

بررسی تأثیر پارامترهای ماشین کاری 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)

بهنام مسعودی^۱، سعید دانشمند^{۲*}

۱- دانشکده فنی و مهندسی، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، مجلسی، اصفهان، ایران

*S.daneshmand@iaumajlesi.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۱۶)

چکیده

مواد مرکب زمینه فلزی با توجه به نوع تقویت کننده قابلیت ماشینکاری متفاوتی دارند. ماده مرکب آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با اکسید آلومینیوم از جمله موادی می باشد که ماشینکاری آن به روش های سنتی فرسایش سریع ابزار را در پی دارد و ماشینکاری تخلیه الکتریکی روشی مناسب برای ماشینکاری این دسته از مواد می باشد. با توجه به اینکه این روش ماشینکاری دارای پارامترهای مختلفی می باشد تنظیم بهینه پارامترهای ماشینکاری بر زمان ماشینکاری، کیفیت محصول و سایش ابزار اثر مهمی دارد. در این تحقیق با استفاده از تحلیل مقدار کل نرمال شده پارامترها (TNQL) و نسبت سیگنال به نویز (S/N) همزمان خروجی ها به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی ماشینکاری تخلیه الکتریکی شامل شدت جریان، ولتاژ، زمان روشنی و خاموشی پالس بر نرخ براده برداری، سایش ابزار و زبری سطح در حالت بدون پودر و پودر و دوران ابزار پرداخته شده است. نتایج نشان داد که شدت جریان بیشترین و بعد از آن زمان روشنی، زمان خاموشی پالس و در آخر ولتاژ، مهمترین اثر را بر پارامترهای خروجی ماشینکاری دارند. استفاده از پودر اکسید آلومینیوم و دوران ابزار باعث افزایش گپ و ایجاد یک نیروی گریز از مرکز شده و ذرات را به سرعت از منطقه ماشینکاری دور می کند و نرخ براده برداری افزایش می یابد. استفاده از پودر آلومینیوم در برخورد با جرقه ها باعث ریز تر شدن جرقه ها شده و عمق نفوذ آنها را کم نموده و در نتیجه زبری سطح کاهش می یابد. نتایج حاصل از بهینه سازی در حالت بدون پودر و دوران ابزار ترکیب پارامترها به صورت $A_3B_1C_2D_3$ و در حالت با پودر و دوران ترکیب پارامترها به صورت $A_1B_1C_2D_3$ را پیشنهاد می کند.

واژه های کلیدی:

ماشین کاری تخلیه الکتریکی، نسبت سیگنال به نویز، آنالیز واریانس، بهینه سازی، ماده مرکب پایه آلومینیوم ۲۰۲۴.

۱- مقدمه

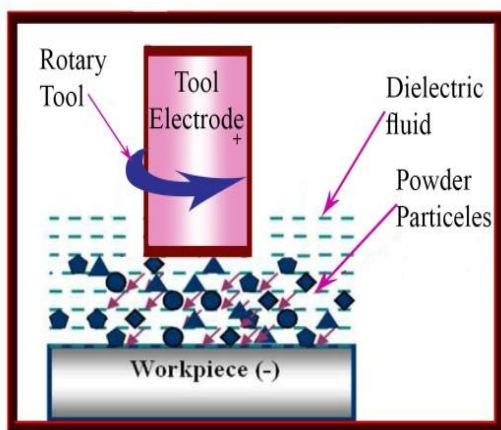
قطعه کار در یک محیط مایع دی الکتریک صورت می گیرد. از آنجا که در EDM از انرژی بالای حرارتی الکتریکی به جای نیروهای برشی مکانیکی استفاده می شود. با این روش می توان مواد مقاوم در برابر

فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی^۱ که زیرمجموعه ای ماشین کاری ترموالکتریکی است، گسترده ترین روش ماشین کاری غیر سنتی فلزات و مواد رسانا است. در این روش، جرقه های الکتریکی متوالی میان الکترود و

پودر، نرخ براده برداری افزایش می یابد و بعد از حد معینی، افزایش غلظت منجر به کاهش نرخ براده برداری می گردد و همچنین با افزایش غلظت پودر آلومینیوم تا یک حد خاص، نرخ سایش ابزار کاهش می یابد و بعد از آن با افزایش غلظت، نرخ سایش ابزار افزایش می یابد [۵]. ژانو و همکارانش جهت ماشین کاری تخلیه الکتریکی قطعه کار فولادی از پودر آلومینیوم با اندازه متوسط ۱۰ میکرون استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که افزودن پودر آلومینیوم به دی الکتریک باعث افزایش گپ کناری ماشین کاری می شود و حفره های کم عمقی که قطر بزرگی دارند، ایجاد می کند [۶]. موهان و همکارانش بر روی ماشینکاری تخلیه الکتریکی کامپوزیت های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات سیلیسیم کارباید پژوهش هایی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که افزایش درصد حجمی سیلیسیم کارباید باعث کاهش نرخ براده برداری و افزایش نرخ سایش ابزار می شود و زبری سطح را زیاد می کند [۷]. در ادامه مطالعات بسیاری نشان داد که دوران ابزار بر عملکرد ماشینکاری تخلیه الکتریکی موثر است. وانگ و همکارانش از تکنیک ماشینکاری تخلیه الکتریکی با ابزار دورانی برای ماشینکاری ماده مرکب Al_6061/Al_2O_3 استفاده کردند و تاثیر دوران ابزار را بر روی نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح مورد مطالعه قرار دادند. این محققان همچنین در بررسی دیگری استفاده از ابزار های توخالی و توپر و همچنین روش گریز از مرکز را در ماشینکاری تخلیه الکتریکی مورد بررسی قرار دادند [۸]. گو و همکارانش بر روی حرکت چرخشی قطعه کار در ماشینکاری تخلیه الکتریکی بررسی هایی انجام دادند. نتایج آن ها نشان داد که حرکت چرخشی قطعه کار به گردش هرچه بهتر سیال دی الکتریک کمک خواهد کرد و در نتیجه باعث افزایش نرخ براده برداری می شود [۹]. در تحقیقات دیگری موهان و همکارانش از ماشینکاری تخلیه الکتریکی با دوران ابزار برای سوراخ کردن ماده مرکب $Al6025/Sicp$ استفاده کردند و نشان دادند که تکنیک دوران ابزار باعث بیشتر شدن نرخ براده برداری خواهد شد. در این مطالعه از ابزار های توخالی و توپر استفاده شد و گزارش ها حاکی از آن بود که ماشین

برش نظیر فولادهای سخت شده، کاربیدهای تنگستن و آلیاژهای با استحکام بالا و اشکال پیچیده را ماشین کاری کرد [۱]. فرآیند ماشین کاری EDM به علت داشتن چندین پارامتر مؤثر، از جمله فرآیندهای چند متغیره محسوب می شود. بنابراین مطالعات انجام شده 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 روش های آماری و به ویژه مبحث طراحی آزمایشات^۱ بوده است. استفاده از روش طراحی آزمایشات به منظور بهینه سازی پارامترهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ 274MAR-M (پایه نیکل) موضوع پژوهش اولمن و همکاران بوده است [۲]. در این تحقیق نشان داده شده است که جریان و زمان روشنی پالس، تأثیر گذارترین پارامترها هستند. همچنین افزایش ولتاژ، باعث افزایش گپ و شستشوی بهتر و در نتیجه براده برداری بیشتر می شود. آیستا و همکاران به کمک روش طراحی آزمایشات تاگوجی و مبحث آنالیز واریانس^۲، تأثیر جریان، ولتاژ و زمان روشنی پالس را در فرآیند شیارزنی آلیاژ 1023C بررسی کرده اند. در این تحقیق نشان داده شده است که افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس، موجب کاهش نرخ خوردگی ابزار^۴ می شود. همچنین جریان و ولتاژ کمتر، نرخ برداشت براده را کاهش می دهد [۳]. برخی از محققان نیز به بررسی تأثیر پودرهای اضافه شده به دی الکتریک پرداختند. این روش برای اولین بار توسط اردن و بلجین [۴] در سال ۱۹۸۰ مورد مطالعه قرار گرفت. آن ها تأثیرات پودرهای اضافه شده به دی الکتریک شامل پودرهای مس، آلومینیوم، کربن و چند پودر دیگر را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. گزارش های اعلام شده از بررسی آن ها حاکی از آن بود که با توجه به میزان غلظت این پودرهای اضافه شده در سیال دی الکتریک و حضور این ذرات در محل انجام جرقه و همچنین با افزایش رسانایی دی الکتریک، موجب افزایش نرخ براده برداری و کاهش زمان تأخیر جرقه خواهد شد. کانگ و چیانگ اثر چهار پارامتر اندازه ذرات پودر، غلظت ذرات پودر، جریان و زمان روشنی پالس را با استفاده از تکنیک پاسخ سطح بر روی نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار در حین ماشینکاری قطعه کار تنگستن کارباید، به کمک پودر آلومینیوم بررسی نمودند. آن ها با بررسی نتایج تجربی بیان داشتند که با افزایش غلظت

تقویت شده با اکسید آلومینیوم بررسی خواهد شد و همچنین نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح قطعه کار در دو حالت با پودر اکسید آلومینیوم و دوران ابزار و حالت بدون پودر و ابزار ثابت مقایسه خواهد شد. شکل (۱) شماتیک دوران ابزار به همراه پودر ترکیب شده در دی الکتریک را نشان می دهد.



شکل (۱): شماتیک دوران ابزار و پودر

کاری تخلیه الکتریکی با دوران ابزار و استفاده از ابزار های توخالی دارای نرخ براده برداری بیشتر، زبری سطح و همچنین نرخ سایش ابزار کمتری بود نسبت به آن دسته از ماشین کاری که از ابزار توخالی استفاده شده بود [۱۰-۱۱]. پاتل و همکارانش از ماشینکاری تخلیه الکتریکی با استفاده از ابزار دورانی در اندازه میکرو در ماشینکاری تخلیه الکتریکی ماده مرکب زمینه آلومینیوم تقویت شده با سیلیسیم کارباید استفاده کردند و نتایج آن ها نشان داد که سرعت دوران ابزار به طور قابل توجهی بر روی نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح تاثیر گذار است [۱۲]. سنتی کومار و همکاران با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی و طرح L18 به بررسی تأثیر شدت جریان، زمان روشنی پالس و فشار پاشش بر روی نرخ خوردگی ابزار و نرخ براده برداری ماده مرکب زمینه آلومینیوم Al-MMC با پودر تیتانیوم کارباید TiC اضافه شده به دی الکتریک پرداخته اند. نتایج، نشان داد ذرات TiC در طی فرآیند، ذوب نمی شوند و براده برداری بر اثر ذوب زمینه (ماتریس) رخ می دهد، بنابراین با افزایش میزان ذرات تیتانیوم کارباید، نرخ برداشت براده کاهش می یابد. همچنین مشخص شد شدت جریان بر نرخ خوردگی ابزار و نرخ برداشت براده تأثیر بیشتری دارد. آنها تنظیم زمان روشنی پالس ۵۰۰ μs و شدت جریان ۶A را دارای بیشترین نرخ خوردگی ابزار و نرخ برداشت براده تعیین کردند [۱۳]. در ادامه مطالعات بسیاری نشان داد که دوران ابزار نیز بر عملکرد ماشین کاری تخلیه الکتریکی مؤثر است. با توجه به تحقیقات و آزمایش های انجام شده در ماشین کاری کامپوزیت های زمینه فلزی ۲۰۲۴ تقویت شده با ذرات اکسید آلومینیوم و کاربرد زیاد ماشین کاری تخلیه الکتریکی در ماشین کاری آنها، مشاهده می شود که تحقیقات زیادی بر روی این نوع ماده مرکب انجام نشده است. در مقابل، مطالعه حاضر به بررسی وضعیت ماشین کاری تخلیه الکتریکی با کمک پودر و دوران ابزار و ماشین کاری در حالت ابزار ثابت و بدون پودر خواهد پرداخت. تأثیر دوران ابزار و پودر اکسید آلومینیوم و اثرات پارامترهای ورودی از قبیل ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس بر روی ماشین کاری تخلیه الکتریکی ماده مرکب ۲۰۲۴

۲- مواد و تجهیزات

۲-۱- ماده مرکب مورد آزمایش

ماده مرکب زمینه فلزی با تقویت کننده های ذره ای اکسید آلومینیوم یک ماده مهم در صنعت مدرن است. خواص استثنایی آن از قبیل سختی، خواص ساینده بالا، سبک بودن وزن آنها و مقاومت سایش عالی نسبت به مواد متداول و عادی دیگر، کاربرد آن را به طور گسترده در هوافضا، خودروسازی، کشتی سازی، صنایع نظامی و الکترونیک گسترش داده است [۱۴]. با توجه به بررسی هایی که در رابطه با ماشین کاری ماده مرکب ۲۰۲۴ تقویت شده با اکسید آلومینیوم انجام شد، دیده می شود که مطالعات کاملی در رابطه با ماشین کاری این نوع ماده مرکب انجام نشده است. در این تحقیق تأثیر پارامترهای دوران ابزار، پودر اکسید آلومینیوم، زمان روشنی پالس، ولتاژ، زمان خاموشی پالس و شدت جریان بر نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و

زبری سطح بررسی می‌شود. جدول (۱) برخی از خواص مکانیکی و فیزیکی مهم این آلیاژ را نشان می‌دهد.

جدول (۱): خواص مکانیکی و فیزیکی ماده مرکب ۲۰۲۴ تقویت شده با

اکسید آلومینا [۱۵]

۲/۸۵۴ g/cm ³	چگالی
۴۷۵ Mpa	استحکام نهایی کششی
۳۲۵ Mpa	تنش تسلیم
۷۳/۲ Gpa	مدول الاستیسیته
۰/۳۳۲	ضریب پواسون
۰/۰۰۰۰۳۸۰ Ohm-cm	مقاومت الکتریکی
۱۲۰ W/m-k	رسانایی گرمایی
۶۳۸-۵۰۲ °C	نقطه ذوب
۳/۸-۴/۹ %	مس
۰/۳-۰/۹ %	منگنز
۱/۲-۱/۸ %	منیزیم

ماده مرکب مذکور توسط دستگاه وایرکات در اندازه‌های ۷۶×۳۷×۹ میلی‌متر بریده شد و سطوح آن‌ها سنگ زنی شد. جنس الکتروود ابزار به کار رفته در این آزمایش مس با خلوص ۹۹/۹٪ است که قطر و ارتفاع آن به ترتیب ۸/۴ و ۵۴/۸ میلی‌متر می‌باشد. لازم به ذکر است که ماده مرکب مورد استفاده در بررسی حاضر با استفاده از یک کوره مقاومتی که دارای قابلیت کنترل دما و سرعت چرخش قابل کنترل می‌باشد، ساخته شده است.

۲-۲- تجهیزات مورد استفاده

برای انجام آزمایش‌های طراحی‌شده، از ماشین اسپارک تهران اکرام مدل 204H ساخت ایران، استفاده شده است. از مهم‌ترین ویژگی‌های این دستگاه می‌توان به امکان تغییر اکثر پارامترهای تنظیمی، دقت بالا و سیستم شست و شوی کارآمد آن اشاره کرد. در این تحقیق، به دلیل بررسی دوران ابزار در ماشین کاری تخلیه الکتریکی و همچنین استفاده از پودر اکسید آلومینیوم، اصلاحات اعمال شده بر روی دستگاه اسپارک، شامل دو قسمت

می‌باشد: قسمت اول مربوط به مونتاژ و انطباق یک سیستم دورانی ابزار طراحی شده بر روی ابزارگیر ماشین اسپارک می‌باشد که امکان دوران ابزار را فراهم می‌سازد و این سیستم شامل یک تسمه، یک موتور و یک قسمت ابزارگیر قابل چرخش می‌باشد. دومین قسمت مربوط به طراحی یک مخزن ماشین کاری ساده می‌باشد. جهت انجام آزمایشات اشاره شده، نیاز است تا از پودر اکسید آلومینیوم با غلظت‌های مختلف استفاده شود. در این تحقیق مخزن ماشین کاری ساده و کوچکی طراحی و ساخته شد، به گونه‌ای که این سیستم و تجهیزات بتواند سیال دی الکتریک را به محل گپ بین دو الکتروود با فشار مناسب پمپ کند و سبب گردش منظم سیال دی الکتریک به همراه پودر معلق در آن، به موضع ماشین کاری شود و همچنین به صورت خودکار و ملایم سیال دی الکتریک در مخزن ویژه هم زده شود تا اطمینان بیشتر از همگن بودن غلظت پودر در سیال حاصل شود و احتمال ته نشین شدن ذرات پودر در کف مخزن کاهش یابد. در این مطالعه اختلاف وزن نمونه‌ها و الکتروودهای ابزار قبل و بعد از ماشین کاری با استفاده از ترازوی آزمایشگاهی^۱ مدل AND GR-300 با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم، ساخت کشور ژاپن اندازه‌گیری شد و سپس با توجه به زمان ماشین کاری و لحاظ نمودن دانسیته اندازه‌گیری شده برای مس و ماده مرکب ۲۰۲۴ تقویت شده با اکسید آلومینیوم که با استفاده از چگالی سنج محاسبه گردید و با استفاده از روابط (۱) و (۲) ارائه شده، نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار هر الکتروود تحت شرایط معین ماشین کاری به دست آمد. لازم به ذکر است که زمان ماشین کاری توسط یک زمان سنج دیجیتال با دقت ۰/۰۱ ثب و یادداشت شد.

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

در این رابطه MRR نرخ براده برداری حجمی بر حسب میلی‌متر مکعب بر دقیقه (mm^3/min) ، W_2 ، W_1 وزن قطعه کار قبل و بعد از

ولتاژ بوده است. در این تحقیق تعداد آزمایش‌ها ۹ و تعداد فاکتورها ۴ می‌باشد.

ماشین کاری، ρ_w چگالی ماده مرکب ۲۰۲۴ تقویت شده با آلومینا و t زمان ماشین کاری بر حسب دقیقه (min) می‌باشد.

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

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

سطوح	ولتاژ	شدت جریان	زمان روشنی پالس	زمان خاموشی پالس
سطح ۱	۸۰	۱۰	۳۵	۳۰
سطح ۲	۲۵۰	۱۵	۵۰	۷۰
سطح ۳	۸۰	۲۰	۱۰۰	۲۰۰

سایش ابزار بر حسب میلی‌متر مکعب بر دقیقه (mm^3/min) با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید. در این رابطه TWR نرخ سایش ابزار بر حسب (mm^3/min), T_1 , T_2 وزن ابزار قبل و بعد از ماشین کاری، ρ_T چگالی ابزار مسی و t زمان ماشین کاری (min) می‌باشد. برای اندازه گیری میزان زبری سطح قطعه کار پس از عملیات ماشین کاری از دستگاه زبری سنج مدل Mahr M300-RD18 ساخت کشور آلمان و با دقت ۰/۰۱ میکرون استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

آزمایشات در دو مرحله انجام شد: ۱- ماشین کاری تخلیه الکتریکی در حالت ابزار ثابت و بدون پودر، ۲- ماشین کاری تخلیه الکتریکی با کمک پودر و دوران ابزار. ابتدا در هر دو روش با استفاده از روش طراحی تاگوچی و محاسبه و تحلیل مقدار کل نرمال شده پارامترها (TNQL) و نسبت سیگنال به نویز (S/N) همزمان خروجی‌ها (MSNR) نتایج به صورت مجزا بررسی شده و در انتها به منظور بررسی تأثیر پودر و دوران ابزار بر روی ماشین کاری ماده مرکب زمینه آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با اکسید آلومینیوم، دو حالت باهم مقایسه شدند. در هر آزمایش، باید همواره به دنبال بالاترین نسبت (S/N) در نتایج بود. مقدار (S/N) بالا نشان‌دهنده‌ی این است که اثر پارامترهای قابل کنترل، بیشتر از اثر پارامترهای غیرقابل کنترل است. طراحی فرآیند تولید با بالاترین نسبت (S/N) همواره باعث ایجاد کیفیت بهینه با حداقل واریانس می‌شود. در روش تاگوچی، پس از تعیین پارامترهای ورودی و خروجی و مقادیر آن‌ها، تبدیل داده‌ها و مشاهدات به یک عدد (S/N) در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول، میانگین مربعات انحراف (MS)، که یک کمیت آماری است و

۳-۲- طراحی آزمایش

در این تحقیق از بین ورودی‌های موجود، اثر چهار پارامتر ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس، بر روی سه پارامتر خروجی نرخ برداشت ماده نرخ سایش ابزار و زبری سطح در ماشین کاری به روش تخلیه الکتریکی ماده مرکب پایه آلومینیوم ۲۰۲۴، مورد بررسی قرار گرفته است. نوع و مقدار پارامترها و چند سطحی بودن آن‌ها با انجام آزمایش‌های اولیه و بررسی تنظیمات قابل حصول در دستگاه مشخص شده در جدول (۲) آمده است. پس از تعیین پارامترها و سطوح هریک، باید نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها تعیین شود. با توجه به تعداد پارامترها و سطوح انتخابی، برای انجام کامل آزمایش‌ها احتیاج به ۸۱ آزمایش (۳^۴) است. اما با توجه به هزینه و زمان‌بر بودن انجام کامل آزمایش‌ها، در این پژوهش از طرح کسری تاگوچی استفاده شده است. برای بهینه سازی تعداد آزمایشات و افزایش تعمیم نتایج به تمام سطوح مورد بررسی از آرایه متعامد L_8 و تکنیک سطوح تکراری^۹ با تکرار سطح ولتاژ ۸۰ استفاده شده است، زیرا که دستگاه EDM مورد استفاده دارای تنها ۲ سطح

$$S/N = -10 \times \log(\sum_{i=1}^n (1/y_i^2)/n) \quad (۳)$$

ب- مقدار بزرگ‌تر، بهتر است: در اندازه‌گیری میزان براده برداری، هرچه عدد بزرگ‌تر باشد بهتر است، بنابراین برای محاسبه تابع زیان از رابطه (۴) استفاده می‌شود:

$$S/N = -10 \times \log(\sum_{i=1}^n (y_i^2)/n) \quad (۴)$$

انحراف از مقدار مشخصه و هدف را نشان می‌دهد، محاسبه می‌شود. این تابع با توجه به شرایط مسئله، دارای حالت‌های مختلف است [۱۷]. دو حالت استفاده شده در این تحقیق به قرار زیر است:

الف- مقدار کوچک‌تر، بهتر است: در اندازه‌گیری زبری سطح و سایش ابزار هرچه عدد، کوچک‌تر باشد بهتر است. بنابراین برای محاسبه‌ی تابع زیان از رابطه (۳) استفاده می‌شود:

آرایه متعامد تاگوجی L9 و مقادیر خروجی مربوطه در دو حالت در جدول (۳) آورده شده است.

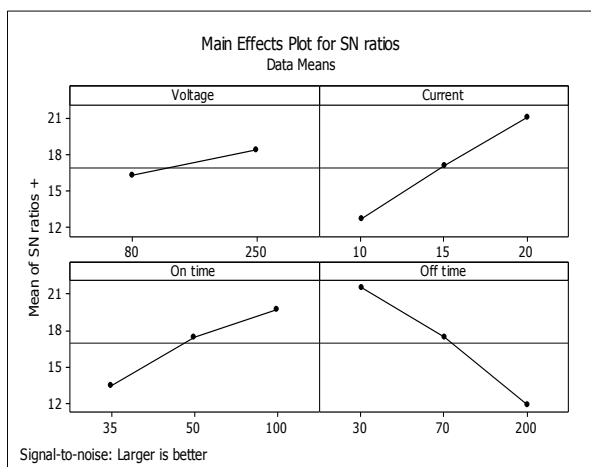
جدول (۳): طراحی آزمایشات و نتایج پارامترهای خروجی

طراحی آزمایشات با استفاده از آرایه L9										
شماره آزمایش	پارامترهای ورودی				پارامترهای خروجی به‌دست آمده با استفاده از وضعیت ماشین کاری در حالت ابزار ثابت و بدون پودر اکسید آلومینیوم			پارامترهای خروجی به‌دست آمده با استفاده از وضعیت ماشین کاری در حالت دوران ابزار و پودر اکسید آلومینیوم		
	ولتاژ	شدت جریان	زمان روشن پالس	زمان خاموشی پالس	زبری سطح (μm)	نرخ براده (cm ³ /min)	نرخ سایش ابزار (cm ³ /min)	زبری سطح (μm)	نرخ براده (cm ³ /min)	نرخ سایش ابزار (cm ³ /min)
۱	۱	۱	۱	۱	۴/۳۵۹	۳/۱۱۸	۰/۰۳۳۶	۴/۲۲۵	۴/۵۹۰	۰/۰۱۱۲
۲	۱	۲	۲	۲	۵/۹۲۴	۵/۱۵۰	۰/۱۲۳۵	۵/۳۰۴	۷/۵۳۳۲	۰/۰۲۲۴
۳	۱	۳	۳	۳	۶/۶۴۳	۹/۷۷۵	۰/۱۴۶۰	۷/۷۹۶	۸/۱۶۳۹	۰/۰۴۴۹
۴	۲	۱	۲	۳	۳/۹۹۸	۱/۹۹۷	۰/۰۳۳۶	۳/۸۵۸	۳/۰۱۳۳	۰/۰۳۳۶
۵	۲	۲	۳	۱	۵/۱۴۱	۱۷/۹۰۴	۰/۲۵۸۳	۵/۳۳۱	۱۹/۷۲۶۶	۰/۰۵۶۱
۶	۲	۳	۱	۲	۷/۳۵۲	۷/۹۸۸	۰/۰۵۶۱	۶/۹۲۰	۹/۴۲۵۳	۰/۰۲۲۴
۷	۳	۱	۳	۲	۳/۶۶۷	۳/۳۶۳	۰/۰۳۳۶	۴/۴۶۰	۵/۷۸۱۳	۰/۰۱۱۲
۸	۳	۲	۱	۳	۵/۱۲۵	۱/۲۶۱	۰/۰۷۸۶	۳/۵۸۵	۲/۴۵۲۶	۰/۰۱۱۲
۹	۳	۳	۲	۱	۳/۲۱۴	۱۷/۹۷۴	۰/۲۴۷۰	۶/۸۰۵	۱۸/۶۰۵۴	۰/۰۷۸۶

و(۳)، سطح دارای بالاترین مقدار متوسط (S/N)، به‌عنوان سطح بهینه برای بیشینه‌سازی نرخ براده‌برداری خواهد بود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در هر دو حالت با افزایش جریان، نرخ براده

۳-۱- تحلیل بر روی خروجی نرخ براده برداری یکی از مزیت‌های روش (S/N)، امکان تعیین سطوح هر پارامتر به منظور بهینه کردن خروجی مدنظر است. با توجه به شکل‌های (۲)

نرخ براده برداری با سرعت زیادی افزایش می‌یابد، در حالی که با افزایش زمان روشنی پالس، افزایش نرخ براده برداری روند آرام‌تری را طی می‌کند و پس از زمان ۵۰ میکرو ثانیه، کمی سیر نزولی پیدا می‌کند.

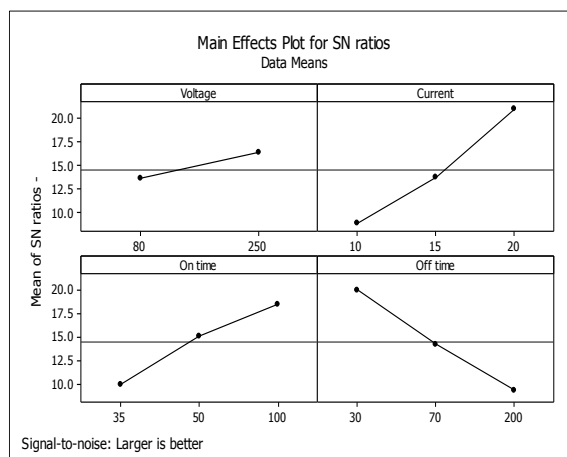


شکل (۳): تأثیر پارامترهای ورودی بر نرخ باربرداری در حالت ابزار دورانی

و پودر [۱۶]

در زمان خاموشی پالس، جریان قطع شده و توسط مایع دی‌الکتریک ذرات کنده‌شده از سطح فلز، از محل دور می‌شوند. هرچه این پارامتر کمتر باشد، میانگین تعداد جرقه‌ها در واحد زمان بیشتر شده و سرعت براده‌برداری افزایش می‌یابد. نتایج تحلیل واریانس برای نرخ باربرداری در هر دو حالت در جدول (۴) نشان داده شده است. با توجه به جدول ملاحظه می‌شود که در حالت دوران ابزار و پودر، برای سطح اطمینان ۹۵٪، مقدار P^{11} کمتر از [۱۸-۱۹]، اثرات شدت جریان جرقه، زمان خاموشی پالس، ولتاژ و زمان روشنی پالس به ترتیب به‌عنوان اثرات بحرانی و مهم فرآیند شناخته می‌شوند. همچنین در نتایج مربوط به تحلیل واریانس نرخ براده برداری در حالت ابزار ثابت و بدون پودر برای سطح اطمینان ۹۵٪ با مقدار P کمتر از ۰/۰۵، اثرات زمان خاموشی پالس، شدت جریان جرقه، زمان روشنی پالس و ولتاژ به ترتیب اثرات مهم و بحرانی فرآیند شناخته می‌شوند. ستون سوم این جدول معادل مجموع مربعات نسبت سیگنال به نویز برای هر فاکتور است. مجموع این مقادیر نیز معادل مجموع مربعات کل است. از تقسیم مجموع مربعات

بردارای افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان در این دانست که با افزایش جریان، انرژی جرقه و در نتیجه درجه حرارت سطح قطعه افزایش یافته، و ذوب شدگی و در نهایت نرخ براده برداری به سرعت افزایش خواهد یافت. با افزایش شدت جریان،



شکل (۲): تأثیر پارامترهای ورودی بر نرخ باربرداری در حالت ابزار ثابت

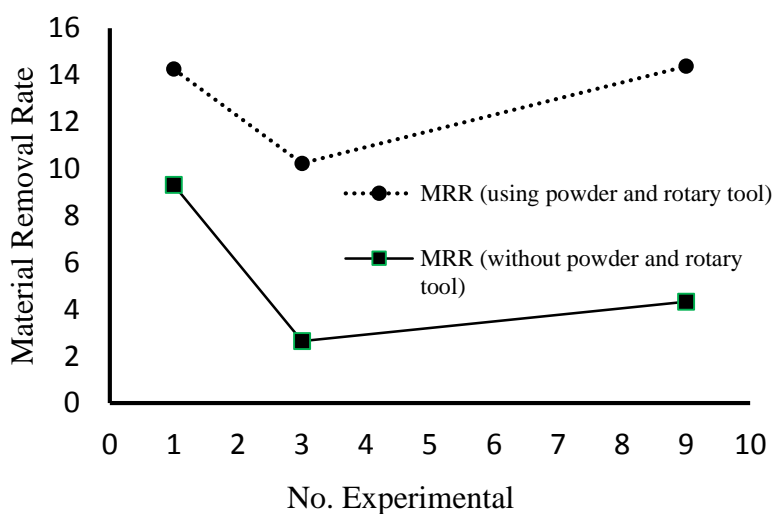
و بدون پودر [۱۶]

اصولاً با افزایش زمان روشنی پالس و خصوصاً شدت جریان، انرژی جرقه افزایش می‌یابد، در نتیجه امکان باربرداری بیشتر از قطعه کار فراهم می‌گردد. با افزایش زمان روشنی پالس از یک مقدار معینی به بعد (در این مورد ۵۰ میکرو ثانیه)، کانال پلاسما در محل قوس و در داخل دی‌الکتریک کاهش می‌یابد و به مرور دانسیته انرژی در موضع تخلیه الکتریکی کاهش یافته و این مسئله بر افزایش نرخ براده برداری تأثیر منفی می‌گذارد. همچنین با افزایش زمان روشنی پالس فرصت لازم برای گشادتر شدن کانال پلاسما و در نتیجه فعال‌تر شدن یون‌های مثبت و یورش بیشتر آن‌ها به قطب منفی (قطعه کار) و تخلیه بیشتر انرژی ایجاد شده و در اثر آن، امکان ذوب و تبخیر بیشتر از سطح قطعه کار فراهم می‌گردد. با افزایش ولتاژ، میدان الکتریکی موجود در کانال پلاسما افزایش پیدا کرده و در نتیجه تعداد الکترون‌ها و یون‌های موجود افزایش پیدا می‌کند و از طرف دیگر سرعت و انرژی ذرات باردار در میدان الکتریکی وابسته به ولتاژ می‌باشد. بنابراین با افزایش ولتاژ، تعداد یون‌های بیشتر و با انرژی بیشتری به قطعه کار برخورد کرده و نرخ باربرداری افزایش پیدا می‌کند.

بر درجه آزادی فاکتور مورد نظر نیز میانگین مربعات آن فاکتور قابل محاسبه شده است. در شکل (۴) نرخ باربرداری در حالت ابزار ثابت و بدون پودر و فاکتور قابل محاسبه شده است. ابزار ثابت، باهم مقایسه شده است.

جدول (۴): تجزیه و تحلیل واریانس نرخ باربرداری در حالت دوران ابزار و پودر

پارامتر	درجه آزادی (DF)	حالت دوران ابزار و پودر اکسید آلومینیوم					حالت ابزار ثابت و بدون پودر اکسید آلومینیوم				
		مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	مقدار P	درجه تأثیر (Rank)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	مقدار P	درجه تأثیر (Rank)
ولتاژ	۱	۱۶/۴	۱۶/۴	۶/۱۷	۰/۰۲۴۷	۳	۱۲/۷	۱۲/۷	۰/۲۸	۰/۶۱۵	۴ (بدون اثر)
شدت جریان	۲	۱۴۹/۸	۷۴/۹	۶/۵۹	۰/۰۴۵	۱ (قابل توجه)	۱۲۴/۹	۶۲/۵	۶/۹۳	۰/۰۳۵	۲
زمان روشنی پالس	۲	۹۲/۱	۴۶/۱	۶/۳۵	۰/۰۳۳۵	۲	۶۰/۷	۳۰/۴	۰/۶۷	۰/۵۴۸	۳ (بدون اثر)
زمان خاموشی پالس	۲	۵۳/۰	۲۶/۵	۶/۰	۰/۵۷۹	۴ (بدون اثر)	۱۳۲/۵	۶۶/۲	۷/۸۶	۰/۰۱۹	۱ (قابل توجه)



شکل (۴): تغییرات نرخ باربرداری با توجه به تغییرات پارامترهای ورودی در هر دو حالت ماشین کاری تخلیه الکتریکی

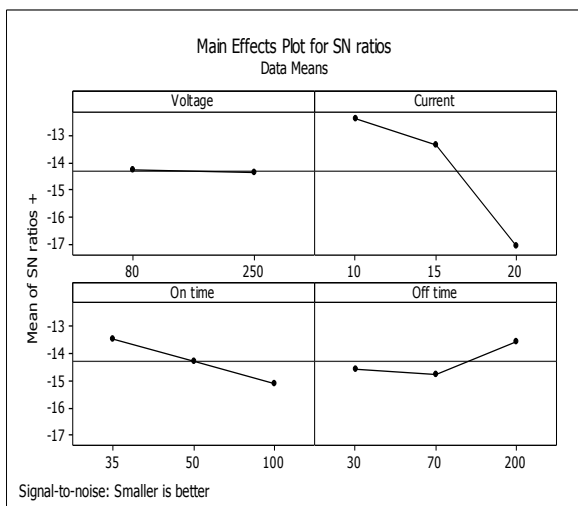
پودر اکسید آلومینیوم پایین می‌باشد و از این رو انرژی بیشتری را انتقال داده و فاصله گپ بیشتر را باعث می‌شود، بنابراین نرخ

با توجه به شکل، نرخ باربرداری حالت با پودر و دوران ابزار بیشتر از حالت بدون پودر و ابزار ثابت است. مقاومت الکتریکی

همان‌طور که از شکل اثرات اصلی بر زبری سطح (شکل ۵ و ۶) ملاحظه می‌شود، در هر دو حالت با کاهش شدت جریان و ولتاژ، زبری سطح نیز کاهش می‌یابد زیرا با کاهش شدت جریان و ولتاژ، میزان انرژی جرقه تا حد زیادی کاهش یافته و در نتیجه در هر پالس، مقدار کمتری از سطح قطعه کار ذوب و تبخیر می‌شود. بنابراین عمق حفره‌های سطحی کاهش می‌یابد که خود به معنی کاهش زبری سطح است، با کاهش پارامتر زمان روشنی پالس در حالت با پودر و دوران ابزار با توجه به دلایل گفته شده در بالا زبری سطح نیز کاهش می‌یابد اما در حالت بدون پودر و دوران با کاهش زمان روشنی پالس پس از یک حد بهینه زبری سطح مجدد افزایش می‌یابد. هنگامی که زمان خاموشی پالس از ۳۰ میکرو ثانیه به ۷۰ میکروثانیه تغییر می‌کند، این تغییر منجر به کاهش زبری سطح شده و هنگامی که از ۷۰ به ۲۰۰ تغییر می‌کند، این تغییر باعث افزایش زبری سطح می‌شود.

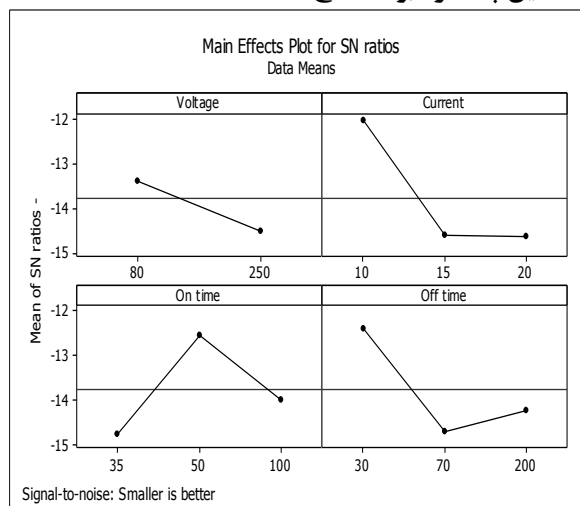
براده برداری بالا را نتیجه خواهد داد. همچنین دوران ابزار باعث می‌شود که یک نیروی گریز از مرکز ایجاد شود و ذرات را به سرعت از منطقه ماشین کاری دور کند. در حالت کلی این عمل موجب زدودن و برداشتن مواد اضافی در محل جرقه می‌شود و باعث بهتر شدن نرخ براده برداری و افزایش آن خواهد شد. نرخ براده برداری برای ماده مرکب تقویت شده با اکسید آلومینیوم در حالت دوران ابزار بیشتر می‌شود. دلیل اصلی افزایش نرخ براده برداری در حالت دوران ابزار، کاهش مقاومت دی الکتریک ناشی از چرخش ابزار و افزایش گپ ماشینکاری می‌باشد. چرخش ابزار نیروی گریز از مرکز تولید کرده و ذرات از ناحیه ماشینکاری سریع فاصله می‌گیرد و نرخ براده برداری افزایش می‌یابد. چرخش الکتروود ابزار حرارت را به خارج از گپ هدایت می‌کند، چرخش ابزار از انتشار کانال پلاسما جلوگیری کرده و نرخ براده برداری را افزایش می‌دهد.

۳-۲- تحلیل پارامتر زبری سطح



شکل (۶): تأثیر پارامترهای ورودی بر زبری سطح در حالت ابزار دورانی و

پودر [۱۶]



شکل (۵): تأثیر پارامترهای ورودی بر زبری سطح در حالت ابزار ثابت و

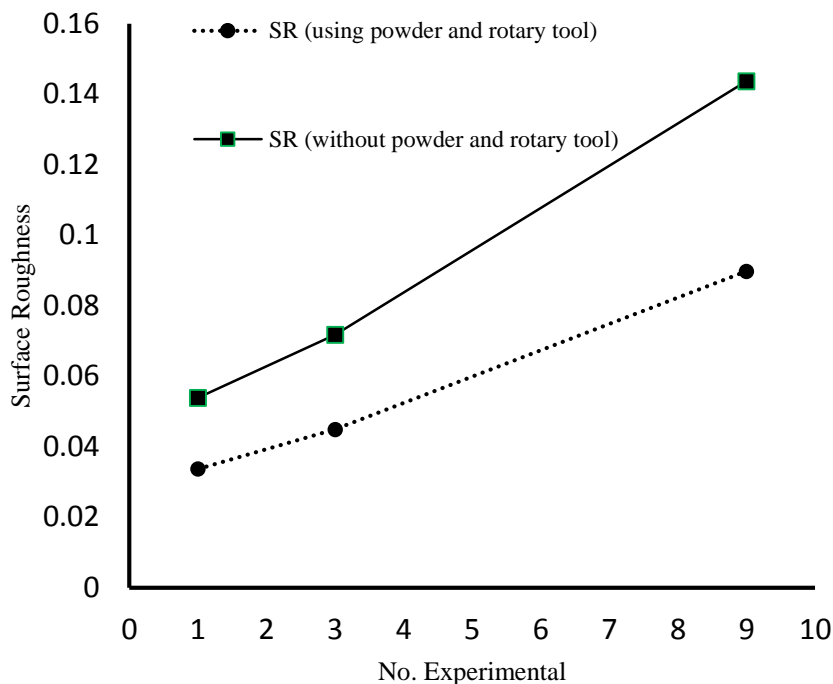
بدون پودر [۱۶]

جدول (۵): تجزیه و تحلیل واریانس زبری سطح در حالت دوران ابزار و پودر

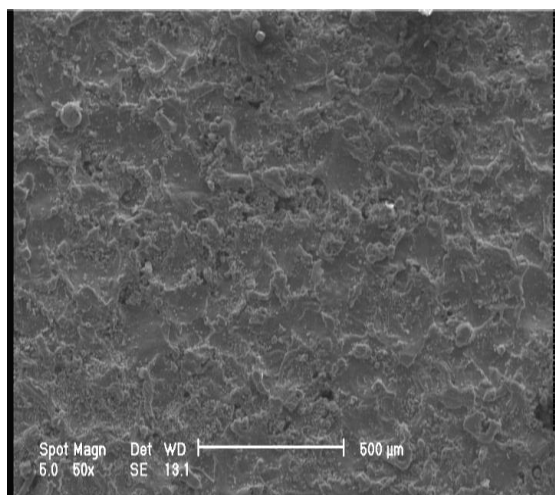
پارامتر	درجه آزادی (DF)	حالت دوران ابزار و پودر اکسید آلومینیوم					حالت ابزار ثابت و بدون پودر اکسید آلومینیوم				
		مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	مقدار P	درجه تأثیر (Rank)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	مقدار P	درجه تأثیر (Rank)
ولتاژ	۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۹۵	۴ (بدون اثر)	۰/۹۱	۰/۹۱	۵/۹۱	۰/۰۴۹	۳
شدت جریان	۲	۱۵/۱۹۱	۷/۵۹۶	۱۶/۴۳	۰/۰۰۴	۱ (قابل توجه)	۵/۰۳	۲/۵۲	۸/۵۳	۰/۰۲۹	۱ (قابل توجه)
زمان روشنی پالس	۲	۱/۳۷	۰/۶۸	۱۰/۵۹	۰/۰۰۴۶	۲	۲/۳۳	۱/۱۶	۰/۵۳	۰/۶۱۳	۴ (بدون اثر)
زمان خاموشی پالس	۲	۰/۳۸	۰/۱۹	۰/۰۷	۰/۹۳۷	۳ (بدون اثر)	۳/۱۸	۱/۵۹	۷/۹۴	۰/۰۳۸	۲

ابزار ثابت است. این اتفاق به دلیل آن است که در این روش پودرها نه تنها باعث توزیع و کاهش دانسیته جرقه می‌شوند، بلکه ضربه ناشی از اصابت پودرها به سطح قطعه کار نیز، باعث بهبود شرایط سطحی می‌شود. همچنین حرکت دورانی ابزار باعث می‌شود که ذرات جدا شده به سرعت از منطقه ماشین کاری دور شوند و در نتیجه باعث بهبود زبری سطح خواهد شد. با توجه به شکل های (۸ و ۹)، در حالت ماشینکاری بدون پودر و ابزار ثابت، حفره ها و تخلخل های ماکروسکوپی و همچنین سطح ناهموار و غیریکنواخت به خوبی دیده می‌شود. همانطور که در شکل دیده می‌شود سطح ماشینکاری شده در حالت دوران ابزار و پودر، هموار و یکنواخت است و خلل و فرج سطحی تا اندازه زیادی کاهش یافته است.

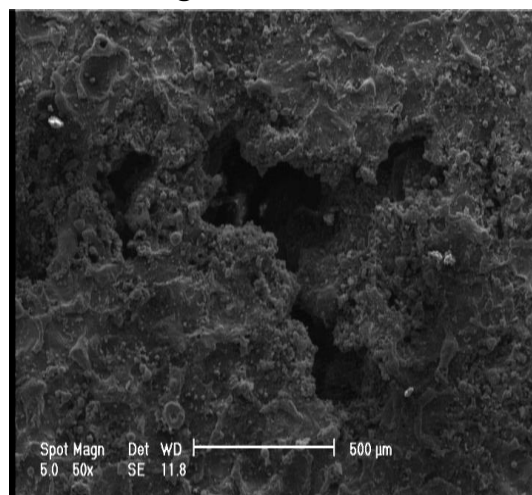
از جدول (۵) تحلیل واریانس برای زبری سطح در حالت دوران ابزار و پودر ملاحظه می‌شود که برای سطح اطمینان ۹۵٪ با مقدار P کمتر از ۰/۰۵، اثرات شدت جریان جرقه، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و ولتاژ به ترتیب به عنوان اثرات بحرانی و مهم فرآیند شناخته می‌شوند. همچنین جدول (۵) نتایج مربوط به تحلیل واریانس زبری سطح ماشین کاری در حالت ابزار ثابت و بدون پودر را بررسی می‌کند. برای سطح اطمینان ۹۵٪ با مقدار P کمتر از ۰/۰۵، اثرات شدت جریان جرقه، زمان خاموشی پالس، ولتاژ و زمان روشنی پالس به ترتیب اثرات مهم و بحرانی فرآیند شناخته می‌شوند. در شکل (۷) زبری سطح در دو حالت با پودر اکسید آلومینیوم و دوران ابزار و بدون پودر و ابزار ثابت، باهم مقایسه شده است. با توجه به شکل (۷) زبری سطح حالت دی الکتریک با پودر و دوران ابزار، کمتر از حالت بدون پودر و



شکل (۷): تغییرات زبری سطح با توجه به تغییرات پارامترهای ورودی در هر دو حالت ماشین کاری تخلیه الکتریکی



شکل (۹): تصویر میکروسکپ الکترونی از سطح ماشینکاری شده با استفاده از تکنیک دوران ابزار و پودر



شکل (۸): تصویر میکروسکپ الکترونی از سطح ماشینکاری شده با استفاده از تکنیک ابزار ثابت و بدون پودر

فعال تر شده و به تدریج از فعالیت الکترون‌های کوچک می‌کاهد و چون الکترودهای ابزار در این آزمایشات دارای قطب مثبت می‌باشند و مورد هجوم الکترون‌ها با بار منفی قرار می‌گیرند لذا با افزایش زمان روشنی پالس به تدریج از شدت حرکت الکترون‌ها به سمت الکتروود ابزار کاسته می‌شود، در نتیجه انرژی و حرارت کمتری به الکتروود ابزار منتقل شده و نسبت فرسایش الکتروود

۳-۳- تحلیل پارامتر نرخ سایش ابزار

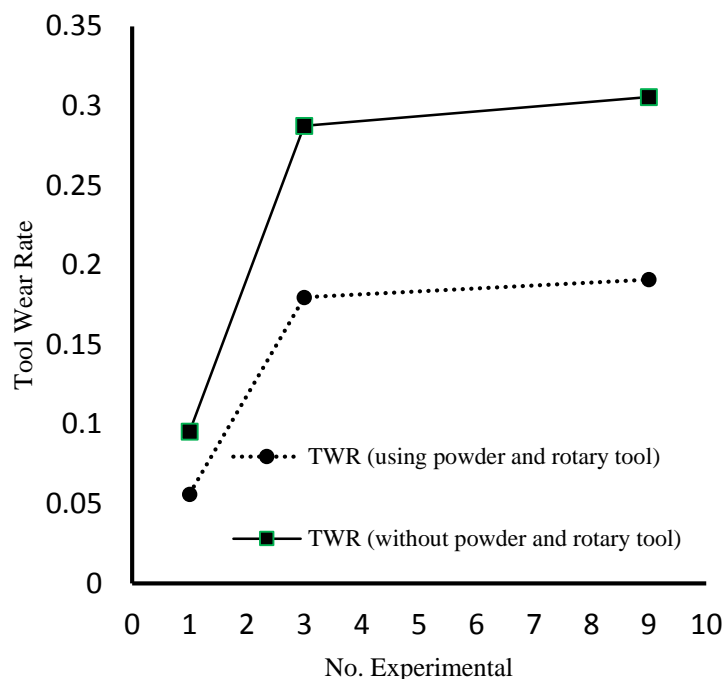
همان‌طور که از شکل اثرات اصلی ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس برای نرخ براده برداری (شکل ۱۰ و ۱۱) ملاحظه می‌شود با افزایش زمان روشنی پالس به تدریج قطر کانال پلاسما افزایش یافته و در نتیجه آن یون‌های مثبت که از لحاظ اندازه خیلی بزرگ‌تر از الکترون‌ها می‌باشند

جنس برای الکترودهای ابزار، الکترودهای دارای نقطه ذوب بالا و مقاومت کم در برابر جریان الکتریکی است. از جدول تحلیل واریانس (جدول ۶)، برای نرخ سایش ابزار در حالت ابزار دورانی و پودر ملاحظه می‌شود که برای سطح اطمینان ۹۵٪ با مقدار P کمتر از ۰/۰۵، اثرات زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، شدت جریان و ولتاژ به ترتیب به‌عنوان اثرات بحرانی و مهم فرآیند شناخته می‌شوند. همچنین نتایج مربوط به تحلیل واریانس نرخ سایش ابزار در حالت ابزار ثابت و بدون پودر را بررسی می‌کند. برای سطح اطمینان ۹۵٪ با مقدار P کمتر از ۰/۰۵، اثرات شدت جریان جرقه، زمان خاموشی پالس، زمان روشنی پالس و ولتاژ به ترتیب اثرات مهم و بحرانی فرآیند شناخته می‌شوند. در شکل (۱۲) نرخ سایش ابزار در دو حالت با پودر اکسید آلومینیوم و دوران ابزار (خط خاکستری رنگ) و بدون پودر و ابزار ثابت (خط مشکی رنگ)، باهم مقایسه شده است.

ابزار کاهش می‌یابد. از این دو نمودار این موضوع قابل استنتاج است که هنگامی که زمان روشنی پالس از ۳۵ میکرو ثانیه به ۵۰ میکرو ثانیه تغییر می‌کند، نرخ سایش ابزار کاهش یافته که دلیل این کاهش را این گونه می‌توان بیان کرد که در ابتدای تخلیه الکتریکی، الکترون‌های سبک به دلیل لختی کمتر، در اثر میدان الکتریکی شروع به حرکت به سمت آند (قطب مثبت) می‌نمایند و الکترودها را بمباران می‌کنند، که این باعث ذوب شدن بخش کوچکی از سطح الکترودها می‌شود، با گذر زمان نیروی میدان الکتریکی به لختی بیشتر یون‌های مثبت که سنگین‌تر می‌باشند، غلبه می‌کنند و با حرکت آن‌ها به سمت کاتد (قطب منفی) و بمباران آن، براده برداری از قطعه کار آزاد می‌شود و در نتیجه نرخ سایش ابزار کاهش می‌یابد، از طرف دیگر تغییرات زمان روشنی پالس از ۵۰ میکرو ثانیه به ۱۰۰ میکرو ثانیه منجر به افزایش نرخ سایش ابزار خواهد شد. الکترودها باید دارای هدایت الکتریکی بالا و نرخ سایش پایین باشد. اصولاً، بهترین

جدول (۶): تجزیه و تحلیل واریانس سایش ابزار در حالت دوران ابزار و پودر

پارامتر	درجه آزادی (DF)	حالت دوران ابزار و پودر اکسید آلومینیوم					حالت ابزار ثابت و بدون پودر اکسید آلومینیوم				
		مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	مقدار P	درجه تأثیر (Rank)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	مقدار P	درجه تأثیر (Rank)
ولتاژ	۱	۰/۰۰۰۱۱۱	۰/۰۰۰۱۱۱	۶/۲۱	۰/۰۴۴	۴	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۱	۰/۹۳۶	۴ (بدون اثر)
شدت جریان	۲	۰/۰۰۱۳۷۵	۰/۰۰۰۶۸۵	۸/۷۴	۰/۰۳۷	۳	۰/۰۲۷۷۸۶	۰/۰۱۳۹۳	۶/۹۳	۰/۰۱۳	۱ (قابل توجه)
زمان روشنی پالس	۲	۰/۰۰۱۴۵۷	۰/۰۰۰۷۲۸	۹/۴۲	۰/۰۱۲	۱ (قابل توجه)	۰/۰۱۴۳۸	۰/۰۰۰۷۱۹	۵/۸۸	۰/۰۳۴	۳
زمان خاموشی پالس	۲	۰/۰۰۱۳۷۵	۰/۰۰۰۶۸۸	۹/۱۲	۰/۰۱۸	۲	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۱	۰/۹۳۶	۴ (بدون اثر)



شکل (۱۲): تغییرات نرخ سایش ابزار با توجه به تغییرات پارامترهای ورودی در هر دو حالت ماشین کاری تخلیه الکتریکی

۴- بهینه سازی فرآیند

در این پژوهش بهینه سازی به روش تاگوچی و محاسبه و تحلیل مقدار کل نرمال شده پارامترها (TNQL) و نسبت سیگنال به نویز (S/N) همزمان خروجی‌ها (MSNR) انجام می‌گیرد. تبدیل مجموعه‌ای از مشاهدات و داده‌ها به یک عدد را نسبت (S/N) گویند که در ۲ مرحله انجام می‌شود. ابتدا میانگین مربعات انحراف (MSD) محاسبه می‌شود و سپس نسبت (S/N) از (MSD) با توجه به پارامترهای خروجی و شاخصه‌های کیفیت مربوط به آن‌ها و با استفاده از معادلات (۳ و ۴) به دست می‌آید [۲۰-۲۱].

۴-۱- بهینه سازی فرآیند در حالت بدون پودر و دوران

برای تحلیل نسبت (S/N) در این آزمایش، زبری سطح و میزان سایش ابزار با استفاده از رابطه (۳)، مقدار کوچک‌تر بهتر) و نرخ براده برداری از رابطه (۴)، مقدار بزرگ‌تر بهتر) محاسبه می‌شود، که نتایج آن در جدول (۷) نشان داده شده است. با توجه به اینکه زبری سطح و میزان سایش ابزار و نرخ براده برداری دارای واحدهای متفاوتی می‌باشند، برای محاسبات بعدی و

از شکل ۱۲ چنین بر می‌آید که نرخ سایش ابزار حالت با پودر و دوران ابزار کمتر از حالت بدون پودر و ابزار ثابت است. همان‌طور که در بخش قبلی نیز اشاره شد، با افزودن ذرات پودر به سیال دی الکتریک به دلیل کاهش مقاومت شکست سیال دی الکتریک، فاصله گپ بین الکتروود ابزار و قطعه کار افزایش می‌یابد و در نتیجه کانال پلاسما گسترده‌تر و بزرگ‌تر می‌شود و در نتیجه انرژی حرارتی حاصل از فرآیند تخلیه الکتریکی در فضای گسترده‌تری توزیع می‌شود که این امر منجر به کاهش دانسیته توان الکتریکی می‌گردد و براده برداری را از سطح الکتروود ابزار کاهش می‌دهد و منجر به کاهش نرخ سایش ابزار می‌شود. از طرف دیگر با افزودن ذرات پودر به سیال دی الکتریک، ذرات رسانای افزوده شده حرارت بیشتری را به بیرون از فاصله گپ بین ابزار و قطعه کار منتقل می‌کنند، که این امر نیز منجر به کاهش توان تخلیه الکتریکی روی سطح الکتروود ابزار می‌شود و نرخ سایش ابزار را کاهش می‌دهد.

بهبود سازی همزمان آن‌ها لازم است که بی‌بعد شوند، برای این منظور باید داده‌های مربوط به هر خروجی را بر مقدار بیشینه مربوط به همان خروجی تقسیم و عملیات نرمالیزه کردن انجام میشود.

جدول (۷): تحلیل نسبت پارامترهای خروجی و نرمالیزه شده

شماره آزمایش	تحلیل نسبت S/N			خروجی‌های نرمالیزه		
	زبری سطح (mμ)	نرخ براده برداری (mm ³ /min)	نرخ سایش ابزار (mm ³ /min)	زبری سطح (mμ)	نرخ براده برداری (mm ³ /min)	نرخ سایش ابزار (mm ³ /min)
۱	۱۲/۷۸۷۷	۹/۸۷۷۵	۲۹/۴۷۳۲	۰/۷۳۷۹۷	۰/۳۹۳۶۳	۱/۰۰۰۰۰
۲	۱۵/۴۵۲۳	۱۴/۲۳۶۱	۱۸/۱۶۶۷	۰/۸۹۱۷۴	۰/۵۶۷۳۳	۰/۶۱۶۳۸
۳	۱۶/۴۴۷۳	۱۹/۸۰۲۳	۱۶/۷۱۲۹	۰/۹۴۹۱۶	۰/۷۸۹۱۵	۰/۵۶۷۰۵
۴	۱۲/۰۳۶۹	۶/۰۰۷۶	۲۹/۴۷۳۲	۰/۶۹۴۶۴	۰/۲۳۹۴۱	۱/۰۰۰۰۰
۵	۱۴/۲۲۱۰	۲۵/۰۵۹۰	۱۱/۷۵۷۵	۰/۸۲۰۶۹	۰/۹۹۸۶۴	۰/۳۹۸۹۲
۶	۱۷/۳۲۸۱	۱۸/۰۴۸۸	۲۵/۰۲۰۷	۱/۰۰۰۰۰	۰/۷۱۹۲۷	۰/۸۴۸۹۳
۷	۱۱/۲۸۶۲	۱۰/۵۳۴۵	۲۹/۴۷۳۲	۰/۶۵۱۳۲	۰/۴۱۹۸۱	۱/۰۰۰۰۰
۸	۱۴/۱۹۳۹	۲/۰۱۴۳	۲۲/۰۹۱۵	۰/۸۱۹۱۲	۰/۰۸۰۲۷	۰/۷۴۹۵۴
۹	۱۰/۱۴۰۹	۲۵/۰۹۲۹	۱۲/۱۴۶۱	۰/۵۸۵۲۲	۱/۰۰۰۰۰	۰/۴۱۲۱۰

مقاله مقدار ضریب وزنی کیفیت سطح ۰/۵ و مقدار ضریب وزنی نرخ براده برداری ۰/۳ و مقدار ضریب وزنی نرخ سایش ابزار ۰/۲ در نظر گرفته شده است. نسبت همزمان خروجی‌ها نیز در فرمول (۵) نشان داده شده است.

$$TNQL_i = \sum wy = (0.5 Ra + 0.3 MRR + 0.2 TWR)_i \quad (5)$$

$$MSNR_i = -10 \log_{10} (TNQL_i)$$

سپس برای محاسبه مقدار کل نرمال شده پارامترها (TNQL) و نسبت S/N همزمان خروجی‌ها (MSNR)، پس از آن که مقدار نرمال شده پارامترها به صورت مجزا در قسمت قبل محاسبه شدند. در این مرحله با توجه به درجه اهمیت خروجی‌ها، به آن‌ها وزن داده می‌شود و در نهایت با استفاده از فرمول (۵) مقدار مجموع نرمال شده پارامترها حساب می‌شود. به علت اهمیت بیشتر کیفیت سطح نسبت به نرخ براده برداری در این

مقادیر مربوط به پارامترهای نرمال شده و تحلیل نسبت همزمان در جدول (۸) نشان داده شده است.

جدول (۸): نرمال سازی و تحلیل نسبت همزمان پارامترهای خروجی

تحلیل همزمان پارامترهای خروجی		
شماره آزمایش	TNQL	MSNR(η_i)
۱	۰/۶۸۷۱۷۳	۱/۶۲۹۳۳
۲	۷۳۹۳۴۵	۱/۳۱۱۵۲
۳	۰/۷۳۹۳۴۵	۰/۸۳۶۸۵
۴	۰/۵۹۴۱۴۳	۲/۲۶۱۰۹
۵	۰/۷۸۹۷۲۱	۱/۰۲۵۲۶
۶	۰/۸۸۵۵۶۷	۰/۵۲۷۸۸
۷	۰/۶۵۱۶۰۳	۱/۸۶۰۱۶
۸	۰/۵۸۳۵۴۹	۲/۳۳۹۲۲
۹	۰/۶۷۵۰۳	۱/۷۰۶۷۶
MSNR میانگین $m \eta = 1.49977$		

$$\eta_0 = \eta_m + \sum_{i=1}^k (\eta_i - \eta_m) \quad (6)$$

در فرمول ۶ مقادیر η_i و η_m به ترتیب نسبت S/N برای هر مرحله و نسبت میانگین S/N برای تمامی مراحل می باشد. مقدار ماکزیمم به دست آمده برای هر پارامتر ورودی به عنوان مقدار بهینه در نظر گرفته میشود.

سپس برای محاسبه مقدار میانگین (MSNR) برای هر پارامتر در سطوح مختلف، با توجه به آرایه استاندارد تاگوجی و مقادیر MSNR محاسبه شده در طی ۹ مرحله در جدول (۹) مقدار میانگین MSNR برای هر پارامتر ورودی و در سطوح مختلف با توجه به فرمول (۶) محاسبه شد.

جدول (۹): میانگین MSNR برای هر پارامتر ورودی و در سطوح مختلف

پارامترهای ورودی	MSNR میانگین $m\eta$		
	سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱
A ولتاژ	۲/۹۰۶۶	۰/۸۱۴۵۹	۰/۷۸۸۱۶
B شدت جریان	۰/۰۷۱۸۵	۱/۶۷۶۴۶	۲/۷۵۱۰۴
C زمان روشنی پالس	۰/۷۲۲۷۳	۲/۲۷۹۸۳	۰/۸۴۴۳۳
D زمان خاموشی پالس	۲/۴۳۷۶۲	۰/۶۹۹۹۲	۱/۳۶۱۸۱

سایش ابزار و نرخ براده برداری دارای واحدهای متفاوتی می‌باشند، برای محاسبات بعدی و بهینه سازی همزمان آن‌ها لازم است که بی‌بعد شوند، برای این منظور باید داده‌های مربوط به هر خروجی را بر مقدار بیشینه مربوط به همان خروجی تقسیم و عملیات نرمالیزه کردن انجام می‌شود (جدول ۱۰).

با توجه به جدول (۹) مشاهده می‌شود که حالت بهینه وقتی رخ می‌دهد که از ترکیب ورودی‌ها به صورت $A_3B_1C_2D_3$ استفاده شود.

۲-۴- بهینه سازی فرآیند در حالت ماشین کاری به کمک پودر و دوران ابزار

همانند مرحله قبل در ابتدا مقادیر S/N با استفاده از معادلات (۳) و (۴) محاسبه گردید و سپس با توجه به اینکه زبری سطح و میزان

جدول (۱۰): تحلیل نسبت پارامترهای خروجی و نرمالیزه شده

شماره آزمایش	تحلیل نسبت S/N			خروجی‌های نرمالیزه		
	زبری سطح (mm μ)	نرخ براده برداری (mm 3 /min)	نرخ سایش ابزار (mm 3 /min)	زبری سطح (mm μ)	نرخ براده برداری (mm 3 /min)	نرخ سایش ابزار (mm 3 /min)
۱	۱۲/۵۱۶۵	۱۳/۲۳۶۳	۳۹/۰۱۵۶	۰/۷۰۱۶۹	۰/۵۱۱۰۳	۱/۰۰۰۰۰
۲	۱۴/۴۹۲۱	۱۷/۵۳۹۶	۳۲/۹۹۵۰	۰/۸۱۲۴۵	۰/۶۷۷۱۷	۰/۰۸۲۶۹
۳	۱۷/۸۳۷۴	۱۸/۲۳۸۰	۲۶/۹۵۵۱	۱/۰۰۰۰۰	۰/۷۰۴۱۴	۰/۶۹۰۸۸
۴	۱۱/۷۲۷۲	۹/۵۸۰۸	۲۹/۴۷۳۲	۰/۶۵۷۴۵	۰/۳۶۹۹۰	۰/۷۵۵۴۲
۵	۱۴/۵۳۶۲	۲۵/۹۰۱۰	۲۵/۰۲۰۷	۰/۸۱۴۹۲	۱/۰۰۰۰۰	۰/۶۴۱۲۹
۶	۱۶/۸۰۲۱	۱۹/۴۸۵۹	۳۲/۹۹۵۰	۰/۹۴۱۹۵	۰/۷۵۲۳۲	۰/۸۴۵۶۸
۷	۱۲/۹۷۶۸	۱۵/۲۴۰۵	۳۹/۰۱۵۶	۰/۷۲۸۰۶	۰/۵۸۸۴۱	۱/۰۰۰۰۰
۸	۱۱/۰۸۹۸	۷/۷۹۲۵	۳۹/۰۱۵۶	۰/۶۲۱۷۱	۰/۳۰۰۸۵	۱/۰۰۰۰۰
۹	۱۶/۶۵۶۶	۲۵/۳۹۲۸	۲۲/۰۹۱۵	۰/۹۳۳۸۰	۰/۹۸۰۳۷	۰/۵۶۶۲۲

نرمال شده پارامترها حساب می‌شود. به علت اهمیت بیشتر کیفیت سطح نسبت به نرخ براده برداری در این مقاله مقدار ضریب وزنی کیفیت سطح ۰/۵ و مقدار ضریب وزنی نرخ براده برداری ۰/۳ و مقدار ضریب وزنی نرخ سایش ابزار ۰/۲ در نظر گرفته شده است. مقادیر مربوط به پارامترهای نرمال شده و تحلیل نسبت همزمان در جدول (۱۱) نشان داده شده است.

۳-۴- محاسبه مقدار کل نرمال شده پارامترها (TNQL) و نسبت S/N همزمان خروجی‌ها (MSNR)

برای محاسبه مقدار کل نرمال شده پارامترها (TNQL) و نسبت S/N همزمان خروجی‌ها (MSNR)، مقدار نرمال شده پارامترها به صورت مجزا در قسمت قبل محاسبه شدند. در این مرحله با توجه به درجه اهمیت خروجی‌ها، به آن‌ها وزن داده می‌شود و در نهایت با استفاده از فرمول (۵)، مقدار مجموع

جدول (۱۱): نرمال سازی و تحلیل نسبت همزمان پارامترهای خروجی

شماره آزمایش	تحلیل همزمان پارامترهای خروجی	
	TNQL	MSNR (η_i)
۱	۰/۷۰۴۱۵۴	۱/۵۲۳۳۲
۲	۰/۶۲۵۹۱۴	۲/۰۳۴۸۵
۳	۰/۸۴۹۴۱۸	۰/۷۰۸۷۸
۴	۰/۵۹۰۷۷۹	۲/۲۸۵۷۴
۵	۰/۸۳۵۷۱۸	۰/۷۷۹۴۰
۶	۰/۸۶۵۴۵۷	۰/۶۲۷۵۴
۷	۰/۷۴۰۵۵۳	۱/۳۰۴۴۳
۸	۰/۶۰۱۱۱	۲/۲۱۰۴۶
۹	۰/۸۷۴۲۵۵	۰/۵۸۳۶۱
MSNR میانگین $m \eta = 1.33979$		

نسبت S/N برای هر مرحله و نسبت میانگین S/N برای تمامی مراحل می‌باشد. مقدار ماکزیمم به دست آمده برای هر پارامتر ورودی به عنوان مقدار بهینه در نظر گرفته میشود. با توجه به جدول (۱۲) مشاهده میشود که حالت بهینه وقتی رخ می‌دهد که از ترکیب ورودی‌ها به صورت $A_1B_1C_2D_3$ استفاده شود.

برای محاسبه مقدار میانگین (MSNR) برای هر پارامتر در سطوح مختلف با توجه به آرایه استاندارد تاگوچی و مقادیر MSNR محاسبه شده در طی ۹ مرحله در جدول (۱۱) مقدار میانگین MSNR برای هر پارامتر ورودی و در سطوح مختلف با توجه به فرمول (۶) محاسبه شد. در رابطه (۶) مقادیر η_i و η_m به ترتیب

جدول (۱۲): میانگین MSNR برای هر پارامتر ورودی و در سطوح مختلف

پارامترهای ورودی	MSNR میانگین η		
	سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱
A ولتاژ	۱/۴۱۸۹۲	۰/۱۰۱۳۱	۱/۵۸۱۳۷
B شدت جریان	-۰/۷۵۹۶۶	۲/۳۵۵۱۳	۲/۴۳۳۹۱
C زمان روشنی پالس	۰/۱۱۳۰۳	۲/۲۲۴۶۲	۱/۶۸۱۷۴
D زمان خاموشی پالس	۲/۵۲۵۴	۱/۲۸۷۲۴	۰/۲۰۶۷۵

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، بعد از آماده سازی نمونه های قطعه کار ماده مرکب آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با اکسید آلومینیوم و الکتروود ابزار مس و همچنین مخزن ماشین کاری و طراحی یک سیستم دوران ابزار، فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی در دو حالت ابزار ثابت و ابزار دوران با پودر اکسید آلومینیوم و بدون پودر انجام شد و تاثیر پارامترهای ورودی از قبیل شدت جریان، ولتاژ، زمان روشنی و زمان خاموشی پالس بر پارامترهای خروجی فرآیند مانند زبری سطح، نرخ سایش ابزار و نرخ براده برداری در دو حالت مورد بررسی قرار گرفت. برای طراحی و تحلیل آزمایش ها از تکنیک طراحی تاگوچی استفاده شد. دوران ابزار و نوع پودر ثابت و پارامترهای ورودی ماشین کاری قابل تغییر بودند. نتایج به دست آمده به صورت زیر است:

۱- با افزایش شدت جریان، مخصوصاً در فاصله ۱۰ تا ۲۰ آمپر، که باعث افزایش نرخ براده برداری در حالت با پودر می شود، زبری سطح در حالت با پودر نسبت به حالت بدون پودر بهتر می شود که این همان ماشین کاری سریع تر و دقیق تر است. در ماشین کاری با دی الکتریک خالص، شیار و خراش های نامنظم و عمیق تری روی سطح قطعه کار ایجاد می شود، که باعث زبری آن می شود. ولی با افزودن پودر به دی الکتریک، پودرها باعث توزیع انرژی تخلیه الکتریکی و اصابت به سطح کار و کم عمق شدن شیارها و منظم شدن حفره ها می شود و لذا صافی سطح بهبود می یابد.

۲- در حالت استفاده از پودر، به دلیل افزایش گپ، براده ها به راحتی خارج شده و در نتیجه این روش پایداری بیشتری نسبت به حالت معمولی و بدون پودر دارد که این موضوع نقش مؤثری در افزایش نرخ براده برداری دارد.

۳- پودر اکسید آلومینیوم، می تواند صافی سطح ماشین کاری شده ماده مرکب ۲۰۲۴ تقویت شده با اکسید آلومینیوم را نسبت به حالت بدون پودر، افزایش دهد.

۴- پودر اکسید آلومینیوم، می تواند نرخ سایش الکتروود مسی را نسبت به حالت ماشین کاری تخلیه الکتریکی بدون پودر، کاهش

دهد و به طور کلی افزودن پودر آلومینیوم به دی الکتریک

دستگاه EDM باعث بهبود پارامترهای ماشین کاری می شود.

۵- با دوران ابزار، پودر اکسید آلومینیوم، افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس، نرخ براده برداری افزایش می یابد. پودر اکسید آلومینیوم اندازه گپ را افزایش می دهد و دوران ابزار نیروی گریز از مرکز تولید می کند که این دو عامل به افزایش نرخ براده برداری کمک می کنند.

۶- اضافه نمودن پودر اکسید آلومینیوم باعث می شود جرقه ها ریزتر شده و عمق نفوذ آن ها کمتر و زبری سطح کمتر شود و دوران ابزار ذرات جدا شده را سریع دور می کند و باعث بهبود کیفیت سطح می شود.

۷- نتایج حاصله از بهینه سازی فرآیند در حالت بدون پودر و دوران ابزار نشان داد که برای دستیابی به زبری سطح پایین (با ضریب وزنی ۰/۵) و باربرداری بالا (با ضریب وزنی ۰/۳) و سایش ابزار پایین (با ضریب وزنی ۰/۲) می تواند از ترکیب پارامترها به صورت $A_3B_1C_2D_3$ استفاده گردید.

۸- نتایج حاصله از بهینه سازی فرآیند در حالت با پودر و دوران ابزار نشان داد که برای دستیابی به زبری سطح پایین (با ضریب وزنی ۰/۵) و باربرداری بالا (با ضریب وزنی ۰/۳) و سایش ابزار پایین (با ضریب وزنی ۰/۲) می توان از ترکیب پارامترها به صورت $A_1B_1C_2D_3$ استفاده نمود.

۹- با توجه به تحلیل واریانس انجام شده مشخص گردید که به طور کلی شدت جریان در ماشینکاری تخلیه الکتریکی بیشترین تأثیر را بر روی سه پارامتر خروجی می گذارد و بعد از آن، زمان روشنی پالس زمان خاموشی پالس و در نهایت تغییرات ولتاژ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر روی سه خروجی دارند. اما در شرایط مختلف و برای هر پارامتر خروجی به صورت مجزا، این ترتیب اثر کمی متفاوت است.

۶- مراجع

- [1] S. Kalpakjian, "Manufacturing engineering and technology", Addison-Wesley, 1995.

- matrix composites using rotary tube electrode”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153-154, pp. 978- 985, 2004.
- [12] K. M. Patel P. M. Pandey & P. V. Rao, “Understanding the role of weight percentage and size of silicon carbide particulate reinforcement on electro discharge machining of aluminum based composites”, *Journal of Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 23, No. 7, pp. 665-673, 2008.
- [13] V. Senthilkumar & B. U. Omprakash, “Effect of Titanium Carbide particle addition in the aluminium composite on EDM process parameters”, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 13, pp. 60-66, 2011.
- [14] F. E. Kennedy, A. C. Balbahadur & D. S. Lashmore, “The friction and wear of cu based silicon carbide particulate metal-matrix composites for brake applications”, *Wear*, Vol. 203-204, pp. 715-721, 1997.
- [۱۵] ح. زهره وند، "تأثیر عملیات حرارتی پیرسازی بر روی فوم‌های کامپوزیت‌های پایه آلومینیوم"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مواد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۱.
- [16] S. Daneshmand, B. Masoudi & V. Monfared, “Electrical discharge machining of al/7.5% Al₂O₃ mmcs using rotary tool and al₂o₃ powder”, *Surface Review And Letters*, Vol. 24, pp. 1-17, 2017.
- [17] G. Taguchi, *Taguchi quality engineering hand book*, New Jersey, 2005.
- [18] C. M. Douglas, “Design and analysis of experiments”, Wiley, 2012.
- [19] S. Daneshmand & B. Masoudi, “Investigation and optimization of the electro-discharge machining parameters of 2024 aluminum alloy and Al/7.5% Al₂O₃ particulate-reinforced metal matrix composite”, *Science and Engineering of Composite Materials*, pp. 1-14, 2016.
- [۲۰] م. قاسمی و م. فرمودی، "کاربرد روش تاگوچی برای بهینه سازی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت پلی وینیل کلراید مونت موریلونیت"، فصلنامه علمی پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد، سال نهم، شماره سوم، صفحه ۱۸۹-۱۹۰، پاییز ۱۳۹۴.
- [2] E. Uhlmann & D. C. Domingosb, “Development and optimization of the die-sinking EDM technology for machining the nickel-based alloy MAR-M247 for turbine components”, *Procedia CIRP*, Vol. 6, pp. 180-185, 2013.
- [3] Ayestaa & B. Izquierdob. “Influence of EDM parameters on slot machining in C1023 aeronautical alloy”, *Procedia CIRP*, Vol. 6, pp. 129-134, 2013.
- [4] A. Erden & S. Bilgin, “Role of impurities in electric discharge machining”, *Proceedings of the 21st Conference on Machine Tool Design and Research Macmillan London*, pp. 345-350, 1980.
- [5] K. Kung, J. Horng & K. Chiang, “Material removal rate and electrode wear ratio study on the powder mixed electrical discharge machining of cobalt-bonded tungsten carbide”, *Journal of Manufacturing Technology*, Vol. 40, pp. 95-104, 2009.
- [6] W. S. Zhao, Q. G. Meng & Z. L. Wang, “The application of research on powder mixed EDM in rough machining”, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 129, pp. 30–33, 2002.
- [7] B. Mohan, A. Rajadurai & K. G. Satyanarayana, “Electric discharge machining of al–sic metal matrix composites using rotary tube electrode”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153-154, pp. 978- 985, 2004.
- [8] C. C. Wang & B. H. Yan, “Blind hole drilling of Al₂o₃/6061al composite using rotary electro-discharge machining”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 102, pp. 90-102, 2000.
- [9] Y. H. Guu & H. Hocheng, “Effects of Workpiece Rotation on Machinability during Electrical Discharge Machining”, *Journal of Materials and Manufacturing Process*, Vol. 16, No. 1, pp. 91-101, 2001.
- [10] B. Mohan, A. Rajadurai & K. G. Satyanarayana, “Effect of sic and rotation of electrode on electric discharge machining of al-sic composites”, *Journal of Materials Manufacturing Process*, Vol. 124, pp. 297-304, 2002.
- [11] B. Mohan, A Rajadurai & K. G. Satyanarayana, “Electric discharge machining of Al–sic metal

[۲۱] ش. حسینی، م. باقر لیمویی و م. حسین زاده، "بهینه سازی عملیات حرارتی فولادهای منگنزی (هادفیلد) با استفاده از روش تاگوچی"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال نهم، شماره سوم، صفحه ۱۵۵-۱۶۰، پاییز ۱۳۹۴.

۷- پی نوشت

-
- [1] Electrical Discharge Machining (EDM)
 - [2] Design of Experiment (DOE)
 - [3] Analyse of Varoance (ANOVA)
 - [4] Tool Wear Rate (TWR)
 - [5] Tool Wear Rate (TWR)
 - [6] Rotary Electrical Discharge Machining (REDM)
 - [7] Laboratory Balance
 - [8] Roughness Tester
 - [9] Repetitive-Levels
 - [10] 95% Confidence Level
 - [11] P Value