مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹۴، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۳۸۷-۳۹۲

مجموعه مقالات کنفرانس ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ و ۱۴ آبان ۱۳۹۴

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تاثیر 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 دبیر شهید رجائی، تهران
۲- استاد یار، ساخت و تولید، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران
۳- استاد یار، ساخت و تولید، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران
۴- کارشناسی ارشد، ساخت و تولید، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، 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 پالس بر نرخ براده‌برداری مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور کاهش تعداد آزمایشات و هزینه، روش سطح پاسخ جهت طراحی آزمایشات با در نظر گرفتن چهار پارامتر ذکر شده در سه سطح به‌کار گرفته شد. بهینه‌سازی پارامترها جهت به‌دست آوردن بیشترین میزان نرخ براده‌برداری انجام شد. براساس آنالیز واریانس صورت گرفته در تحقیق موثرترین پارامترها برافزایش نرخ براده‌برداری، پارامترهای شدت جریان و زمان روشنی پالس 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 پالس ۴۰۰و زمان خاموشی پالس ۳۰۰ میکروثانیه به‌دست آورد..

کلید واژگان: 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. 16785-136, 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

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 خصوصیاتی که به وسیله‌ی هیچ یک از فازها به طور مستقل ایجاد نمی‌شود، در هم توزیع شده اند. 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 نا پیوسته به‌صورت الیاف کوتاه، ویسکرها و یا ذرات می-باشد. توسعه کامپوزیت‌های زمینه فلزی[1] تقویت شده با ذرات از مهمترین ابداعات در زمینه‌ی مواد پیشرفته قلمداد شده است [۱].

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 گرفته اند. 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 [۳،۲].

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

1. MMC (Metal Matrix Composite)

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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-SiCp 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 فارسی)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-13]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.28.8]

و غیره اشاره کرد. در کامپوزیت‌های زمینه فلزی، 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 کامپوزیت های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات SiC_p به دلیل قابلیت ماشین‌کاری 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، ماشین‌کاری سنتی مواد کامپوزیتی زمینه فلزی با مشکلاتی روبه‌رو است. در این میان فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی[1] روش قابل توجه‌ای برای ماشین‌کاری این‌گونه از کامپوزیت‌ها است. از آن-جایی‌که در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نیازی به انرژی مکانیکی نیست، نرخ براده‌برداری تحت تأثیر ویژگی‌های مواد از جمله سختی، استحکام و چقرمگی وغیره قرار نمی‌گیرد. مواد با قابلیت ماشین‌کاری ضعیف مثل کاربیدهای تنگستن سمانته شده و کامپوزیت‌ها را می‌توان بدون مواجه شدن با مشکل خاصی با فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی براده‌برداری کرد [۶،۵].

تحقیقات انجام گرفته در مورد ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی روی کامپوزیت-های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات گزارش شده است. جورج و همکارانش تأثیر سه پارامتر را در دو سطح در ماشین‌کاری 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 براده‌برداری و سایش الکترود دارد [۷]. کارتیکیان و همکارانش تأثیر پارامترهای شدت جریان، زمان روشنی پالس و افزایش درصد ذرات سیلیکون کارباید را در ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی کامپوزیت (آلومینیوم– سیلیکون کارباید) بررسی کرده‌اند. آن‌ها گزارش داده‌اند که با تغییر در پارامترهای فوق مقدار نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح تغییر می‌کند [۸]. در تحقیقی تأثیر درصد حجمی SiC_p و فشار مایع شست‌وشو به همراه سایر پارامترها در ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی کامپوزیت $Al-10\%SiC_p$ مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق مشخص شد که با افزایش درصد SiC_p مقدار نرخ براده‌برداری کاهش، نرخ سایش ابزار ومقدار زبری سطح افزایش می‌یابد [۱۰،۹]. موهان و همکارانش تأثیر پارامترهای مختلف را در سوراخ-کاری ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی روی کامپوزیت‌های $AL6025-SiC_p$ و $Al-Al_2O_3$ بررسی کرده و گزارش داده‌اند که افزایش سرعت دوران الکترود باعث افزایش نرخ براده‌برداری، کاهش نرخ سایش ابزار و بهتر شدن صافی سطح می‌شود [۱۲،۱۱]. هارمش کومار و همکارانش ضمن انجام یک مطالعه تجربی روی پارامترهای ماشین‌کاری کامپوزیت $Al-10\%SiC_p$ نشان داده‌اند که مخلوط کردن پودر سیلیکون در مایع دی‌الکتریک ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نرخ براده‌برداری را افزایش داده و میزان زبری سطح را کاهش می‌دهد [۱۳].

روش سطح پاسخ[2] 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 معیین 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 تاثیرگذار است [۱۵].

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

در این تحقیق از تکنیک باکس-بنکن[3] 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 براده‌برداری روی کامپوزیت $A369-10\%Sic_p$ استفاده شده است. ضمن این‌که برای به دست آوردن بیشترین نرخ براده‌برداری 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 فلز زمینه استفاده شده است. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۱ آمده است. از پودر SiC_p با درجه خلوص ۹۹/۵٪ 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 سرند الکتریکی با مش ۱۰۰ عبور داده تا ذرات کاملا از هم جدا شوند.

برای تولید کامپوزیت از روش ریخته‌گری هم‌زدنی[4] 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 حدودا ۶۵٪ مذاب زیر آن قرار گیرد به مدت تقریبا ۵ دقیقه با سرعت ۷۵۰ دور بر دقیقه می‌چرخد. آن گاه پودر کاربید سیلیسیم موردنظر را که در دمای ۲۰۰ 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 ۳۵٪ مذاب زیر پروانه باشد تا هم‌زن 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 ۲۰۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم شده است می‌ریزند. شکل ۲ الف بیلت‌های کامپوزیتی ریخته‌گری شده در قالب فلزی را نشان می‌دهد.

در این تحقیق بیلت‌ها 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[5] VEGA TESCAN HIVAC، سطح قطعه به مدت ۲۰-۲۵ ثانیه توسط محلول HF ۵٪ به همراه آب مقطر اچ شدند. شکل ۳ تصویر میکروسکوپی سطح کامپوزیت $A369-10\%Sic_p$ را نشان می‌دهد.

۲-۲- طراحی آزمایش

پس از انجام ماشین‌کاری 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.

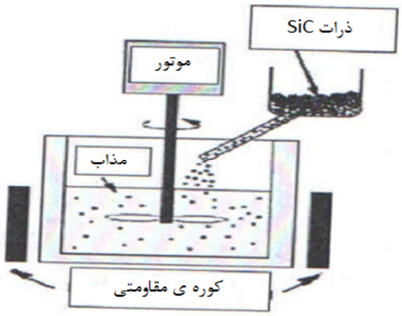
جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ زمینه برحسب درصد وزنی

Si	Cr	cu	Fe	Mg	Mn	Zn	Ni	Ti
۱۱/۷	۰/۳	۰/۱	۰/۳	۰/۳	۰/۱	۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۱

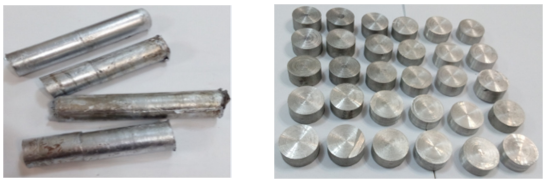
3. Box-Behnken
4. Stirr Casting
5.SEM (*scanning* Electron Microscope)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-13]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.28.8]

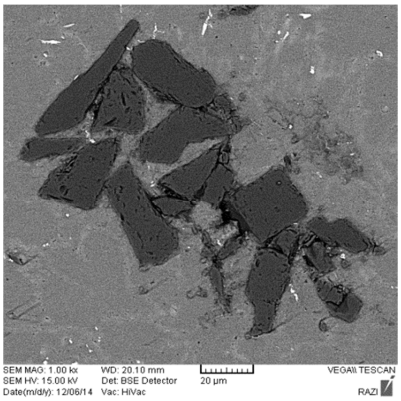


شکل۱ تجهیزات به کار رفته در تولید کامپوزیت به روش ریخته‌گری همزدنی



الف ب

شکل۲ الف: بیلت کامپوزیت ریخته‌گری شده ب:ماشین‌کاری و برش‌کاری بیلت‌ها



شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح کامپوزیت $Al369\text{-}10\%SiC_p$

هر کدام از فاکتورها نیز در سه سطح براساس روش باکس- بنکن تعریف شدند. جدول۲ پارامترها و سطوح آن را مشخص می‌کند. در جدول ۲ ابتدا، انتها و حد میانی بازه تغییرات مشخص شده است. طراحی آزمایشات، تجزیه وتحلیل داده‌ها به روش سطح پاسخ و با استفاده از نرم‌افزار تحلیل آماری مینی‌تب[1] انجام شده است. در این روش با ورود ابتدا و انتهای بازه‌ی 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

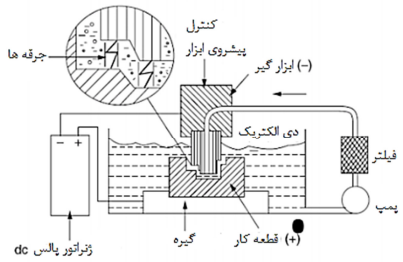
علامت	پارامترها	سطوح		
		-۱	۰	+۱
A	I جریان(آمپر)	۸	۱۴	۲۰
B	V ولتاژ (ولت)	۴۰	۵۵	۷۰
C	Ton زمان روشنی (میکرو ثانیه)	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰
D	Toff زمان خاموشی (میکرو ثانیه)	۱۵۰	۲۲۵	۳۰۰

1. minitab

۲- ۳- روش انجام آزمایش

مدل ماشین تخلیه الکتریکی مورد استفاده از نوع ZNC ۴۰۴ شرکت تهران اکرام، الکترود 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 دیجیتالی با دقت ۰/۰۱گرم. استفاده شده است. زمان ماشین‌کاری همه قطعات ۱۵ دقیقه و سایر شرایط ماشین‌کاری در تمام آزمایشات یکسان می‌باشد. نرخ براده‌برداری از اختلاف وزن قطعات، قبل(W_{jb}) و بعد از ماشین‌کاری (W_{ja}) مطابق رابطه (۱) به‌دست می‌آید. در جدول ۳ نرخ براده‌برداری به‌دست آمده از آزمایشات به‌عنوان پاسخ آن‌ها نشان داده شده است.

$$MRR=\frac{W_{jb}-W_{ja}}{t} \qquad (۱)$$



شکل ۴ طرح ساده ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی

جدول۳ طرح اولیه و نرخ براده‌برداری درتمام 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	۰/۱۳۴۰
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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-13]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.28.8]

۳- آنالیز واریانس[1] ومدل ریاضی نرخ براده‌برداری

در این‌جا ابتدا نتایج به‌دست آمده از نرخ براده‌برداری، به‌عنوان پاسخ به محیط نرم‌افزار وارد گردید. سپس توسط تحلیل‌گر نرم‌افزار مورد اولین مرحله آنالیز قرار گرفت که در این مرحله نمودارهای باقی مانده‌ها چهارتایی، شواهد غیرمتعارف، توابع رگرسیونی و جدول آنالیز واریانس به‌دست 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 والگوی خاصی ندارد. شکل (۶). رابطه رگرسیونی نرخ براده‌برداری که از این آنالیز اولیه به دست آمد است به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود. این معادله برحسب مقادیر واقعی (کد نشده) پارامترها نوشته شده است. همچنان که در این رابطه مشاهده می‌شود تمامی فاکتورهای خطی، مربع و کنش- واکنش در این رابطه تأثیر گذارند.

$$MRR = 0.215956 + 0.011036\,I + 0.000270\,V - 0.001348\,Ton - 0.000255\,Toff - 0.000624\,I*I - 0.000043\,V*V + 0.0000001\,Ton*Ton - 0.000001\,Toff*Toff + 0.000042\,I*V + 0.000038\,I*Ton - 0.000007\,I*Toff + 0.000010\,V*Ton + 0.000003\,V*Toff + 0.000002\,Ton*Toff \quad (۲)$$

پس از حذف کلیه نقاط پرت آزمایش وحذف فاکتورهای ناموثرموجود درآنالیز اولیه، جدول آنالیز واریانس نهایی تهیه شد که به‌صورت جدول ۴ ارائه شده است. نتایج این مرحله به‌عنوان نتایج نهایی در نظر گرفته شده است. رگرسیون نرخ براده‌برداری که از آنالیز نهایی نتایج به‌دست 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 براده‌برداری در نظر گرفته می‌شود.

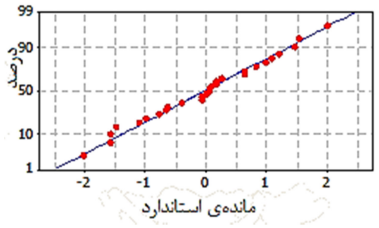
$$MRR = 0.198766 + 0.011292\,I + 0.000431\,V - 0.001289\,Ton - 0.000228\,Toff - 0.000633\,I*I - 0.000045\,V*V - 0.000001\,Toff*Toff + 0.000042\,I*V + 0.000038\,I*Ton - 0.000008\,I*Toff + 0.000010\,V*Ton + 0.000003\,V*Toff + 0.000002\,Ton*Toff \quad (۳)$$

همچنان که در این رابطه مشاهده می‌شود تمامی فاکتورهای خطی، همه کنش- واکنش‌ها، مجذور ولتاژ، مجذور زمان خاموشی پالس و مجذور شدت جریان در این رابطه تاثیرگذارند و فقط مجذور زمان روشنی پالس در رابطه وجود ندارد. این موضوع از آن‌جا 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 این‌که مقدار فاکتور R^2 در این تحلیل ۹۹/۷۸٪ می‌باشد که به حد ۱۰۰٪ خیلی نزدیک است. نزدیک بودن این فاکتور به مقدار ۱۰۰٪ نشان می‌دهد که دقت رابطه پیش‌بینی کننده‌ی نرخ براده‌برداری در حد قابل توجهی است.

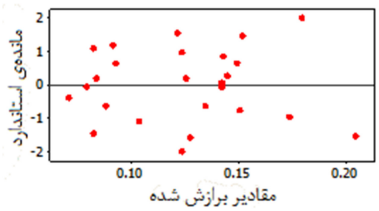
۳-۱ آزمایشات تأییدی

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

1. Analysis of variance



شکل۵ نمودار احتمال نرمال



شکل۶ مقدار باقیمانده‌ها برحسب 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 ۶/۴۵٪ 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).

٤- بررسی اثر پارامترها

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

۴-۱- نمودار شدت جریان - زمان روشنی پالس

تاثیر کنش- واکنش پارامترهای شدت جریان و زمان روشنی پالس به صورت دو بعدی و سه بعدی درشکل 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 براده‌برداری 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 وب تاثیر 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 براده‌برداری افزایش می‌یابد و افزایش زمان خاموشی پالس نرخ براده‌برداری 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 تاثیر دو پارامتر ولتاژ و زمان روشنی پالس را روی نرخ براده‌برداری 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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-13]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.28.8]

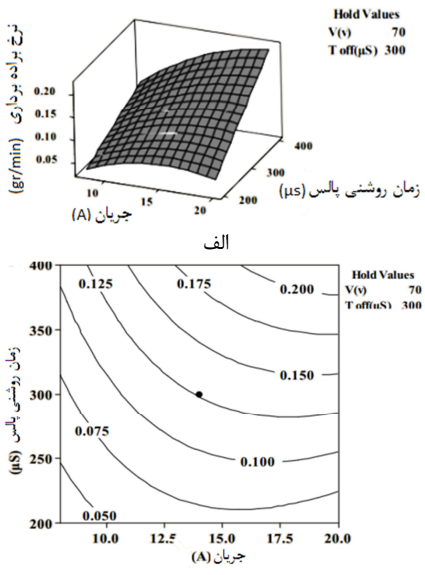
جدول۴ آنالیز واریانس نهایی

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	۱۳	۰/۰۳۰۲۲۹	۰/۰۳۰۲۲۹	۰/۰۰۲۳۲۵	۴۶۱/۹۴	۰/۰۰۰
Linear	۴	۰/۰۲۲۷۹۷	۰/۰۰۳۳۲۳	۰/۰۰۰۸۳۱	۱۶۵/۰۴	۰/۰۰۰
I(A)	۱	۰/۰۱۳۳۲۰	۰/۰۰۰۳۹۷	۰/۰۰۰۳۹۷	۷۸/۷۹	۰/۰۰۰
V(v)	۱	۰/۰۰۰۰۹۳	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۵۶	۰/۴۶۹
T on(μS)	۱	۰/۰۰۹۳۴۷	۰/۰۰۲۳۵۶	۰/۰۰۲۳۵۶	۴۶۷/۹۴	۰/۰۰۰
T off(μS)	۱	۰/۰۰۰۰۳۷	۰/۰۰۰۰۲۲	۰/۰۰۰۰۲۲	۴/۴۷	۰/۰۵۴
Square	۳	۰/۰۰۳۲۴۳	۰/۰۰۳۲۴۳	۰/۰۰۱۰۸۱	۲۱۴/۷۴	۰/۰۰۰
I(A)*I(A)	۱	۰/۰۰۲۵۲۵	۰/۰۰۳۱۲۰	۰/۰۰۳۱۲۰	۶۱۹/۸۴	۰/۰۰۰
V(v)*V(v)	۱	۰/۰۰۰۴۵۴	۰/۰۰۰۶۱۰	۰/۰۰۰۶۱۰	۱۲۱/۰۹	۰/۰۰۰
T off(μS)*T off(μS)	۱	۰/۰۰۰۲۶۵	۰/۰۰۰۲۶۵	۰/۰۰۰۲۶۵	۵۲/۵۸	۰/۰۰۰
Interaction	۶	۰/۰۰۴۱۹۰	۰/۰۰۴۱۹۰	۰/۰۰۰۶۹۸	۱۳۸/۷۲	۰/۰۰۰
I(A)*V(v)	۱	۰/۰۰۰۰۵۸	۰/۰۰۰۰۵۸	۰/۰۰۰۰۵۸	۱۱/۴۷	۰/۰۰۵
I(A)*T on(μS)	۱	۰/۰۰۲۰۶۶	۰/۰۰۲۰۶۶	۰/۰۰۲۰۶۶	۴۱۰/۳۶	۰/۰۰۰
I(A)*T off(μS)	۱	۰/۰۰۰۰۴۶	۰/۰۰۰۰۴۶	۰/۰۰۰۰۴۶	۹/۰۵	۰/۰۱۰
V(v)*T on(μS)	۱	۰/۰۰۰۸۸۲	۰/۰۰۰۸۸۲	۰/۰۰۰۸۸۲	۱۷۵/۲۳	۰/۰۰۰
V(v)*T off(μS)	۱	۰/۰۰۰۰۵۶	۰/۰۰۰۰۵۶	۰/۰۰۰۰۵۶	۱۱/۱۷	۰/۰۰۵
T on(μS)*T off(μS)	۱	۰/۰۰۱۰۸۲	۰/۰۰۱۰۸۲	۰/۰۰۱۰۸۲	۲۱۵/۰۳	۰/۰۰۰
Residual Error	۱۳	۰/۰۰۰۰۶۵	۰/۰۰۰۰۶۵	۰/۰۰۰۰۰۵		
Lack-of-Fit	۱۱	۰/۰۰۰۰۶۵	۰/۰۰۰۰۶۵	۰/۰۰۰۰۰۶	۵۹۴/۷۳	۰/۰۰۲
Pure Error	۲	۰/۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰		
Total	۲۶	۰/۰۳۰۲۹۵				

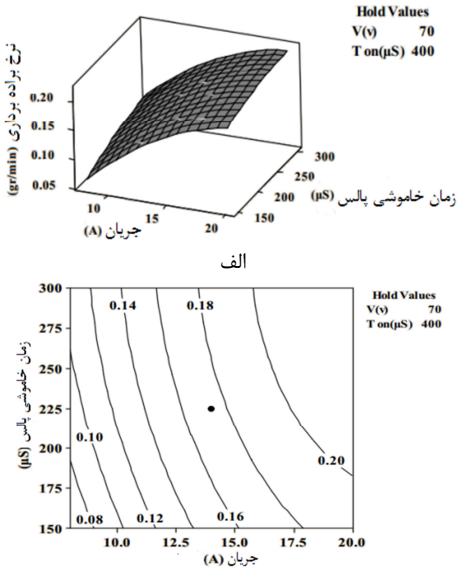
R-Sq = ۹۹/۷۸٪ R-Sq(pred) = ۹۸/۹۲٪ R-Sq(adj) = ۹۹/۵۷٪

جدول۵ آرایه و نتایج آزمایشات و درصد خطاها

شماره ازمایش	I(A)	V(V)	$TON(\mu S)$	$TOFF(\mu S)$	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	۲۰۰	۲۲۵	۰/۱۱۶۶	۰/۱۱۱۳۰	۴/۵۴۵۴
۴	۲۰	۴۰	۲۰۰	۱۵۰	۰/۱۳۰۱	۰/۱۲۱۷۰	۶/۴۵۶۵
۵	۲۰	۷۰	۴۰۰	۳۰۰	۰/۱۹۹۷	۰/۲۰۴۸۷	۲/۵۸۸۸



شکل۷ نمودار دو و سه بعدی شدت جریان و زمان روشنی پالس



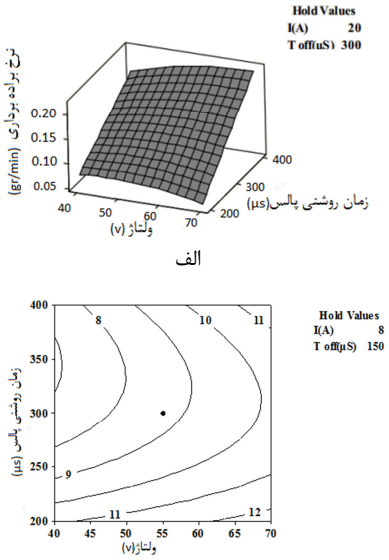
شکل ۸ نمودار دو و سه بعدی شدت جریان و زمان خاموشی پالس

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-13]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.28.8]

که با افزایش زمان روشنی پالس در هر ولتاژی نرخ برادەبرداری افزایش پیدا می‌کند و افزایش ولتاژ در هر زمان روشنی پالس تاثیر خیلی کمی روی نرخ برادەبرداری دارد.

۵- بهینه‌سازی

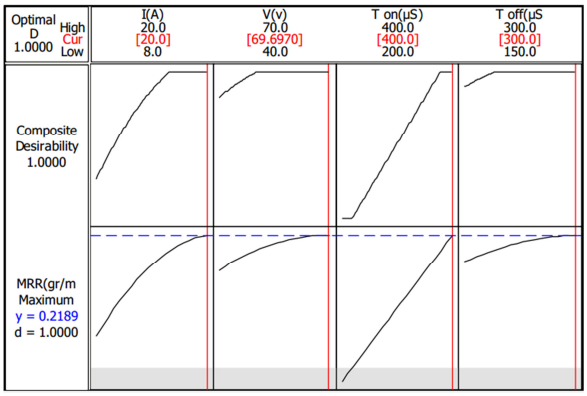
پس از بررسی اثر پارامترها روی نرخ برادەبرداری اکنون، به بهینه‌سازی برای رسیدن به حداکثر مقدار ممکن پاسخ پرداخته می‌شود. برای این منظور از بخش بهینه‌سازی نرم‌افزار استفاده شده است. ابتدا مقادیر ۰/۰۷ و ۰/۲۰۲ به ترتیب به‌عنوان حدود (کمینه و بیشینه پاسخ‌های تجربی) نرخ براده برداری موجود در آزمایشات به نرم‌افزار معرفی شد. ضریب وزنی و میزان اهمیت آن به صورت پیش فرض برابر ۱ تنظیم گردید. نتیجه این بهینه‌سازی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. حالت بهینه وقتی حاصل می‌شود 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- نتیجه‌گیری

- براساس آنالیز واریانس نرخ برادەبرداری، زمان روشنی پالس، شدت جریان، زمان خاموشی پالس و ولتاژ به ترتیب از بیشترین تا کمترین تاثیر را بر نرخ برادەبرداری در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی کامپوزیت A369-10%Sic$_p$ داشته است.
- براساس نتایج حاصل از آزمایشات، تابع رگرسیون برای پیش‌بینی پاسخ یعنی نرخ برادەبرداری، به‌دست آمد که طبق آزمایشات تأییدی حداکثر خطای رابطه ۶/۴۵٪ بوده است.
- با افزایش زمان روشنی پالس و شدت جریان، نرخ برادەبرداری افزایش می‌یابد.
- طبق رابطه به‌دست آمده، در حالت بهینه، نرخ برادەبرداری ۰/۲۱۸۹ گرم بر دقیقه می‌باشد که در شدت جریان ۲۰ آمپر، ولتاژ ۶۹/۶۹۷ ولت، زمان



شکل ۱۰ نمودار بهینه‌سازی پاسخ

روشنی پالس ۴۰۰ و زمان خاموشی پالس ۳۰۰ میکرو ثانیه حاصل می‌شود.

۶- مراجع

[1] K.U.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 siliconin 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. Bahari, *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. Eeraerts, 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. Warrier, *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 productionin 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. Balan, 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.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-13]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.28.8]