



ماشین کاری تخلیه الکتریکی کامپوزیت زمینه فلزی آلیاژ AZ91 منیزیم و بررسی و بهینه‌سازی اثر پارامترهای ورودی در نرخ براده برداری و زبری سطح قطعات

امین صفرآبادی^۱، وحید طهماسبی^{۲*}، امین سوسن‌آبادی فراهانی^۲، مجتبی ذوالفقاری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۴- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران

* اراک، کد پستی ۳۸۱۸۱۴۱۱۶۷، arakut.ac.ir، Tahmasbi@arakut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۴ مرداد ۱۴۰۱

داوری اولیه: ۲۷ شهریور ۱۴۰۱

پذیرش: ۱۹ مهر ۱۴۰۱

کلیدواژگان:

ماشین کاری تخلیه الکتریکی

کامپوزیت زمینه منیزیمی

نرخ براده برداری

زبری سطح

کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMC) دارای مدول الاستیک، چقرمگی و شکل‌پذیری بالاتری نسبت به فلز پایه هستند و کاربرد فراوانی در بسیاری از صنایع مختلف دارند. این مواد دارای ویژگی‌های عالی مانند وزن سبک، نسبت مقاومت به وزن زیاد، سختی خاص بالا، هدایت حرارتی بالا و مقاومت در برابر سایش خوب هستند. به دلیل سختی بالا، ماشین کاری این مواد توسط فرآیندهای معمول ماشین کاری بسیار دشوار است. ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM) یکی از فرآیندهای ماشین کاری پیشرفته است که می‌توان از آن برای ماشین کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی استفاده کرد. آزمایش‌های مربوط به تحقیق حاضر با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها (DOE) و روش سطح پاسخ (RSM) مدل‌سازی گردیده و اثر پارامترهای شدت جریان تخلیه، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس در فرآیند براده برداری ماشین کاری تخلیه الکتریکی ماتریس زمینه فلزی آلیاژ AZ91 منیزیم تقویت شده با ۵ درصد ذرات کاربرد سیلیسیوم پودری، بر روی نرخ براده برداری و صافی سطح قطعه کار، مورد مطالعه قرار گرفته و بهینه‌سازی شده است. جریان پیک تخلیه، تنها فاکتور مؤثر بر روی نرخ براده برداری است و بیشترین نرخ براده برداری در زمان روشنی پالس ۳۰۰ میکرو ثانیه، جریان ۱۷/۵ آمپر و زمان خاموشی پالس ۴۰ میکرو ثانیه به اندازه ۵۴۲ میلی‌گرم بر دقیقه، قابل دستیابی است. پارامترهای زمان روشنی پالس، جریان تخلیه و اثر متقابل زمان روشنی پالس و جریان پیک تخلیه از فاکتورهای مؤثر بر زبری سطح قطعه کار هستند. کمترین میزان زبری سطح قطعه کار، در زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکرو ثانیه و جریان پیک تخلیه ۵ آمپر به اندازه ۹/۵۵ میکرون متر است.

Electrical discharge machining of metal matrix composite AZ91 magnesium alloy and investigation and optimization of the effect of input parameters on material removal rate and workpiece surface roughness

Amin Safarabadi¹, Vahid Tahmasbi^{1*}, Amin Sousanabadi Farahani², Mojtaba Zolfaghari²

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran

* P.O.B. 3818141167 arak, Iran, Tahmasbi@arakut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 26 July 2022

First Decision: 18 September 2022

Accepted: 11 October 2022

Keywords:

Electrical discharge machining

Metal matrix composites magnesium

Material removal rate

Surface roughness

Abstract

Metal matrix composites (MMCs) have higher modulus of elasticity, toughness and ductility than base metal and are widely used in many different industries. These materials have excellent properties such as light weight, high resistance to weight ratio, high specific hardness, high thermal conductivity and good abrasion resistance. Due to the high hardness, machining of these materials by conventional machining processes is very difficult. Electrical discharge machining (EDM) is an advanced machining process can be used to machining metal matrix composite. Experiments related to the present study were modeled using Design Of Experiments (DOE) and Response Surface Methodology (RSM) and the effect of parameters of discharge current intensity, pulse on time and pulse off time in the machining process of electric discharge machining of AZ91 alloy metal matrix composite Magnesium reinforced with 5% silicon carbide powdered particles has been studied and optimized on the material removal rate and surface roughness of the workpiece. The discharge peak current is the only factor affecting the material removal rate and the highest material removal rate can be achieved at pulse on time 300 μ s, discharge peak current 17.5 A and pulse off time 40 μ s as much as 542 mg/min. the parameters of pulse on time, discharge peak current and Interaction effect of pulse on time and discharge peak current are the factors affecting the surface roughness of the workpiece. The minimum surface roughness of the work piece is 9.55 μ m in the pulse on time 100 μ s and discharge peak current 5 A.

Please cite this article using:

A. Safarabadi, V. Tahmasbi, A. Sousanabadi Farahani, M. Zolfaghari, Electrical discharge machining of metal matrix composite AZ91 magnesium alloy and investigation and optimization of the effect of input parameters on material removal rate and workpiece surface roughness, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 6, pp. 59- 69, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.160942>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

تحقیقات گسترده در زمینه علم مواد به سمت معرفی و توسعه مواد مهندسی سبک در حال پیشرفت است که این مواد دارای استحکام بالا، سختی قابل قبول در دماهای بالا، خزش مناسب و مقاومت سایشی و خستگی مطلوب می‌باشند. فن‌آوری‌های پیشرفته‌ی خودروسازی و هوافضا به چنین خصوصیات برای مواد نیاز دارند تا کارایی تولیدات را افزایش دهند. این ویژگی‌ها با آلیاژهای تیتانیوم، آلومینیوم و منیزیم قابل دستیابی نیست. در نتیجه طراحان گونه‌های جدیدی از کامپوزیت‌ها نظیر پلاستیک‌های تقویت شده با فیبر^۱، کامپوزیت‌ها با زمینه فلزی^۲ و کامپوزیت‌ها با زمینه سرامیک^۳ را معرفی کرده‌اند. کامپوزیت‌های MMC به خاطر دارا بودن نسبت استحکام و سختی به وزن بالایی که دارند، قابل استفاده در دماها و نیروهای نسبتاً بالا می‌باشند. چگالی اغلب MMCها تقریباً یک سوم چگالی فولاد بوده که منجر به نسبت استحکام به وزن ویژه بالا و سختی قابل قبول برای این مواد شده است. کامپوزیت‌های MMC کاربردهای متنوعی در صنعت دارند از جمله کاربرد در صنایع هوافضا (برای دماغه مدارگرد شاتل فضایی و مقطع عمودی در دم‌جنگنده‌های پیشرفته)، بخش‌های مختلف صنعت خودروسازی (پیستون، بوش‌های سیلندر و لنت‌های ترمز)، تجهیزات ورزشی و دریایی. آلیاژهای آلومینیوم تقویت شده با کاربید سیلیکون نسبتاً جدید بوده و موادی با قابلیت ساختاری مفید همراه با استحکام ویژه بالا و مقادیر استاندارد قابل قبول هستند [۱]. در میان فرآیندهای ماشین کاری پیشرفته، EDM و WEDM مناسب ترین تکنیک برای ماشین کاری MMCها نشان داده شده اند [۲، ۳]. ماشین کاری تخلیه الکتریکی فرایندی است که برای براده برداری از فلزات هادی با سختی بالا استفاده می‌شود. در این فرآیند مواد به وسیله جرقه ای که بین ابزار و قطعه کار ایجاد می‌شود، برداشته خواهد شد. ابزار و قطعه کار در یک ماده دی الکتریک قرار دارند که در این فرآیند توسط یک ولتاژ بالا یونیزه می‌شود. با تکرار جرقه‌ها بین ابزار و قطعه کار، شکل پروفیل ابزار بر روی قطعه ایجاد می‌گردد [۴]. مطالعات انجام شده در ماشین کاری تخلیه الکتریکی عمدتاً بر روی کنترل تنظیمات بهینه‌سازی پارامترهای ماشین کاری با توجه به جنس قطعه کار متمرکز بوده است. پژوهش عمده محققان نیز بر روی استفاده از روش‌های آماری و به‌ویژه مبحث

طراحی آزمایش‌ها^۴ متمرکز شده است. استفاده از تکنیک طراحی آزمایش‌ها به منظور بهینه‌سازی پارامترهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ MAR-M247 موضوع پژوهش اولمن و همکاران بوده است [۵].

در این تحقیق نشان داده شده است که جریان و زمان روشنی پالس، تأثیرگذارترین پارامترها هستند. همچنین افزایش ولتاژ باعث افزایش دهانه گپ و شستشوی بهتر و در نتیجه براده برداری بیشتر می‌شود. کالایارسان و همکاران [۶] فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی را بر روی ماده مرکب نیتريد سیلیکون و نیتريد تیتانیوم سرامیکی بررسی کردند. در این تحقیق پارامترهای ورودی شامل زمان روشنی پارس زمان خاموشی پالس فشار پاشش دی الکتریک و شدت جریان را بر روی پاسخ‌های زبری سقف نرخ براده برداری نرخ سایش ابزار مورد مطالعه قرار دادند. آنها برای بهینه‌سازی پاسخ‌های فرایند از تحلیل وابستگی گری استفاده کردند و نتایج آن‌ها توسط تجزیه و تحلیل آماری و نرم افزاری به گونه‌ای مدل‌سازی گردید تا بیشترین نرخ براده برداری به ازای کمترین زبری سطح حاصل شود.

قریشی و همکاران [۷] با در نظر گرفتن ولتاژ دهانه ماشین کاری، جریان، زمان روشنی و خاموشی پالس، فشار گاز دی الکتریک و سرعت دوران الکترود به‌عنوان متغیرهای ورودی مؤثر در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک دریافتند که هرچه ولتاژ دهانه ماشین کاری، جریان، نسبت زمان روشنی پالس به خاموشی پالس، فشار گاز ورودی و سرعت دوران الکترود بیشتر باشند نرخ باربرداری بیشتر خواهد بود و برای زمان روشنی پالس یک مقدار بهینه وجود دارد که بسته به شرایط آزمایش تعیین می‌شود. سریواستاوا و همکاران [۸] فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر روی کامپوزیت ماتریسی فلز آلومینیوم Al 6061 که با ۸٪ ذرات کاربید سیلیسیوم (SiC) تقویت شده است و در کارگاه خانگی و با فرایند ریخته‌گری ساخته شده است، مورد بررسی قرار داده‌اند. کامپوزیت ماتریسی فلز ساخته شده، توسط ماشین تخلیه الکتریکی ZNC براده برداری می‌شود. در این آزمایش از روش سطح پاسخ (RSM) برای مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی پارامترهای فرایند مانند جریان، زمان روشنی پالس و دیوتی سایکل (duty cycle) استفاده شده است. از روش باکس بنکهن (BBD) برای ایجاد طرح آزمایش استفاده شده و مدل ریاضی بین پارامترهای ورودی انتخاب شده و پاسخ‌های نرخ براده برداری (MRR)، نرخ سایش الکترود (EWR) و زبری سطح قطعه ساخته شده (SR)

¹ FRP² MMC³ CMC⁴ Design Of Experiments

آزمایش‌ها از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ (RSM) استفاده شده است و معادلات رگرسیون خطی مرتبه دوم به‌منظور پیش‌بینی رفتار پارامترها ارائه شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

کامپوزیت زمینه منیزیومی حاضر، با روش ریخته‌گری به هم زدنی تولید می‌شود. ذرات کاربید سیلیسیوم پودری که برای ساخت کامپوزیت استفاده می‌شوند به دلیل رطوبت هوا به هم چسبیده و توده‌های بزرگی را تشکیل می‌دهند. برای جدا کردن پودرها، از دستگاه اولتراسونیک استفاده می‌شود. قطعات آلیاژ AZ91 زمینه را به اندازه‌های مناسب برش زده و درون آن سوراخ‌هایی ایجاد گردید تا ذرات کاربید سیلیسیوم را درون آن‌ها ریخته شود. این عمل را به این منظور انجام داده شد تا ذرات کاربید سیلیسیوم بعد از ذوب، اختلاط مناسبی را با فلز زمینه ایجاد کرده و به‌خوبی داخل آن پراکنده شوند. شکل ۱ نمونه آماده شده به‌منظور ساخت کامپوزیت زمینه فلزی که داخل کوره ذوب قرار می‌گیرد را نشان می‌دهد.



Fig. 1 The sample of the primary work piece that is placed in the melting furnace

شکل ۱ نمونه قطعه‌کار اولیه که درون کوره ذوب قرار داده می‌شود

۲-۱- ریخته‌گری با روش هم زنی

یکی از مناسب‌ترین و پرکاربردترین روش‌های تولید برای کامپوزیت‌های زمینه فلزی، روش ریخته‌گری هم زنی است. از مزایای این روش نسبت به روش متالورژی پودر می‌توان به امکان تولید کامپوزیت‌ها در ابعاد مختلف و مقادیر زیاد، همچنین کمتر بودن تخلخل، شکل‌پذیری بیشتر و از نظر اقتصادی، مقرون‌به‌صرفه بودن آن اشاره کرد. برای ساخت نمونه آزمایش،

مورد بررسی قرار می‌گیرد. تجزیه و تحلیل واریانس^۱ برای یافتن اهمیت پارامترهای مؤثر در فرآیند به کار گرفته شده است. آن‌ها دریافتند که نرخ براده برداری با توجه به جریان پیک افزایش می‌یابد. چگالی انرژی عمدتاً به پیک جریان بستگی دارد، بنابراین با افزایش پیک جریان، انرژی تخلیه هر پالس افزایش یافته و حجم براده برداشته شده در هر پالس افزایش یافته و نرخ براده برداری نیز افزایش می‌یابد. امین مصطفی‌پور و همکاران [۹] اثرات سه پارامتر ورودی فرآیند وایرکات (WEDM)، از جمله زمان روشنی پالس، جریان پالس و نرخ تغذیه سروو را بر روی پاسخ‌های خروجی نرخ براده برداری، پهنای برش و زبری سطح در حین ماشین‌کاری آلیاژ AZ91 منیزیم مورد مطالعه قرار داده‌اند. آزمایش‌های مربوط به این فرایند با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) مدل‌سازی شده و درصد سهم هر متغیر بر روی پارامترهای ورودی بدست آمده است. نتایج تجربی نشان داد که سرعت حذف مواد و پهنای برش به طور قابل توجهی بیشتر از مواد سخت است و می‌توان به حدود ۱۸۰ میلی‌متر مکعب بر دقیقه رسید. در حالی که پهنای برش و زبری سطح به ترتیب حدود ۰/۴۵ و ۴/۶۸۳ میکرومتر است. شان‌دیلیا و همکاران [۱۰] تحقیق تجربی برای بهینه‌سازی پارامترهای ولتاژ اسمی سروو، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و سرعت تغذیه سیم در فرآیند وایرکات بر روی پاسخ عرض برش کامپوزیت زمینه فلزی Al6061/SiC_p انجام دادند. آن‌ها از روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی پارامترهای پاسخ استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که میزان تغذیه سیم و ولتاژ از پارامترهای مهم فرآیند برای برش هستند. بررسی مقالات نشان می‌دهد در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی مواد خاص و به‌طور ویژه مواد کامپوزیتی ماتریس فلزی (MMC) تحقیقات اندکی صورت گرفته است. از آنجاکه تأثیر پارامترهای تنظیمی و تعیین سطوح بهینه آن‌ها، وابسته به جنس قطعه‌کار و شرایط ماشین‌کاری است، برای هر آلیاژ و ماده خاص می‌بایست آزمایش‌های عملی صورت بگیرد.

در این تحقیق برای نخستین بار یک مطالعه تجربی دقیق و روشمند به‌منظور بررسی اثر پارامترهای جریان پیک تخلیه، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس در فرآیند براده برداری ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی ماتریس زمینه فلزی آلیاژ AZ91 منیزیم تقویت‌شده با ۵ درصد ذرات کاربید سیلیسیوم پودری، بر روی پاسخ‌های نرخ براده برداری و زبری سطح قطعه‌کار مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌منظور مدل‌سازی

^۱ ANOVA

پاسخ^۶ اشاره نمود. بسته به نوع فرآیند، تعداد سطوح و نوع پارامترهای متغیر ورودی، طرح مناسب جهت انجام آزمایش در تحقیقات، طراحی و مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به این که از روش سطح پاسخ در این تحقیق استفاده شده است در ادامه به شرح این روش پرداخته می‌شود [۱۱].

۲-۲-۱- روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ، مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آمار است که برای مدل‌بندی و تحلیل مسائلی که پاسخ موردنظر تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد، مفید است و هدف آن بهینه‌سازی این پاسخ است [۱۲]. در اکثر مسائل مربوط به روش سطح پاسخ، ارتباط بین پاسخ و متغیرهای مستقل نامعلوم است. پس اولین قدم در سطح پاسخ، یافتن تقریبی مناسب برای ارتباط واقعی موجود بین پاسخ و مجموعه متغیرهای مستقل است [۱۳]. معمولاً از چندجمله‌ای‌های مرتبه پایین در ناحیه‌ای از مقادیر متغیرهای مستقل استفاده می‌شود. اگر پاسخ به‌خوبی توسط یک تابع خطی از متغیرهای مستقل مدل‌بندی شده باشد، آنگاه تابع تقریب‌کننده برای مدل مرتبه اول به‌صورت رابطه (۱) است.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

اگر در سیستم، خمیدگی وجود داشته باشد، آنگاه باید از چندجمله‌ای‌های مرتبه بالاتر، مانند مدل مرتبه دوم استفاده کرد (رابطه ۲).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

تقریباً در تمام مسائل سطح پاسخ از یک یا هر دو این چندجمله‌ای‌های تقریب‌کننده استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر از روش سطح پاسخ با طرح مرکب مرکزی، با توجه به استفاده متداول‌تر و صحیح‌تر از این روش نسبت به دیگر روش‌ها و همچنین امکان بهره‌گیری از این روش با توجه به امکانات و تجهیزات آزمایش، بهره‌گرفته شده است. سطوح پارامترهای ورودی شامل شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به پیشنهاد نرم‌افزار و شرایط آزمایش و امکانات موجود مقدار $\alpha=1$ در نظر گرفته شده است. با توجه به مقدار α ، ۳ سطح برای هر یک از پارامترهای ورودی در نظر گرفته می‌شود.

مخلوط آلیاژ زمینه با ذرات تقویت‌کننده در کوره مقاومتی ذوب گردیده و سپس مذاب به‌دست‌آمده توسط میدان‌های مغناطیسی که به‌وسیله سیم‌پیچ‌های الکتریکی ایجاد گردیده است، هم‌زده می‌شود. گاهی هم به‌منظور توزیع مناسب ذرات، از هم‌زن مکانیکی در داخل فلز پایه استفاده شده است. همچنین به دلیل میل ترکیبی بالای فلز منیزیم با اکسیژن، ریخته‌گری این ماده می‌بایست در شرایط خلأ و یا در حضور گاز آرگون انجام پذیرد. (شکل ۲).

۲-۲- طراحی آزمایش‌ها

در انجام آزمایش‌ها، بررسی اثر تغییر در پارامترهای ورودی در پارامترهای خروجی آزمایش مدنظر است. در طراحی آزمایش‌ها (DOE)، یک یا چند پارامتر را چند بار تغییر می‌دهند تا نتایج این تغییرات بر روی پارامترهای خروجی بررسی کرده و نتیجه مطلوب جهت تعیین پارامترهای مؤثر به دست آید. یک فرایند را می‌توان به یک جعبه سیاه تشبیه کرد که از اتفاقات آن اطلاعاتی در دسترس نیست و معمولاً پژوهشگر در آن با چند پارامتر قابل کنترل به‌عنوان متغیرهای ورودی فرآیند و یک یا چند پاسخ خروجی مواجه است.

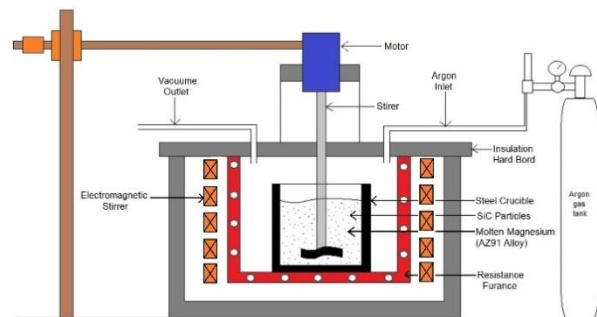


Fig. 2 The schematic furnace used

شکل ۲ تصویر شماتیک کوره مورد استفاده

هدف این است که با فرض مستقل بودن پارامترهای قابل کنترل و پاسخ‌های خروجی، ارتباطی بین خروجی‌ها با ورودی‌های فرآیند با حداقل خطا، در قالب یک مدل ریاضی به دست آید. روش‌های متفاوتی برای طراحی آزمایش‌ها وجود دارد، به‌عنوان نمونه می‌توان به روش‌های طراحی پلاکت-بورمن^۱، طراحی آزمایش با سطوح متفاوت پارامترها^۲، طراحی آزمایش عاملی^۳، روش تاگوچی^۴، روش ترکیبی^۵ و روش سطح

¹ Plackett-Burman

² Design With Mixed Levels

³ Factorial Design of Experimental

⁴ Taguchi Method

⁵ Mixture Design

⁶ Response Surface Methodology

۳-۲- ماشین کاری تخلیه الکتریکی

در تمام آزمایش‌ها به جز پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده سایر بخش‌های قابل تنظیم دستگاه مانند میزان برگشت ابزار برای شستشوی دهانه ماشین کاری، دقت تنظیم گپ ماشین کاری، مدت زمان شستشوی دهانه ماشین کاری و غیره در مقادیر ثابتی تنظیم شدند. زمان انجام ماشین کاری برای هر یک از آزمایش‌ها ۱۲ دقیقه در نظر گرفته شد.

۴-۲- مواد به کاررفته در آزمایش

۲-۴-۱- مشخصات قطعه کار

همان‌طور که گفته شد، در تحقیق حاضر از کامپوزیت زمینه فلزی با فلز زمینه از جنس آلیاژ AZ91 منیزیم به همراه ۵ درصد حجمی از ذرات سیلیکون کارباید پودری که با روش ریخته‌گری به هم زدنی تولید شده، استفاده شده است. قطعه کار بافرم استوانه، به قطر ۳۵ میلی‌متر و ارتفاع ۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. به منظور تثبیت موقعیت قطعه کار بر روی میز دستگاه از یک چهار نظام نامنظم که بر روی میز دستگاه ثابت شده بود استفاده گردید. شکل ۴ نمایی از قطعه کار مورد استفاده و نحوه بستن آن را نمایش می‌دهد.

۲-۴-۲- مشخصات الکتروود ابزار

الکتروود ابزار مورد استفاده در تحقیق حاضر از جنس مس با خلوص ۹۹/۹ درصد و به شکل استوانه‌ای با قطر ۴۵ میلی‌متر انتخاب شد تا سطح قطعه کار را به طور کامل پوشش دهد. بعد از انجام هر تست به منظور تمیز کردن و جلوگیری از تأثیر زبری سطح ابزار بر روی نتایج زبری سطح قطعه کار، سطح ابزار مجدداً پرداخت کاری گردید. در شکل ۵ نمایی از الکتروود ابزار آورده شده است.



Fig. 4 The workpiece used and how to fix it

شکل ۴ قطعه کار مورد استفاده و نحوه بستن آن

ماشین کاری تخلیه الکتریکی یکی از مهم‌ترین و قدیمی‌ترین فرآیندهای ماشین کاری مدرن است. اولین دفعات استفاده از این فرآیند به روزهای جنگ جهانی اول بازمی‌گردد. از جمله مهم‌ترین مزیت‌های ماشین کاری تخلیه الکتریکی، مستقل بودن سرعت ماشین کاری از سختی قطعه کار است. در این روش حرفه‌ها با جداره‌های نازک و اشکال خیلی دقیق قابل ساخت هستند. همچنین هیچ‌گونه تنش مکانیکی به ابزار و قطعه کار وارد نمی‌شود که باعث می‌شود امکان تولید قطعه کارهای ترد و نازک وجود داشته باشد. اگرچه براده برداری در این روش در اثر ذوب، تبخیر و حرارت بسیار بالای ایجاد شده در اثر تخلیه الکتریکی هست، اما با این حال هیچ‌گونه آسیب حرارتی به کل قطعه کار وارد نمی‌شود. امروزه این فرآیند عموماً به شکل خودکار انجام می‌شود و نیاز چندانی به حضور اپراتور در حین انجام کار را ندارد، اما الزام قطعه کار و ابزار به رسانای الکتریکی بودن، سایش ابزار در حین عملیات ماشین کاری و در نتیجه کاهش دقت ابعادی و نهایتاً طولانی بودن زمان ماشین کاری از جمله معایب ماشین کاری تخلیه الکتریکی می‌باشند [۱۴].

دستگاهی که برای انجام آزمایش‌ها در تحقیق حاضر استفاده گردید، دستگاه آذرخش ساخت شرکت تهران اکرام، مدل TA-E.D.M.204H با حداکثر جریان خروجی ۵۰ آمپر است که نمای کلی آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱ پارامترهای ورودی و مقادیر آن‌ها

Table 1 Input parameters and their values

Factor	Name	Low	Center	High
A	pulse on time (micro s)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰
B	peak current (A)	۵	۱۰	۱۵
C	Pulse off time (micro s)	۲۰	۳۰	۴۰



Fig. 3 Azarakhsh machine manufactured by Tehran Akram company, model TA-E.D.M.204H

شکل ۳ دستگاه آذرخش ساخت شرکت تهران اکرام، مدل TA-E.D.M.204H

۵-۲- روند انجام آزمایشها

قبل از انجام آزمایشها الکترود ابزار و قطعه کار توسط ترازوی دیجیتال مدل AND Gf-600 با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن کشی شده و وزن آنها ثبت گردید. بعد از انجام هر تست الکترود ابزار و قطعه کار دوده زدایی شده و پس از خشک کردن به وسیله پارچه نظیف و فشار باد، مجدداً وزن کشی شده و وزن آنها ثبت گردید.



Fig. 5 Used electrode as a tool

شکل ۵ الکترود ابزار مورد استفاده

۳- تحلیل داده‌ها، بحث و نتیجه گیری

۳-۱- مقدمه

در این بخش ابتدا پس از وارد کردن داده‌ها در نرم افزار، به بررسی و مدل سازی آماری داده‌ها پرداخته می‌شود و مدل ریاضی حاکم بر نتایج خروجی پارامترهای اندازه گیری شده به دست می‌آید. سپس به تحلیل آنها پرداخته و آنها را بهینه سازی می‌کنیم. به منظور بهینه سازی فرایند، به حذف پارامترهای غیر مؤثر در نتایج هر یک از پارامترهای خروجی خواهیم پرداخت و معادله رگرسیونی عوامل مؤثر حاکم بر فرآیند، جهت پیش بینی نتایج هرگونه تغییرات در پارامترهای ورودی ارائه خواهیم شد.

جدول ۲ جدول آزمایشها (مقادیر فاکتورهای ورودی و نتایج خروجی)

Table 2 Design of Experiment table (input factors values and output results)

Std Order	Run Order	I (A)	Ton (μs)	Toff (μs)	Ra (μm)	MRR (mg/min)	EWR (mg/min)
۶	۱	۱۵	۱۰۰	۴۰	۱۴/۱۳۳۳۳	۴/۳۷۹	۰/۱۵۸
۷	۲	۵	۳۰۰	۴۰	۱۰/۴۶۶۶۷	۰/۹۴۴	.
۲	۳	۱۵	۱۰۰	۲۰	۱۱/۹۳۳۳۳	۴/۶۸۲	۰/۰۶۷
۴	۴	۱۷/۵	۳۰۰	۲۰	۱۹/۲۶۶۶۷	۵/۸۸۹	۰/۰۱۹
۹	۵	۵	۲۰۰	۳۰	۱۱/۸۳۵	۱/۰۳۵	۰/۰۰۴
۵	۶	۵	۱۰۰	۴۰	۱۰	۰/۶۲۱	۰/۰۰۱
۱۶	۷	۷/۵	۲۰۰	۳۰	۱۲/۶۶۶۶۷	۲/۱۷۹	۰/۰۰۴
۱۵	۸	۷/۵	۲۰۰	۳۰	۱۳/۵۳۳۳۳	۲/۰۹۷	۰/۰۱۴
۳	۹	۶/۲۵	۳۰۰	۲۰	۱۱/۴	۱/۲۴۲	۰/۰۰۲
۱۷	۱۰	۷/۵	۲۰۰	۳۰	۱۲/۷۳۳۳۳	۲/۰۶۹	۰/۰۰۴
۱۱	۱۱	۱۰	۱۰۰	۳۰	۱۲/۳۳۳۳۳	۳/۲۸۵	۰/۰۵۸
۱۲	۱۲	۸/۲۵	۳۰۰	۳۰	۱۳/۴	۲/۴۱۱	۰/۰۰۲
۱۴	۱۳	۱۰/۷۵	۲۰۰	۴۰	۱۳/۹۳۳۳۳	۳/۷۰۱	۰/۰۱۹
۱	۱۴	۱۰/۷۵	۱۰۰	۲۰	۹/۹۳۳۳۳۳	۲/۳۶۵	۰/۰۰۱
۱۳	۱۵	۵/۵	۲۰۰	۲۰	۱۲/۲۶۹	۱/۹	۰/۰۰۵
۸	۱۶	۱۴/۲۵	۳۰۰	۴۰	۱۵/۸۶۶۶۷	۴/۲۵	۰/۰۱۴
۱۰	۱۷	۱۴	۲۰۰	۳۰	۱۶/۰۶۶۶۷	۴/۰۸۴	۰/۰۲۹

۳-۲- نرخ براده برداری

جدول ۳ آنالیز واریانس به دست آمده برای نرخ براده برداری را نشان می‌دهد. با استفاده از شاخص پی-مقدار^۱ که بر اساس آمار تعیین می‌شود، نتیجه گیری آزمون بسیار ساده می‌گردد. فاکتورهایی که میزان پی-مقدار به دست آمده برای آنها کمتر از $\alpha=0.05$ باشد در فرایند مؤثر هستند. اگر میزان پی-مقدار در یک آزمون فرض کمتر از سطح معناداری تعیین شده آن آزمون باشد،

^۱ P-Value

پارامترهای خروجی نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار با استفاده از رابطه (۳) و در جدول طراحی آزمایشها ثبت گردید.

$$MRR = \frac{W_b - W_a}{T_m} (\text{mgr/min}) \quad (3)$$

که در آن: W_b وزن قطعه کار قبل از ماشین کاری (میلی گرم)، W_a وزن قطعه کار بعد از ماشین کاری (میلی گرم) و T_m زمان ماشین کاری (دقیقه) است.

زبری سطح قطعه کار بعد از ماشین کاری، با دستگاه زبری سنج مدل SURFSCAN200 در سه نقطه متفاوت، با روش میانگین ارتفاعات زبری (Ra) اندازه گیری و میانگین آن به عنوان پارامتر خروجی زبری سطح برحسب میکرومتر، در نظر گرفته شد. در جدول ۲ طراحی آزمایشها، فاکتورهای ورودی و نتایج خروجیها آورده شده است. برای افزایش دقت، آزمایشها به صورت اتفاقی انجام پذیرفت.

با توجه به اینکه تنظیم جریان در دستگاه تخلیه الکتریکی آذرخش استفاده شده در این آزمایش، به صورت پله ای صورت می‌گیرد، تنظیم مقدار جریان در برخی از آزمایشها به صورت دقیق امکان پذیر نبوده و برای جلوگیری از بروز خطا در نتایج خروجی، مقدار واقعی جریان در جدول طراحی آزمایشها ثبت گردیده و تحلیل داده‌ها با مقادیر واقعی جریان تخلیه انجام شده است.

با توجه به جدول آنالیز واریانس داده‌ها، تنها پارامتر مؤثر در نرخ براده برداری، شدت جریان است. بنابراین معادله رگرسیون (۴) مدل اصلاح شده برای متغیرهای مؤثر در نرخ براده برداری در فرآیند، به صورت ذیل به دست می‌آید:

Regression Equation in Uncoded Units

$$\text{MRR (mg/min)} = -0.686 + 0.3569 I \text{ (A)} \quad (۴)$$

۳-۳- پارامترهای مؤثر بر نرخ براده برداری

برای تحلیل دقیق اثر پارامترهای مؤثر در فرآیند انجام شده می‌بایست به دقت اثر فاکتور اصلی و برهم کنش‌های مؤثر فاکتورها را مورد تحلیل قرار داد. در این بخش تنها یکی از فاکتورهای فرایند بر روی نرخ براده برداری مؤثر بوده و به بررسی آن پرداخته خواهد شد.

۳-۳-۱- اثر جریان تخلیه بر نرخ براده برداری

تنها پارامتر موجود در معادله رگرسیون برای نرخ براده برداری جریان تخلیه الکتریکی می‌باشد که معمولاً در اکثر آزمایش‌ها تخلیه الکتریکی نیز به همین صورت است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اثر این فاکتور در نرخ براده برداری نسبت به سایر فاکتورها بالاتر است. با توجه به این موضوع مشاهده می‌شود که رابطه بین جریان تخلیه و نرخ براده برداری به صورت خطی است، یعنی هر چه شدت جریان تخلیه بیشتر باشد، نرخ براده برداری نیز بیشتر خواهد بود. علت این موضوع این است که با افزایش جریان تخلیه، انرژی تخلیه نیز بیشتر شده و در دهانه ماشین کاری چاله‌های مذاب عمیق‌تر و بزرگتری ایجاد می‌شود که منجر به افزایش نرخ براده برداری می‌گردد. این افزایش جریان منجر به پدید آمدن ذرات براده‌های بزرگتری خواهد شد که در جریان‌های بالا منجر به بروز اتصال کوتاه در دهانه ماشین کاری شده و زبری سطح قطعه کار را به شدت افزایش می‌دهد. این اثر در تست‌های با جریان بالاتر مشاهده گردید. برای افزایش جریان در مقادیر بالاتر از تست‌های انجام شده در تحقیق حاضر می‌توان از ولتاژهای بالاتری در دهانه ماشین کاری استفاده نمود. در این صورت گپ ماشین کاری نیز بیشتر شده و امکان خروج براده‌ها با اندازه‌های بزرگتر فراهم می‌آید. شکل ۷ اثر پارامتر جریان تخلیه بر روی نرخ براده برداری را نشان می‌دهد.

۳-۳-۲- بهینه سازی فرآیند از نظر نرخ براده برداری

هدف از تحقیق حاضر، به حداکثر رساندن نرخ براده برداری است. نرم افزار مینی تب علاوه بر نتایج آورده شده از تحلیل

فرض صفر (عدم تأثیر پارامتر در نظر گرفته شده) به نفع فرض ۱ (تأثیرگذاری آن پارامتر در فرایند) رد می‌شود و بر اساس آن نتیجه می‌شود که آزمون انجام گرفته، پذیرفته و یا رد می‌گردد.

جدول ۳ آنالیز واریانس عوامل مؤثر در نرخ براده برداری

Table 3 Analysis of Variance of effective factors in material removal rate

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۹	۳۵/۰۸۴۶	۳/۸۹۸۳	۱۷/۲۹	۰/۰۰۱
Linear	۳	۲۳/۲۱۸۱	۷/۷۳۹۴	۳۴/۳۳	۰/۰۰۰
I (A)	۱	۲۰/۶۰۱۰	۲۰/۶۰۱۰	۹۱/۳۹	۰/۰۰۰
Ton (μs)	۱	۰/۱۲۶۲	۰/۱۲۶۲	۰/۵۶	۰/۴۷۹
Toff (μs)	۱	۰/۰۱۹۰	۰/۰۱۹۰	۰/۰۸	۰/۷۸۰
Square	۳	۰/۴۰۹۰	۰/۱۳۶۳	۰/۶۰	۰/۶۳۲
I (A)*I (A)	۱	۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۱۱	۰/۰۵	۰/۸۳۱
Ton (μs)*Ton (μs)	۱	۰/۳۱۰۸	۰/۳۱۰۸	۱/۳۸	۰/۲۷۹
Toff (μs)*Toff (μs)	۱	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۴	۰/۰۱	۰/۹۴۰
2-Way Interaction	۳	۰/۰۳۲۹	۰/۰۱۱۰	۰/۰۵	۰/۹۸۵
I (A)*Ton (μs)	۱	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۳	۰/۰۱	۰/۹۴۱
I (A)*Toff (μs)	۱	۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۱۱	۰/۰۵	۰/۸۳۱
Ton (μs)*Toff (μs)	۱	۰/۰۲۲۲	۰/۰۲۲۲	۰/۱۰	۰/۷۶۳
Error	۷	۱/۵۷۸۰	۰/۰۲۲۵۴		
Lack-of-Fit	۵	۱/۵۷۱۴	۰/۰۳۱۴۳	۹۶/۱۷	۰/۰۱۰
Pure Error	۲	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۳۳		
Total	۱۶	۳۶/۶۶۲۶			

دقت داده‌های مربوط به نرخ براده برداری مناسب است و مقدار $R\text{-sq}=۹۴/۱۱$ درصد می‌باشد که نشان دهنده دقت مناسب مدل است. نمودارهای مربوط به تحلیل و پراکندگی داده‌ها در خصوص نرخ براده برداری نیز در شکل ۶ آمده است که نشان دهنده پراکندگی مناسب داده‌ها می‌باشد.

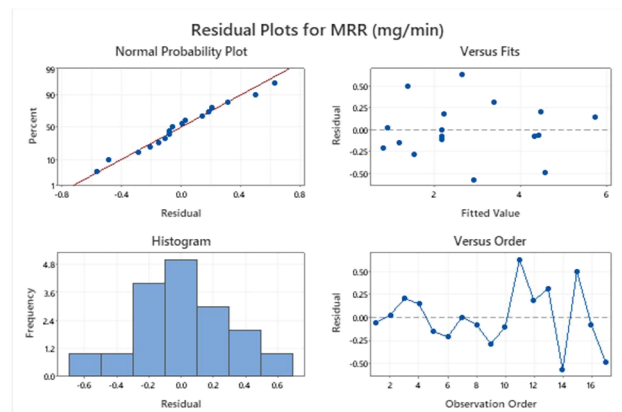


Fig. 6 Residual plots for material removal rate

شکل ۶ سایر نمودارهای مربوط به نرخ براده برداری

سطح آزمایش‌ها، زبری سطح قطعه کار در سه نقطه متفاوت از هم و با روش میانگین ارتفاعات زبری سطح (Ra) سنجیده شد و میانگین آن‌ها به عنوان پاسخ خروجی از آزمایش‌ها ثبت گردید.

جدول ۴ آنالیز واریانس داده‌های مربوط به زبری سطح قطعه کار

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۹	۸۸/۱۹۹۳	۹/۷۹۹۹	۲۹/۸۶	۰/۰۰۰
Linear	۳	۶۹/۷۸۴۸	۲۳/۲۶۱۶	۷۰/۸۸	۰/۰۰۰
I (A)	۱	۴۲/۳۹۷۴	۴۲/۳۹۷۴	۱۲۹/۱۸	۰/۰۰۰
Ton (μs)	۱	۱۶/۱۳۰۱	۱۶/۱۳۰۱	۴۹/۱۵	۰/۰۰۰
Toff (μs)	۱	۰/۶۲۳۷	۰/۶۲۳۷	۱/۹۰	۰/۲۱۰
Square	۳	۹/۶۵۱۹	۳/۲۱۷۳	۹/۸۰	۰/۰۰۷
I (A)*I (A)	۱	۰/۶۱۰۴	۰/۶۱۰۴	۱/۸۶	۰/۲۱۵
Ton (μs)*Ton (μs)	۱	۳/۲۷۶۷	۳/۲۷۶۷	۹/۹۸	۰/۰۱۶
Toff (μs)*Toff (μs)	۱	۱/۷۷۷۷	۱/۷۷۷۷	۵/۴۲	۰/۰۵۳
2-Way Interaction	۳	۶/۴۵۲۳	۲/۱۵۰۸	۶/۵۵	۰/۰۱۹
I (A)*Ton (μs)	۱	۲/۵۸۴۴	۲/۵۸۴۴	۷/۸۷	۰/۰۲۶
I (A)*Toff (μs)	۱	۰/۲۸۶۳	۰/۲۸۶۳	۰/۸۷	۰/۳۸۱
Ton (μs)*Toff (μs)	۱	۱/۷۷۶۳	۱/۷۷۶۳	۵/۴۱	۰/۰۵۳
Error	۷	۲/۲۹۷۴	۰/۳۲۸۲		
Lack-of-Fit	۵	۱/۸۳۲۲	۰/۳۶۶۴	۱/۵۸	۰/۴۳۲
Pure Error	۲	۰/۴۶۵۲	۰/۲۳۲۶		
Total	۱۶	۹۰/۴۹۶۶			

مقدار $R-sq = ۹۷/۴۶\%$ برای داده‌های مربوط به زبری سطح به دست آمده است که نشان‌دهنده برازش مناسب داده‌ها می‌باشد.

همچنین معادله رگرسیون (۵) مدل اصلاح‌شده، به منظور پیش‌بینی داده‌های مربوط به نتایج زبری سطح، با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر در آن به صورت ذیل به دست آمده است.

$$\text{Regression Equation in Uncoded Units} \\ Ra (\mu m) = 4.52 + 0.109 I (A) + 0.0542 \text{Ton} (\mu s) - \\ 0.000148 \text{Ton} (\mu s) * \text{Ton} (\mu s) \\ + 0.001789 I (A) * \text{Ton} (\mu s) \quad (5)$$

در شکل ۹ نمودارهای مربوط به تحلیل و پراکندگی باقیمانده‌ها آورده شده است که نشان‌دهنده پراکندگی مناسب داده‌ها می‌باشد.

۳-۵- پارامترهای مؤثر بر زبری سطح قطعه کار
زبری سطح به دست آمده قطعه کار، یکی از فاکتورهای مهم فرآیند می‌باشد. در عملیات خشن تراشی میزان توجه ما به این

نمودارهای مدل، یک پیشنهاد بهینه ارائه می‌کند که در شکل ۸ نشان داده شده است. بیشترین نرخ براده برداری که می‌توان به آن دست یافت، در زمان روشنی پالس ۳۰۰ میکرو ثانیه، جریان ۱۷/۵ آمپر و زمان خاموشی پالس ۴۰ میکرو ثانیه به میزان ۵۴۲ میلی گرم بر دقیقه می‌باشد. در این زمان روشنی پالس، یون‌های مثبت که جرم سنگینی دارند، به سمت قطعه کار که در قطب منفی قرار گرفته، شتاب می‌گیرند. با دادن زمان خاموشی پالس کافی، براده‌های ایجاد شده در دهانه ماشین کاری، تخلیه شده و دهانه ماشین کاری برای شروع پالس بعدی، آماده می‌شود.

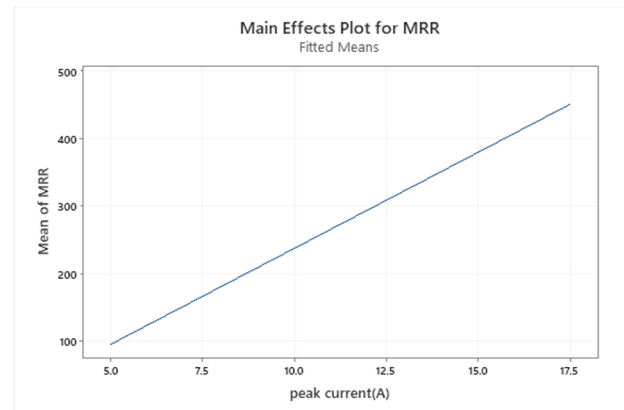


Fig. 7 Main effect plot of the discharge peak current on the material removal rate

شکل ۷ نمودار اثر جریان تخلیه بر روی نرخ براده برداری

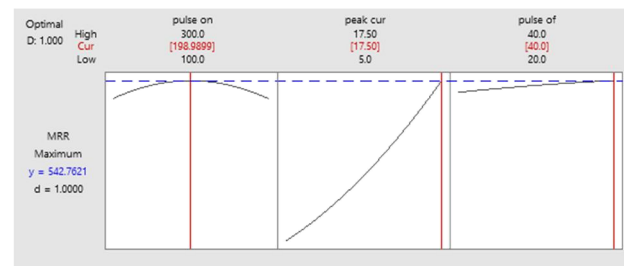


Fig. 8 Optimizing the process in terms of material removal rate

شکل ۸ بهینه‌سازی فرآیند از نظر نرخ براده برداری

۳-۴- بررسی و تحلیل زبری سطح قطعه کار

در این بخش نتایج زبری سطح به دست آمده از آزمایش‌ها بررسی خواهد شد. همان‌طور که جدول ۴ آنالیز جدول ۴ آنالیز واریانس داده‌های مربوط به زبری سطح قطعه کار آنالیز واریانس نشان می‌دهد، پارامترهای زمان روشنی پالس و جریان تخلیه، تنها عواملی هستند که بر روی زبری سطح قطعه کار تمام شده، اثرگذار هستند. در ادامه به بررسی تاثیرات هر یک است فاکتورهای فوق بر روی زبری سطح قطعه کار، خواهیم پرداخت. همان‌طور که گفته شد به منظور دقت بیشتر در نتایج زبری

۳-۵-۳- اثر متقابل زمان روشنی پالس و جریان پیک تخلیه بر روی زبری سطح قطعه کار
 نمودار اثر متقابل زمان روشنی پالس و جریان پیک تخلیه بر روی زبری سطح قطعه کار در شکل ۱۲ آورده شده است.

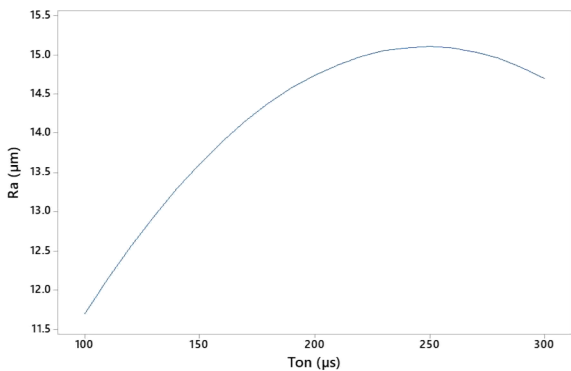


Fig. 10 Main effect plot of the pulse on time on the surface roughness
 شکل ۱۰ نمودار اثر زمان روشنی پالس بر روی زبری سطح قطعه کار

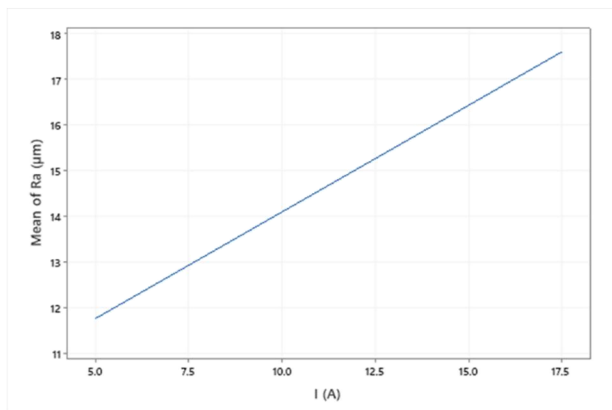


Fig. 11 Main effect plot of the discharge peak current effect on the surface roughness
 شکل ۱۱ نمودار اثر جریان تخلیه بر روی زبری سطح قطعه کار

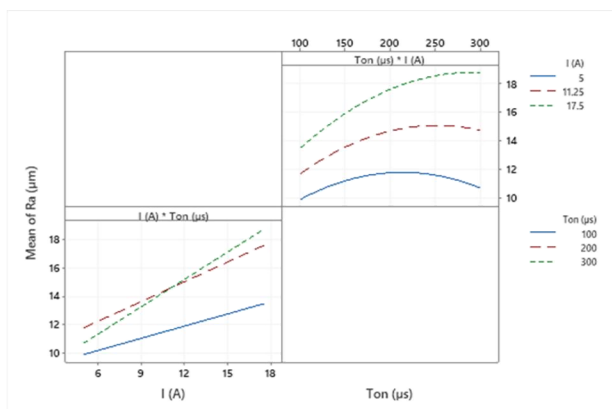


Fig. 12 Interaction plot of pulse on time and discharge peak current on surface roughness
 شکل ۱۲ اثر متقابل زمان روشنی پالس و جریان پیک تخلیه بر روی زبری سطح قطعه کار

پارامتر کمتر بوده و معمولاً هدف به حداکثر رساندن نرخ براده برداری می باشد؛ اما در عملیات پرداخت کاری این پارامتر از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و توجه بیشتری به آن می شود. نتایج این آزمایش ها بر روی زبری سطح قطعه کار می تواند در پیش بینی های علمی فرایند و همچنین انتخاب مناسب پارامترهای ورودی، به منظور دستیابی به هدف مورد نظر، با توجه به نوع عملیات ماشین کاری، کمک شایانی به اپراتور دستگاه کند.

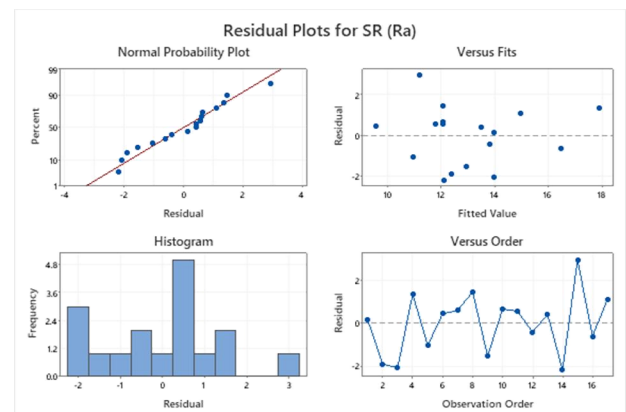


Fig. 9 Residual plots for surface roughness
 شکل ۹ سایر نمودارهای مربوط به زبری سطح قطعه کار

۳-۵-۳-۱- اثر زمان روشنی پالس بر روی صافی سطح قطعه کار
 افزایش زمان روشنی پالس موجب افزایش انرژی تخلیه در دهانه ماشین کاری گشته و منجر به ایجاد چاله های مذاب بزرگتری می شود که این امر باعث افزایش زبری سطح قطعه کار می گردد. لذا هر چه زمان روشنی پالس بیشتر شود، زبری سطح قطعه کار نیز بیشتر خواهد شد. با افزایش بیشتر مقدار زمان روشنی پالس، قطر کانال پلاسما افزایش یافته و تمرکز انرژی کاهش می یابد و چاله های مذاب کوچک تر می شوند. بنابراین با افزایش زمان روشنی پالس، زبری سطح افزایش یافته و بعد از حد معینی، زبری سطح کاهش می یابد. این موضوع در نمودار شکل ۱۰ دیده می شود. با توجه به نتایج به دست آمده، این عامل بیشترین اثر را بر روی زبری سطح قطعه کار دارا می باشد.

۳-۵-۳-۲- اثر جریان تخلیه بر زبری سطح قطعه کار
 عامل اثرگذار دیگر بر روی زبری سطح قطعه کار، جریان تخلیه در دهانه ماشین کاری است. این عامل نیز همانند زمان روشنی پالس، موجب ایجاد چاله های مذاب عمیق تر و در نتیجه افزایش زبری سطح قطعه کار خواهد شد. این موضوع به وضوح در نمودار شکل ۱۱ قابل مشاهده است.

- ماشین کاری تخلیه الکتریکی می تواند به عنوان یکی از روش های ماشین کاری کامپوزیت های زمینه فلزی آلیاژ منیزیم مورد استفاده قرار گیرد. به طور کلی نرخ براده برداری در ماشین کاری تخلیه الکتریکی نسبت به روش های ماشین کاری سنتی پایین است، اما با توجه به وجود ذرات ساینده در این نوع مواد و مشکلات موجود در ماشین کاری سنتی آن ها، استفاده از این روش ماشین کاری می تواند مناسب باشد.

- نرخ براده برداری در ماشین کاری تخلیه الکتریکی نمونه استفاده شده در این آزمایش، با شدت جریان تخلیه رابطه مستقیم داشته و با افزایش جریان تخلیه نرخ براده برداری نیز افزایش می یابد. اما در صورتی که میزان افزایش جریان از حد معینی تجاوز کند شرایط ماشین کاری ناپایدار شده و تنظیم دهانه ماشین کاری توسط سیستم های دستگاه با نوسانات بسیاری همراه خواهد شد که ادامه این روند موجب بروز خسارت به دستگاه خواهد شد.

- زمان روشنی پالس و جریان تخلیه به ترتیب بیشترین اثر را در زبری سطح قطعه کار دارند. رابطه این دو پارامتر با زبری سطح قطعه کار به صورت خطی و مستقیم است و با افزایش این دو پارامتر زبری سطح قطعه کار نیز افزایش خواهد یافت.

۵- فهرست علائم

MRR	نرخ براده برداری
SR	صافی سطح
I	شدت جریان
T_{on}	زمان روشنی پالس
T_{off}	زمان خاموشی پالس
W_b	وزن قطعه کار قبل از ماشین کاری (میلی گرم)
W_a	وزن قطعه کار بعد از ماشین کاری (میلی گرم)
T_m	زمان ماشین کاری (دقیقه)

۶- تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت مالی سازمان صنایع کوچک و شهرک های صنعتی ایران انجام شده است.

۷- مراجع

- [1] Z. Zhong and N. P. Hung, "Grinding of alumina/aluminum composites," Journal of materials processing technology, Vol. 123, No. 1, pp. 13-17, 2002.
- [2] Yadav RN, Yadava V (2013) Experimental study of erosion and abrasion based hybrid machining of

با توجه به این نمودار تغییرات در زمان روشنی پالس در جریان های پایین ناچیز بوده و ابتدا باعث افزایش زبری سطح قطعه کار و سپس موجب کاهش آن می شود. اما در جریان های بالا افزایش زمان روشنی پالس، منجر به افزایش زبری سطح قطعه کار می شود. همچنین در همه زمان های روشنی پالس، افزایش جریان پیک تخلیه منجر به افزایش زبری سطح می شود، اما این تأثیر در زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه کمتر است.

۳-۶- بهینه سازی فرایند از نظر زبری سطح قطعه کار

با توجه به پیشینه علمی فرایند و همچنین موارد بیان شده، کمترین مقدار زبری سطح قطعه کار را به عنوان مقدار بهینه در نظر گرفته شده است. همان طور که در نمودارهای شکل ۱۳ مشاهده می گردد، کمترین میزان زبری سطح قطعه کار، در زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکرو ثانیه و جریان ۵ آمپر به میزان ۹/۵۵ میکرون متر بر اساس معیار Ra قابل دستیابی است. زمان خاموشی پالس در این فاکتور اثرگذار نبوده و میزان آن به طور دلخواه قابل تنظیم است.

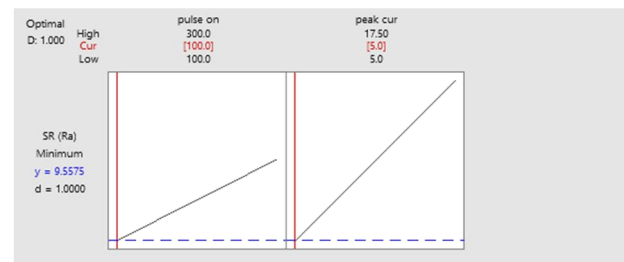


Fig. 13 Optimizing the process in terms of surface roughness

شکل ۱۳ مقادیر پیشنهادی به منظور بهینه سازی فرایند از نظر زبری سطح قطعه کار

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر و بررسی نمودارها و جداول آن و همچنین با توجه به مشکلات فراوان در روش های ماشین کاری سنتی کامپوزیت های زمینه فلزی، نتایج کلی این تحقیق را می توان به صورت زیر بیان کرد:

- کامپوزیت زمینه فلزی آلیاژ AZ91 منیزیم با ذرات سیلیکون کاربرد پودری را می توان به وسیله فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی براده برداری نمود و با توجه به میل زیاد فلز منیزیم به اکسید شدن هیچگونه مورد مشتعل شدن در آن مشاهده نشد. البته لازم به ذکر است که همواره قبل از شروع فرایند نمونه آزمایش، به طور کامل در مایع دی الکتریک غوطه ور گردید.

- [8] A. Srivastava, Sunil Kumar Yadav and D.K. Singh, Modeling and Optimization of Electric Discharge Machining Process Parameters in machining of Al 6061/SiCp Metal Matrix Composite, *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.235>
- [9] Mostafapor, Amir, and Hossein Vahedi. "Wire electrical discharge machining of AZ91 magnesium alloy; investigation of effect of process input parameters on performance characteristics." *Engineering Research Express* 1.1 (2019): 015005. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ab26c8>
- [10] P. Shandilya, P.K. Jain, N.K. Jain, *Procedia Engg.* 38 (2012) 2371–2377. doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.283
- [11] Monotgormery D.C., "Design and analysis of experimental", New York: J.Wiley & Sons, 2008.
- [12] Myers RH, Monotgormery D.C., "Response Surface Methodology", J.Wiley & Sons Interscience Publication, 2002.
- [13] Qureshi Majid, Tahmasebi Vahid, Engraving Goldsmith Praise; Optimization of effective parameters in bronze machining by response surface methodology, 3rd International Conference and 12th National Conference on Manufacturing, University of Tehran, 2011. (in Persian فارسی)
- [14] Hassan Alhafi, Translated by Majid Qureshi, *Advanced Machining Processes*, Khajeh Nasir al-Din Tusi University, Second Edition, 2007. (in Persian فارسی)
- hybrid metal matrix composite. *Int J Precis Eng Manuf* 14:1293–1299. <https://doi.org/10.1007/s12541-013-0176-x>
- [3] Satishkumar D, Kanthababu M, Vajjiravelu V, Anburaj R, Sundarrajan NT, Arul H (2011) Investigation of wire electrical discharge machining characteristics of Al6063/SiCp composites. *Int J Adv Manuf Technol* 56:975–986. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3242-5>
- [4] M. Sivaraj & N. Selvakumar, "Experimental analysis of Al-TiC sintered nano composite on EDM process parameters using ANOVA", *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 31, pp. 802-812, 2016.
- [5] Uhlmann. E., Domingosb. D. C., "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.
- [6] M. Kalayarasan & M. Murali, "Optimization process Parameters in edm using Taguchi method with grey relational analysis and topsiis for ceramic composites", *Journal of Engineering Research in Africa*, Vol. 22, pp. 83-93, 2016.
- [7] M. Ghoreishi, V. Tahmasbi, Optimization of material removal rate in dry electro-discharge machining process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 113-121, 2014. (in Persian فارسی)