



تأثیر پارامترهای فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی روی نرخ براده‌برداری در ماشین-کاری کامپوزیت A369-SiC_p به روش تجربی

حسین کشاورز^{۱*}، محمد مراد شیخی^۲، نصرالله بنی مصطفی عرب^۳، رضا نیکوی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استادیار، ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استادیار، ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۴- کارشناسی ارشد، ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۳۶-۱۶۷۸۵، h.keshavarz@srttu.edu

چکیده

در تحقیق حاضر از فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی برای براده‌برداری از کامپوزیت پایه آلومینیومی A369-SiC_p استفاده شده است. اثر چهار پارامتر شدت جریان، ولتاژ گپ، زمان روشنی و زمان خاموشی یالس بر نرخ براده‌برداری مورد بررسی قرار گرفت. به منظور کاهش تعداد آزمایشات و هزینه، روش سطح پاسخ جهت طراحی آزمایشات با در نظر گرفتن چهار پارامتر ذکر شده در سه سطح به کار گرفته شد. بهینه‌سازی پارامترها جهت بدست آوردن بیشترین میزان نرخ براده‌برداری انجام شد. بر اساس آنالیز واریانس صورت گرفته در تحقیق موثرترین پارامترها برافزایش نرخ براده‌برداری، پارامترهای شدت جریان و زمان روشنی یالس بوده و همچنین نتایج تحقیق نشان داد که بیشترین نرخ براده‌برداری در حالت بهینه حدود ۰/۲۱۸۹ gr/min را می‌توان در شدت جریان ۲۰ آمپر، ولتاژ ۶۹/۶۹۷۰ ولت، زمان روشنی یالس ۴۰۰ و زمان خاموشی یالس ۳۰۰ میکروثانیه بدست آورد. کلید واژه‌ها: ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، کامپوزیت پایه آلومینیومی، روش سطح پاسخ، نرخ براده‌برداری، آنالیز واریانس

An Experimental study to investigate the effect of the machining parameters on MRR in machining of A369-SiC_p composite by EDM

Hosein keshavarz*, Mohammad Morad sheikhi, Nasrollah Bani Mostafa Arab, Reza Nikoi

Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

* P.O.B. 167 85-136, Tehran, Iran, h.keshavarz@srttu.edu

ABSTRACT

In the present study, the electrical discharge machining (EDM) process is used for aluminum matrix composite A369-SiC_p. The effect of four process parameters such as peak current, gap voltage, pulse on and off time on material removal rate (MRR) is investigated. To reduce the number of tests and cost, the response surface methodology of design of experiments is employed by considering the above four parameters at three levels. These parameters were also optimized to obtain the maximum MRR. Based on the analysis of variance done in this study, the most effective parameters on MRR were peak current and pulse on time. Also, the results showed that the maximum MRR about 0.2189 gr/min was obtained when peak current, gap voltage, pulse on time and pulse off time were 20A, 69.697V, 400 and 300 micro-seconds, respectively.

Keywords: Aluminum Matrix Composite, Analysis of Variance, EDM, MRR, Response Surface Methodology.

۱- مقدمه

در بین کامپوزیت‌های زمینه فلزی، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی که دارای ذرات سرامیکی به عنوان تقویت کننده می‌باشند، ساختار جالبی دارند زیرا خواص مکانیکی برتر زمینه مانند انعطاف‌پذیری و چقرمگی، با استحکام بالای ذرات سرامیکی ترکیب می‌شوند. در نتیجه این کامپوزیت‌ها به دلیل خواص ویژه از جمله استحکام، مدول الاستیک، مقاومت به سایش بالا، مقاومت به خوردگی خوب و دمای استفاده بالاتر آن نسبت به فلزات و آلیاژهای تقویت نشده‌ی مرسوم، مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. به‌عنوان نمونه، ذرات SiC_p دارای مدول الاستیک بالا می‌باشند و در صورتی که فصل مشترک مناسبی بین ذرات SiC_p و زمینه‌ی آلومینیومی ایجاد شود، می‌تواند باعث افزایش استحکام کامپوزیت گردد [۱، ۲].

کامپوزیت‌های زمینه فلزی به روش‌های مختلفی ساخته می‌شوند از جمله می‌توان به آلیاژسازی مکانیکی، متالورژی پودر، ایجاد باند نفوذی، ریخته‌گری

کامپوزیت‌ها به طور مداوم در حال جایگزینی مواد با ساختارهای سنتی هستند. مواد کامپوزیتی شامل حداقل دو فاز متفاوت از لحاظ خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی هستند که به منظور فراهم کردن خصوصیتی که به وسیله‌ی هیچ یک از فازها به طور مستقل ایجاد نمی‌شود، در هم توزیع شده‌اند. زمینه‌ی کامپوزیت می‌تواند فلز، پلیمر و یا سرامیک باشد. فاز دوم ممکن است به‌صورت پیوسته یا ناپیوسته باشد که فاز پیوسته به صورت الیافی یا لایه‌ای و فاز ناپیوسته به‌صورت الیاف کوتاه، ویسکرها و یا ذرات می‌باشد. توسعه کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات از مهمترین ادعاهای در زمینه‌ی مواد پیشرفته قلمداد شده است [۱].

1. MMC (Metal Matrix Composite)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

H. keshavarz, M.M. sheikhi, N. Bani Mostafa Arab, R. Nikoi, An Experimental study to investigate the effect of the machining parameters on MRR in machining of A369-SiC_p composite by EDM, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp. 387-392, 2015 (in Persian)

در این تحقیق از تکنیک باکس بنکن^۳ و روش سطح پاسخ جهت بسط یک مدل تخمینی برای پیش‌بینی تأثیر پارامترهای شدت جریان، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و ولتاژ گپ بر میزان نرخ براده برداری روی کامپوزیت SiC -A369-10% استفاده شده است. ضمن این‌که برای به دست آوردن بیشترین نرخ براده برداری پارامترهای فوق بهینه‌سازی می‌شوند.

۲- مواد و روش آزمایش

۲-۱- تهیه مواد و ساخت کامپوزیت

در این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم A369 به عنوان فاز زمینه استفاده شده است. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۱ آمده است. از پودر SiC با درجه خلوص ۷۹/۵٪ و اندازه متوسط ۵۰ میکرون متر به‌عنوان فاز تقویت کننده استفاده شده است. این ذرات را در دمای حدود ۱۱۰۰ درجه سانتی-گراد به مدت ۲ ساعت عملیات حرارتی می‌کنند، سپس از سرد الکتریکی با مش ۱۰۰ عبور داده تا ذرات کاملاً از هم جدا شوند.

برای تولید کامپوزیت از روش ریخته‌گری هم‌زدنی^۴ استفاده می‌شود. در این روش ابتدا شمش آلومینیوم موردنظر توزین شده را درون کوره حرارتی قرار داده و پس از آماده شدن مذاب هم‌زمان گاز آرگون به سطح مذاب دمیده می‌شود. سپس پروانه گرافیتی به‌صورتی که حدوداً ۶/۶۵ مذاب زیر آن قرار گیرد به مدت تقریباً ۵ دقیقه با سرعت ۷۵۰ دور بر دقیقه می‌چرخد. آن گاه پودر کاربید سیلیسیم موردنظر را که در دمای ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم شده، با دبی ۵ تا ۱۰ گرم در دقیقه به مذاب اضافه می‌کنند. پس از آن پروانه گرافیتی با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۵ تا ۲۰ دقیقه درون مذاب به صورتی قرار می‌گیرد که ۷/۳۵ مذاب زیر پروانه باشد تا هم‌زمان گرافیتی دوغاب کامپوزیتی را به خوبی مخلوط کند. شکل ۱ تجهیزات به کار رفته در تولید کامپوزیت به روش ریخته‌گری هم‌زدنی را نشان می‌دهد. مذاب کامپوزیتی را درون قالب از جنس فولاد ساختمانی دو تکه، با سطح جدایش عمودی به قطر داخلی ۴۱ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر که از قبل تا دمای ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم شده است می‌ریزند. شکل ۲ الف بیات‌های کامپوزیتی ریخته‌گری شده در قالب فازی را نشان می‌دهد.

در این تحقیق بیات‌ها به کمک ابزار برشی PCD 1600 روی دستگاه تراش به قطر ۴۰ و طول ۱۵ میلی‌متر تقسیم شده‌اند (شکل ۲ ب). پس از عملیات سنباده‌زنی و پولیش، جهت مشاهده ریز ساختار نمونه توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۵ VEGA TESCAN HIVAC، سطح قطعه به مدت ۲۰ تا ۲۵ ثانیه توسط محلول HF ۵٪ به همراه آب مقطر اچ شدند. شکل ۳ تصویر میکروسکوپی سطح کامپوزیت SiC -A369-10% را نشان می‌دهد.

۲-۲- طراحی آزمایش

پس از انجام ماشین کاری تخلیه الکتریکی روی چند نمونه از کامپوزیت ساخته شده محدوده پارامترهای تنظیمی جهت طراحی آزمایشات مشخص شد. در این تحقیق چهار فاکتور قابل کنترل بر انجام فرآیند (جریان، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و ولتاژ گپ) شناسایی شدند.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ زمینه برحسب درصد وزنی

Si	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn	Ni	Ti
۱۱/۷	۰/۴	۰/۱	۰/۴	۰/۴	۰/۱	۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۱

3.B ox: Behnken
4. Stir Casting
5. SEM (scanning Electron Micro scope)

و غیره اشاره کرد. در کامپوزیت‌های زمینه فازی، روش‌های ریخته‌گری به دلیل سهولت تولید و هزینه‌ی پایین‌تر، بیش از سایر روش‌ها در تولید انبوه قطعات صنعتی مورد توجه قرار گرفته است [۳،۲].

کاربرد کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات SiC به دلیل قابلیت ماشین کاری ضعیف، عدم دسترسی به کیفیت سطح مطلوب و سایش بیش از اندازه ابزار برشی محدود شده است [۴]. با توجه به سختی و استحکام بالاتر مواد تقویت کننده، ماشین کاری سنتی مواد کامپوزیتی زمینه فازی با مشکلاتی روبه‌رو است. در این میان فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی^۱ روش قابل توجهی برای ماشین کاری این‌گونه از کامپوزیت‌ها است. از آن‌جایی‌که در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیازی به انرژی مکانیکی نیست، نرخ براده برداری تحت تأثیر ویژگی‌های مواد از جمله سختی، استحکام و چقرمگی و غیره قرار نمی‌گیرد. مواد با قابلیت ماشین کاری ضعیف مثل کاربیدهای تنگستن سماتنه شده و کامپوزیت‌ها را می‌توان بدون مواجه شدن با مشکل خاصی با فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی براده برداری کرد [۶،۵].

تحقیقات انجام گرفته در مورد ماشین کاری تخلیه الکتریکی روی کامپوزیت‌های زمینه فازی تقویت شده با ذرات گزارش شده است. جورج و همکارانش تأثیر سه پارامتر را در دو سطح در ماشین کاری تخلیه الکتریکی روی کامپوزیت کربن-کربن مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش داده‌اند که شدت جریان و زمان روشنی پالس بیشترین تأثیر را بر میزان نرخ براده برداری و سایش الکترود دارد [۷]. کارتیکیان و همکارانش تأثیر پارامترهای شدت جریان، زمان روشنی پالس و افزایش درصد ذرات سیلیکون کارباید را در ماشین کاری با تخلیه الکتریکی کامپوزیت (آلومینیوم-سیلیکون کارباید) بررسی کرده‌اند. آن‌ها گزارش داده‌اند که با تغییر در پارامترهای فوق مقدار نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح تغییر می‌کند [۸]. در تحقیقی تأثیر درصد حجمی SiC و فشار مایع شست‌وشو به همراه سایر پارامترها در ماشین کاری با تخلیه الکتریکی کامپوزیت SiC -Al-10% مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق مشخص شد که با افزایش درصد SiC مقدار نرخ براده برداری کاهش، نرخ سایش ابزار و مقدار زبری سطح افزایش می‌یابد [۹،۱۰]. موهان و همکارانش تأثیر پارامترهای مختلف را در سوراخ کاری ماشین کاری تخلیه الکتریکی روی کامپوزیت‌های SiC -Al6025 و Al- Al_2O_3 بررسی کرده و گزارش داده‌اند که افزایش سرعت دوران الکترود باعث افزایش نرخ براده برداری، کاهش نرخ سایش ابزار و بهتر شدن صافی سطح می‌شود [۱۱،۱۲]. هارمش کومار و همکارانش ضمن انجام یک مطالعه تجربی روی پارامترهای ماشین کاری کامپوزیت SiC -Al-10% نشان داده‌اند که مخلوط کردن پودر سیلیکون در مایع دی‌الکتریک ماشین کاری تخلیه الکتریکی نرخ براده برداری را افزایش داده و میزان زبری سطح را کاهش می‌دهد [۱۳].

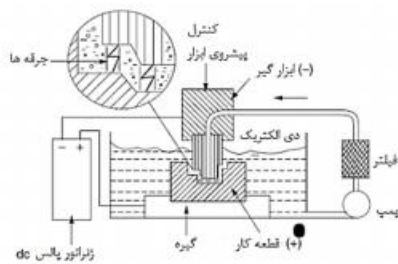
روش سطح پاسخ^۱ یک تکنیک آنالیز آماری است که در حوزه‌های مختلف برای مشخص کردن تغییرات منطقی در پاسخ و برقراری ارتباط بین پاسخ و مقادیر ورودی استفاده می‌شود [۱۴]. در این روش یک سری از آزمایشات برای اندازه گیری پاسخ معین طراحی می‌شود که در آن بر اساس یک مدل ریاضی بسط داده شده، ارتباط بین پاسخ و مقادیر ورودی مشخص می‌شود. در این مدل ریاضی تمامی فاکتورهای خطی، مربع و کنش-واکنش بین پارامترها برای پیش‌بینی روی مقدار پاسخ تأثیرگذار است [۱۵].

1. EDM (Electrical Discharg Ma chining)
2. RSM (Response Surface Method)

۲-۳- روش انجام آزمایش

مدل ماشین تخلیه الکتریکی مورد استفاده از نوع ZNC ۴۰۴ شرکت تهران اکرام، الکتروود مسی مورد مصرف به قطر ۱۰ میلی‌متر با درجه خلوص ۹۹/۹٪ و مایع شست و شو از نوع نفت سفید تجاری می‌باشد. شکل ۴ طرح ساده ماشین تخلیه الکتریکی را نشان می‌دهد. جهت توزین قطعه از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم، استفاده شده است. زمان ماشین کاری همه قطعات ۱۵ دقیقه و سایر شرایط ماشین کاری در تمام آزمایشات یکسان می‌باشد. نرخ براده برداری از اختلاف وزن قطعات، قبل (W_{j0}) و بعد از ماشین کاری (W_{j1}) مطابق رابطه (۱) به دست می‌آید. در جدول ۳ نرخ براده برداری به دست آمده از آزمایشات به عنوان پاسخ آن‌ها نشان داده شده است.

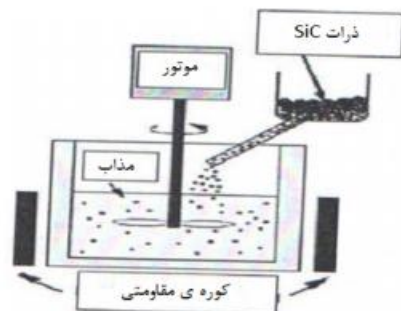
$$MRR = \frac{W_{j0} - W_{j1}}{t} \quad (1)$$



شکل ۴ طرح ساده ماشین کاری تخلیه الکتریکی

جدول ۳ طرح اولیه و نرخ براده برداری در تمام آزمایشات

شماره آزمایش	$I(A)$	$V(V)$	$T_{on}(\mu s)$	$T_{off}(\mu s)$	$MRR(gr/min)$
۱	۸	۴۰	۳۰۰	۲۲۵	۰/۰۸۴۰
۲	۲۰	۴۰	۳۰۰	۲۲۵	۰/۱۴۴۰
۳	۸	۷۰	۳۰۰	۲۲۵	۰/۰۷۰۰
۴	۲۰	۷۰	۳۰۰	۲۲۵	۰/۱۴۵۲
۵	۱۴	۵۵	۲۰۰	۱۵۰	۰/۱۲۵۴
۶	۱۴	۵۵	۴۰۰	۱۵۰	۰/۱۴۹۵
۷	۱۴	۵۵	۲۰۰	۳۰۰	۰/۰۹۳۰
۸	۱۴	۵۵	۴۰۰	۳۰۰	۰/۱۸۲۹
۹	۸	۵۵	۳۰۰	۱۵۰	۰/۰۷۸۹
۱۰	۲۰	۵۵	۳۰۰	۱۵۰	۰/۱۵۴۵
۱۱	۸	۵۵	۳۰۰	۳۰۰	۰/۰۸۰۱
۱۲	۲۰	۵۵	۳۰۰	۳۰۰	۰/۱۴۲۲
۱۳	۱۴	۴۰	۲۰۰	۲۲۵	۰/۱۲۵۱
۱۴	۱۴	۷۰	۲۰۰	۲۲۵	۰/۰۸۷۵
۱۵	۱۴	۴۰	۴۰۰	۲۲۵	۰/۱۵۰۷
۱۶	۱۴	۷۰	۴۰۰	۲۲۵	۰/۱۷۲۵
۱۷	۸	۵۵	۲۰۰	۲۲۵	۰/۰۸۴۳
۱۸	۲۰	۵۵	۲۰۰	۲۲۵	۰/۱۰۲۳
۱۹	۸	۵۵	۴۰۰	۲۲۵	۰/۰۹۴۰
۲۰	۲۰	۵۵	۴۰۰	۲۲۵	۰/۲۰۲۹
۲۱	۱۴	۴۰	۳۰۰	۱۵۰	۰/۱۲۴۰
۲۲	۱۴	۷۰	۳۰۰	۱۵۰	۰/۱۲۴۱
۲۳	۱۴	۴۰	۳۰۰	۳۰۰	۰/۱۲۱۰
۲۴	۱۴	۷۰	۳۰۰	۳۰۰	۰/۱۲۶۱
۲۵	۱۴	۵۵	۳۰۰	۲۲۵	۰/۱۴۲۸
۲۶	۱۴	۵۵	۳۰۰	۲۲۵	۰/۱۴۲۷
۲۷	۱۴	۵۵	۳۰۰	۲۲۵	۰/۱۴۲۶



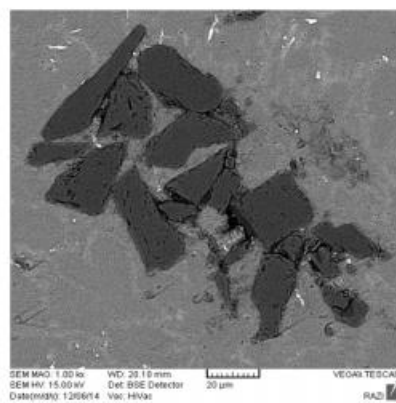
شکل ۱ تجهیزات به کار رفته در تولید کامپوزیت به روش ریخته‌گری همزدنی



الف

ب

شکل ۲ الف: بیلت کامپوزیت ریخته‌گری شده ب: ماشین کاری و برش کاری بیلت‌ها



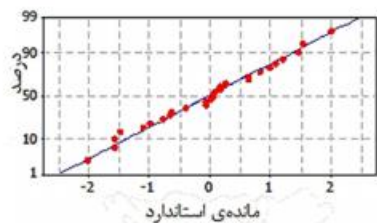
شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح کامپوزیت $A1369-10\%SiC_p$

هر کدام از فاکتورها نیز در سه سطح براساس روش باکس بنکن تعریف شدند. جدول ۲ پارامترها و سطوح آن را مشخص می‌کند. در جدول ۲ ابتدا، انتها و حد میانی بازه تغییرات مشخص شده است. طراحی آزمایشات، تجزیه و تحلیل داده‌ها به روش سطح پاسخ و با استفاده از نرم‌افزار تحلیل آماری مینی‌تب^۱ انجام شده است. در این روش با ورود ابتدا و انتهای بازه تغییرات در نرم‌افزار، طراحی آزمایش با در نظر گرفتن سه نقطه مرکزی و ۳ بار تکرار انجام گرفت. ۲۷ آزمایش طراحی شده به همراه پاسخها در جدول ۳ نشان داده شده است.

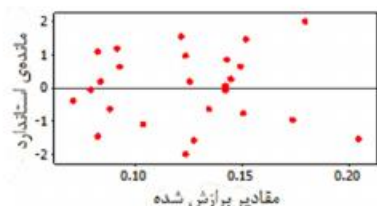
جدول ۲ پارامترها و سطوح آن‌ها

علامت	پارامترها	سطوح		
		-۱	۰	+۱
A	I جریان (آمپر)	۸	۱۴	۲۰
B	V ولتاژ (ولت)	۴۰	۵۵	۷۰
C	Ton زمان روشنی (میکرو ثانیه)	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰
D	Toff زمان خاموشی (میکرو ثانیه)	۱۵۰	۲۲۵	۳۰۰

۱. minitab



شکل ۵ نمودار احتمال نرمال



شکل ۶ مقدار باقیمانده‌ها بر حسب مقادیر تخمین زده

نمونه‌ها طبق شرایط آزمایشات اصلی آماده شدند. در جدول ۵ تعداد و شرایط نمونه‌های جدید، مقدار پاسخ‌های واقعی، مقدار پاسخ‌های پیش‌بینی شده براساس مدل تجربی و درصد خطاها ارائه شده است. با توجه به این جدول می‌توان گفت که حداکثر خطای مدل ۶/۱۴۵ بوده است. بنابراین طبق آزمایشات تأییدی می‌توان گفت که رابطه به دست آمده در این تحقیق، قادر به پیش‌بینی پاسخ با دقت کافی می‌باشد. (جدول ۵).

۴ بررسی اثر پارامترها

در این جا تأثیر پارامترها به صورت دو به دو، بر نرخ براده برداری، توسط نمودارهای دو بعدی و سپس سه بعدی به تصویر کشیده می‌شود.

۴-۱- نمودار شدت جریان - زمان روشنی پالس

تأثیر کنش واکنش پارامترهای شدت جریان و زمان روشنی پالس به صورت دو بعدی و سه بعدی در شکل ۷ الف و ب نشان داده شده است. با توجه به این نمودار می‌توان گفت که با افزایش شدت جریان در هر زمان روشنی پالس و همچنین با افزایش زمان روشنی پالس در هر شدت جریانی نرخ براده برداری افزایش پیدا می‌کند. برای رسیدن به بالاترین نرخ براده برداری باید هر دو پارامتر در بالاترین مقدار خود قرار گیرند و این در صورتی است که ولتاژ و زمان خاموشی پالس هر دو در بالاترین سطح خود قرار داشته باشند.

۴-۲- نمودار شدت جریان - زمان خاموشی پالس

شکل ۸ الف و ب تأثیر تعامل پارامتر شدت جریان و زمان خاموشی پالس را نشان می‌دهد. از این نمودار می‌توان فهمید که با افزایش شدت جریان در هر زمان خاموشی پالس نرخ براده برداری افزایش می‌یابد و افزایش زمان خاموشی پالس نرخ براده برداری را به مقدار کمی افزایش می‌دهد. در این شرایط ولتاژ و زمان روشنی پالس در بالاترین سطح قرار دارند.

۴-۳- نمودار ولتاژ - زمان روشنی پالس

شکل ۹ الف و ب تأثیر دو پارامتر ولتاژ و زمان روشنی پالس را روی نرخ براده برداری در حالتی که شدت جریان و زمان خاموشی پالس در بالاترین سطح قرار دارند نشان می‌دهد. آن چه در این نمودار مشخص است این است

۳- آنالیز واریانس و مدل ریاضی نرخ براده برداری

در این جا ابتدا نتایج به دست آمده از نرخ براده برداری، به عنوان پاسخ به محیط نرم افزار وارد گردید. سپس توسط تحلیل گر نرم افزار مورد اولین مرحله آنالیز قرار گرفت که در این مرحله نمودارهای باقی مانده‌ها چهارنمایی، شواهد غیرمعمول، توابع رگرسیونی و جدول آنالیز واریانس به دست آمد. شکل ۵ نشان می‌دهد توزیع مانده‌ها نرمال است و نمودار احتمال نرمال موجود، حاکی از این است که درصد بالایی از مانده‌ها روی خط مستقیم قرار دارند و یا خیلی از آن انحراف ندارند. همواره بین مقدار پیش‌بینی شده توسط یک رابطه‌ی منسوب به مقادیر آزمایشی با مقدار واقعی تفاوتی وجود دارد که این تفاوت می‌تواند به دلیل وجود خطاهای اندازه‌گیری و همچنین ناشی از دیگر پارامترهای فرآیند باشد که به دلایل مختلفی از جمله غیر قابل کنترل بودن و غیرقابل اندازه‌گیری بودن، یا برای ساده‌سازی در نظر گرفته نشده است. مانده‌های به دست آمده از رابطه رگرسیونی (رابطه ۲) بدست آمده از این تحقیق دارای توزیع مناسبی هستند و مانده‌های ناشی از مقادیر تخمینی مربوط به هر مشاهده، ریتم و الگوی خاصی ندارد. (شکل ۶). رابطه رگرسیونی نرخ براده برداری که از این آنالیز اولیه به دست آمد است به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود. این معادله بر حسب مقادیر واقعی (کد نشده) پارامترها نوشته شده است. همچنان که در این رابطه مشاهده می‌شود تمامی فاکتورهای خطی، مربع و کنش و واکنش در این رابطه تأثیر گذارند.

$$\begin{aligned} MRR = & 0.215956 + 0.011036 I + 0.000270 V - 0.001348 Ton - \\ & 0.000255 Toff - 0.000624 I^2 - 0.000043 V^2 + \\ & 0.000001 Ton^2 - 0.000001 Toff^2 + 0.000042 I^2V + \\ & 0.000038 I^2Ton - 0.000007 I^2Toff + 0.000010 V^2Ton + \\ & 0.000003 V^2Toff + 0.000002 Ton^2Toff \end{aligned} \quad (2)$$

پس از حذف کلیه نقاط پرت آزمایش و حذف فاکتورهای ناموجود در آنالیز اولیه، جدول آنالیز واریانس نهایی تهیه شد که به صورت جدول ۴ ارائه شده است. نتایج این مرحله به عنوان نتایج نهایی در نظر گرفته شده است. رگرسیون نرخ براده برداری که از آنالیز نهایی نتایج به دست آمده است به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود. این رابطه نیز براساس مقادیر واقعی (کد نشده) نوشته شده است. این رابطه به عنوان مدل تجربی پیش‌بینی کننده نرخ براده برداری در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} MRR = & 0.198766 + 0.011292 I + 0.000431 V - 0.001289 Ton \\ & 0.000228 Toff - 0.000633 I^2 - 0.000045 V^2 \\ & 0.000001 Toff^2 + 0.000042 I^2V + 0.000038 I^2Ton - \\ & 0.000008 I^2Toff + 0.000010 V^2Ton + 0.000003 V^2Toff + \\ & 0.000002 Ton^2Toff \end{aligned} \quad (3)$$

همچنان که در این رابطه مشاهده می‌شود تمامی فاکتورهای خطی، همه کنش و واکنش‌ها، مجذور ولتاژ، مجذور زمان خاموشی پالس و مجذور شدت جریان در این رابطه تأثیر گذارند و فقط مجذور زمان روشنی پالس در رابطه وجود ندارد. این موضوع از آن جا ناشی می‌شود که مقدار p در مرحله آنالیز واریانس، از ۰/۰۵ بیشتر بوده بنابراین مجذور زمان روشنی پالس در مرحله نهایی آنالیز حذف شده است. ضمن این که مقدار فاکتور R^2 در این تحلیل ۰/۹۹۷۸ می‌باشد که به حد ۰/۱۰۰ خیلی نزدیک است. نزدیک بودن این فاکتور به مقدار ۰/۱۰۰ نشان می‌دهد که دقت رابطه پیش‌بینی کننده نرخ براده برداری در حد قابل توجهی است.

۳-۱- آزمایشات تأییدی

برای تأیید دقت مدل تجربی به دست آمده در این تحقیق، لازم است که آزمایشات جدیدی انجام گیرد تا درصد خطای رابطه حاصل سنجیده شود.

1. Analysis of variance

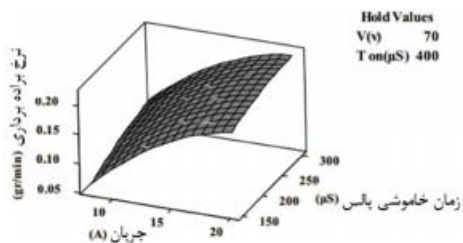
جدول ۴ آنالیز واریانس نهایی

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	۱۳	۰.۳۰۲۲۹	۰.۳۰۲۲۹	۰.۰۰۲۲۲۵	۴۶۱/۹۴	۰.۰۰۰
Linear	۴	۰.۲۲۷۹۷	۰.۲۲۷۹۷	۰.۰۰۰۸۳۱	۱۶۵/۰۴	۰.۰۰۰
I(A)	۱	۰.۱۳۳۲۰	۰.۱۳۳۲۰	۰.۰۰۰۳۹۷	۷۸/۷۹	۰.۰۰۰
V(V)	۱	۰.۰۰۰۰۹۳	۰.۰۰۰۰۰۳	۰.۰۰۰۰۰۳	۰/۵۶	۰/۴۶۹
T on(μS)	۱	۰.۰۹۳۴۷	۰.۰۰۲۳۵۶	۰.۰۰۲۳۵۶	۴۶۷/۹۴	۰.۰۰۰
T off(μS)	۱	۰.۰۰۰۰۳۷	۰.۰۰۰۰۰۲۲	۰.۰۰۰۰۰۲۲	۴/۴۷	۰/۰۵۴
Square	۳	۰.۰۳۳۴۳	۰.۰۰۳۳۴۳	۰.۰۰۱۰۸۱	۲۱۴/۷۴	۰.۰۰۰
I(A)*I(A)	۱	۰.۰۲۵۲۵	۰.۰۰۳۱۲۰	۰.۰۰۳۱۲۰	۶۱۹/۸۴	۰.۰۰۰
V(V)*V(V)	۱	۰.۰۰۰۴۵۴	۰.۰۰۰۰۶۱۰	۰.۰۰۰۰۶۱۰	۱۲۱/۰۹	۰.۰۰۰
T off(μS)*T off(μS)	۱	۰.۰۰۰۲۶۵	۰.۰۰۰۰۲۶۵	۰.۰۰۰۰۲۶۵	۵۲/۵۸	۰.۰۰۰
Interaction	۶	۰.۰۰۴۱۹۰	۰.۰۰۴۱۹۰	۰.۰۰۰۰۶۹۸	۱۳۸/۷۲	۰.۰۰۰
I(A)*V(V)	۱	۰.۰۰۰۰۵۸	۰.۰۰۰۰۰۵۸	۰.۰۰۰۰۰۵۸	۱۱/۴۷	۰/۰۰۵
I(A)*T on(μS)	۱	۰.۰۰۰۰۳۰۶۶	۰.۰۰۰۰۰۳۰۶۶	۰.۰۰۰۰۰۳۰۶۶	۴۱/۳۳۶	۰.۰۰۰
I(A)*T off(μS)	۱	۰.۰۰۰۰۰۴۶	۰.۰۰۰۰۰۰۴۶	۰.۰۰۰۰۰۰۴۶	۹/۰۵	۰/۰۰۱
V(V)*T on(μS)	۱	۰.۰۰۰۰۸۸۲	۰.۰۰۰۰۰۸۸۲	۰.۰۰۰۰۰۸۸۲	۱۷۵/۲۳	۰.۰۰۰
V(V)*T off(μS)	۱	۰.۰۰۰۰۰۵۶	۰.۰۰۰۰۰۰۵۶	۰.۰۰۰۰۰۰۵۶	۱۱/۱۱۷	۰/۰۰۵
T on(μS)*T off(μS)	۱	۰.۰۰۰۰۰۸۲	۰.۰۰۰۰۰۰۸۲	۰.۰۰۰۰۰۰۸۲	۲۱۵/۰۳	۰.۰۰۰
Residual Error	۱۳	۰.۰۰۰۰۶۵	۰.۰۰۰۰۰۶۵	۰.۰۰۰۰۰۰۵		
Lack of Fit	۱۱	۰.۰۰۰۰۶۵	۰.۰۰۰۰۰۶۵	۰.۰۰۰۰۰۰۶	۵۹۴/۷۳	۰/۰۰۲
Pure Error	۲	۰.۰۰۰۰۰۰	۰.۰۰۰۰۰۰۰	۰.۰۰۰۰۰۰۰		
Total	۲۶	۰.۳۰۲۲۹۵				

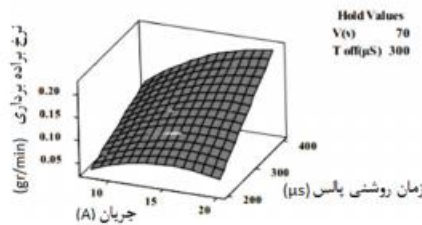
۹۹/۵۷٪ R-Sq(adj) = ۹۸/۹۲٪ R-Sq(pred) = ۹۹/۷۸٪ R-Sq =

جدول ۵ آرایه و نتایج آزمایشات و درصد خطاها

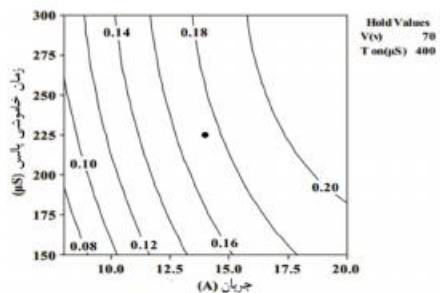
شماره آزمایش	I(A)	V(V)	TON(μS)	TOFF(μS)	واقعی $MMR(\frac{gr}{min})$	تخمینی $MMR(\frac{gr}{min})$	خطای رابطه
۱	۸	۴۰	۴۰۰	۳۰۰	۰/۰۷۴۱	۰/۰۷۱۶۷	۳/۲۷۹۳
۲	۸	۷۰	۴۰۰	۳۰۰	۰/۰۹۸۱	۰/۰۹۳۱۸	۵/۰۱۵۲
۳	۱۴	۵۵	۳۰۰	۲۲۵	۰/۱۱۶۶	۰/۱۱۱۳۰	۴/۵۴۵۴
۴	۲۰	۴۰	۳۰۰	۱۵۰	۰/۱۳۰۱	۰/۱۲۱۷۰	۶/۴۵۶۵
۵	۲۰	۷۰	۴۰۰	۳۰۰	۰/۱۹۹۷	۰/۲۰۴۸۷	۲/۵۸۸۸



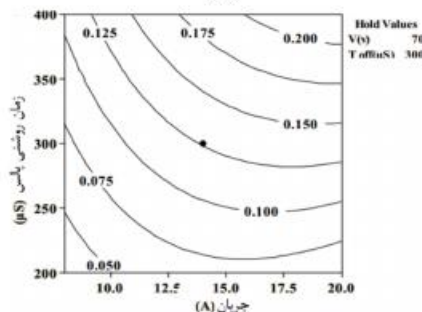
الف



الف



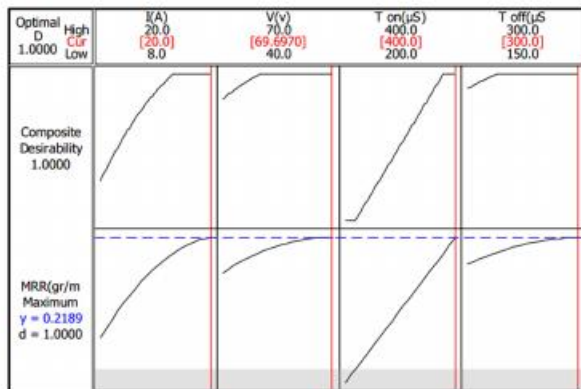
ب



ب

شکل ۸ نمودار دو و سه بعدی شدت جریان و زمان خاموشی پالس

شکل ۷ نمودار دو و سه بعدی شدت جریان و زمان روشنی پالس



شکل ۱۰ نمودار بهینه سازی پاسخ

روشنی پالس ۴۰۰ و زمان خاموشی پالس ۳۰۰ میکرو ثانیه حاصل می شود.

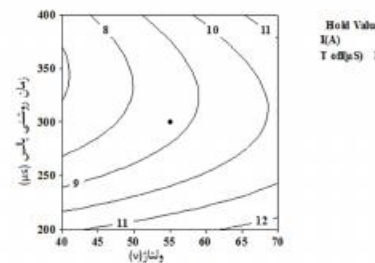
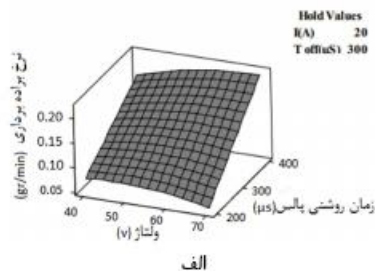
۶- مراجع

- [1] K.J.Kainer, *Metal Matrix Composites - Custom-Made Materials for automotive and Aerospace engineering*, pp. 1-75, Wiley, VCH, 2006.
- [2] S. Nagarajan, B. Dutt, M. k. Surappa, *The effect of sic particles on the size and morphology of eutectic silicon in cast A356/sic_p composites*, *Composites scienc and Tecnology*, pp. 897-902, 1999.
- [3] V. S. Aigbodion, S. B. Hassan, *Effects of silicon carbide reinforcement on microstructure and properties of cast Al-Si-Fe/SiC particulate Composites*, *Materials Science and Engineering A*, pp. 355-360, 2007.
- [4] N. M. Abbas, D. G. Solomon, Md. F. Balari, *A review on current research trends in electric discharge machining* *international machining Journal manufacturing*, Vol 47, pp. 1214-1228, 2006.
- [5] B. Lauwers, J. P. Kruth, W. Liu, W. Eevaerts, B. Schact and P. Bleys, *Investigation of material removal mechanisms in EDM of composite ceramic materials*, *Journal Materials Process Technology*, Vol. 149, pp. 347-352, 2004.
- [6] A. Abdullah, R. Mohammad, S. A. Ivanov, T. Mohammad and S. Tabar, *Effect of ultrasonic-assisted EDM on the surface integrity of cemented tungsten carbide (WC-Co)*, *International Journal Advance Manufacturing Technology*, Vol. 41, pp. 268-280, 2009.
- [7] P. M. George, B. K. Ragunath, L. M. Manocha and A. M. Warriar, *EDM machining of carbon-carbon composite-a Taguchi approach*, *Journal. Materials Process. Technology* Vol. 147, pp. 66-71, 2004.
- [8] R. Karthikeyan, P.R. L. Narayanan, and R.S. Naagarazan, *Mathematical modelling for electric discharge machining of aluminium-silicon carbide particulate composites*, *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 87, pp. 59-63, 1999.
- [9] P. Narendar Singh, K. Raghukandan, M. Rathinasabapathi and B. C. Pai, *Electric discharge machining of Al-10%SiCp as-cast metal matrix composites*, *Journal Material Process. Technology*, Vol 156-157, pp. 1653-1657, 2004.
- [10] B. Mohan, A. Rajadurai and K. G. Satyanarayana, *Electric discharge machining of Al-SiC metal matrix composites using rotary tube electrode*, *Journal Materials Process. Technology*, Vol. 153-154, pp 978-985, 2004.
- [11] C. C. Wang and B. H. Yan, *Blind-hole drilling of Al2O3 Al composite using rotary electro-discharge machining*, *Journal. Mater. Process. Technol.* Vol. 102, pp. 90-102, 2000.
- [12] B. Mohan, A. Rajadurai and K. G. Satyanarayana, *Effect of SiC and rotation on electric discharge machining of Al-SiC composite*, *Journal. Material. Process. Technology*, Vol. 124, pp. 297-304, 2002.
- [13] H. Kumar and J. P. Davim, *Role of powder in the machining of Al-10% SiCp metal matrix composites by powder mixed electric discharge machining*, *journal. Composite. Mater.*, Vol. 45, No. 2, pp. 133-151, 2011.
- [14] M. Hosseinpour, G. Najafpour, H. Younesi, M. Khorrami, and Z. Vaseghi, *Lipase production in solid state fermentation using aspergillus niger: Response surface methodology*, *International Journal of Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 151-159, 2012.
- [15] J. Forsberg, and L. Nilsson, *Evaluation of response surface methodologies used in crashworthiness optimization*, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 5, pp. 759-777, 2006.
- [4] L. Fourment, T. Bhan, J. Chenot, *optimal design for non-steady-state metal forming processes. Application of shape optimization in forging*, *International journal for numerical methods in engineering*, Vol 39, pp. 51-65, 1996.

که با افزایش زمان روشنی پالس در هر ولتاژی نرخ براده برداری افزایش پیدا می کند و افزایش ولتاژ در هر زمان روشنی پالس تاثیر خیلی کمی روی نرخ براده برداری دارد.

۵ بهینه سازی

پس از بررسی اثر پارامترها روی نرخ براده برداری اکنون، به بهینه سازی برای رسیدن به حداکثر مقدار ممکن پاسخ پرداخته می شود. برای این منظور از بخش بهینه سازی نرم افزار استفاده شده است. ابتدا مقادیر ۰/۰۷ و ۰/۰۲ به ترتیب به عنوان حدود (کمینه و بیشینه پاسخ های تجربی) نرخ براده برداری موجود در آزمایشات به نرم افزار معرفی شد. ضریب وزنی و میزان اهمیت آن به صورت پیش فرض برابر ۱ تنظیم گردید. نتیجه این بهینه سازی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. حالت بهینه وقتی حاصل می شود که ماشین تخلیه الکتریکی روی شدت جریان ۲۰ آمپر، ولتاژ ۶۹/۶۹۷ ولت، زمان روشنی پالس ۴۰۰ و زمان خاموشی پالس ۳۰۰ میکروثانیه تنظیم باشد که در این حالت حداکثر نرخ براده برداری ممکن ۰/۲۱۸۹ گرم بر دقیقه خواهد شد.



شکل ۹ نمودار دو و سه بعدی ولتاژ و زمان روشنی پالس

۶- نتیجه گیری

- براساس آنالیز واریانس نرخ براده برداری، زمان روشنی پالس، شدت جریان، زمان خاموشی پالس و ولتاژ به ترتیب از بیشترین تا کمترین تاثیر را بر نرخ براده برداری در ماشین کاری تخلیه الکتریکی کامپوزیت A369-10%SiC_p داشته است.
- براساس نتایج حاصل از آزمایشات، تابع رگرسیون برای پیش بینی پاسخ یعنی نرخ براده برداری، به دست آمد که طبق آزمایشات تأییدی حداکثر خطای رابطه ۶/۴۵/ بوده است.
- با افزایش زمان روشنی پالس و شدت جریان، نرخ براده برداری افزایش می یابد.
- طبق رابطه به دست آمده، در حالت بهینه، نرخ براده برداری ۰/۲۱۸۹ گرم بر دقیقه می باشد که در شدت جریان ۲۰ آمپر، ولتاژ ۶۹/۶۹۷ ولت، زمان