

## تحلیل نرخ برداشت مواد و فرسایش ابزار در میکرو سوراخ کاری تخلیه الکتریکی روی تنگستن کاربید

نیما تفضلی<sup>۱</sup>، علی اکبر اکبری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجو کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، nima.tafazooli@stu.um.ac.ir  
<sup>۲</sup>استادیار، دانشگاه فردوسی مشهد، akbari@um.ac.ir

### چکیده

سمت قطب منقی کشیده می‌شوند که اگر این میدان خیلی قوی باشد بر مقاومت دی الکتریک غلبه کرده و الکترون‌ها را جدا می‌کند و در نتیجه مولکول‌های دی الکتریک در محلی که میدان الکتریکی خیلی قوی است در نزدیک‌ترین نقطه یا نقاط یونیزه می‌شوند. در این حالت گفته می‌شود مقاومت دی الکتریک شکسته (Break Down) شده است [۱]. در نقطه‌ای که دی الکتریک شکسته و یونیزه شده است، و از حالت نارسانا بودن به وضعیت رسانای الکتریکی تبدیل می‌شود و کانال پلاسما ایجاد خواهد شد جریان الکتریکی بین ابزار و قطعه کار برقرار می‌شود و جرقه زنی رخ می‌دهد و بعد اتمام جرقه زنی و دی الکتریک دیونیزه شده و دوباره عایق الکتریسیته می‌شود، این فرآیند در هر جرقه تکرار می‌گردد و بدین صورت عمل بار برداری انجام می‌شود، هر جرقه مقداری از مواد را از هر دو الکتروود ابزار و قطعه کار حذف می‌کند که سبب افزایش فاصله بین آن‌ها در آن نقطه می‌شود، در نتیجه جرقه بعدی در نزدیک‌ترین فاصله بین آن‌ها رخ می‌دهد [۲].

میکرو ماشین کاری تخلیه الکتریکی بسیار شبیه به اساس ماشین کاری تخلیه الکتریکی است. ماشین کاری تخلیه الکتریکی یک فرآیند گرمایی است که با استفاده از تخلیه الکتریکی از مواد رسانای الکتریکی برداشت می‌کند. EDM توانایی ماشین کاری حفره‌های دقیق قالب‌ها را دارد. EDM روشی مفید برای ساخت میکرو قطعات کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرومتر هست. میکرو EDM شبیه ماکرو EDM است بطوریکه مکانیزم آن براساس فرآیندهای الکتروترمال است. تفاوت میکرو و ماکرو EDM در قطر کانال پلاسما است. با توجه به انواع مختلف میکرو EDM، فرآیند ماشین کاری خیلی انعطاف‌پذیر است. سه نوع از انواع کاربردی در صنایع عبارت از میکرو اسپارک<sup>۱</sup>، میکرو ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی<sup>۲</sup> و میکرو تخلیه الکتریکی سوراخ کاری<sup>۳</sup> می‌باشند. [۳].

روش EDM و Micro-EDM به دلیل آنکه روش بار برداری با تخلیه الکتریکی است و تنها پدیده آن ذوب و تبخیر است، با خواص ترمودینامیکی و فیزیکی قطعه کار و ابزار همانند، نقطه جوش، گرمای نهان تبخیر، گرمای ویژه ذوب، ضریب انتقال حرارت در ارتباط است. در صورتیکه در پروسه‌های سنتی برای ماشین کاری، عوامل استحکام، تنش تسلیم، مدول الاستیسیته، سختی و کلاً خواص مکانیکی مهم

ماشین کاری تخلیه الکتریکی پروسه‌ای است که در آن مواد از طریق جرقه‌های الکتریکی بین الکتروود و قطعه کار بصورت غوطه‌ور در سیال دی الکتریک به وسیله یک عمل سایشی برداشته می‌شود. این روش در سطح میکرونی برای ایجاد میکرو سوراخ و میکرو شیار را میکرو ماشین کاری تخلیه الکتریکی می‌نامند، در این تحقیق به بررسی پارامترهای میکرو سوراخ کاری تخلیه الکتریکی به منظور دستیابی به یک روند صحیح برای Micro-EDM پرداخته شده است. در این تحقیق تنگستن کاربید با ضخامت ۳۰۰ میکرومتر و سختی ۸۲ راکول C به عنوان قطعه کار انتخاب شده که با ساخت ابزاری با قطری کمتر از ۱۵۰ میکرومتر از جنس تنگستن-مس، با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی L16 برای پارامترهای ولتاژ، جریان الکتریکی، زمان روشنایی پالس، سرعت دورانی ابزار، زمان خاموشی پالس و نوع منبع تغذیه، میکرو سوراخ‌هایی با تلرانس استاندارد به قطر  $0.23^{+0.05}_{-0.05}$  بر روی تنگستن کاربید ایجاد شده است، نرخ برداشت مواد و فرسایش ابزار آن به همراه ارائه مدل رگرسیونی تحلیل و بیان شده است که مولد منبع تغذیه RC نتایج بهتری نسبت به مولد ایزو پالس ارائه می‌دهد و همچنین ولتاژ بالا، نرخ برداشت کمتر و فرسایش بیشتر را سبب شده است.

### واژه‌های کلیدی

ماشین کاری تخلیه الکتریکی، میکرو سوراخ کاری تخلیه الکتریکی، تنگستن کاربید، تنگستن - مس

### مقدمه

ماشین کاری تخلیه الکتریکی، روش بار برداری است که در آن ولتاژ پالسی و منقطع بین دو الکتروود بنام‌های ابزار و قطعه کار برقرار شده است که در سیالی بنام دی الکتریک غوطه‌ور می‌باشند و فضای بین آن‌ها را دی الکتریک پر نموده است. عامل جرقه در نزدیک‌ترین نقطه (نقاط) رخ می‌دهد و هر جرقه جزء کوچکی از ماده را از سطح قطعه کار جدا می‌کند و در نهایت بعد از تعداد زیادی جرقه شکل مکمل پیشانی ابزار با ایجاد حفره‌ای در قطعه کار حک می‌شود، در این فرآیند به دلیل ولتاژ ایجاد شده یک میدان الکتریکی به وجود می‌آید، چنانچه دی الکتریک در میدان الکتریکی قرار گیرد، مولکول‌های خنثی و متقارن آن به مولکول‌های قطبی تبدیل می‌شود و دو قطب میدان، مولکول‌های خنثی دی الکتریک را کش می‌آورند. الکترون‌ها به سمت قطب مثبت و هسته که شامل پروتون‌ها است به

<sup>1</sup>  $\mu$ -die sinking

<sup>2</sup>  $\mu$ -WEDG

<sup>3</sup>  $\mu$ -ED drilling

Mohd Zahiruddin در سال ۲۰۱۲ در دانشگاه توکیوی ژاپن مقایسه‌ای بین انرژی و حذف مواد در میکرو و ماکرو EDM انجام داده است، وی بیان کرده است که این دو روش مشابه یکدیگر هستند ولی در چگالی قدرت تفاوت دارند و این روی فرسایش و میزان برداشت مواد. تأثیر می‌گذارد. به این نتیجه رسیده‌اند که تأثیر انرژی در میکرو EDM به میزان ۳۰ برابر بیشتر از ماکرو EDM است [۸].

### انتخاب پارامترها و طراحی آزمایش

در این پروژه به منظور تعیین دقیق سطوح پارامترها، در حدود ۴۰ آزمایش فرعی انجام شد و با توجه به عوامل اصلی تأثیرگذار مستقیم بر فرآیند، پارامترهای ولتاژ (V)، جریان الکتریکی (I)، زمان روشنایی پالس (T<sub>on</sub>)، زمان خاموشی پالس (T<sub>off</sub>)، نوع منبع تغذیه (C) و سرعت دوران ابزار (C-Rotation)، انتخاب شدند، برای انجام آزمایش دقیق و منضبط لازم است که از یک طرح آزمایشی مطلوب با توجه به شرایط و پارامترها انتخاب شود که بتوان خروجی‌های مطلوب را استخراج و در ادامه تحلیل کرد. به همین منظور در این تحقیق با بررسی کلیه طرح‌ها، طرح آزمایشی تاگوچی مطلوب‌تر به نظر رسید و با توجه به ۶ پارامتر مد نظر که ۴ عامل سطحی و ۲ عامل دو سطحی هستند، آرایه متعامد L<sub>16</sub> از طرح آزمایشی تاگوچی انتخاب شد.

جدول ۱ پارامترها و سطوح انتخاب شده

Units/parameters	levels			
	1	2	3	4
v / V	80	120	160	200
Amper / I	0.2	1	4	6
μs / T <sub>on</sub>	0.4	1	1.6	3
rev/min / C-Rotation	0	10	25	40
Power	Iso-pulse		RC /10F	
μs/T <sub>off</sub>	0.8		3	

جدول ۲ طرح L<sub>16</sub> تاگوچی و مقادیر بدست آمده

	VOLT	Amper	Ton	C-Rotation	Toff	Capacitance	EW, %	MRR
1	1	1	1	1	1	1	23	0.001897
2	1	2	2	2	1	2	24.2	0.001683
3	1	3	3	3	2	1	22.8	0.002413
4	1	4	4	4	2	2	15	0.002876
5	2	1	2	3	2	2	21.2	0.001872
6	2	2	1	4	2	1	31.69	0.002056
7	2	3	4	1	1	2	23.04	0.002198
8	2	4	3	2	1	1	12.95	0.002088
9	3	1	3	4	1	2	28.4	0.000987
10	3	2	4	3	1	1	45	0.000924
11	3	3	1	2	2	2	42.3	0.00095
12	3	4	2	1	2	1	24.3	0.00098
13	4	1	4	2	2	1	15.1	0.000827
14	4	2	3	1	2	2	10.71	0.001658
15	4	3	2	4	1	1	28	0.000855
16	4	4	1	3	1	2	16.2	0.000935

### تجهیزات استفاده شده در آزمایش

در آزمایش‌ها طراحی شده نیاز به ماشین تخلیه الکتریکی پیشرفته با دقت کمتر از ۱ میکرون نیاز است و همچنین قابلیت دوران ابزار را نیز داشته باشد. ماشین ONA علاوه بر با قابلیت CNC دارای تنظیمات دستی و دوران ابزار را می‌باشد و همچنین دارای دقتی برابر ۰/۱ میکرون است. نمونه‌ای از مدل H300 دستگاه ONA را می‌توان

هستند، بنابراین در روش EDM امکان ماشین‌کاری مواد بسیار سخت با هر استحکامی و تنش تسلیم بالایی را وجود دارد [۱]. از جمله مواد بسیار سخت و پر کاربرد که ماشین‌کاری سنتی قابلیت باربرداری از آن را ندارد، تنگستن کاربید است، این جنس در رتبه‌بندی سختی در مقیاس Mohs تقریباً ۹، با عدد ویکرز ۱۷۰۰ - ۲۴۰۰ است. مدول ینگ در حدود ۵۵۰ گیگا پاسکال، مدول برشی ۲۷۰ گیگا پاسکال است. این جنس استحکام کششی نهایی ۳۴۴/۸ مگا پاسکال دارد. تنگستن کاربید هنگامی که تحت فشار معادل ۷۶۰ میلیمتر جیوه قرار دارد، دارای نقطه ذوب بالا در دمای ۲۸۷۰ درجه سانتی‌گراد و نقطه جوش ۶۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، همچنین هدایت حرارتی  $\frac{W}{m.k}$  84.02 و ضریب انبساط حرارتی  $\frac{\mu m}{m.k}$  5.8 دارد. تنگستن کاربید در ابزارهای ماشین‌کاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابزار برشی تنگستن کاربید متخلخل در برابر سایش مقاوم است و همچنین می‌تواند در برابر درجه حرارت بالا مقاومت‌تر از فولاد ابزار با سرعت زیاد است، از دیگر کاربردهای آن می‌توان به لوازم جراحی، لوازم ورزشی، قالب‌سازی و ... اشاره کرد.

در این مقاله به بررسی میکرو سوراخ‌کاری تخلیه الکتریکی با استفاده از دستگاه EDM روی تنگستن کاربید پرداخته شده است. از آنجایی که محققین مختلفی در این زمینه فعالیت‌های علمی داشته‌اند بدین جهت لازم دیده شده است برخی از این تلاش‌ها ذکر شود.

مواد ترد به علت خاصیت شکنندگی و همچنین استفاده مبرم از آن‌ها، مورد توجه محققین قرار گرفته است، در همین راستا در سال ۲۰۰۲، Kia Egashira در دانشگاه واکایاما ژاپن، سوراخ‌کاری ریز در مواد ترد را بررسی و تحلیل کرده‌اند. ایشان با استفاده از ابزاری با سطح مقطع D شکل و شعاع لبه برشی ۰/۵ میکرومتر که به روش WEDG ساخته شده بود، به بررسی عمق برش و زاویه آزاد ابزار در سوراخ‌کاری، سوراخ‌هایی به قطر کمتر از ۲۲ میکرومتر و عمق ۹۰ میکرومتر پرداخته‌اند [۴]. وی همچنین در سال ۲۰۰۹ با استفاده از الکترودهایی از جنس تنگستن و سیلیکون، ماشین‌کاری با منبع تغذیه ایزو پالس و ولتاژ مدار باز ۲۰ ولت انجام داده است و سوراخ‌هایی به قطر کمتر از ۱ μm و عمق بیشتر از ۱ μm با موفقیت توسط ابزار تنگستن ایجاد شده است [۵].

M.P.Jahan در دانشگاه ملی سنگاپور در سال ۲۰۰۸ با روش تخلیه الکتریکی با دو نوع منبع تغذیه ایزو پالس و RC میکرو سوراخ‌هایی بر روی تنگستن کاربید ایجاد نمود، که نشان داد برای میکرو سوراخ‌کاری WC استفاده از منبع RC دقت ابعادی و کیفیت سطح بهتری دارد [۶].

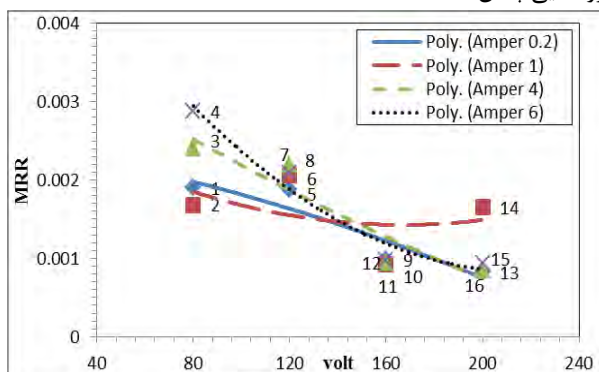
Pham در سال ۲۰۰۷ به همراه همکارانش تأثیر فاکتورهای مختلف تأثیرگذار بر سایش میکرو الکتروود در مدت ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سوراخ‌کاری با میکرو الکتروود لوله‌ای و میله‌ای را بررسی کرده‌اند. آن‌ها یک روشی برای محاسبه نرخ سایش حجمی بر اساس اطلاعات هندسی پیشنهاد داده‌اند و همچنین روشی برای جبران فرسایش نیز ارائه داده‌اند [۷].

وزن ابزار بعد از ماشین کاری می باشد. که مقدار بدست آمده درصد فرسایش ابزار را نشان می دهد.

$$EW = \frac{W_a}{W_{ta}} \times 100 \quad (2)$$

### تحلیل نرخ برداشت مواد

با افزایش جریان الکتریکی و زمان روشنایی پالس، انرژی جرقه بیشتر می شود و اگر این امر در ولتاژهای پایین باشد سبب ایجاد انرژی جرقه مناسب و تشکیل کانال پلاسما متناسب می شود و در نتیجه نرخ باربرداری بیشتر می گردد، در این وضعیت نیز افزایش سرعت دورانی می تواند در پراکنده کردن آلودگی ها و کاهش درجه حرارت به دی یونیزه شده محیط در زمان خاموشی پالس کمک کند و سرعت و حجم برداشت مواد افزایش می یابد. ولی اگر همزمان با افزایش جریان الکتریکی و زمان روشنایی پالس، ولتاژ نیز بیشتر شود سبب افزایش زیاد انرژی جرقه و تشکیل کانال پلاسمایی بزرگ تر می گردد که این امر باعث کاهش بی رویه درجه حرارت محیط می شود و در نتیجه سبب تأخیر در روشنایی پالس می شود و بعضاً ممکن است به علت ولتاژ و جریان بالا عامل DC-ARC پدید آید که این دو باعث افزایش مدت زمان ماشین کاری و در نتیجه کاهش نرخ برداشت مواد می شوند، از طرفی دیگر با افزایش سرعت دورانی ابزار، نرخ کاهش درجه حرارت کانال پلاسما افزایش می یابد و مانع از ایجاد جرقه می شود که عاملی برای افزایش زمان تأخیر و کاهش MRR می باشد. در نمودارهای ۱، ۲، ۳ و ۴ همان طور که مشاهده می شود، در حالت کلی با افزایش ولتاژ میزان برداشت مواد کاهش می یابد که در ولتاژهای پایین با افزایش آمپر میزان نرخ باربرداری افزایش می یابد ولی در ولتاژهای بالا با افزایش آمپر این نرخ کاهش می یابد. از طرفی دیگر با توجه به شیب نمودارهای رسم شده در نمودار ۱ میزان کاهش MRR با افزایش ولتاژ در جریان های بالاتر بیشتر است. این تغییرات در MRR با تغییر ولتاژ و جریان کاملاً مشابه تغییرات ولتاژ و زمان روشنایی پالس است.



نمودار ۱ تغییرات جریان الکتریکی بر حسب ولتاژ در نرخ برداشت مواد

در شهرک علمی و تحقیقاتی شیخ بهایی واقع در دانشگاه صنعتی اصفهان مشاهده کرد که در آزمایش ها انجام شده از این دستگاه استفاده شده است.



شکل ۱ دستگاه EDM مدل ONA-H300

ابزار مورد استفاده برای ماشین کاری قطعات مقاوم به فرسایش همچون تنگستن کاربرد اصولاً، تنگستن- مس پیشنهاد می شود. تنگستن- مس به دلیل آنکه ترکیبی از مس با هدایت الکتریکی و گرمایی فوق العاده بالا، و تنگستن با هدایت الکتریکی و گرمایی بالا و صلبیت فوق العاده و مقاوم در برابر فرسایش، جنسی بسیار مناسب برای فرآیند اسپارک است. تنگستن مس مورد استفاده با نام مشخصه S15WC با درصد ترکیبی ۷۰٪ تنگستن و ۳۰٪ مس با تراکم  $\frac{9.6}{14/25}$  رسانایی الکتریکی ۴۴ الی ۵۲ و سختی راکول B ۹۰-۹۶ مناسب تشخیص داده شد است.

در این تحقیق از تنگستن کاربرد به عنوان قطعه کار با ضخامت ۳۰۰ میکرومتر (۰/۳ میلی متر)، تختی ۰/۱ میلی متر، کیفیت سطح ۰/۸ و سختی ۸۳ راکول C استفاده شده است.

### متغیرهای پاسخ

#### نرخ برداشت مواد

میزان برداشت مواد قطعه کار در واحد زمان را نرخ ماشین کاری می نامند. برای اندازه گیری نرخ ماشین کاری از فرمول زیر استفاده شده است، که  $W_b$  وزن قطعه کار قبل از سوراخ کاری و  $W_a$  وزن قطعه کار بعد از سوراخ کاری است، و  $t$  مدت زمان ماشین کاری به ثانیه است. می توان به جای استفاده از وزن از دست رفته از حجم سوراخ استفاده کرد.

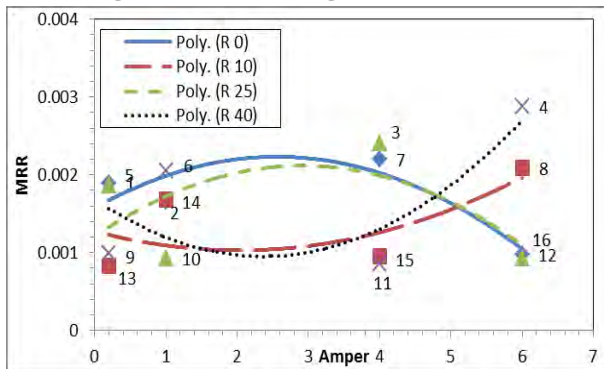
$$MRR = \frac{W_b - W_a}{t} \quad (1)$$

### فرسایش ابزار

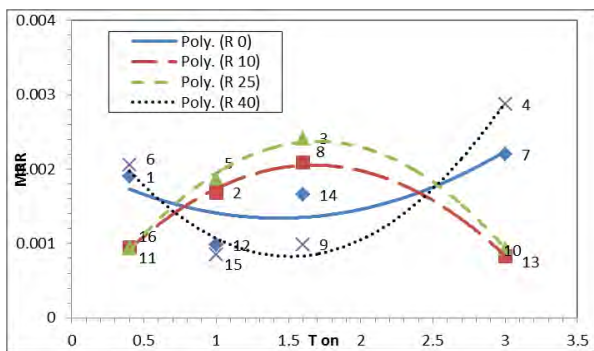
مقدار حجم (وزن) حذف شده از مواد ابزار نسبت به حجم (وزن) اولیه ابزار را میزان فرسایش ابزار می نامند.

برای اندازه گیری میزان فرسایش ابزار از فرمول (۲) می توان استفاده کرد. در این فرمول  $W_a$  وزن قطعه کار بعد از ماشین کاری و  $W_{ta}$

کردن محیط پلاسما و پراکندگی آلودگی‌ها می‌شود ولی در ادامه با افزایش زمان روشنایی پالس کانال پلاسما بزرگ‌تر می‌شود و در نتیجه کاهش دمای کانال سریع‌تر رخ می‌دهد که سرعت دورانی این کاهش دما تشدید کرده و مانع از ایجاد جرقه می‌گردد و نرخ باربرداری کاهش می‌یابد، در سرعت‌های دورانی زیاد، به علت ایجاد اغتشاش بیش‌ازحد، یونیزاسیون محیط با مشکل مواجه می‌شود که در نتیجه زمان تأخیر افزایش می‌یابد و MRR کاهش می‌یابد.



نمودار ۵ تغییرات سرعت دورانی بر حسب جریان الکتریکی در نرخ برداشت مواد



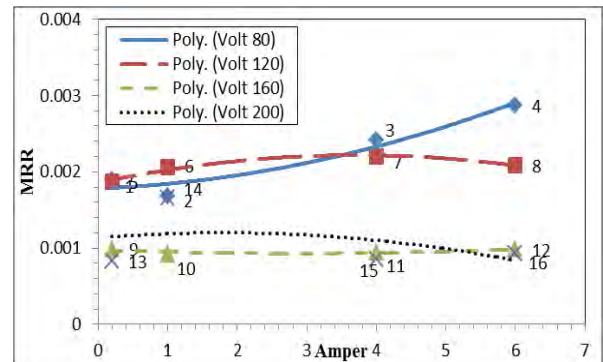
نمودار ۶ تغییرات سرعت دورانی بر حسب روشنایی پالس در نرخ برداشت مواد

با توجه به معادله ۳ مدل برازش شده برای نرخ برداشت مواد و تحلیل نمودارها می‌توان بیان کرد که نرخ برداشت مواد با افزایش جریان و روشنایی پالس و همچنین سرعت دورانی بیشتر می‌شود و با ولتاژ کاملاً نسبت عکس دارد. تأثیر ولتاژ بیشتر از سایر پارامترها است و به دلیل رابطه مرتبه دوم، در زمان‌های روشنایی پالس زیاد، میزان برداشت نیز بیشتر می‌شود.

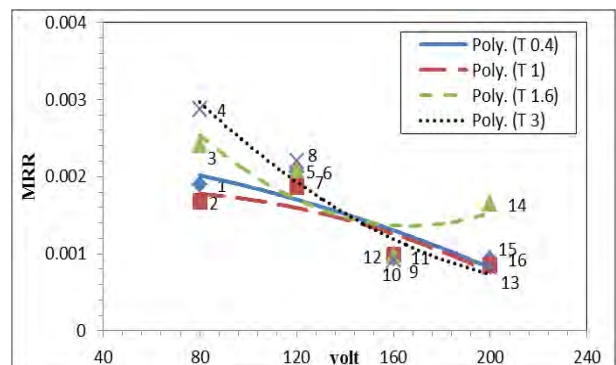
$$\begin{aligned} MRR = & -0.00138 - 0.0005149 \text{ Volt} + 0.000023438 \text{ Amper} + 0.000116 T_{on} \\ & - 2.0837 E - 7 \text{ volt}^2 + 0.00023554 T_{on}^2 + 6.753518 E - 7 \text{ Rotation}^2 \\ & - 2.82309 E - 7 \text{ Volt} * \text{Rotation} + 0.00001524 \text{ Amper} * \text{Rotation} \\ & - 0.00001902 T_{on} * \text{Rotation} \end{aligned} \quad (3)$$

### تحلیل فرسایش ابزار

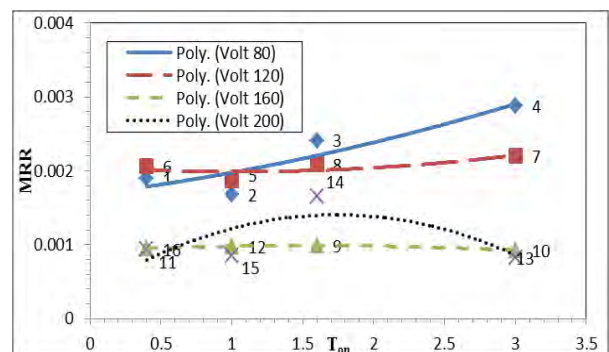
در حالت کلی با افزایش ولتاژ و جریان الکتریکی، فرسایش ابزار ابتدا افزایش می‌یابد و در ادامه سیر نزولی دارد. ابتدا با افزایش ولتاژ و جریان الکتریکی، انرژی جرقه بیشتر می‌شود ولی به دلیل کوچکی بیش‌ازحد ابزار (قطر کم ابزار) خوردگی از ابزار بیشتر از برداشت از قطعه‌کار است و فرسایش بیشتر صورت می‌گیرد ولی در ادامه با



نمودار ۲ تغییرات ولتاژ بر حسب جریان الکتریکی در نرخ برداشت مواد



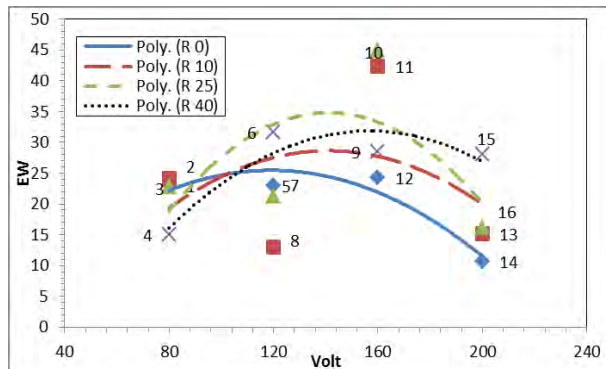
نمودار ۳ تغییرات روشنایی پالس بر حسب ولتاژ در نرخ برداشت مواد



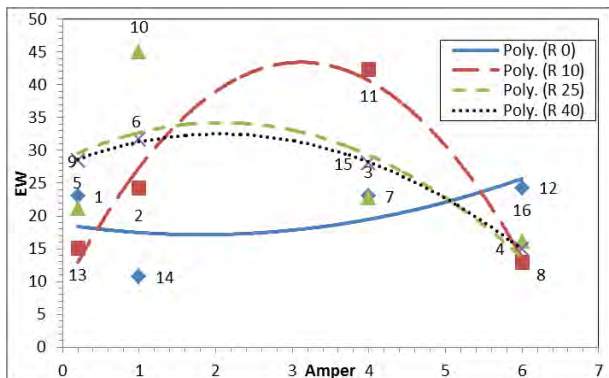
نمودار ۴ تغییرات ولتاژ بر حسب روشنایی پالس در نرخ برداشت مواد

در حالتی که ابزار بدون چرخش ماشین‌کاری می‌کند با افزایش جریان الکتریکی ابتدا نرخ باربرداری روند صعودی دارد ولی در ادامه با افزایش جریان، نرخ باربرداری روند نزولی پیدا می‌کند، با افزایش جریان با توجه به سطح تماس ابزار میزان باربرداری تا نقطه بیشینه افزایش می‌یابد و سپس به علت ازدیاد در حجم باربرداری و ایجاد آلودگی بیشتر، دی الکتریک توانایی خود را در یونیزه کردن محیط از دست می‌دهد و پدیده arc به وجود می‌آید که سبب کاهش نرخ باربرداری می‌شود (نمودار ۵). این مسئله نیز قابل مشاهده است که با افزایش زمان روشنایی پالس در سرعت دورانی صفر، انرژی جرقه بیشتر و میزان MRR افزایش می‌یابد (نمودار ۶). همان‌طور که در نمودار ۶ مشاهده می‌شود با افزایش همزمان Ton و سرعت دورانی میزان باربرداری نیز بیشتر می‌شود ولی در ادامه کاهش قابل‌توجهی دارد، این تغییر بدین دلیل است که ابتدا سرعت دورانی باعث سرد

حالت‌هایی که از سرعت دورانی استفاده می‌شود با افزایش آمپر و ولتاژ، انرژی جرقه نیز افزایش می‌یابد و سبب افزایش فرسایش می‌شود، علت آن این است که چرخش ابزار باعث ایجاد اغتشاش و پراکنده کردن آلودگی‌ها و آماده‌سازی بهتر محیط برای یونیزاسیون و ایجاد جرقه‌های بهتر می‌شود که در نتیجه به حذف بدنه خورده شده ابزار کمک می‌کند و فرسایش زودرسی را ایجاد می‌کند و چون در ادامه افزایش جریان و ولتاژ، کانال پلاسما نیز بزرگ‌تر می‌شود و مناسب نیست، خوردگی در بدنه ابزار کمتر می‌شود و به راحتی با چرخش و اغتشاش حذف نمی‌شود.

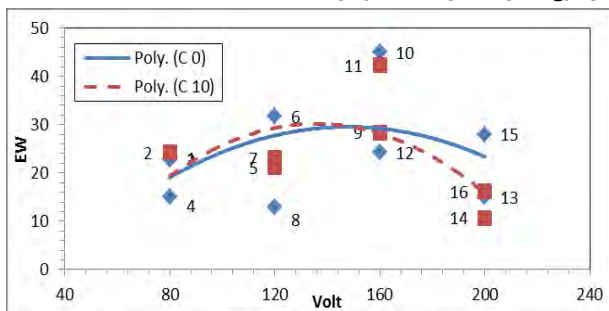


نمودار ۹ تغییرات سرعت دورانی بر حسب ولتاژ در فرسایش ابزار



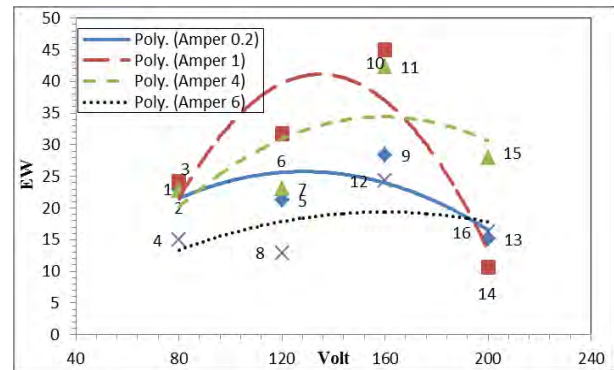
نمودار ۱۰ تغییرات سرعت دورانی بر حسب جریان الکتریکی در فرسایش ابزار

ماشین‌کاری با مدار ایزو پالس، انرژی بیشتری نسبت به مدار RC دارد و با افزایش ولتاژ نیز این انرژی در هر دو حالت بیشتر می‌گردد، ولی به دلیل آنکه انرژی ایزو پالس بیشتر است سبب تخلیه الکتریکی قوی‌تری بین الکترود و قطعه‌کار می‌شود که در نتیجه خوردگی در این نوع مدار بیشتر است (نمودار ۱۱).

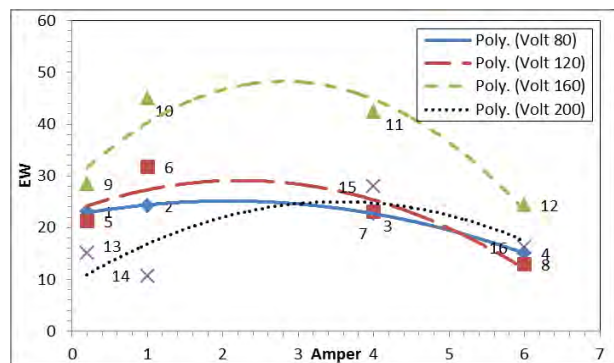


نمودار ۱۱ مقایسه مولد ایزو پالس و RC در فرسایش ابزار

افزایش انرژی جرقه، قطر کانال پلاسما نیز بیشتر می‌شود که سبب کاهش درجه حرارت و مانع ایجاد جرقه می‌گردد و در نتیجه فرسایش ابزار به علت کاهش در برداشت مواد کمتر می‌شود. دلیل دیگر این روند صعودی و نزولی این است که نرخ برداشت مواد با افزایش جریان الکتریکی مقدار بهینه‌ای دارد و در ادامه آن با افزایش جریان، نرخ برداشت کاهش می‌یابد، این تغییرات در روند در فرسایش ابزار تأثیر دارد به طوری که با افزایش جریان الکتریکی فرسایش مقدار بحرانی دارد و سپس کاهش می‌یابد (نمودارهای ۷ و ۸).



نمودار ۷ تغییرات جریان الکتریکی بر حسب ولتاژ در فرسایش ابزار



نمودار ۸ تغییرات ولتاژ بر حسب جریان الکتریکی در فرسایش ابزار

قطر ابزار در فرسایش الکترود اهمیت قابل توجهی دارد به طوری که به علت کم بودن قطر، فرسایش در گوشه‌ها و اطراف ابزار و همچنین در سطح مقطع ابزار به یک میزان است و زمانی که انرژی جرقه به حدی است که کانال پلاسما بزرگ نباشد خوردگی از همه جهت برای ابزار به وجود می‌آید و می‌توان این‌طور بیان کرد که سبب فرسایش حجمی می‌شود که این به خودی خود سبب افزایش زیاد فرسایش ابزار می‌شود که این پدیده به علت قطر میکرونی ابزار غیرقابل رفع می‌باشد.

در حالتی که ابزار بدون دوران ماشین‌کاری می‌کند، با افزایش ولتاژ تغییر قابل توجهی مشاهده نمی‌شود ولی با افزایش بیش از حد ولتاژ در زمان روشنایی زیاد در سوراخ شماره ۱۴ سبب افزایش قطر پلاسما می‌شود که فرسایش الکترود کاهش می‌یابد. این مسئله برای تغییر جریان و زمان روشنایی پالس در سرعت دورانی صفر نیز برقرار است. در حالت کلی وقتی که سرعت دورانی ابزار استفاده نمی‌شود میزان فرسایش ابزار به میزان قابل توجهی کمتر از مواردی است که سرعت دورانی استفاده می‌شود (نمودارهای ۹ و ۱۰).

## قدردانی و تشکر

کلیه فعالیت‌های انجام‌شده در این تحقیق در شهرک صنعتی شیخ بهایی واقع در دانشگاه صنعتی اصفهان با همکاری شرکت فراکوش سپاهان و جناب آقای مهندس احسان ایمانیان صورت گرفته است و از زحمات ایشان تشکر و قدردانی می‌شود.

## مراجع

- [1] A. Abdollah, "Voltage Injection and Performance Evaluation in EDM," P.H.D, Victoria University of Manchester, 1989
- [2] E. C. Jameson, *Electrical Discharge Machining (EDM)*: Society of Manufacturing Engineers (SME), 2001
- [3] R. D. S. Mahendran, T. Nagarajan, and A. Majdi, "A Review of Micro-EDM," in *proceeding of the international multiconference of engineers and computer scientists*, Hong kong, 2010
- [4] M. K. Egashira Kai, "Microdrilling and micromilling of brass using a 10  $\mu$ m Society for Precision diameter tool," *Japon Engineering*, pp. 649-6493
- [5] K. M. Kai Egashira, "Micro-drilling of monocrystalline silicon using a cutting tool," *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, vol. 26, pp. 263-268, 2002
- [6] Y. S. W. M.P. Jahan, M. Rahman, "A study on the quality micro-hole machining of tungsten carbide by micro-EDM process using transistor and RC-type pulse generator," *journal of materials processing technology*, vol. 209, pp. 1706-1716, 2009
- [7] T. Pham, S. Bigot, K. Popov, S. A. I. D Dimov, "An investigation of tube and rod electrode wear in micro EDM drilling," *journal of manufacturing Technology*, vol. 33, pp. 103-109, 2007
- [8] M. K. Mohd Zahiruddin, "Comparison of energy and removal efficiencies between micro and macro EDM," *Journal of CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 61, pp. 187-190, 2012

از تحلیل ذکرشده و معادله بدست آمده مدل رگرسیونی فرسایش ابزار (معادله ۴) این واضح است که افزایش جریان، ولتاژ و روشنایی پالس بیشترین تأثیر مستقیم در افزایش فرسایش را دارند، ولی در ولتاژها و جریان‌های بالا با توجه به مرتبه دوم این نرخ کاهش می‌یابد

$$EW = 19.71063 + 0.25180 \text{ Volt} + 11.39994 \text{ Amper} + 32.43892 T_{on} - 0.00143 \text{ Volt}^2 - 2.25879 \text{ Amper}^2 + 4.59250 T_{on}^2 - 0.00281 \text{ Rotation}^2 + 0.03222 \text{ Volt} * \text{Amper} + 0.06922 \text{ Volt} * T_{on} - 0.12480 \text{ Amper} * \text{Rotation} + 0.46247 T_{on} * \text{Rotation} \quad (4)$$

## نتیجه‌گیری

مجموعه تحقیقات انجام‌شده در این فعالیت علمی باوجود خطاهای ناشی از عوامل اغتشاش‌گر مانند دقت دستگاه، خطاهای کامپیوتری در اندازه‌گیری ابعاد ابزار، ... که همواره در آزمایش‌ها قرار دارد، با توجه به ماهیت فرآیند و انطباق بالای ۹۰٪ مدل‌های بدست آمده کاملاً قابل قبول می‌باشند.

به طور کلی دستاوردهای مهم این تحقیق را می‌توان این‌طور بیان کرد:

۱. در حالت کلی مدار RC در همه پارامترهای خروجی نتیجه بهتر ارائه داده است.
۲. به منظور دستیابی به نرخ برداشت بالا بهتر است از ولتاژ کم استفاده شود.
۳. در نرخ برداشت مواد زمانی که ابزار دوران ندارد بهتر است محدوده جریان الکتریکی در بازه ۲ الی ۴ آمپر تعیین شود. در این وضعیت زمان روشنایی پالس بهتر است بیشتر باشد.
۴. در صورتی که از سرعت دورانی استفاده می‌شود بهتر است از سرعت‌های زیاد اجتناب شود و سرعتی متوسط انتخاب گردد و زمان روشنایی پالس نیز تقریباً در محدوده ۱/۵ الی ۲ میکروثانیه و جریان الکتریکی نیز در محدود سرعت ۲ الی ۴ آمپر نتیجه مطلوبی برای نرخ برداشت مواد ارائه می‌دهد.
۵. نتایج نشان داده در صورتی که جریان و ولتاژ بالا انتخاب شوند فرسایش کمتری در ابزار رخ می‌دهد.
۶. بدون استفاده از سرعت دورانی و با ولتاژ بالا فرسایش کمتری در ابزار اتفاق می‌افتد و هر چقدر در این وضعیت جریان الکتریکی کمتری برقرار باشد بهتر است.
۷. در صورتی که از سرعت دورانی استفاده می‌شود بهتر است حداً امکان از سرعت پایین در ولتاژ بالا برای فرسایش کمتر ابزار بهره برد.
۸. نتایج نشان می‌دهد که زمان خاموشی پالس بیشتر در حالت کلی فرسایش کمتری را سبب می‌شود.