



بررسی عوامل مؤثر بر نرخ سایش ابزار در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی کامپوزیت زمینه فلزی آلیاژ منیزیم AZ91 تقویت‌شده با میکروذرات کاربید سیلیسیم

امین صفرآبادی^۱، وحید طهماسبی^{۲*}، امین سوسن‌آبادی فراهانی^۳، مجتبی ذوالفقاری^۴

^۱ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، ایران

^۲ دانشجوی مقطع دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، ایران

^۳ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، ایران

^۴ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، ایران

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۹

چکیده

کامپوزیت‌های زمینه فلزی، توجه روزافزونی برای کاربرد در صنایع هوافضا، دفاعی و خودروسازی را به خود جلب کرده‌اند. ماشین‌کاری این مواد با روش‌های سنتی ماشین‌کاری به دلیل وجود ذرات ساینده، بسیار مشکل است. ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (EDM) یکی از پرکاربردترین روش‌های ماشین‌کاری پیشرفته است و به نظر می‌رسد، یک تکنیک امیدوارکننده برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی باشد. سایش ابزار در حین فرآیند، امری اجتناب‌ناپذیر است و نمی‌توان آن را به حد صفر رساند، ولی می‌توان آن را تا جایی که امکان دارد، کم کرد. در این تحقیق اثر پارامترهای جریان پیک تخلیه، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس، روی قطعه‌کار از جنس کامپوزیت زمینه فلزی آلیاژ AZ91 منیزیم، تقویت‌شده با ۵ درصد ذرات کاربید سیلیسیم پودری و اثر آن بر روی نرخ سایش الکترود ابزار مسی، بررسی خواهد شد. آزمایش‌های این فرآیند با استفاده از روش سطح پاسخ مدل‌سازی شده و ۱۷ آزمایش برای رسیدن به نتایج انجام گردیده است. جریان پیک تخلیه، زمان روشنی پالس، اثر تعاملی جریان پیک تخلیه و زمان روشنی پالس و اثر تعاملی زمان خاموشی پالس و جریان تخلیه از فاکتورهای مؤثر بر روی نرخ سایش ابزار هستند. کمترین نرخ سایش ابزار در زمان روشنی پالس ۳۰۰ میکروثانیه، شدت جریان تخلیه ۱۱/۶۹ آمپر و زمان خاموشی پالس ۲۰ میکروثانیه به دست آمد.

کلمات کلیدی: ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی؛ کامپوزیت زمینه منیزیمی؛ نرخ سایش ابزار؛ روش سطح پاسخ.

Investigating factors affecting electrode wear rate in electrical discharge machining of AZ91 magnesium alloy metal matrix composite reinforced with silicon carbide microparticles

Amin safarabadi¹, Vahid tahmasbi^{2*}, Amin sousanabadi farahani³, mojtaba zolfaghari⁴

¹ MSc, Department of Mechanical Engineering, arak university of technology, arak, Iran

² Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, arak university of technology, arak, Iran

³ Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, arak university, arak, Iran

⁴ Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, arak university of technology, arak, Iran

Abstract

Metal matrix composites have attracted a lot of attention for application in the aerospace, defense, and automotive industries. Machining these materials with traditional machining methods is very difficult due to the presence of abrasive particles. Electrical Discharge Machining (EDM) is one of the most widely used advanced machining methods and seems to be a good method for machining metal matrix composites. Tool wear occurs during the process and cannot be reduced to zero, but it can be reduced as much as possible. In this research, the effect of discharge peak current, pulse on time, and pulse off time on the workpiece made of AZ91 magnesium alloy, reinforced with 5% of powdered silicon carbide particles has been investigated. The effect of these parameters on the wear rate of copper electrode is studied. The tests of this process have been modeled using the response surface methodology. 17 experiments have been done to reach the results. Discharge peak current, pulse on time, the interaction effect of discharge peak current and pulse on time, and the interaction effect of pulse off time and discharge peak current are effective factors on electrode wear rate. The lowest electrode wear rate is on the 300 microseconds pulse on time, 11.69 amp discharge peak current, and pulse off time of 20 microseconds.

Keywords: electrical discharge machining; magnesium matrix composite; electrode wear rate; Response surface methodology.

۱- مقدمه

تحقیقات گسترده در زمینه علم مواد به سمت معرفی و توسعه مواد مهندسی سبک در حال انجام است. فن آوری‌های پیشرفته‌ی خودروسازی و هوافضا به چنین خصوصیتی برای مواد مورد استفاده خود 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 با عنوان کامپوزیت زمینه فلزی^۱ را معرفی کرده‌اند. کامپوزیت زمینه فلزی (MMC) یک ماده مرکب با حداقل دو بخش تشکیل‌دهنده است، یکی فلز زمینه و دوم ذرات تقویت‌کننده که ممکن است از جنس فلزی متفاوت یا ماده دیگری مانند یک ترکیب سرامیکی یا آلی باشد. فلز زمینه ماده یکپارچه‌ای است که ذرات تقویت‌کننده در آن تعبیه شده است و کاملاً پیوسته است. معمولاً به عنوان زمینه از یک فلز سبک‌تری مانند آلومینیوم، منیزیم یا تیتانیوم استفاده می‌شود و یک تکیه‌گاه سازگار برای ذرات تقویت‌کننده را فراهم می‌کند [۱]. کامپوزیت‌های زمینه فلزی به خاطر دارا بودن نسبت استحکام و سختی به وزن بالایی که دارند، قابل استفاده در دماها و نیروهای نسبتاً بالا می‌باشند. چگالی اغلب MMC ها تقریباً یک‌سوم چگالی فولاد بوده که منجر به نسبت استحکام به وزن ویژه بالا و سختی قابل قبول برای این مواد شده است. ماشین کاری تخلیه الکتریکی^۲ یکی از روش‌های ماشین کاری پیشرفته است که در صنعت برای ماشین کاری با دقت بالا در انواع مواد رسانا، آلیاژها و حتی مواد سرامیکی با هر سختی و شکلی که ساخت آن‌ها با ماشین کاری سنتی دشوار است، استفاده می‌شود. ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM) یک فرآیند ماشین کاری غیر سنتی است که از انرژی حرارتی-الکتریکی برای حذف مواد استفاده می‌کند. ماده با عمل فرسایشی تخلیه‌های الکتریکی با فرکانس بالا، (جرقه‌های) با چگالی توان بالا بین دو الکترود که یکی ابزار و دیگری خود قطعه کار است، با یک سیال دی‌الکتریک در شکاف بین آن‌ها قرار دارد، حذف می‌شود. استفاده از سیال دی‌الکتریک این

امکان را فراهم می‌کند که ذرات جدا شده را از شکاف خارج کرده و همچنین موجب خنک شدن قطعه کار می‌شود. ماشین کاری تخلیه الکتریکی روشی مقرون به صرفه و مؤثر برای ماشین کاری مواد با استحکام بالا و مقاوم در برابر حرارت را برای ساخت اشکال پیچیده فراهم می‌کند. در میان بسیاری از تکنیک‌های ماشین کاری، EDM ثابت کرده است که در ماشین کاری مواد کامپوزیت مؤثر است. محققان مختلف آزمایش‌های زیادی را روی کامپوزیت‌های مختلف انجام داده‌اند [۲].

کامپوزیت‌های MMC کاربردهای متنوعی در صنعت دارند. از جمله کاربرد در صنایع هوافضا (برای دماغه مدارگرد شاتل فضایی و مقطع عمودی در دم جنگنده‌های 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 [۳].

سرباستاوا^۳ و همکاران [۴] فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر روی کامپوزیت ماتریسی فلز آلومینیوم Al 6061 که با ۸٪ ذرات کاربید سیلیسیم (SiC) تقویت شده است و در کارگاه کوچک و با فرایند ریخته‌گری ساخته شده است، مورد بررسی قرار داده‌اند. در این آزمایش از روش سطح پاسخ (RSM) برای مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی پارامترهای فرایند مانند جریان، زمان روشنی پالس و نسبت زمان خاموشی به روشنی پالس^۴ استفاده شده است و مدل ریاضی بین پارامترهای ورودی انتخاب شده و پاسخ‌های نرخ براده برداری (MRR)، نرخ سایش الکترود (EWR) و زبری سطح (SR) قطعه ساخته شده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. زمان روشنی پالس مهم‌ترین پارامتر بر روی نرخ سایش ابزار است. کمترین نرخ سایش ابزار در جریان پیک تخلیه ۴ آمپر، زمان روشنی پالس ۲۰۰ میلی‌ثانیه و چرخه کاری ۶ درصد به اندازه ۰/۰۱۳۹ میلی‌متر مکعب بر دقیقه به دست آمده است. مسعودی و

³ A. Srivastava⁴ duty cycle¹ Metal Matrix Composite (MMC)² Electrical discharge machining (EDM)

همکاران [۵] با استفاده از تحلیل مقدار کل نرمال شده پارامترها (TNQL) و نسبت سیگنال به نویز (S/N) هم‌زمان خروجی‌ها به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی شامل شدت‌جریان، 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 شدت‌جریان 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 نیروی گریز از مرکز شده و ذرات را به سرعت از منطقه ماشین‌کاری دور می‌کند و نرخ براده برداری افزایش می‌یابد. استفاده از پودر آلومینیوم در برخورد با جرقه‌ها باعث ریز تر شدن جرقه‌ها شده و عمق نفوذ آن‌ها را کم نموده و در نتیجه زبری سطح کاهش می‌یابد. هاورمند^۱ و همکاران [۶] به بررسی تأثیر متغیرهای ورودی (ولتاژ، جریان، زمان روشن شدن پالس و ضریب وظیفه^۲) را بر روی نرخ براده برداری^۳ (MRR)، نرخ سایش الکترود^۴ (EWR) و تغییرات ریزساختار در کامپوزیت Al-Mg₂Si که یک گروه جدید از کامپوزیت‌های زمینه فلزی است، پرداخته‌اند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان می‌دهد که ولتاژ، جریان، اثر تعاملی ولتاژ و جریان، اثر تعاملی جریان و زمان روشنی پالس و اثر مرتبه دوم ولتاژ، از مهم‌ترین عوامل بر MRR هستند. زمان روشن شدن پالس و اثر مرتبه دوم زمان روشن شدن پالس مهم‌ترین عوامل مؤثر بر EWR هستند. حاج حسینی و همکاران [۷] تأثیر پارامترهای ورودی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی روی نانو کامپوزیت A356 تقویت‌شده با ۳/۵٪ آلومینا (Al₂O₃)، 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 (دوسطحی)، شدت‌جریان (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 قطعه‌کار، نرخ سایش ابزار ماشین‌کاری و زبری سطح قطعه‌کار بودند. با توجه به نتایج حاصله، تأثیرگذارترین پارامتر ورودی بر روی نرخ سایش ابزار شدت‌جریان تعیین شد. لاکشمنان^۵ و همکاران [۸] به بررسی کامپوزیت‌های زمینه فلزی هیبریدی Mg/SiCP-FlyAsh (MMCs) که با روش متالورژی پودر ساخته و با ماشین‌کاری EDM ماشین‌کاری شدند، پرداختند. زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و جریان اعمال شده پارامترهای مورد استفاده برای مطالعه نرخ براده برداری در فرآیند EDM بودند. فرایند EDM بر روی یک دستگاه تخلیه الکتریکی فرسایش جرقه‌ای ELEKTRA PLUS انجام شد. ابزار برنجی با قطر ۱۰ میلی‌متر برای سوراخ کردن نمونه‌های MMC انتخاب شد. شرایط بهینه‌شده با استفاده از جریان ۸/۵ آمپر، زمان روشنی پالس ۷۰۰ میکروثانیه و زمان خاموشی پالس ۲۰۰ میکروثانیه، با تولید بالاترین نرخ براده برداری ۰/۲۲۹۶ گرم در دقیقه و نرخ سایش ابزار ۰,۰۰۰۳ گرم در دقیقه به دست آمده است. سینگ^۶ و همکاران [۹] به بررسی تجربی روی نرخ سایش ابزار در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی مخلوط با پودر^۷ (PMEDM) از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ تقویت‌شده با ۱۰٪ ذرات کاربید سیلیکون (کامپوزیت SiCp %AA6061/10) پرداخته‌اند. در این فرایند پودر تنگستن با غلظت ۴ گرم در لیتر در سیال دی الکتریک مخلوط می‌شود. چهار پارامتر فرآیند، یعنی جریان پیک تخلیه، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و ولتاژ دهانه ماشین‌کاری برای بررسی نرخ سایش ابزار در نظر گرفته شده‌اند. آنان دریافتند که جریان پیک تخلیه و زمان روشنی پالس از مهم‌ترین پارامترهای فرآیند هستند که بر نرخ سایش ابزار تأثیر می‌گذارند. نرخ سایش ابزار با افزایش جریان پیک تخلیه به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، درحالی‌که زمان روشنی پالس بالاتر باعث کاهش نرخ سایش ابزار می‌شود. میناموتو^۸ و همکاران [۱۰] به مطالعه، کامپوزیت آلومینیوم

⁶ Singh

⁷ powder-mixed electrical discharge machining (PMEDM)

⁸ Muniamuthu

¹ Hourmand

² duty factor

³ material removal rate (MRR)

⁴ electrode wear ratio (EWR)

⁵ Lakshmanan

گرید ۷۰۷۵ با استفاده از یک دستگاه EDM پرداخته‌اند. تقویت‌کننده‌های SiC و Al_2O_3 با ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ وزنی، برای تولید آلومینیوم MMC با استفاده از دستگاه ریخته‌گری به هم زدنی^۱ تحت کنترل الکترونیکی استفاده می‌شوند. اثر محیط‌های دی‌الکتریک مانند نیتروژن مایع و آب دیونیزه شده بر ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلومینیوم MMC مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. ولتاژ شکاف، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و جریان تخلیه از پارامترهای ورودی قابل کنترل بودند. نرخ براده برداری (MRR)، نرخ سایش ابزار (EWR) و زبری سطح (SR) پارامترهای خروجی ماشین کاری برای این کار در نظر گرفته شدند. نتیجه نشان داد که مقادیر MRR، EWR و SR هنگام ماشین کاری با تقویت‌کننده‌های کاربید سیلیکون (SiC) نسبت به آلومینا برای هر دو محیط دی‌الکتریک کمتر است. این به دلیل وجود ذرات سرامیکی SiC در مواد زمینه آلومینیومی است که تحرک الکترون‌ها را در قطعه کار کاهش می‌دهد. مهدی وحدتی [۱۱] تحلیل آماری و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر سختی مقطع عرضی اتصال لب به لب آلیاژ Al7075 حاصل از فرآیندهای FSW و SFSW با استفاده از روش رویه پاسخ و تابع مطلوبیت را مورد مطالعه قرار داده است. بدین منظور، روش رویه پاسخ به عنوان روش طراحی آزمایش، انتخاب گردید و متغیرهای سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار و زاویه انحراف ابزار به عنوان متغیرهای ورودی، تعیین شدند. در ادامه، تحلیل آماری و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر سختی مقاطع عرضی اتصالات به انجام رسید. نتایج تحلیل داده‌های حاصل از آزمون‌های تجربی، صحت و دقت معادله رگرسیون را مورد تأیید قرار داد و نشان داد که مدل نهایی می‌تواند پارامتر MHD را با خطای کمتر از ۰/۵ پیش‌بینی کند؛ همچنین، عبارات خطی از متغیرهای قطر شانه ابزار و سرعت دورانی ابزار بر سختی مقاطع عرضی اتصالات تولید شده در زیر آب، مؤثر هستند. پاناپا^۲ و همکاران [۱۲] اثرات پارامترهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر کیفیت سوراخ ایجادشده، مانند مخروطی شدن و

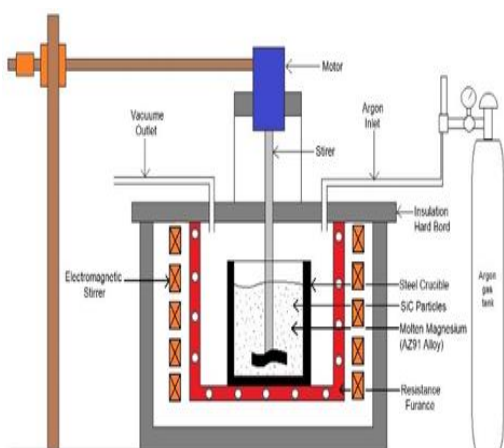
زبری سطح را مورد بررسی قرار داده‌اند. قطعه کار مورد استفاده در این آزمایش نانو کامپوزیت‌های منیزیم تف جوشی شده در ماکروویو (تقویت‌شده با ۰/۸ و ۰/۲ درصد وزنی نانو آلومینا) است. آزمایش‌ها با استفاده از روش تاگوجی برای تعیین اثرات پارامتر فرآیند طراحی شد. پارامترهای فرآیند مانند زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ دهانه ماشین کاری و سرعت سروو موتور^۳ برای بهینه‌سازی زبری سطح کمتر و کاهش مخروطی شدن، بهینه شدند. آنان دریافتند که زمان روشن شدن پالس و سرعت سروو موتور به‌عنوان متغیرهای اصلی پاسخ هستند. امیر مصطفی پور و همکاران [۱۳]، اثرات سه پارامتر ورودی فرآیند وایرکات (WEDM)، از جمله زمان روشنی پالس، جریان پالس و نرخ تغذیه سروو را روی پاسخ‌های خروجی نرخ براده برداری، پهنای برش و زبری سطح در حین ماشین کاری آلیاژ AZ91 منیزیم مورد مطالعه قرار داده‌اند. آزمایشات مربوط به این فرآیند با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) مدل‌سازی شده و درصد سهم هر متغیر بر روی پارامترهای ورودی به دست آمده است. نتایج تجربی نشان داد که سرعت حذف مواد و پهنای برش به‌طور 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. مهدی وحدتی و همکاران [۱۴] به تحلیل آماری پارامترهای مؤثر بر خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی $Al_2O_3/Al7075$ حاصل از فرآوری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از روش رویه پاسخ پرداخته‌اند. در این پژوهش متغیرهای: سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار و اندازه ذرات تقویت‌کننده به عنوان متغیرهای ورودی فرآیند، تعیین شدند. نتایج حاصل از آنالیز واریانس و تحلیل رگرسیون داده‌های حاصل از آزمون‌های تجربی، صحت و دقت معادلات رگرسیون را مورد تأیید قرار داد و نشان داد که عبارات خطی، تعاملی و سهمی از متغیرهای ورودی فرآیند، بر استحکام تسلیم و سختی نمونه‌های کامپوزیتی مؤثر هستند.

³ Servo motor

¹ stir casting machine

² Ponappa

در نهایت کامپوزیت فلزی آلیاژ AZ91 با ۵ درصد حجمی ذرات تقویت کننده کاربرد سلیسیوم پودری ساخته شد. تصویر شماتیک کوره مورد استفاده و روش ساخت نمونه اولیه در شکل ۱ آورده شده است. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه به همراه آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) قطعه کار مورد استفاده در تحقیق حاضر نیز در شکل ۲ آورده شده است. نمودار سمت راست مربوط به ذرات تقویت کننده سلیکون کارباید (۱) و نمودار سمت چپ مربوط به زمینه فلزی از جنس آلیاژ AZ91 منیزیوم (۲) است.



شکل ۱- تصویر شماتیک کوره مورد استفاده

در کشور ما علیرغم کاربرد روزافزون مواد کامپوزیت زمینه فلزی و مشکلاتی که در ماشین کاری سنتی این مواد وجود دارد، تاکنون تحقیقی در زمینه بهبود شرایط ماشین کاری به روش تخلیه الکتریکی و همچنین عملکرد روش های مختلف مدل سازی و بهینه سازی برای این مواد صورت نگرفته است. از آنجا که تأثیر پارامترهای تنظیمی و تعیین سطوح بهینه آن ها، وابسته به جنس قطعه کار و شرایط ماشین کاری است، در این تحقیق برای نخستین بار یک مطالعه تجربی دقیق و روشمند به منظور بررسی اثر پارامترهای جریان پیک تخلیه (I)، زمان روشن شدن پالس (T_{on}) و زمان خاموشی پالس (T_{off}) در فرآیند براده برداری ماشین کاری تخلیه الکتریکی ماتریس زمینه فلزی آلیاژ (AZ91) منیزیوم تقویت شده با ۵ درصد ذرات کاربرد سلیسیوم پودری، بر روی پاسخ نرخ سایش ابزار (EWR) انجام شده است. به منظور مدل سازی آزمایش ها از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ (RSM) استفاده شده است و معادلات رگرسیون خطی مرتبه دوم به منظور پیش بینی رفتار پارامترها ارائه شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

کامپوزیت زمینه منیزیومی حاضر، با روش ریخته گری به هم زدنی^۱ تولید می شود. از ذرات کاربرد سلیسیوم با اندازه دانه ۴۵ میکرون و مش ۳۲۰ برای ساخت کامپوزیت زمینه فلزی مطالعه حاضر استفاده شد. این ذرات به دلیل رطوبت هوا به هم چسبیده و توده های بزرگی را تشکیل می دهند. برای جدا کردن پودرها، از دستگاه اولتراسونیک استفاده می شود. سپس ذرات الک گردید تا ذراتی با دانه بندی یکنواخت حاصل شود. برای ساخت نمونه آزمایش، مخلوط آلیاژ زمینه با ذرات تقویت کننده در کوره مقاومتی ذوب گردیده و سپس مذاب به دست آمده توسط میدان های مغناطیسی هم زده می شود که به وسیله سیم پیچ های الکتریکی ایجاد گردیده است. گاهی هم به منظور توزیع مناسب ذرات، از همزن مکانیکی در داخل فلز پایه استفاده شده است. همچنین به دلیل میل ترکیبی بالای فلز منیزیوم با اکسیژن، ریخته گری این ماده می بایست در حضور گاز آرگون انجام پذیرد. سپس کوره تا دمای بالای ۷۰۰ درجه سانتی گراد گرم گردید تا تمام نقاط فلزی ذوب شود و در حین ذوب شدن از همزن مکانیکی و مغناطیسی استفاده گردید.

^۱ Stir Casting

بخش‌های قابل تنظیم دستگاه مانند میزان برگشت ابزار برای شستشوی دهانه ماشین کاری، گپ ماشین کاری، مدت زمان شستشوی دهانه ماشین کاری و غیره در مقادیر ثابتی تنظیم شدند (جدول ۱). زمان انجام ماشین کاری برای هر یک آزمایش‌ها ۱۲ دقیقه در نظر گرفته شد. قطعه کار با فرم استوانه، به قطر ۳۵ میلی‌متر و ارتفاع ۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. 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 به‌طور کامل پوشش دهد. بعد از هر آزمایش نتایج آن با استفاده از ترازوی دیجیتال برند AND مدل (GF_600) با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری و ثبت شده و آزمایش‌های بعدی صورت گرفته است. سطح ابزار نیز پس از هر آزمایش مجدداً پرداخت شده و وزن آن قبل و بعد از هر آزمایش اندازه‌گیری و ثبت گردیده است. تصویر قطعه کار و ابزار مورد استفاده در شکل ۴ آورده شده است.

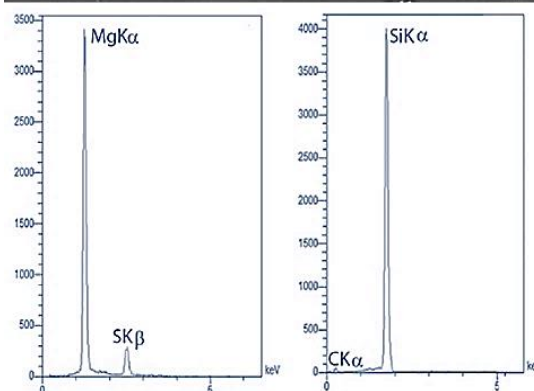
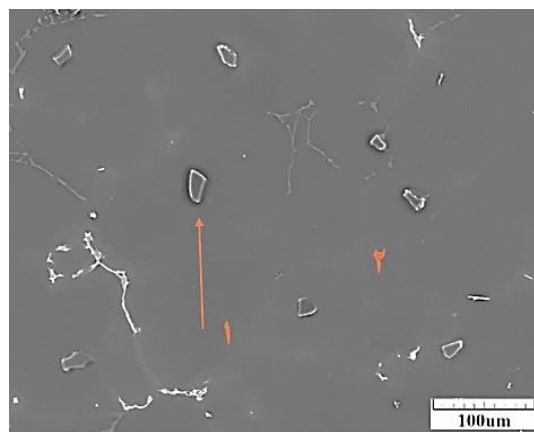


شکل ۳- دستگاه آذرخش ساخت شرکت تهران اکرام،

مدل TA-E.D.M.204H

جدول ۱- جدول پارامترهای ثابت و مقادیر آن

پارامتر	گپ ماشین کاری	دی‌الکتریک	برگشت ابزار	ولتاژ دهانه
مقدار	۰/۰۲ - ۰/۰۵ میلی‌متر	نفت سفید	۵ میلی‌متر	۸۰ ولت
پارامتر	نوع مدار	زمان شست‌وشو	نوع شست‌وشو	زمان هر آزمایش
مقدار	ایزوپالس	۱ ثانیه	غوطه‌وری	۱۲ دقیقه



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه به همراه آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) - (۱) ذرات سیلیکون کارباید (نمودار سمت راست)، (۲) زمینه آلیاژ AZ91 منیزیومی (نمودار سمت چپ)

۱-۲- فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی

ماشین کاری تخلیه الکتریکی یکی از مهم‌ترین و قدیمی‌ترین فرآیندهای ماشین کاری مدرن است و در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. 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. مدار مورد استفاده در تمامی آزمایشگاه مدار ایزوپالس در نظر گرفته شد و ولتاژ دهانه ماشین کاری در تمام آزمایشگاه بر روی ۸۰ ولت تنظیم گردید. از نفت سفید به‌عنوان مایع دی‌الکتریک استفاده شد. در تمام آزمایش‌ها به‌جز پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده، سایر

سطوح پارامترهای ورودی شامل جریان پیک تخلیه، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس در جدول ۲ 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. تعداد آزمایش‌ها در این روش با در نظر گرفتن سه تکرار برای نقطه مرکزی، برابر ۱۷ آزمایش است.



شکل ۴- تصویر قطعه کار و ابزار مورد استفاده

جدول ۲- پارامترهای ورودی و مقادیر آن‌ها

پارامتر ورودی	نام پارامتر	حد پایین	حد وسط	حد بالایی
الف	زمان روشنی پالس (میکروثانیه)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰
ب	جریان پیک تخلیه (آمپر)	۵	۱۰	۱۵
ج	زمان خاموشی پالس (میکروثانیه)	۲۰	۳۰	۴۰

۳- تحلیل داده‌ها، بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه تنظیم جریان در دستگاه تخلیه الکتریکی آذرخش استفاده‌شده در این آزمایش، به صورت پله‌ای صورت می‌گیرد، تنظیم مقدار جریان در برخی از آزمایش‌ها به صورت دقیق امکان‌پذیر نبوده و برای جلوگیری از بروز خطا در نتایج خروجی، مقدار اصلاح‌شده مقادیر جریان در جدول طراحی آزمایش‌ها ثبت گردیده و تحلیل داده‌ها با مقادیر واقعی جریان تخلیه انجام شده است. نرخ سایش ابزار با استفاده از معادله (۱) محاسبه شده است.

$$EWR = \frac{W_b - W_a}{T_m} \text{ (g/min)} \quad (1)$$

W_b = وزن ابزار قبل از ماشین‌کاری (گرم)

W_a = وزن ابزار بعد از ماشین‌کاری (گرم)

T_m = زمان ماشین‌کاری (دقیقه)

نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

۳-۱- بررسی و تحلیل نرخ سایش الکترواد ابزار

یکی از خروجی‌های مهم فرآیند نرخ سایش ابزار است که در این بخش به آن پرداخته خواهد شد. سایش ابزار امری

۲-۲- طراحی آزمایش‌ها در این تحقیق

در تحقیق حاضر از روش سطح پاسخ که یکی از روش‌های طراحی آزمایش‌ها می‌باشد، جهت طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است. روش سطح پاسخ از جمله روش‌های ریاضی و آماری است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود و هدف آن مدل‌سازی و بهینه‌سازی این پاسخ است [۱۵]. اساس سطح پاسخ بر طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی آماری استوار است. طرح آزمایش به‌عنوان ابزاری مناسب برای مهندسان در توسعه و اصلاح و صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌های آزمایش‌ها و رفع عیوب آن‌ها به کار گرفته می‌شود و استفاده به‌موقع از آن سبب کاهش زمان تولید و هزینه‌ها می‌شود [۱۶]. این روش می‌تواند نمودارهای خروجی مناسبی را جهت مشخص کردن نقطه بهینه در میان چندین پارامتر به محقق ارائه دهد [۱۷]. همچنین این روش این قابلیت را دارد که رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک آزمایش را مدل‌سازی کرده به صورت یک معادله ریاضی ارائه کند [۱۸]. جهت انجام آزمایش‌ها از طرح مرکب مرکزی (CCD) استفاده گردید.

نرم‌افزار مینی‌تب یک نرم‌افزار کنترل کیفیت آماری و مناسب برای کار بر روی اعداد و تجزیه و تحلیل داده‌های خام شناخته شده است و در بسیاری از واحدهای صنعتی بزرگ و کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد و به‌وسیله آن می‌توان با تجزیه و تحلیل داده‌های آماری به طراحی آزمایش پرداخت. در این تحقیق از نسخه ۱۹ این نرم‌افزار استفاده شده است.

اجتناب‌ناپذیر است و نمی‌توان آن را به حد صفر رساند، ولی می‌توان آن را تا جایی که امکان دارد، کم کرد. پارامترهای زیادی در نرخ سایش و ابزار مؤثر هستند که از جمله آن می‌توان به جنس الکتروود ابزار، جنس قطعه‌کار، شرایط شستشوی دهانه ماشین کاری، مشخصه‌های پالس و غیره اشاره کرد.

در

جدول ۴ نتایج آنالیز واریانس اولیه داده‌های مربوط به نرخ سایش ابزار آورده شده است. حذف پارامترهای غیر مؤثر با توجه به جدول آنالیز واریانس صورت گرفته است. با استفاده از شاخص P-Value که بر اساس آماره تعیین می‌شود، نتیجه‌گیری آزمون بسیار ساده می‌گردد. فاکتورهایی که مقدار P-Value به دست آمده برای آن‌ها کمتر از سطح معناداری $\alpha=0.05$ باشد، در فرایند مؤثر هستند و تأثیرگذاری آن پارامتر در فرایند تأیید می‌گردد، در غیر این صورت اگر مقدار P-Value بیشتر از 0.05 باشد پارامتر مورد نظر به عنوان پارامتر غیر مؤثر در نظر گرفته خواهد شد. دقت داده‌های مربوط به نرخ براده برداری بسیار خوب و برابر با $R-sq=89.82\%$ است که نشان‌دهنده سازگاری مناسب مدل تجربی با مدل ریاضی در نظر گرفته شده است.

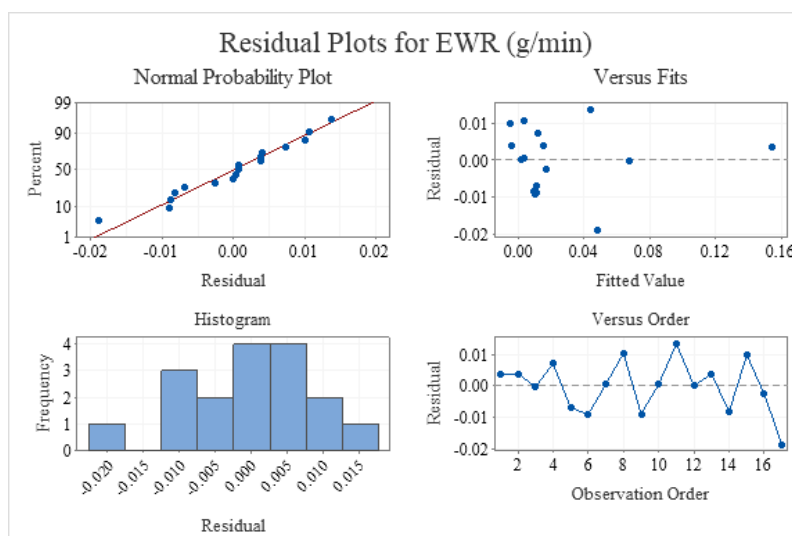
پس از حذف عوامل غیر مؤثر در نرخ سایش ابزار و اصلاح مدل، معادله رگرسیون آن به منظور پیش‌بینی مقدار سایش ابزار به صورت معادله (۲) به دست می‌آید.

نمودارهای مربوط به باقیمانده‌ها، نمودار نرمال، نمودار باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر مشاهده‌شده و هیستوگرام باقیمانده‌ها در شکل ۳ آورده شده است. آزمون باقی‌مانده‌ها عموماً به شکل بصری انجام می‌شود. در ضمن مقادیر دور افتاده نیز با استفاده از این نمودارها قابل تشخیص خواهد بود. در

نمودار مانده‌ها در مقابل مقادیر برازش شده، اگر نقاط حول خط به‌طور یکنواخت و متقارن پراکنده شده باشند، نشان می‌دهد که الگوی رگرسیون برازش داده‌شده از لحاظ ثابت بودن واریانس خطاها و میانگین صفر برای خطاها دارای وضعیت مناسبی است. توزیع نرمال که اغلب منحنی زنگوله‌ای نامیده می‌شود، یک توزیع احتمال پیوسته است که در دو طرف میانگین متقارن است. یکی مهم‌ترین دلایلی که نیاز است داده‌ها توزیع نرمال داشته باشند، این است که قوی‌ترین آزمون‌های آماری، یعنی آزمون‌های (پارامتریک) که هم دقت بالاتر و هم تعمیم‌پذیری بالاتری دارند و مورد استفاده پژوهش‌گران علوم مختلف هستند، پیش‌شرط توزیع نرمال داده‌ها را دارند. اگر داده‌ها متعلق به توزیع نرمال باشند، نقاط باید اطراف یک خط صاف جمع شوند. با توجه به موارد گفته شده، مشاهده می‌گردد که نمودارها مناسب هستند.

۳-۲- اثر پارامترهای مؤثر بر نرخ سایش الکتروود ابزار

عوامل مختلفی در نرخ سایش ابزار دخیل هستند که در بین پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق، یکی از مهم‌ترین پارامترها با بیشترین اثرگذاری، جریان پیک تخلیه است. زمان روشنی پالس پارامتر بعدی است که بیشترین اثرگذاری را بر روی نرخ سایش ابزار می‌گذارد. اثر تعاملی جریان تخلیه و زمان روشنی پالس پارامترهای اثرگذار بعدی بر روی نرخ سایش ابزار هستند. زمان خاموشی پالس و اثر تعاملی آن با جریان تخلیه نیز بر روی سایش ابزار اثرگذار هستند که در این بخش به آن‌ها پرداخته خواهد شد.



شکل ۴- نمودارهای باقیمانده‌ها مربوط به نرخ سایش الکتروود ابزار

جدول ۳- جدول طراحی آزمایش‌ها (مقادیر فاکتورهای ورودی و نتایج خروجی)

ترتیب تصادفی (طراحی آزمایش‌ها)	جریان پیک تخلیه (A)	زمان روشنی پالس (μs)	زمان خاموشی پالس (μs)	نرخ سایش ابزار (g/min)	ترتیب تصادفی (ترتیب انجام آزمایش‌ها)
۱	۱۰/۷۵	۱۰۰	۲۰	۰/۰۰۱	۱۴
۲	۱۵	۱۰۰	۲۰	۰/۰۶۷	۳
۳	۶/۲۵	۳۰۰	۲۰	۰/۰۰۲	۹
۴	۱۷/۵	۳۰۰	۲۰	۰/۰۱۹	۴
۵	۵	۱۰۰	۴۰	۰/۰۰۱	۶
۶	۱۵	۱۰۰	۴۰	۰/۱۵۸	۱
۷	۵	۳۰۰	۴۰	۰/۰۰۲	۲
۸	۱۴/۲۵	۳۰۰	۴۰	۰/۰۱۴	۱۶
۹	۵	۲۰۰	۳۰	۰/۰۰۴	۵
۱۰	۱۴	۲۰۰	۳۰	۰/۰۲۹	۱۷
۱۱	۱۰	۱۰۰	۳۰	۰/۰۵۸	۱۱
۱۲	۸/۲۵	۳۰۰	۳۰	۰/۰۰۲	۱۲
۱۳	۵/۵	۲۰۰	۲۰	۰/۰۰۵	۱۵
۱۴	۱۰/۷۵	۲۰۰	۴۰	۰/۰۱۹	۱۳

۱۵	۷/۵	۲۰۰	۳۰	۰/۰۱۴	۸
۱۶	۷/۵	۲۰۰	۳۰	۰/۰۰۴	۷
۱۷	۷/۵	۲۰۰	۳۰	۰/۰۰۴	۱۰

جدول ۴ آنالیز واریانس داده‌های مربوط به نرخ سایش الکتروود ابزار

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییر
۰/۰۰۰	۱۲/۵۰	۰/۰۰۳۷۳۵	۰/۰۲۲۴۰۸	۶	مدل رگرسیون
۰/۰۰۰	۲۲/۰۰	۰/۰۰۶۵۷۳	۰/۰۱۹۷۲۰	۳	خطی
۰/۰۰۰	۴۱/۵۲	۰/۰۱۲۴۰۹	۰/۰۱۲۴۰۹	۱	جریان پیک تخلیه (A)
۰/۰۰۰	۲۷/۳۶	۰/۰۰۸۱۷۵	۰/۰۰۸۱۷۵	۱	زمان روشنی پالس (μs)
۰/۰۰۹	۱۰/۳۸	۰/۰۰۳۱۰۱	۰/۰۰۳۱۰۱	۱	زمان خاموشی پالس (μs)
۰/۰۱۳	۹/۱۵	۰/۰۰۲۷۳۳	۰/۰۰۲۷۳۳	۱	مربعی
۰/۰۱۳	۹/۱۵	۰/۰۰۲۷۳۳	۰/۰۰۲۷۳۳	۱	I (A) * I (A)
۰/۰۰۲	۱۲/۷۰	۰/۰۰۳۷۹۶	۰/۰۰۷۵۹۲	۲	تعاملی
۰/۰۰۴	۱۴/۱۴	۰/۰۰۴۲۲۶	۰/۰۰۴۲۲۶	۱	I (A) * Ton (μs)
۰/۰۲۳	۷/۱۷	۰/۰۰۲۱۴۲	۰/۰۰۲۱۴۲	۱	I (A) * Toff (μs)
		۰/۰۰۰۲۹۹	۰/۰۰۲۹۸۹	۱۰	خطا
۰/۰۸۶	۱۰/۹۶	۰/۰۰۰۳۶۵	۰/۰۰۲۹۲۲	۸	عدم برازش
		۰/۰۰۰۰۳۳	۰/۰۰۰۰۶۷	۲	خطای خالص
			۰/۰۲۵۳۹۶	۱۶	مجموع

$$EWR = 0.001175 \times I^2 - 0.000051 \times I \times T_{on} + 0.000371 \times I \times T_{off} - 0.0195 \times I + 0.000269 \times T_{on} - 0.00234 \times T_{off} + 0.0907 \quad (2)$$

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در ابتدا با افزایش جریان تخلیه، سایش الکتروود ابزار مقداری کاهش و پس‌از آن با افزایش جریان تخلیه، نرخ سایش الکتروود ابزار به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. پس از ذوب شدن سطح قطعه کار در اثر تخلیه الکتریکی صورت گرفته، با ادامه اعمال ولتاژ و جریان، کانال یونیزه گشادتر می‌شود و سطح نقطه ذوب بیشتر می‌شود، اما این ولتاژ و جریان را تا آخر نمی‌توان ادامه داد چراکه با ادامه جریان، آن نقطه هر چه بیشتر داغ‌تر می‌شود و به کربن‌ها فرصت کافی برای سوختن می‌رسد و این کربن‌ها در اثر فشار حاصل و به دلیل مرطوب بودن کانال یونیزه به هم می‌چسبند

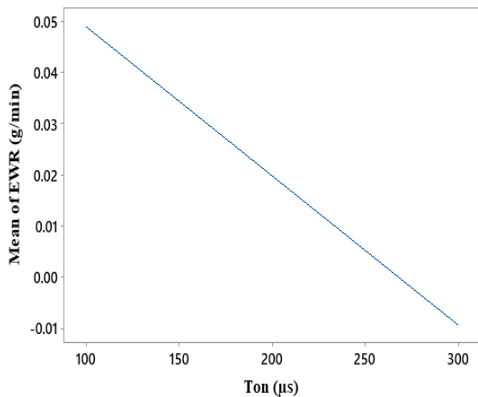
I = جریان پیک تخلیه (آمپر)

T_{on} = زمان روشنی پالس (میکروثانیه)

T_{off} = زمان خاموشی پالس (میکروثانیه)

۳-۲-۱- اثر جریان تخلیه بر روی نرخ سایش الکتروود ابزار

همان‌طور که قابل پیش‌بینی بود، جریان پیک تخلیه بیشترین اثرگذاری را بر روی نرخ سایش ابزار خواهد داشت. این عامل کاملاً مشابه پیشینه علمی ماشین کاری تخلیه الکتریکی است.

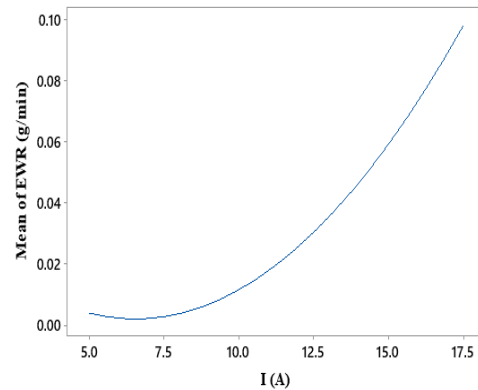


شکل ۶ نمودار اثر زمان روشنی پالس بر روی نرخ سایس ابزار

۳-۲-۳- اثر زمان خاموشی پالس بر روی نرخ سایس الکتروود ابزار

در شکل ۷ نمودار تأثیرات زمان خاموشی پالس بر روی نرخ سایس الکتروود ابزار آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش زمان خاموشی پالس، نرخ سایس الکتروود ابزار نیز افزایش می‌یابد و رابطه این دو عامل باهم به صورت خطی و مستقیم است. ابزار مسی از ذرات کاربید سیلیسیوم موجود در کامپوزیت زمینه منیزیومی، بسیار نرم‌تر می‌باشد. در زمان خاموشی پالس، این ذرات در گپ دهانه ماشین‌کاری معلق شده و با توجه به فشار و دمای بالای به وجود آمده در اثر تخلیه‌های صورت گرفته، در زمان خاموشی پالس با سرعت به سمت نقاط کم‌فشار به حرکت درمی‌آیند. در این زمان در اثر برخوردی به وجود آمده بین ذرات کاربید سیلیسیوم و سطح ابزار، سایس ابزار بیشتر می‌شود. پس بهتر است، به‌منظور کمتر شدن نرخ سایس الکتروود ابزار، از زمان‌های خاموشی پالس کمتری در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی استفاده نمود.

و حال الکترون‌ها به‌جای حرکت از طریق کانال یونیزه از طریق این توده کربن منتقل می‌شوند و علاوه بر اینکه بر ذوب بیشتر کمک نمی‌کند بلکه موجب افزایش سایس ابزار شده و همچنین موجب بروز عارضه بسیار بدی بنام (ARC) یا جوشکاری می‌شود؛ بنابراین رابطه نرخ سایس ابزار با جریان تخلیه به‌صورت نمایی است.

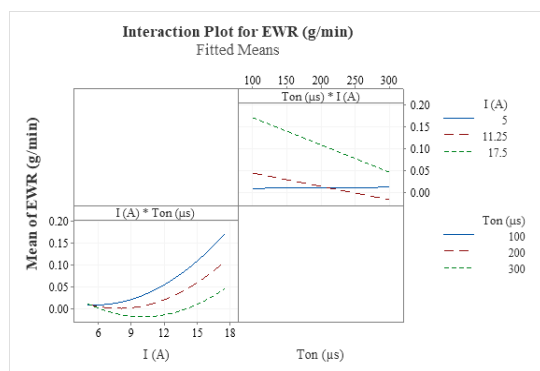


شکل ۵- نمودار اثر جریان تخلیه بر روی نرخ سایس ابزار

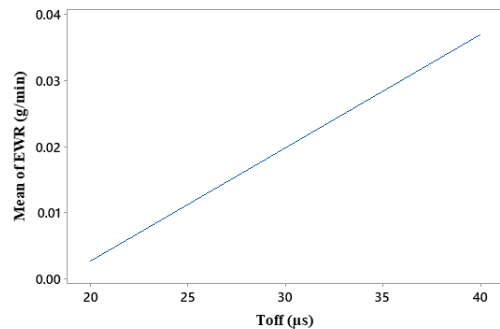
۳-۲-۳- اثر زمان روشنی پالس بر روی نرخ سایس الکتروود ابزار

زمان روشنی پالس، پارامتر بعدی است که بر روی نرخ سایس الکتروود ابزار تأثیرگذار است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش زمان روشنی پالس، نرخ سایس ابزار کاهش می‌یابد. با طولانی شدن زمان روشنی پالس، کانال پلاسما منبسط شده و قطر آن افزایش می‌یابد و بخشی از انرژی، به ماده دی‌الکتریک منتقل شده و براده برداری صورت نمی‌گیرد، بنابراین سایس ابزار نسبت به زمان ماشین‌کاری کاهش پیدا می‌کند؛ همچنین با افزایش زمان روشنی پالس آلودگی در مایع دی‌الکتریک افزایش یافته و جرقه در محل تمرکز آلودگی‌ها رخ داده و بخش اعظمی از انرژی صرف ذوب شدن آلودگی‌ها می‌شود و سایس ابزار کاهش پیدا می‌کند. رابطه زمان روشنی پالس و نرخ سایس الکتروود ابزار به‌صورت خطی است و کمترین میزان سایس ابزار، در زمان روشنی پالس ۳۰۰ میکروثانیه رخ خواهد داد.

میکروثانیه، با افزایش جریان تخلیه، میزان سایش الکتروود ابزار ابتدا کمتر می‌شود و سپس افزایش می‌یابد؛ اما در زمان‌های روشنی پالس کمتر، روند کاهش سایش الکتروود ابزار با افزایش جریان تخلیه، کمتر می‌شود. به طوری که در زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه، با افزایش جریان تخلیه، میزان سایش الکتروود ابزار دیگر کاهش نمی‌یابد. با افزایش جریان پیک تخلیه، به دلیل افزایش چگالی جریان و ایجاد جرقه‌های پراثرتری، از سطح ابزار نسبت به قطعه کار ذوب می‌شود و با افزایش جریان پیک تخلیه، خوردگی ابزار نیز افزایش می‌یابد. در نقطه مقابل با افزایش زمان روشنی پالس، خوردگی ابزار روند نزولی دارد. دلیل این مسئله را می‌توان این‌طور بیان نمود که در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با قطبیت ابزار مثبت، هنگامی که مدت زمان روشنی پالس کم باشد، مکانیزم غالب جهت براده برداری حرکت الکترون‌ها از سوی قطب منفی (قطعه کار) به طرف قطب مثبت (ابزار) می‌باشد که موجب خوردگی بیشتر ابزار در این شرایط می‌شود که با افزایش زمان روشنی پالس، به دلیل گسترش شعاع کانال پلاسما، حرکت یون‌های مثبت از طرف ابزار (قطب مثبت) به طرف قطعه کار (قطب منفی) راحت‌تر شده و در هنگام برخورد یون‌های مثبت، مکانیزم غالب براده برداری می‌باشد و این عامل باعث کاهش نرخ خوردگی ابزار می‌شود [۱۹]. لذا می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که برای به دست آوردن نرخ‌های براده برداری بیشتر (در جریان تخلیه بالاتر) هم‌زمان با کاهش نرخ سایش ابزار بهتر است، زمان روشنی پالس را بیشتر در نظر گرفت.



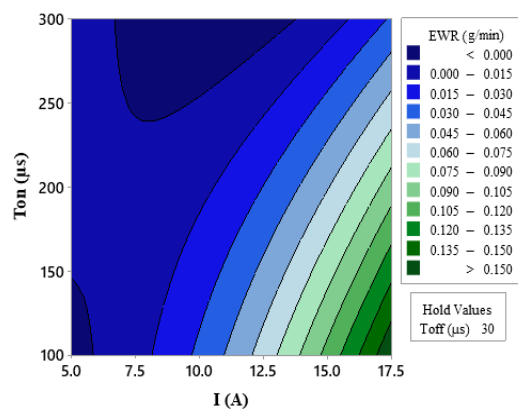
شکل ۹- نمودار اثر تعاملی زمان روشنی پالس و جریان تخلیه بر روی نرخ سایش الکتروود ابزار



شکل ۷- اثر زمان خاموشی پالس بر روی نرخ سایش ابزار

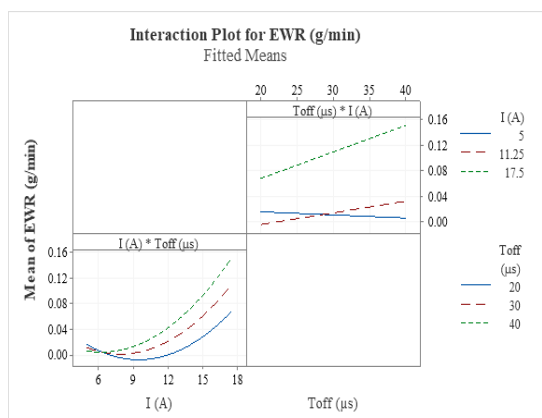
۳-۲-۴- اثر تعاملی جریان تخلیه و زمان روشنی پالس بر روی نرخ سایش ابزار

با در نظر گرفتن نمودار برهم‌کنش جریان تخلیه و زمان روشنی پالس مشاهده می‌شود که هم‌زمان با کاهش جریان تخلیه و افزایش زمان روشنی پالس، نرخ سایش الکتروود ابزار، بیشترین کاهش را خواهد داشت که با توجه به اثرات جداگانه این دو پارامتر بر روی نرخ سایش ابزار، این امر مورد انتظار بود. در نمودار شکل ۸، زمان خاموشی پالس بر روی ۳۰ میکروثانیه ثابت در نظر گرفته شده است.



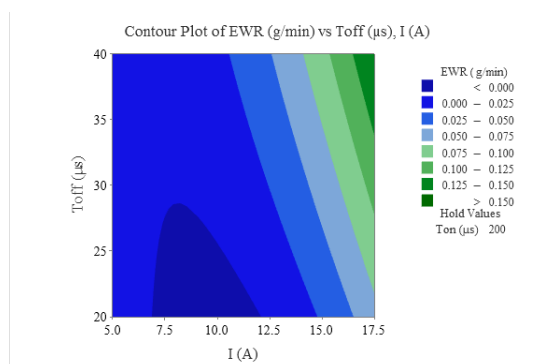
شکل ۸- نمودار اثر تعاملی زمان روشنی پالس و جریان تخلیه

همان‌طور که در نمودار شکل ۹ مشاهده می‌شود، در جریان‌های پایین، افزایش زمان روشنی پالس منجر به کاهش نرخ سایش ابزار نخواهد شد؛ اما با افزایش جریان تخلیه، اثر زمان روشنی پالس نیز بیشتر خواهد شد و هرچه جریان بیشتر شود این تأثیر افزایش بیشتری خواهد یافت؛ همچنین در این نمودار مشاهده می‌شود که در زمان روشنی پالس ۳۰۰



شکل ۱۰- نمودار اثر تعاملی جریان تخلیه و زمان خاموشی پالس بر روی نرخ سایش الکتروود ابزار

اگر نرخ سایش الکتروود ابزار نسبت به تغییرات جریان تخلیه و زمان خاموشی ابزار سنجیده شود، مشاهده می‌گردد که با کم کردن زمان خاموشی پالس و همچنین در نظر گرفتن جریان‌های تخلیه کمتر، سایش الکتروود ابزار نیز کاهش خواهد یافت. این موضوع را می‌توان در نمودار برهم‌کنش این دو فاکتور در شکل ۱۱ مشاهده کرد. در این نمودار زمان روشنی پالس بر روی ۲۰۰ میکروثانیه ثابت در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۱- نمودار کانتور اثر جریان تخلیه و زمان خاموشی پالس بر روی نرخ سایش الکتروود ابزار

۳-۳- بهینه‌سازی فرآیند با توجه به نرخ سایش الکتروود ابزار

به منظور دستیابی به کمترین نرخ سایش الکتروود، بهینه‌سازی فرآیند با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب صورت پذیرفته است (شکل ۱۲). نرخ سایش ابزار، در زمان روشنی پالس ۳۰۰

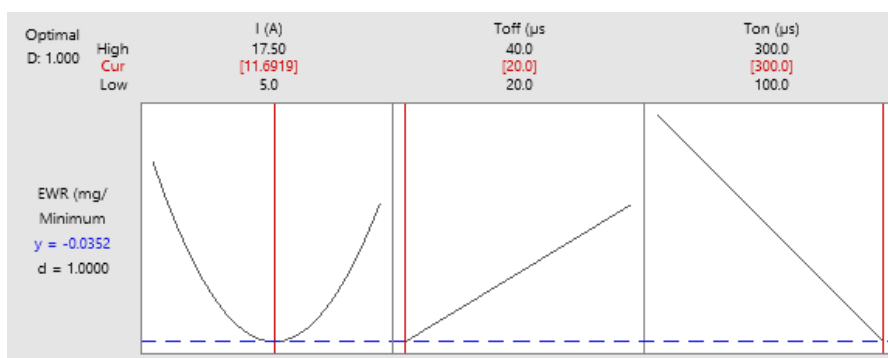
۳-۲-۵- اثر تعاملی جریان تخلیه و زمان خاموشی

پالس بر روی نرخ سایش الکتروود ابزار

با بررسی اثر تعاملی جریان تخلیه و زمان خاموشی پالس بر روی نرخ سایش الکتروود ابزار در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که در زمان‌های خاموشی پالس کمتر، نرخ سایش الکتروود ابزار با افزایش جریان تخلیه کمتر خواهد بود؛ اما هرچه زمان خاموشی پالس بیشتر در نظر گرفته شود، میزان افزایش نرخ سایش الکتروود ابزار نسبت به افزایش جریان تخلیه، بیشتر می‌شود. از سوی دیگر در جریان‌های پایین‌تر، با افزایش زمان خاموشی پالس، نرخ سایش ابزار کاهش می‌شود؛ اما در جریان‌های تخلیه بالاتر، هرچه زمان خاموشی پالس بیشتر در نظر گرفته شود، نرخ سایش الکتروود ابزار نیز بیشتر می‌شود. با افزایش جریان پیک تخلیه، حجم یون‌های مثبت و منفی به شدت افزایش یافته و در برخورد با سطح قطعه‌کار و ابزار، گرمای شدیدی به وجود می‌آورد و در صورتی که این گرما مؤثر باشد، همان نقطه از قطعه‌کار ذوب می‌شود. این گرما مایع دی الکتریک را بخار کرده و فشاری را بین الکتروود و قطعه‌کار به وجود می‌آورد، اما این فشار بسیار کوچک‌تر از آنی است که بتواند در قطعه‌کار یا ابزار حرکت ایجاد کند، اما این فشار در واحد سطح مقدار بسیار بزرگی است و موجب سایش ابزار می‌شود. مایع سرد به سطح مذاب حرارت بالا می‌رسد و مذاب بسیار سرد می‌شود. با خاموش شدن پالس، مایع سرد به سطح مذاب با حرارت بالا می‌رسد و مذاب بسیار سرد می‌شود. این سرد شدن شدید مذاب را متلاشی می‌کند که به صورت آتش‌فشانی فوران می‌کند و از محل دور می‌شود. در حین دور شدن مواد برداشته‌شده از سطح قطعه‌کار، این مواد بر روی سطح ابزار سایش ایجاد کرده و در نتیجه در زمان‌های خاموشی پالس طولانی‌تر، سایش ایجادشده بر روی سطح ابزار بیشتر خواهد بود.

که نرخ سایش الکتروود بسیار ناچیز به اندازه 0.0001 گرم بر دقیقه بدست آمد. نتایج حاصل از بهینه سازی فرایند در جدول ۵ آورده شده است.

میکروثانه، جریان تخلیه $11/69$ آمپر و زمان خاموشی 20 میکروثانه، به کمترین میزان خود خواهد رسید. به منظور کنترل نتایج به دست آمده، آزمایش تجربی با استفاده از پارامترهای ورودی حاصل از بهینه سازی فرایند، انجام گردید



شکل ۱۲- نمودار برشی حاصل از بهینه سازی نرخ سایش ابزار

جدول ۵- نتایج حاصل از آزمایش تجربی بهینه سازی نرخ سایش الکتروود

نرخ سایش ابزار (g/min)	زمان روشنی پالس (μs)	زمان خاموشی پالس (μs)	جریان پیک تخلیه (A)	بهینه سازی
0.0001	300	20	11/69	روش مطلوبیت

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر و بررسی نمودارها و جداول آن، نتایج کلی این تحقیق را می توان به صورت ذیل بیان کرد:

جریان پیک تخلیه، زمان روشنی پالس، اثر تعاملی زمان روشنی پالس و جریان پیک تخلیه و اثر تعاملی جریان تخلیه و زمان خاموشی پالس هستند. با افزایش جریان پیک تخلیه، سایش الکتروود ابزار مقداری کاهش و پس از آن با افزایش جریان تخلیه، نرخ سایش الکتروود ابزار به صورت نمایی افزایش می یابد. کمترین نرخ سایش الکتروود در جریان پیک تخلیه $11/69$ آمپر خواهد بود و بعد از آن با افزایش جریان پیک تخلیه، نرخ سایش الکتروود افزایش می یابد.

با افزایش زمان روشنی پالس، نرخ سایش ابزار کاهش می یابد. رابطه زمان روشنی پالس و نرخ سایش الکتروود ابزار به صورت خطی است و کمترین

- 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 کامپوزیت های زمینه فلزی و مشکلات موجود در ماشین کاری سنتی آن ها و همچنین و نرخ پایین سایش ابزار در این فرایند، استفاده از این روش ماشین کاری می تواند مناسب باشد.
- در بین پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق، عوامل اثرگذار بر روی نرخ سایش ابزار به ترتیب

[6] Hourmand, M., Farahany, S., Sarhan, A. A., & Noordin, M. Y. (2015). Investigating the electrical discharge machining (EDM) parameter effects on Al-Mg 2 Si metal matrix composite (MMC) for high material removal rate (MRR) and less EWR-RSM approach. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 77, 831-838.

[۷] حاج حسینی, مختاریان, رحیمی, مسعودی, & بهنام. (۲۰۲۲). بررسی و بهینه‌سازی تأثیر پارامترهای ورودی بر نرخ براده برداری, نرخ سایش ابزار و زبری سطح در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نانو کامپوزیت A۲۵۶ تقویت‌شده با آلومینا. فرآیندهای نوین در مهندسی مواد, ۱۶(۳), ۱-۱۲.

[8] Lakshmanan, P., Kumanan, G., Arunkumar, L., & Amith, S. C. (2021). Experimental investigations of material removal rate on Mg/SiCp-flyash hybrid metal matrix composites by electrical discharge machining. *Mater. Today: Proceedings*, 46, 986-990.

[9] Singh, B., Kumar, J., & Kumar, S. (2016). Investigation of the tool wear rate in tungsten powder-mixed electric discharge machining of AA6061/10% SiCp composite. *Mater. Manuf. Process.* 31(4), 456-466.

[10] Muniyath, S., & Rathinasuriyan, C. (2023). Effect of dielectric medium on electro-discharge machining of aluminium metal matrix composites. *Mater. Today: Proceedings*.

[11] Vahdati, M. (2020). 'Statistical analysis and optimization of parameters affecting the hardness of butt joint cross-section of Al7075 produced by FSW and SFSW using RSM and desirability approach', *J. Fluid Mech.* 10(4), pp. 165-180. doi: 10.22044/jsfm.2020.9476.3136

[12] Ponappa, K., Aravindan, S., Rao, P. V., Ramkumar, J., & Gupta, M. (2010). The effect of process parameters on machining of magnesium nano alumina composites through EDM. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 46, 1035-1042.

[13] Mostafapor, Amir, and Hossein Vahedi (2019) "Wire electrical discharge machining of AZ91 magnesium alloy; investigation of effect of process input parameters on performance characteristics." *Mater. Res. Express.* 1.1: 015005. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ab26c8>

[14] Vahdati, M., Moradi, M. (2019). 'Statistical Analysis of Parameters Affecting the Mechanical Properties of Surface Composite Al7075/Al2O3 Produced by Friction Stir Processing Using Response Surface Methodology', *J. Fluid Mech.* 9(3), pp. 81-94. doi: 10.22044/jsfm.2019.8826.2997

[15] Douglas C. Montgomery (2011) *Design and analysis of experiments*, 7th Edition, pp. 457-460, New York: John Wiley and Son.

[16] Hsieh CS, Zhu H, Wei TY, Chung ZJ, Yang WD, Ling YH (2008) Applying the experimental statistical method to deal the preparatory conditions of nanometric-sized TiO2 powders from a two-

میزان سایش ابزار, در زمان روشنی پالس ۳۰۰ میکروثانیه رخ خواهد داد.

- با افزایش زمان خاموشی پالس, نرخ سایش الکتروود ابزار نیز افزایش می‌یابد و رابطه این دو عامل باهم به صورت خطی و مستقیم است. کمترین نرخ سایش الکتروود در زمان خاموشی پالس ۲۰ میکروثانیه می‌باشد.
- با بهینه‌سازی فرایند به منظور دستیابی به کمترین نرخ سایش ابزار, پارامترهای ورودی به صورت: زمان روشنی پالس ۳۰۰ میکروثانیه, جریان پیک تخلیه ۱۱/۶۹ آمپر و زمان خاموشی پالس ۲۰ میکروثانیه به دست آمده است.

۵- تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی سازمان صنایع کوچک و شرکت شهرک‌های صنعتی ایران انجام شده است که بدین وسیله کمال تشکر و قدردانی را از ایشان به عمل می‌آوریم.

۶- مراجع

[1] Gore, A. S., & Patil, N. G. (2018). Wire electro discharge machining of metal matrix composites: A review. *Procedia Manuf.*, 20, 41-52.

[2] Velmurugan, C., Subramanian, R., Thirugnanam, S., & Ananadavel, B. (2011). Experimental investigations on machining characteristics of Al 6061 hybrid metal matrix composites processed by electrical discharge machining. *Inter. J. Eng. Sci. Technol.* 3(8), 87-101.

[3] Z. Zhong and N. P. Hung (2002) "Grinding of alumina/aluminum composites," *J. Mater. Process. Technol.* vol. 123, no. 1, pp. 13-17.

[4] A. Srivastava, Sunil Kumar Yadav and D.K. Singh (2020) 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.11.235>

[۵] مسعودی, بهنام, & دانشمند. (۲۰۱۷). بررسی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه‌الکتریکی, بر روی ماده مرکب پایه آلومینیوم ۲۰۲۴ با استفاده از تحلیل مقدار کل نرمال شده پارامترها (TNQL) و نسبت سیگنال به نویز (S/N). فرآیندهای نوین در مهندسی مواد, ۱۱(۱), ۹۱-۱۱۰.

- low carbon steels using response surface methodology, J. Mater. Sci. Vol. 31, pp. 3845–3851.
- [۱۹] فرید ایلیچی, آزادی مقدم, مسعود, جمالی, & کلاهان. (۲۰۱۵, September). مقایسه عملکرد الگوریتم های PSO و SA در بهینه سازی پارامترهای تنظیمی فرآیند ماشینکاری اسپارک فولاد ابزار AISI2312. In کنفرانس ملی مکانیک-مواد و فناوری های پیشرفته.
- emulsion process, J. Eur. Ceram. Soc. Vol. 28, pp. 1177–1183.
- [17] Hou TH, Su CH, Liu WL (2007) Parameters optimization of a nano-particle wet milling process using the taguchi method response surface method and geneticalgorithm, journal of Powder Technol, Vol. 173, pp. 153-162.
- [18] A. Nekahi, K. Dehghani (2010) Modeling the thermo mechanical effects on baking behavior of
-