کاری است، برای هر آلیاژ و ماده خاصی باید آزمایش‌های مجددی صورت گیرد. علیرغم کاربرد روزافزون مواد کامپوزیتی و به خصوص نانو کامپوزیت‌ها، در زمینه بهبود شرایط ماشین کاری آن‌ها به روش تخلیه الکتریکی، خصوصاً برای نانو کامپوزیت زمینه آلومینیوم A356 تقویت شده با آلومینا



شکل (۲): الکترودهای مسی مورد استفاده در ماشین کاری تخلیه

الکتریکی قطعات

دستگاه ماشین کاری مورد استفاده در این پژوهش، ماشین تخلیه الکتریکی تهران اکرام مدل 204H است. ابتدا قطعه کار و الکترودهای ابزار مربوط به هر آزمایش را که از قبل شماره گذاری شده است بر روی دستگاه تخلیه الکتریکی (به ترتیب در قطب‌های منفی و مثبت) بسته و بر طبق جدول طراحی آزمایش‌ها، پارامترهای ورودی برای هر قطعه را بر روی دستگاه تنظیم نموده، سپس ماشین کاری الکتریکی بر روی هر قطعه انجام می‌شود (مطابق شکل ۳). ماشین کاری تخلیه الکتریکی انجام شده بر روی هر قطعه کار در طی آزمایش مربوطه، شامل ۱۰ دقیقه سوراخ کاری بر روی قطعه است.



شکل (۳): نمایی از فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی انجام شده در

تحقیق حاضر

آلومینیوم A356 در داخل بوتله گرافیتی قرار داده شد و با استفاده از کوره مقاومتی تا دمای ذوب حرارت داده شد. پس از ذوب کامل آلیاژ با فرو بردن همزن گرافیتی در مذاب، عمل هم زدن در حین افزودن پودر تقویت کننده آلومینا به میزان ۳/۵ درصد وزنی به مذاب به انجام رسید. سپس مذاب در داخل قالب فلزی مکعب مستطیلی شکل ریخته‌گری شد.

جدول (۱): عناصر تشکیل دهنده آلیاژ A356 همراه با درصد وزنی

آن‌ها [۱۶]

Al	Si	Mn	Mg	Zn	Fe
۹۳/۲۷۵	۶/۱۰۴	۰/۰۱۳	۰/۴۲۵	۰/۰۶۳	۰/۱۸۰
Ti	Ni	P	Pb	Ca	
۰/۰۰۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	

جهت سهولت در اندازه‌گیری جرم قطعه در قبل و بعد هر آزمایش (ماشین کاری)، قطعه اولیه توسط وایرکات به ۹ قطعه مکعبی شکل (با توجه به ۹ آزمایش طراحی شده) به ابعاد ۱×۲×۲ سانتی‌متر برش داده شده و به وسیله سنبه شماره گذاری می‌شوند (شکل ۱).



شکل (۱): قطعات مکعبی برش داده شده جهت انجام آزمایش‌ها

ماشین کاری تخلیه الکتریکی

در این پژوهش، الکترودهای ابزار از جنس مس خالص (۹۹/۹) با چگالی ۸/۹۴ گرم بر سانتیمتر مکعب به قطر ۸/۴ میلی‌متر و ارتفاع ۴ سانتی‌متر و با قطبیت مثبت مورد استفاده قرار گرفته است. به تعداد قطعات برش داده شده، الکترودها با شرایط و مقیاس یکسان تهیه و هر الکترودها به یک قطعه برش داده شده اختصاص داده شد (شکل ۲). همچنین، دی الکتریک مورد استفاده در این پژوهش، مخلوطی از گازوئیل و نفت سفید (به نسبت مساوی) است.

همچنین، تمامی قطعات پس از انجام آزمایش و ماشین کاری توسط دستگاه زبری سنج Mahr M300-RD18 مورد ارزیابی کیفیت سطح قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است سطح مورد نظر جهت اندازه‌گیری زبری سطح، سطح قاعده سوراخ استوانه‌ای ایجاد شده بر روی قطعه به قطری معادل قطر ابزار یعنی ۸/۴ میلی‌متر است. جرم تمامی قطعات کامپوزیت برش خورده و تمامی الکترودها نیز در قبل و بعد از ماشین کاری، جهت تعیین مقدار نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار، توسط ترازوی Sartorius مدل Quintix با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری می‌شود.

جدول (۲): پارامترهای ورودی ماشین کاری و سطوح انتخابی برای آن‌ها

سطح	ولتاژ (V)	آمپر (A)	زمان روشنی پالس (μs)	زمان خاموشی پالس (μs)
۱	۸۰	۱۰	۳۵	۳۰
۲	۲۵۰	۱۵	۵۰	۷۰
۳	۸۰	۲۰	۱۰۰	۲۰۰

جدول (۳): الگوی انجام آزمایش‌ها بر مبنای رویکرد طراحی تاگوجی

شماره آزمایش	ولتاژ (V)	آمپر (A)	زمان روشنی پالس (μs)	زمان خاموشی پالس (μs)
۱	۸۰	۱۰	۳۵	۳۰
۲	۸۰	۱۵	۵۰	۷۰
۳	۸۰	۲۰	۱۰۰	۲۰۰
۴	۲۵۰	۱۰	۵۰	۲۰۰
۵	۲۵۰	۱۵	۱۰۰	۳۰
۶	۲۵۰	۲۰	۳۵	۷۰
۷	۸۰	۱۰	۱۰۰	۷۰
۸	۸۰	۱۵	۳۵	۲۰۰
۹	۸۰	۲۰	۵۰	۳۰

۲-۱- طراحی آزمایش‌ها

در این تحقیق، اثر چهار پارامتر ورودی شامل ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس، بر روی سه پارامتر خروجی نرخ براده برداری از قطعه کار، نرخ سایش ابزار و زبری سطح قطعه کار در ماشین کاری به روش تخلیه الکتریکی نانو کامپوزیت A356 تقویت شده با ۳/۵٪ آلومینا، مورد بررسی قرار می‌گیرد. نوع و تعداد سطوح پارامترهای ورودی بر مبنای تنظیمات قابل حصول بر دستگاه و با انجام یک سری آزمایش‌های اولیه جهت بررسی شدت تأثیر سطوح مختلف پارامترهای ورودی بر خروجی‌های ماشین کاری مشخص می‌شود. پس از تعیین پارامترها و سطوح هر یک، باید نحوه انجام آزمایش‌ها تعیین شود. با توجه به تعداد پارامترها و سطوح انتخابی و با توجه به هزینه و زمان بر بودن انجام کامل آزمایش‌ها، در این پژوهش از طرح کسری تاگوجی استفاده شده است [۱۷]. البته، برای کمینه‌سازی تعداد آزمایش‌ها از آرایه متعامد L9 (شامل ۹ آزمایش) و تکنیک سطوح تکراری (با تکرار سطح ولتاژ ۸۰) استفاده شده است زیرا که دستگاه اسپارک مورد استفاده دارای تنها ۲ سطح ولتاژ (برخلاف سه سطحی بودن دیگر پارامترهای ورودی) است. لازم به توضیح است که تکرار سطح اول برای سطح سوم ولتاژ به دلیل مشاهده تأثیر محسوس‌تر این سطح از ولتاژ (هم‌زمان با تغییر سایر ورودی‌ها) بر خروجی‌های ماشین کاری در طی آزمایش‌های اولیه بوده است. در جدول ۲، پارامترهای ورودی

۲-۲- تعیین پارامترهای خروجی

پس از تنظیم پارامترهای ورودی (ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس) برای هر آزمایش و ماشین کاری قطعات نانو کامپوزیت A356 تقویت شده با ۳/۵٪ آلومینا، به محاسبه نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار و همچنین تعیین مقدار زبری سطح قطعه کار توسط دستگاه زبری سنج، پرداخته می‌شود. مقادیر نرخ براده برداری (MRR) و نرخ سایش ابزار (TWR) از روابط (۱) و (۲) به دست می‌آیند [۱۷]:

$$MRR = \frac{(W_1 - W_2)}{\rho_w \times t} \times 10^3 \quad (1)$$

$$TWR = \frac{(T_1 - T_2)}{\rho_T \times t} \times 10^3 \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)، W_1 و W_2 به ترتیب جرم قطعه کار قبل و بعد از ماشین کاری هستند. T_1 و T_2 نیز به ترتیب جرم ابزار قبل و بعد از ماشین کاری هستند. ρ_w و ρ_T به ترتیب چگالی قطعه کار و چگالی ابزار و t زمان ماشین کاری بر حسب دقیقه

است. نتایج حاصل برای خروجی‌ها در طی ۹ آزمایش طراحی شده در جدول ۴ آورده شده است.

جدول (۴): پارامترهای خروجی ماشین کاری الکتریکی قطعات نانو کامپوزیت A356 تقویت شده با Al_2O_3 ۳/۵

شماره آزمایش (قطعه)	زبری سطح (μm)	نرخ براده برداری (mm^3/min)	نرخ سایش ابزار (mm^3/min)
۱	۴/۱۱۵	۱۳/۷۲۶	۰/۰۳۴
۲	۵/۲۲۴	۲۲/۶۹۴	۰/۲۰۲
۳	۶/۶۵۰	۱۸/۸۸۲	۰/۱۱۲
۴	۵/۵۱۹	۱۴/۳۴۸	۰/۳۳۷
۵	۶/۵۹۲	۱۴/۶۷۸	۰/۱۲۴
۶	۵/۰۲۶	۲۹/۰۶۳	۰/۱۹۱
۷	۵/۰۸۸	۲۰/۹۷۴	۰/۰۳۴
۸	۳/۱۹۹	۵/۸۵۷	۰/۰۵۶
۹	۶/۱۱۸	۲۵/۰۰۰	۰/۲۱۳

۲-۳- نسبت سیگنال به نویز خروجی‌ها

در این بخش با انجام تحلیل نسبت سیگنال به نویز خروجی‌های به دست آمده در نرم‌افزار Minitab@16 به بررسی و تحلیل تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی ماشین کاری نانو کامپوزیت A356 تقویت شده با Al_2O_3 ۳/۵ بر روی هر یک از خروجی‌ها به‌طور جداگانه پرداخته می‌شود. لازم به توضیح است برای نرخ براده برداری، افزایش (کاهش) نسبت سیگنال به نویز بیانگر افزایش (کاهش) آن و برای نرخ سایش ابزار و زبری سطح قطعه کار، افزایش (کاهش) نسبت سیگنال به نویز نشان‌دهنده کاهش (افزایش) هر یک آن‌ها است.

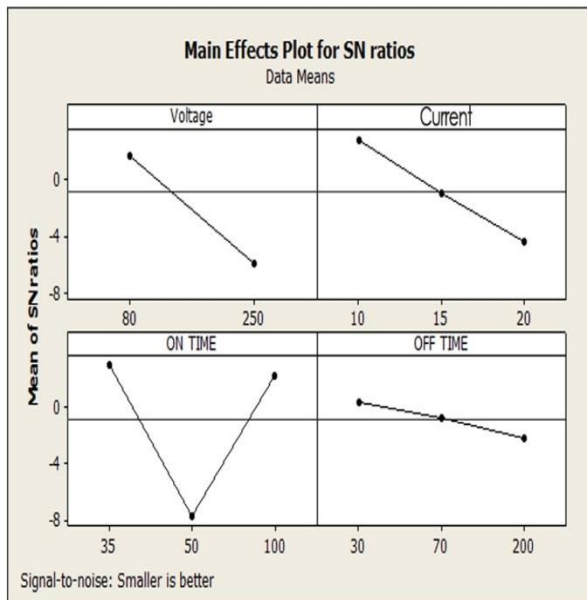
۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج نرخ براده برداری

پس از انجام تحلیل سیگنال به نویز نرخ براده برداری نانو کامپوزیت تقویت شده با Al_2O_3 ۳/۵، نتایج حاصله به صورت شکل ۴ گزارش می‌شود. مشاهده می‌شود که با افزایش ولتاژ، نرخ براده برداری افزایش پیدا می‌کند. در واقع با افزایش ولتاژ، به علت تقویت شدن میدان الکتریکی در کانال پلاسما، یون‌های مثبت با انرژی بیشتر به سطح قطعه کار برخورد کرده و موجب افزایش نرخ براده برداری می‌شوند. با افزایش شدت جریان از سطح ۱ به

سطح ۲، با وجود افزایش حجم تعداد یون‌های مثبت برخوردکننده به سطح قطعه کار، به دلیل افزایش تجمع براده‌ها در ناحیه ماشین کاری از شدت ضربه برخورد یون‌ها به سطح کاسته شده و به‌طور متوسط در طی کل زمان ماشین کاری، کاهش در نرخ براده برداری نتیجه می‌شود. این در حالی است که در طی افزایش بیشتر شدت جریان از سطح ۲ به سطح ۳، تأثیر افزایش حجم بمباران سطح قطعه کار توسط یون‌ها بر تأثیر تجمع براده‌ها در ناحیه ماشین کاری غالب شده و در نتیجه نرخ براده برداری از قطعه کار با شیب قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش زمان روشنی پالس از سطح ۱ به سطح ۲، به دلیل افزایش زمان برقراری جریان الکتریکی و ایجاد فرصت لازم برای گسترده‌تر شدن کانال پلاسما جهت یورش بیشتر یون‌های مثبت به طرف قطعه کار، مقدار براده برداری افزایش یافته و سپس با تغییر از سطح ۲ به سطح ۳، به دلیل تجمع بیشتر براده‌های قطعه کار در ناحیه ماشین کاری، دانسیته انرژی در ناحیه تخلیه الکتریکی کاهش می‌یابد که این باعث منفی شدن شیب نمودار براده برداری تحت تأثیر افزایش زمان روشنی پالس شده است. بعلاوه، با افزایش زمان خاموشی پالس از سطح ۱ به سطح ۲، به دلیل ایجاد فرصت خنک شدن براده‌ها و در نتیجه امکان خروج سریع‌تر از ناحیه ماشین کاری (جهت ممانعت از ایجاد تجمع براده‌ها)، مقدار براده برداری افزایش و سپس با افزایش زمان خاموشی پالس به سطح ۳، به دلیل کاهش حجم هجوم یون‌های مثبت به طرف قطعه کار نمودار با شیب منفی بیشتری پایین می‌آید.

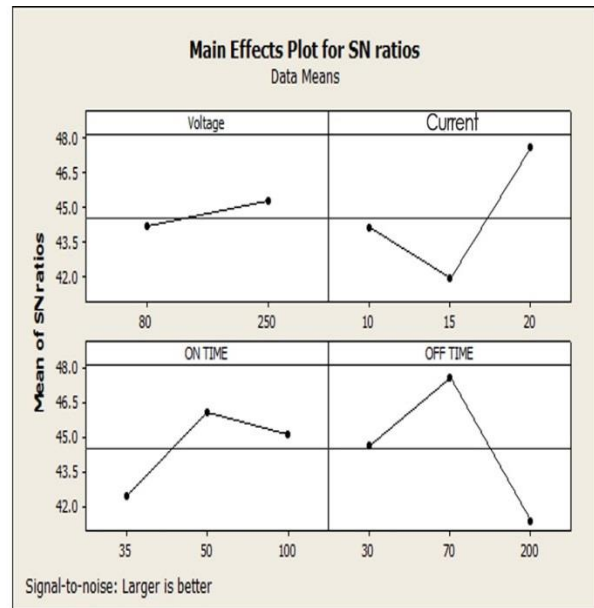
نسبتاً ملایم افزایش نرخ سایش ابزار از سطح ۱ به سطح ۲ و نیز از سطح ۲ به سطح ۳ مشهود است. این روند می‌تواند به دلیل وجود فرصت بیشتر برای خنک شدن براده‌ها و دور شدن آن‌ها از ناحیه ماشین‌کاری در طی افزایش زمان خاموشی پالس محقق شده باشد.



شکل (۵): نمودارهای نسبت سیگنال به نویز نرخ سایش ابزار برحسب پارامترهای ورودی

۴-۳- نتایج زبری سطح

شکل ۶ بیانگر نتایج نسبت سیگنال به نویز زبری سطح قطعه کار پس از ماشین‌کاری نانو کامپوزیت A356 تقویت شده با Al_2O_3 ۳٪/۵ برحسب پارامترهای ورودی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ولتاژ به دلیل افزایش انرژی یون‌های مثبت در برخورد با سطح قطعه کار و در نتیجه ایجاد حفره‌های عمیق‌تر بر سطح، مقدار صافی سطح کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش شدت جریان از سطح ۱ به سطح ۲، صافی سطح به دلیل ایجاد یکنواختی توزیع حرکت یون‌ها (به واسطه گسترده‌تر شدن کانال پلاسما) در ناحیه براده برداری بهبود بخشیده شده ولی در مقابل با تغییر شدت جریان از سطح ۲ به سطح ۳، به دلیل افزایش تعداد یون‌های مثبت و در نتیجه افزایش شدت بمباران یون‌ها بر سطح قطعه کار و ایجاد حفره‌های بیشتر بر سطح، زبری سطح افزایش می‌یابد. با مشاهده نمودار زمان



شکل (۴): نمودارهای نسبت سیگنال به نویز نرخ براده برداری برحسب پارامترهای ورودی

۴-۲- نتایج نرخ سایش ابزار

نتایج نسبت سیگنال به نویز نرخ سایش ابزار ماشین‌کاری نانو کامپوزیت تقویت شده با Al_2O_3 ۳٪/۵ در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشهود است در نانو کامپوزیت تقویت شده، با افزایش ولتاژ، افزایش انرژی الکترون‌ها که از طرف قطعه کار به الکتروود ابزار که در این آزمایش‌ها در قطب مثبت قرار گرفته است هجوم برده و برخورد می‌کنند منجر به افزایش سایش ابزار می‌شود. همچنین با افزایش مقدار شدت جریان، با افزایش حجم تعداد الکترون‌های خارج شده از قطعه کار و برخورد آن‌ها به ابزار، مقدار سایش ابزار افزایش می‌یابد. با افزایش زمان روشنی پالس از سطح ۱ به سطح ۲، به تدریج قطر کانال پلاسما زیادتر شده و الکتروود ابزار مورد هجوم الکترون‌های بیشتری با بار منفی قرار می‌گیرند و همان‌طور که مشاهده می‌شود بر نرخ سایش ابزار افزوده می‌شود. در ادامه، با افزایش زمان روشنی پالس از سطح ۲ به سطح ۳، به دلیل تجمع بیشتر براده‌ها در محل ماشین‌کاری از ضربه برخورد الکترون‌ها به سمت الکتروود ابزار کاسته می‌شود، در نتیجه انرژی کمتری به الکتروود ابزار منتقل شده و نرخ سایش ابزار کاهش می‌یابد. در آخر، با بررسی زمان خاموشی پالس از روی نمودار مربوطه، شیب

اگر خروجی آزمایش، زبری سطح و یا نرخ سایش ابزار باشد، با توجه به اینکه هر چه مقادیر اندازه‌گیری شده کوچک‌تر باشند بهتر است از روابط (۴) و (۵) به ترتیب برای محاسبه تابع زیان زبری سطح (L_{SR}) و تابع زیان نرخ سایش ابزار (L_{TWR}) استفاده می‌شود.

$$L_{SR_i} = SR_i^2 \quad i = 1, 2, 3, \dots, 9 \quad (4)$$

$$L_{TWR_i} = TWR_i^2 \quad i = 1, 2, 3, \dots, 9 \quad (5)$$

اکنون با توجه به میزان اهمیت فرضی در نظر گرفته شده برای هر خروجی در این تحقیق، به نرخ براده برداری ضریب وزنی ۰/۵، به زبری سطح ضریب وزنی ۰/۳ و به نرخ سایش ابزار ضریب وزنی ۰/۲ اختصاص یافته و برای هر یک از آزمایش‌ها، تابع زیان نرمال شده کل خروجی‌ها^{۲۰} (TNQL) از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$TNQL_i = 0.5 \frac{L_{MRR_i}}{L_{MRR_{max}}} + 0.3 \frac{L_{SR_i}}{L_{SR_{max}}} + 0.2 \frac{L_{TWR_i}}{L_{TWR_{max}}} \quad (6)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, 9$$

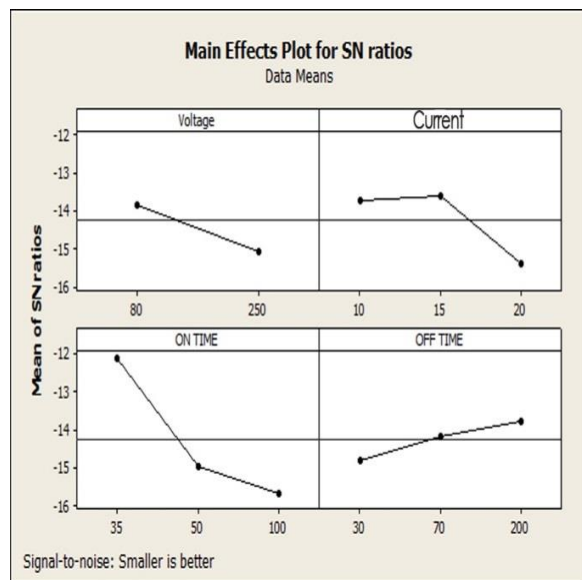
که در آن، جهت نرمال‌سازی، نسبت سیگنال به نویز هر خروجی بر مقدار بیشینه متناظر تعیین شده در بین آزمایش‌ها تقسیم شده است. با توجه به توابع زیان نرمال شده کل به دست آمده، با استفاده از رابطه (۷) مقدار نسبت سیگنال به نویز کل خروجی‌ها (MSNR) برای هر آزمایش محاسبه می‌شود.

$$MSNR_i = -10 \log(TNQL_i) \quad (7)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, 9$$

سپس، مقدار میانگین نسبت سیگنال به نویز کل خروجی‌ها نظیر هر یک از پارامترهای ورودی شامل ولتاژ ($MSNR_{voltage}$)، شدت جریان ($MSNR_{current}$)، زمان روشنی پالس ($MSNR_{on\ time}$) و زمان خاموشی پالس ($MSNR_{off\ time}$) با توجه به سطوح در نظر گرفته شده برای آن‌ها و با توجه به جدول طراحی آزمایش‌ها، با استفاده از روابط (۸) تا (۱۶) تعیین می‌شود.

روشنی پالس می‌توان پی برد که با افزایش زمان روشنی پالس از سطح ۱ به سطح ۲ و در پی آن از سطح ۲ به سطح ۳، کانال پلاسما تقویت شده و شدت بمباران یون‌ها افزایش یافته و مقدار زبری سطح با شیب تندی افزایش پیدا می‌کند. افزایش زمان خاموشی پالس از سطح ۱ به سطح ۲ و به دنبال آن از سطح ۲ به سطح ۳ نیز به دلیل ایجاد فرصت کافی جهت شستشوی ناحیه ماشین‌کاری توسط دی‌الکتریک و در نتیجه ایجاد نظم در حرکت (بدون تداخل و انرژی افزایشی) یون‌های مثبت به طرف سطح قطعه کار موجب بهبود کیفیت سطح قطعه کار می‌شود.



شکل (۶): نمودارهای نسبت سیگنال به نویز زبری سطح بر حسب

پارامترهای ورودی

۴-۴- بهینه‌سازی فرآیند

برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، از روش به کارگیری نسبت سیگنال به نویز کل خروجی‌ها^{۱۹} استفاده شده است [۱۸-۱۹]. در این روش ابتدا لازم است تابع زیان هر یک از خروجی‌ها برای هر آزمایش محاسبه شود. برای هر یک از آزمایشات، تابع زیان نرخ براده برداری (L_{MRR}) را با توجه به اینکه هر چه مقدار نرخ براده برداری اندازه‌گیری شده بزرگ‌تر باشد بهتر است، از رابطه (۳) به دست آورده می‌شود.

$$L_{MRR_i} = 1/MRR_i^2 \quad i = 1, 2, 3, \dots, 9 \quad (3)$$

۵-۴- آنالیز واریانس

آنالیز واریانس به منظور تعیین اهمیت اثر و سهم نسبی تأثیر پارامترهای ورودی در طراحی آزمایشات و با توجه به تابع زیان کلی در نظر گرفته شده به انجام می‌رسد. مجموع مربعات (SS)، درجه آزادی (D)، واریانس (V) و درصد مشارکت در واریانس کل (P)، چهار پارامتری هستند که اغلب در آنالیز واریانس استفاده می‌شوند. این پارامترها به طریقی که در ادامه می‌آید محاسبه می‌شوند [۲۰-۲۱]. ابتدا، مجموع کل مربعات انحرافات (SS_T) با استفاده از رابطه (۲۰) تعیین می‌شود.

$$SS_T = \sum_{i=1}^9 (MSNR_i - MSNR_m)^2 \quad (20)$$

که در آن، $MSNR_m$ میانگین همگی نسبت‌های سیگنال به نویز کل خروجی‌ها برای ۹ آزمایش انجام شده است. یعنی:

$$MSNR_m = \left(\sum_{i=1}^9 MSNR_i \right) / 9 \quad (21)$$

همچنین، مجموع مربعات انحرافات متناظر با هر یک از پارامترهای ورودی از طریق روابط (۲۲) تا (۲۵) قابل محاسبه است.

$$SS_{voltage} = \sum_{i=1}^3 3(MSNR_{voltage_i})^2 - \frac{1}{9} \left(\sum_{i=1}^9 MSNR_i \right)^2 \quad (22)$$

$$SS_{current} = \sum_{i=1}^3 3(MSNR_{current_i})^2 - \frac{1}{9} \left(\sum_{i=1}^9 MSNR_i \right)^2 \quad (23)$$

$$SS_{on\ time} = \sum_{i=1}^3 3(MSNR_{on\ time_i})^2 - \frac{1}{9} \left(\sum_{i=1}^9 MSNR_i \right)^2 \quad (24)$$

$$SS_{off\ time} = \sum_{i=1}^3 3(MSNR_{off\ time_i})^2 - \frac{1}{9} \left(\sum_{i=1}^9 MSNR_i \right)^2 \quad (25)$$

$$MSNR_{voltage_1} = (MSNR_1 + MSNR_2 + MSNR_3) / 3 \quad (8)$$

$$MSNR_{voltage_2} = (MSNR_4 + MSNR_5 + MSNR_6) / 3 \quad (9)$$

$$MSNR_{voltage_3} = (MSNR_7 + MSNR_8 + MSNR_9) / 3 \quad (10)$$

$$MSNR_{current_1} = (MSNR_1 + MSNR_4 + MSNR_7) / 3 \quad (11)$$

$$MSNR_{current_2} = (MSNR_2 + MSNR_5 + MSNR_8) / 3 \quad (12)$$

$$MSNR_{current_3} = (MSNR_3 + MSNR_6 + MSNR_9) / 3 \quad (13)$$

$$MSNR_{on\ time_1} = (MSNR_1 + MSNR_6 + MSNR_8) / 3 \quad (14)$$

$$MSNR_{on\ time_2} = (MSNR_2 + MSNR_4 + MSNR_9) / 3 \quad (15)$$

$$MSNR_{on\ time_3} = (MSNR_3 + MSNR_5 + MSNR_7) / 3 \quad (16)$$

$$MSNR_{off\ time_1} = (MSNR_1 + MSNR_5 + MSNR_9) / 3 \quad (17)$$

$$MSNR_{off\ time_2} = (MSNR_2 + MSNR_6 + MSNR_7) / 3 \quad (18)$$

$$MSNR_{off\ time_3} = (MSNR_3 + MSNR_4 + MSNR_8) / 3 \quad (19)$$

نتایج حاصل از به‌کارگیری روابط فوق برای پژوهش حاضر، در جدول ۵ قابل مشاهده است. از بین سطوح در نظر گرفته شده برای هر پارامتر ورودی، سطحی که متناظر با حداکثر مقدار به دست آمده برای میانگین نسبت سیگنال به نویز کل خروجی‌ها (نظیر همان پارامتر ورودی) باشد، به عنوان مقدار بهینه برای آن پارامتر در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین با توجه به جدول ۵، سطوح بهینه پارامترهای ورودی نظیر تابع زیان نرمال شده کلی در نظر گرفته شده، مشخص می‌شوند. به‌طوری‌که، مقدار بهینه ولتاژ معادل ۸۰ ولت، شدت جریان معادل ۱۰ آمپر، زمان روشنی پالس معادل ۳۵ میکروثانیه و زمان خاموشی پالس معادل ۷۰ میکروثانیه برای فرآیند ماشین‌کاری با در نظر گرفتن تابع زیان کلی تعریف شده تعیین شده است.

جدول (۵): میانگین نسبت سیگنال به نویز کل خروجی‌ها نظیر هر پارامتر

سطوح مختلف ورودی			پارامتر ورودی
سطوح نظیر پارامتر ورودی			
سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	ولتاژ
۴/۴۸۹۳	۴/۳۲۶۹	۵/۵۰۲۶	
۴/۸۸۵۵	۳/۹۱۲۹	۵/۵۲۰۵	شدت جریان
۴/۹۷۳۸	۴/۲۹۷۳	۵/۰۴۷۷	زمان روشنی پالس
۳/۲۲۲۶	۵/۹۷۷۷	۵/۰۶۸۵	زمان خاموشی پالس

$$SS'_{\text{off time}} = SS_{\text{off time}} - D_{\text{off time}} V_e \quad (35)$$

در پایان، درصد سهم هر یک از پارامترهای ورودی در واریانس کل با استفاده از روابط (۳۶) تا (۳۹) قابل محاسبه است.

$$P_{\text{voltage}}(\%) = \frac{SS'_{\text{voltage}}}{SS_T} \times 100 \quad (36)$$

$$P_{\text{current}}(\%) = \frac{SS'_{\text{current}}}{SS_T} \times 100 \quad (37)$$

$$P_{\text{on time}}(\%) = \frac{SS'_{\text{on time}}}{SS_T} \times 100 \quad (38)$$

$$P_{\text{off time}}(\%) = \frac{SS'_{\text{off time}}}{SS_T} \times 100 \quad (39)$$

در پایان، درصد سهم خطا در واریانس کل (P_e) نیز با استفاده از رابطه (۴۰) به دست می‌آید.

$$P_e = 100 - (P_{\text{voltage}}(\%) + P_{\text{current}}(\%) + P_{\text{on time}}(\%) + P_{\text{off time}}(\%)) \quad (40)$$

پس از انجام محاسبات آنالیز واریانس طراحی آزمایش‌ها انجام شده، نتایج به دست آمده در جدول ۶ نشان داده می‌شود. مشاهده می‌شود که زمان خاموشی پالس به علت بالاترین درصد سهم تأثیر (۶۰/۶۰ درصد)، مهم‌ترین پارامتر در این فرایند (با در نظر گرفتن تابع زیان کلی تعریف شده) به حساب می‌آید. پارامترهای مؤثر بعدی به ترتیب شدت جریان، ولتاژ و زمان روشنی پالس با درصد مشارکت ۲۰/۹۶ درصد، ۱۲/۹۸ درصد و ۵/۴۷ درصد هستند.

همچنین، واریانس هر پارامتر ورودی با استفاده از درجه آزادی آن پارامتر از طریق روابط (۲۶) تا (۲۹) محاسبه می‌شود.

$$V_{\text{voltage}}(\%) = \frac{SS_{\text{voltage}}}{D_{\text{voltage}}} \times 100 \quad (26)$$

$$V_{\text{current}}(\%) = \frac{SS_{\text{current}}}{D_{\text{current}}} \times 100 \quad (27)$$

$$V_{\text{on time}}(\%) = \frac{SS_{\text{on time}}}{D_{\text{on time}}} \times 100 \quad (28)$$

$$V_{\text{off time}}(\%) = \frac{SS_{\text{off time}}}{D_{\text{off time}}} \times 100 \quad (29)$$

در ادامه، خطای مجموع مربعات انحرافات (SS_e) با استفاده از رابطه (۳۰) محاسبه و تعیین می‌شود.

$$SS_e = SS_T - (SS_{\text{voltage}} + SS_{\text{current}} + SS_{\text{on time}} + SS_{\text{off time}}) \quad (30)$$

با استفاده از درجه آزادی خطای آزمایش‌ها (D_e)، واریانس خطا (V_e) از طریق رابطه (۳۱) محاسبه می‌شود.

$$V_e = \frac{SS_e}{D_e} \quad (31)$$

در ادامه، با استفاده از درجه آزادی هر پارامتر ورودی، مجموع اصلاح شده مربعات انحرافات (SS') آن پارامتر از طریق روابط (۳۲) تا (۳۵) قابل تعیین است.

$$SS'_{\text{voltage}} = SS_{\text{voltage}} - D_{\text{voltage}} V_e \quad (32)$$

$$SS'_{\text{current}} = SS_{\text{current}} - D_{\text{current}} V_e \quad (33)$$

$$SS'_{\text{on time}} = SS_{\text{on time}} - D_{\text{on time}} V_e \quad (34)$$

جدول (۶): نتایج آنالیز واریانس طراحی آزمایشات

پارامتر	درجه آزادی (D)	مجموع مربعات (SS)	واریانس (V)	مجموع اصلاح شده مربعات (SS')	مشارکت (P, %) (P)	درجه اهمیت
ولتاژ	۲	۲/۴۳۵۱	۱/۲۱۷۵	۲/۴۳۵۱	۱۲/۹۸	۳
شدت جریان	۲	۳/۹۳۳۵	۱/۹۶۶۷	۳/۹۳۳۵	۲۰/۹۶	۲
زمان روشنی پالس	۲	۱/۰۲۶۳	۰/۵۱۳۲	۱/۰۲۶۳	۵/۴۷	۴
زمان خاموشی پالس	۲	۱۱/۳۶۹۴	۵/۶۸۴۷	۱۱/۳۶۹۴	۶۰/۶۰	۱
خطا	۰	۰	۰	۰	۰	۰
کل	۸	۱۸/۷۶۴۲			۱۰۰	

درصد باشد بدین معناست که همگی پارامترهای ورودی مؤثر در طراحی آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است [۲۲].

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود درصد خطا صفر به دست آمده است. لازم به ذکر است که در آنالیز واریانس، چنانچه سهم خطا در واریانس کل کمتر از ۱۵

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر تأثیر پارامترهای ورودی شامل ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس بر روی پارامترهای خروجی شامل نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح قطعه کار در طی ماشین‌کاری نانو کامپوزیت A356 تقویت شده با ۳/۵٪ آلومینا مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، روش طراحی آزمایش تاگوچی با انتخاب آرایه متعامد L9 بکار گرفته شد و با استفاده از نرم‌افزار Minitab@16 نمودارهای نسبت سیگنال به نویز خروجی‌ها متناظر با هر یک از پارامترهای ورودی ترسیم شدند و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. همچنین، با تعریف یک تابع زیان مناسب از مقادیر نرمال شده کل خروجی‌ها بر مبنای در نظر گرفتن ضریب وزنی دلخواه برای هر یک از پارامترهای خروجی، مراحل بهینه‌سازی مقدار نسبت سیگنال به نویز کل خروجی‌ها به انجام رسید. مطابق نتایج بهینه‌سازی انجام گرفته بر روی طراحی آزمایش‌های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، سطح اول ولتاژ (معادل ۸۰ ولت)، سطح اول شدت جریان (معادل ۳۵ آمپر)، سطح اول زمان روشنی پالس (معادل ۷۰ میکروثانیه) و سطح دوم زمان خاموشی پالس (معادل ۷۰ میکروثانیه) به عنوان سطوح بهینه پارامترهای ورودی مشخص شدند. در پایان، جهت تعیین سهم نسبی تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی در طراحی آزمایش‌ها، مراحل آنالیز واریانس با در نظر گرفتن تابع زیان تعریف شده، ارائه شد. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که زمان خاموشی پالس به علت بالاترین درصد مشارکت (۶۰/۶۰ درصد)، مهم‌ترین پارامتر در این فرآیند بوده است و پارامترهای مؤثر بعدی به ترتیب شدت جریان، ولتاژ و زمان روشنی پالس با درصد سهم تأثیر ۲۰/۹۶ درصد، ۱۲/۹۸ درصد و ۵/۴۷ درصد تعیین شدند.

۶- منابع

- [۱] ف. بیغال، "روش‌های ماشین‌کاری مدرن"، انتشارات طراح، چاپ ششم، ۱۳۸۹.
- [2] D. Naderi & E. Ghasemi, "Fundamentals of machining using spark and wire cut", Tarrah publication, 2009.
- [3] A. Erden & S. Bilgin, "Role of impurities in electric discharge machining, in: 21st Conference of Machine Tool Design and Research", London, pp. 345-350, 1980.
- [4] H. K. Kansal, S. Singh & P. Kumara, "EDM drilling optimization using stochastic techniques", Procedia CIRP, vol. 67, pp. 350-355, 2018.
- [5] Q. Y. Ming & L. Y. He, "Thermographic analysis of spark location distribution in sinking EDM", Procedia CIRP, vol. 68, pp. 280-285, 2018.
- [۶] ه. فتاحی و ع. پاک، "بررسی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به کمک امواج فراصوتی با استفاده از مخلوط نانوپودرهای اکسید تیتانیوم، اکسید روی و اکسید آلومینیوم در دی‌الکترونیک"، نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۰، شماره ۳، صفحه ۵۵۰-۵۴۱، ۱۳۹۷.
- [7] S. S. Sidhu, A. Batish & S. Kumar, "Improving EDM performance by adapting gap servo-voltage to machining state", Journal of Manufacturing Processes, vol. 37, pp. 101-113, 2019.
- [8] B. Mohan, A. Rajadurai & K. G. Satyanarayana, "Study on micro reciprocated wire-EDM for complex indexing structure", Procedia CIRP, vol. 68, pp. 120-125, 2018.
- [9] P. Kuppan, A. Rajadurai & S. Narayanan, "Pulse efficiency and gap status of rotary ultrasonic assisted electrical discharge machining and EDM milling", Procedia CIRP, vol. 68, pp. 783-788, 2018.
- [10] A. Dev, K. M. Patel, P. M. Pandey & S. Aravindan, "Multi-characteristics optimization in EDM of NiTi alloy, NiCu alloy and BeCu alloy using Taguchi's approach and utility concept", Alexandria engineering journal, vol. 57, no. 4, pp. 2807-2817, 2018.
- [11] P. M. George, B. K. Ragnath, L. M. Manocha & A. M. Warriar, "EDM machining of carbon-carbon composite-a Taguchi approach", Journal of Materials Processing Technology, vol. 145, no. 1, pp. 66-71, 2004.

[19] G. Taguchi, "Taguchi quality engineering handbook", Wiley, 2005.

[20] M. Karimi, M. R. Toroghinejad & K. Farmanesh, "Multi-response optimization on the annealing of accumulative roll bonded monolithic Ti and Ti-SiC_p composites", Materials & Design, vol. 65, pp. 34-41, 2015.

[21] M. Yousefieh, M. Shamanian & A. Saatchi, "Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW) parameters for corrosion resistance of super duplex stainless steel (UNS S32760) welds using the Taguchi method", Journal of Alloys and Compounds, vol. 509, pp. 782-788, 2011.

[22] Y. Ma, H. Hu, D. Northwood & X. Nie, "Optimization of the electrolytic plasma oxidation processes for corrosion protection of magnesium alloy AM50 using the Taguchi method", Journal of Materials Processing Technology, vol. 182, pp. 58-64, 2007.

[12] T. Rajmohan & R. Prubho, "Optimization of machining parameter in EDM of 304 stainless steel", Procedia Engineering, vol. 38, pp. 1030-1036, 2012.

[13] S. Gopakalannan, T. Sinthelevan & S. Ranganathan, "Modeling and optimization of EDM process parameter on machining of AL 7075-B4 MMC using RSM", Procedia Engineering, vol. 38, pp. 685-690, 2012.

[14] M. S. Dastjerdi, A. Mokhtarian & P. Saraeian, "The effect of alumina powder in dielectric on electrical discharge machining parameters of aluminum composite A413-Al₂O₃ by the Taguchi method, the signal-to-noise analysis and the total normalized quality loss", International Journal of Mechanical and Materials engineering, vol. 15, no. 5, pp. 1-11, 2020.

[۱۵] ع.ا. لطفی نیستانک و س. دانشمند، "بررسی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی ماده مرکب آلومینیوم تقویت شده با نانو ذرات اکسید تیتانیوم"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال سیزدهم، شماره دوم، صفحه ۴۳-۲۷، ۱۳۹۸.

۷- پی‌نوشت

[1] Electrical Discharge Machining (EDM)

[2] Relaxation Circuit

[3] Erden & Bilgin

[4] Material Removal Rate (MRR)

[5] Kansal et al

[6] Ming & He

[7] Surface Roughness (SR)

[8] Tool Wear Rate (TWR)

[9] Sidhu et al

[10] Metal Matrix Composite

[11] Mohan et al

[12] Kuppan et al

[13] Dev et al

[14] George et al

[15] Rajmohan & Prubho

[16] Gopakalannan et al

[17] Signal to Noise (S/N)

[18] Analysis of Variance (ANOVA)

[19] Multiple Signals to Noise Ratio (MSNR)

[20] Total Normalized Quality Loss (TNQL)

[16] S. A. Sajjadi, M. Torabi Parizi, H. R. Ezatpour & A. Sedghi, "Fabrication of A356 composite reinforced with micro and nano Al₂O₃ particles by a developed compocasting method and study of its properties", Journal of Alloys and Compounds, vol. 511, no. 1, pp. 226-231, 2012.

[۱۷] ب. مسعودی و س. دانشمند، "بررسی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، بر روی ماده مرکب پایه آلومینیوم ۲۰۲۴ با استفاده از تحلیل مقدار کل نرمال شده پارامترها (TNQL) و نسبت سیگنال به نویز (S/N)"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال یازدهم، شماره اول، صفحه ۱۱۰-۹۱، ۱۳۹۶.

[18] J. Antony, "Simultaneous Optimisation of multiple quality characteristics in manufacturing processes using Taguchi's quality loss function", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 17, pp. 134-138, 2001.