

بررسی کیفیت سطح لبه ورودی میکرو سوراخ ایجاد شده به روش ماشینکاری تخلیه الکتریکی روی تنگستن کاربید

نیما تفضلی^۱، علی اکبر اکبری^۲ و احسان ایمانیان^۳
^۱دانشگاه فردوسی مشهد، nima.tafazooli@stu.um.ac.ir
^۲دانشگاه فردوسی مشهد، akbari@um.ac.ir
^۳شرکت پایا هیدرولیک جم، info@payahydraulic.ir

چکیده - ماشین کاری تخلیه الکتریکی پروسه‌ای است که در آن مواد از طریق جرقه‌های الکتریکی بین الکترود و قطعه کار بصورت غوطه‌ور در سیال دی‌الکتریک 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 را کول 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، که به روش نسبت سیگنال به نویز و مدل رگرسیونی، کیفیت لبه ورودی سوراخ بررسی و بیان شده است که مدل رگرسیونی نتایج دقیقتری را نسبت به تحلیل سیگنال به نویز ارائه داده است. در این تحقیق، در مدار RC نسبت به مدار ایزوپالس نتایج بهتری بدست آمده است همچنین سرعت دورانی بالا نتیجه مطلوبی در کیفیت سطح لبه ورودی سوراخ دارد.

کلید واژه- ماشینکاری تخلیه الکتریکی، میکرو سوراخکاری تخلیه الکتریکی، تنگستن کاربید، تنگستن-مس

ابزار با ایجاد حفره‌ای در قطعه کار حک می‌شود، در این فرآیند به دلیل ولتاژ ایجاد شده یک میدان الکتریکی به وجود می‌آید، چنانچه دی‌الکتریک در میدان الکتریکی قرار گیرد، مولکول‌های خنثی و متقارن آن به مولکول‌های قطبی تبدیل می‌شود و دو قطب میدان، مولکول‌های خنثی دی‌الکتریک را کش می‌آورند. الکترون‌ها به سمت قطب مثبت و هسته که شامل پروتون‌ها است به سمت قطب منقی کشیده می‌شوند که اگر این میدان خیلی قوی باشد بر مقاومت دی‌الکتریک غلبه کرده و

۱- مقدمه

ماشین کاری تخلیه الکتریکی، روش باربرداری است که در آن ولتاژ پالسی و منقطع بین دو الکترود بنام‌های ابزار و قطعه کار برقرار شده است که در سیالی بنام دی‌الکتریک غوطه‌ور می‌باشند و فضای بین آن‌ها را دی‌الکتریک 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



کانال پلاسما و کاهش دانسیته پلاسما این مقدار نیز کمتر می‌شود لذا عاملی که در ادامه زمان جرقه باعث برداشت مواد می‌شود حرارت و جوشش حجمی است یعنی مکانیزم حرارت و تبخیر بر مکانیزم الکترومغناطیسی در طول زمان جرقه غلبه می‌کند و مکانیزم الکترومغناطیس رو به افول می‌رود.

جوشش حجمی زمانی اتفاق می‌افتد که درجه حرارت مایع بیش از درجه حرارت نقطه جوش آن در فشار محیط باشد؛ یعنی اگر فشار را از روی سیالی که درجه حرارت آن بالا باشد برداریم، آن سیال دچار جوشش حجمی خواهد شد. حال در مکانیزم تخلیه الکتریکی زمانی کانال پلاسما تشکیل می‌شود، فشار کانال در ابتدای تشکیل کانال افت شدید دارد و به دلیل درجه حرارت بالا در منطقه ذوبی که پدید می‌آید، پدیده جوشش حجمی به همراه پدیده الکترومغناطیس در همان ابتدا اتفاق می‌افتد. به موازات کاهش فشار در طول زمان جرقه، پدیده جوشش حجمی تدریجاً از مقدار مذاب مکیده تا اینکه به انتهای جرقه می‌رسیم که در این لحظه جریان قطع می‌شود و در واقع منبع حرارت نیز قطع می‌گردد و به ناگهان فشار کانال پلاسما در انتهای جرقه افت دیگری پیدا می‌کند و به همین جهت پدیده جوشش حجمی بیشتر شده و

الکترون‌ها را جدا می‌کند و در نتیجه مولکول‌های دی‌الکتریک در محلی که میدان الکتریکی خیلی قوی است در نزدیک‌ترین نقطه یا نقاط یونیزه می‌شوند. در این حالت گفته می‌شود مقاومت دی‌الکتریک شکسته (Break Down) شده است [۱]. در نقطه‌ای که دی‌الکتریک شکسته و یونیزه شده است، و از حالت نارسا بودن به وضعیت رسانای الکتریکی تبدیل می‌شود و کانال پلاسما ایجاد خواهد شد جریان الکتریکی بین ابزار و قطعه کار برقرار می‌شود و جرقه‌زنی رخ می‌دهد و بعد اتمام جرقه‌زنی و دی‌الکتریک 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].

در فرآیند تخلیه الکتریکی یک پروسه الکتروترمال می‌باشد، یعنی علاوه بر میدان الکتریکی و جریان الکتریسیته ایجاد شده، فرآیند حرارتی نیز در برداشت مواد دخیل است. زمان روشنایی جرقه و اعمال جریان الکتریکی، فقط در شروع جرقه شاهد برداشت مواد از طریق الکتریسته می‌باشیم و در ادامه با گشادتر شدن



اسپارک است که با حرکت دورانی الکتروود، میکرو سوراخ ایجاد می‌کند [۳].

روش EDM و Micro-EDM به دلیل آنکه روش باربرداری 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 ماشین‌کاری، عوامل استحکام، تنش تسلیم، مدول الاستیسیته، سختی و کلاً خواص مکانیکی مهم 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 یانگ در حدود ۵۵۰ گیگا پاسکال، مدول بخش عمده آن ۴۳۹ 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

محتویات چاله مذاب به ناگهان به بیرون می‌ریزد [۱].

میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بسیار شبیه به اساس ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی است. ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی یک فرآیند گرمایی است که با استفاده از تخلیه الکتریکی از مواد رسانای الکتریکی برداشت می‌کند. EDM توانایی ماشین‌کاری حفره‌های دقیق قالب‌ها را دارد. EDM روشی مفید برای ساخت میکرو قطعات کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرومتر می‌باشد. میکرو EDM شبیه ماکرو EDM است بطوریکه فرآیند مکانیزم آن براساس فرآیندهای الکتروترمال است. تفاوت میکرو و ماکرو EDM در قطر کانال پلاسما است. با توجه به انواع مختلف میکرو EDM، فرآیند ماشین‌کاری خیلی انعطاف‌پذیر است. سه نوع از انواع کاربردی در صنایع عبارت از میکرو اسپارک (μ -diesinking)، میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی (μ -WEDG) و میکرو تخلیه الکتریکی سوراخ‌کاری (μ -ED drilling) می‌باشند.

در میکرو اسپارک بر اساس شکل ابزار، برای ساخت شکل سه بعدی استفاده می‌شود. میکرو تخلیه الکتریکی سیمی عملیات حرکت روی مسیر تعریف شده توسط سیم الکتروود است و میکرو سوراخ‌کاری یک مورد ویژه از میکرو



سوراخ‌کاری، سوراخ‌هایی به قطر کمتر از ۲۲ میکرومتر و عمق ۹۰ میکرومتر پرداخته‌اند [۵]. در سال ۲۰۱۰، Adrin Losub به همراه همکارانش در دانشگاه لاسی رومانی به تحقیق در مورد تأثیر پارامترهای مهم در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی روی نرخ برداشت مواد، فرسایش ابزار و کیفیت سطح در مواد کامپوزیتی با پایه فلزی پرداخته‌اند که با استفاده از ۲۷ ابزار برنجی به قطر ۳/۹۷ میلی‌متر در کامپوزیت فلزی (AL/Sic) سوراخ‌هایی ایجاد کرده‌اند که پالس‌های روشن و خاموش و جریان مصرفی برای هر ابزار تغییر داده شده است، وی بیان کرده است که ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی کامپوزیت (AL/Sic) با کیفیت خوبی انجام می‌شود و شدت جریان الکتریکی بیشترین تأثیر را در برداشت مواد و فرسایش ابزار دارد [۶]. در سال ۲۰۰۹ بررسی‌هایی توسط Kia Egashira در دانشگاه کیوتو ژاپن روی سوراخ‌کاری به روش EDM با استفاده از الکترودهای بسیار ریز از جنس تنگستن و سیلیکون به قطر یک میکرومتر که به دو روش ECM و WEDG ساخته شده بودند انجام شده است، ماشین‌کاری با منبع تغذیه ایزو پالس و ولتاژ مدارباز ۲۰ ولت انجام شده است و سوراخ‌هایی به قطر کمتر از 1 μm و عمق بیشتر

می‌باشد، همچنین هدایت حرارتی $84.02 \frac{W}{m.k}$ و ضریب انبساط حرارتی $5.8 \frac{\mu m}{m.k}$ دارد. تنگستن کاربرد در ابزارهای ماشین‌کاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابزار برشی تنگستن کاربرد 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 [۴]. در این مقاله به بررسی کیفیت لبه ورودی سوراخ ایجاد شده به روش میکرو سوراخ‌کاری تخلیه الکتریکی با استفاده از دستگاه EDM روی تنگستن کاربرد 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



سوراخ EDM ارائه داده‌اند. آن‌ها در این مدل ریاضی به آنالیز پارامترهای موثر مانند جریان تخلیه، زمان روشنایی پالس و ظرفیت خازن در میکرو سوراخ ایجاد شده در تنگستن کاربرد پرداخته‌اند. آن‌ها بیان کرده‌اند که تأثیر جریان و ظرفیت خازن بیشترین تأثیر را دارند [۱۱].

Mohd Zahiruddin در سال ۲۰۱۲ در دانشگاه توکیو 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 [۱۲].

۲- 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_{on})، زمان خاموشی پالس (T_{off})، نوع منبع تغذیه (C) و سرعت دوران ابزار (C-Rotation)، انتخاب شدند،

از $1\mu m$ با موفقیت توسط ابزار تنگستن ایجاد شده است [۷].

Zhao Wansheng در دانشگاه هاربین چین در سال ۲۰۰۰ تحقیقاتی روی میکرو سوراخ‌کاری آلیاژ تیتانیوم توسط روش تلفیقی از EDM و USM انجام داده است. با توجه به اینکه تیتانیوم هدایت الکتریکی کمی دارد با استفاده از USM توانسته سوراخ‌های به قطر $0.2mm$ در قطعه کار ایجاد کند [۸].

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 کاربرد ایجاد نمود، که نشان داد برای میکرو سوراخ‌کاری WC استفاده از منبع RC دقت ابعادی و کیفیت سطح بهتری دارد [۹].

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 [۱۰].

Nun-Ming Liu با همکاری همکارانش در سال ۲۰۱۰ مدلی برای لبه‌های فروپاشیده در

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



شکل ۱: دستگاه تخلیه الکتریکی مدل ONA H300

ابزار مورد استفاده برای ماشین‌کاری قطعات مقاوم به فرسایش همچون تنگستن کاربرد اصولاً، تنگستن - مس پیشنهاد می‌شود. تنگستن - مس به دلیل آنکه ترکیبی از مس با هدایت الکتریکی و گرمایی فوق‌العاده بالا، و هدایت الکتریکی و گرمایی بالا و صلبیت فوق‌العاده و مقاوم در برابر فرسایش، جنسی بسیار مناسب برای فرآیند اسپارک است.

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 ۴ سطحی و ۲ عامل دو سطحی هستند، آرایه متعامد L_{16} از طرح آزمایشی تاگوچی انتخاب شد.

جدول ۱: پارامترها و سطوح انتخاب شده طرح تاگوچی

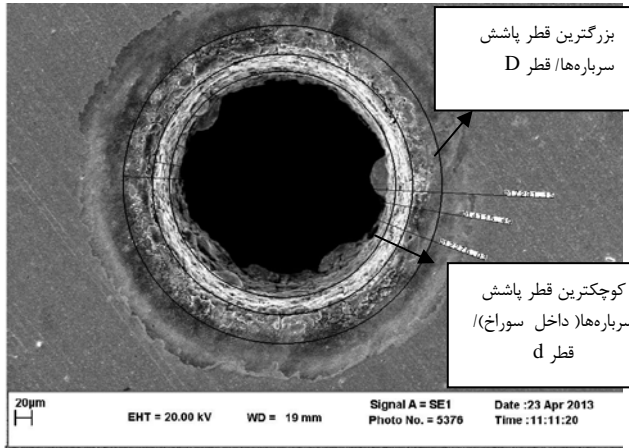
Units/parameters	Levels			
	1	2	3	4
V / v	80	120	160	200
I / Amper	0.2	1	4	6
$T_{on} / \mu s$	0.4	1	1.6	3
C-Rotation / $\frac{rev}{min}$	0	10	25	40
Power	RC/10F		Iso-pulse	
$T_{off} / \mu s$	3		0.8	

جدول ۲: جدول تاگوچی L_{16} و مقدار پارامتر خروجی

number's EXP	VOLT	Amper	T on	C-Rotation	T off	Capacitance	F enter
1	80	0.2	0.4	0	0.8	0	1.1514
2	80	1	1	10	0.8	10	1.2403
3	80	4	1.6	25	3	0	1.0806
4	80	6	3	40	3	0	1.1069
5	120	0.2	1	25	3	10	1.1025
6	120	1	0.4	40	3	0	1.0947
7	120	4	3	0	0.8	10	1.0972
8	120	6	1.6	10	0.8	0	1.1444
9	160	0.2	1.6	40	0.8	10	1.1507
10	160	1	3	25	0.8	0	1.3804
11	160	4	0.4	10	3	10	1.4085
12	160	6	1	0	3	0	1.3224
13	200	0.2	3	10	3	0	1.1871
14	200	1	1.6	0	3	10	1.1931
15	200	4	1	40	0.8	0	1.4283
16	200	6	0.4	25	0.8	10	1.3741

۱-۲- تجهیزات استفاده شده در آزمایش

در آزمایش‌ها طراحی شده نیاز به ماشین تخلیه الکتریکی پیشرفته با دقت کمتر از ۱ میکرون



شکل ۲: روش تعیین قطر پاشش و نسبت آن‌ها در میکرو سوراخ

تنگستن مس مورد استفاده با نام مشخصه S15WC با درصد ترکیبی ۷۰٪ تنگستن و ۳۰٪ مس با تراکم $\frac{14}{25}$ رسانایی الکتریکی ۴۴ الی ۵۲ و سختی راکول B ۹۰-۹۶ مناسب تشخیص داده شد است. در این تحقیق از تنگستن کاربرد به‌عنوان قطعه‌کار با ضخامت ۳۰۰ میکرومتر ($\frac{0}{3}$ میلی متر)، تختی ۰/۱ میلی‌متر، کیفیت سطح ۰/۸ و سختی ۸۳ راکول C استفاده شده است.

۲-۳- تحلیل نسبت سیگنال به نویز کیفیت

لبه ورودی سوراخ

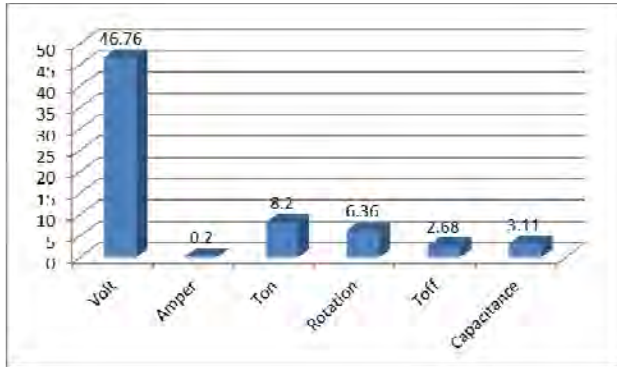
با توجه به آزمایش تاگوچی انجام شده، تحلیل واریانس ANOVA، تحلیل نسبت سیگنال به نویز انجام شده است و بهترین سطح برای کیفیت لبه ورودی سوراخ پیش‌بینی شده است. در ادامه نیز مدل رگرسیونی که کفایت مناسب داشته باشد، ارائه شده است و هر دو روش تحلیل مقایسه و بحث شده‌اند.

تمیزی سوراخ یکی از موارد مهم می‌باشد و همانطور که پیش از این توضیح داده شده است، مقدار F ای که بدست آمده هر چقدر کمتر باشد مطلوب تر است و بدین منظور مقادیر سطوح بهینه بدست آمده از این تحلیل مطابق جدول ۳ است:

۲-۲- کیفیت لبه ورودی سوراخ

همانطور که شد؛ سرباره‌ها (مواد مذاب منجمد شده) در اطراف منطقه اسپارک باقی می‌مانند و مانع جرقه زنی مناسب می‌شوند به همین منظور باید به نحوی پارامترها انتخاب شوند که این سرباره‌ها به حداقل برسند. معیاری کمی و عددی برای اندازه‌گیری این سرباره‌ها وجود ندارد، به همین دلیل همچون شکل ۳-۱ با توجه به قطر سوراخ، قطر دایره ای که دورترین پاشش سرباره را داشته به عنوان قطر D و قطر کوچکترین دایره (ممکن است درون سوراخ یا قطر سوراخ باشد) d اندازه‌گیری کرده با استفاده از فرمول ۱ معیاری کمی تعریف کرده و سعی بر کمتر کردن این نسبت است.

$$F = \frac{D}{d} \quad (1)$$



نمودار ۲: درصد تاثیر پارامترهای ورودی روی کیفیت لبه ورودی سوراخ بر اساس تحلیل S/N

جدول ۳: سطوح بهینه تخمین زده شده توسط تحلیل S/N

پارامتر	سطح بهینه	مقدار سطح
Volt	2	120
Amper	1	0.2
Ton	3	1.6
Rotation	1	0
Toff	2	3
Capacitance	2	RC
		S/N Ratio=0.5 Mean=0.90905

۲-۴- مدل رگرسیونی مرتبه دوم کیفیت لبه ورودی سوراخ

مدل رگرسیونی مرتبه دوم کیفیت لبه ورودی سوراخ به روش Backward در ۶ مرحله مطابق معادله ۲ بدست آمده است

$$F_{enter} = 1.13785 + 0.05181 \text{ Amper} + 0.00000912 \text{ Volt}^2 + 0.05866 \text{ Ton}^2 - 0.00011886 \text{ Rotation}^2 - 0.00151 \text{ Volt} * \text{Ton} - 0.02941 \text{ Amper} * \text{Ton} - 0.00128 \text{ Amper} * \text{Rotation} + 0.00387 \text{ Rotation} * \text{Ton} \quad (2)$$

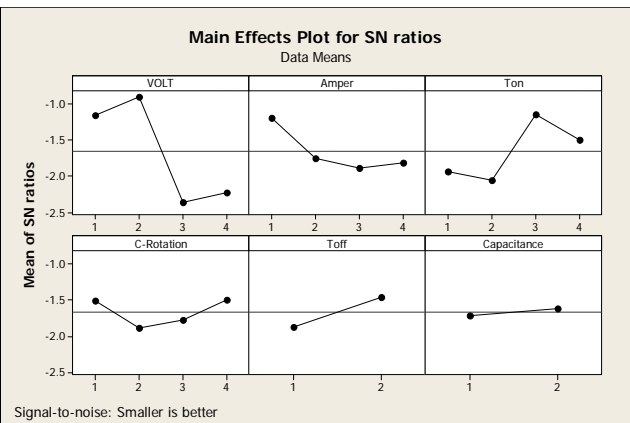
جدول ۴: جدول ANOVA مدل رگرسیونی کیفیت لبه ورودی سوراخ

Source	DF	Sum of Squares	Mean of Squares	F stat	P-value
Model	8	0.16784	0.02098	7.11	0.009
Error	7	0.02067	0.00295		
Total	15	0.1885			

$R^2 = 0.8904$
 $F_{cr} = 3.7$
 $R^2 - adj = 0.8173$

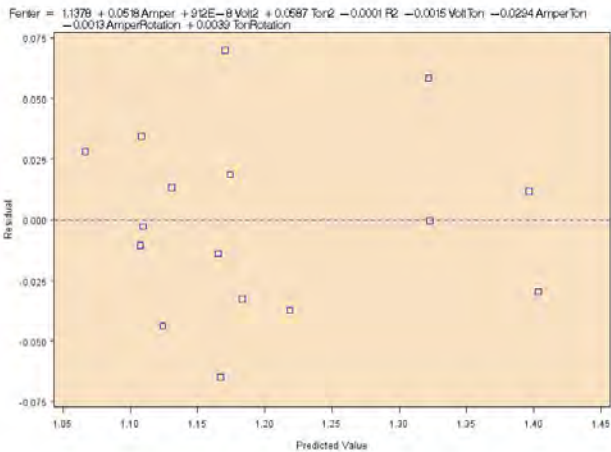
$$F_{cr} = F_{\alpha, k, n-k-1} = F_{0.05, 8, 7} = 3.73$$

با مقایسه مقادیر در آزمون F میتوان صحت مدل رگرسیونی را تایید کرد بطوری که مقدار

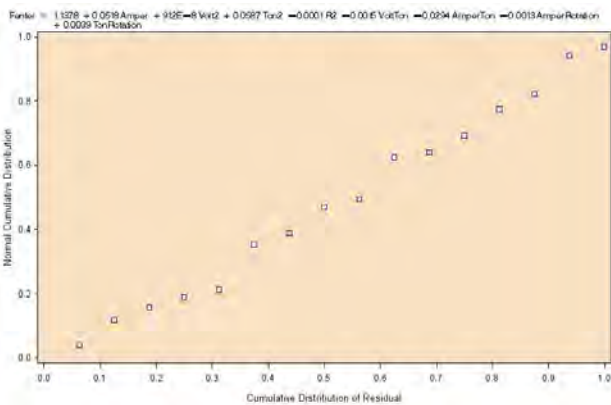


نمودار ۱: نمودارهای سیگنال به نویز پارامترهای ورودی

از نمودارهای بدست آمده از سیگنال به نویز کیفیت لبه ورودی سوراخ این بدست می‌آید که بهترین کیفیت و کمترین سرباره در اطراف سوراخ در ولتاژهای و جریان پایین بدست می‌آید و همچنین در زمان روشنایی پالس زیاد و سرعت های دورانی خیلی زیاد و یا در حالت سکون نیز کمترین سرباره ایجاد می‌شود. بیشترین تاثیر در تغییرات افزایش ولتاژ است که سبب افزایش سرباره‌ها می‌شود و برعکس افزایش زمان روشنایی پالس سبب کاهش سرباره‌ها شده است.



نمودار ۳: توزیع مقادیر تخمین زده شده بر اساس باقیمانده‌های مدل رگرسیونی مرتبه دوم کیفیت لبه ورودی سوراخ



نمودار ۴: احتمال نرمال باقیمانده‌های مدل رگرسیونی مرتبه دوم کیفیت لبه ورودی سوراخ

به منظور صحت گذاری مدل رگرسیونی و تحلیل S/N آزمایشات تاییدیه انجام شده و دقت مدل رگرسیونی نسبت به تحلیل سیگنال به نویز بیشتر نمایان بود، علاوه بر این برای اطمینان بیشتر با جایگذاری پارامترهای ورودی طرح آزمایشی تاگوچی در مدل رگرسیونی بدست آمده و مقایسه نتایج آن با خروجی بدست آمده از آزمایشات می‌توان اینطور بیان کرد که تطابقی با قدر مطلق میانگین درصد خطای ۴/۰۵٪ بدست آمده است و صحت مدل را با توجه با

بدست آمده بزرگتر از مقدار بحرانی است.

$$F_{cr}(3.73) < F(7.11)$$

و همچنین با توجه به کمتر بودن مقدار $p - value$ از سطح اهمیت α کفایت مدل را تایید می‌شود.

$$P - value(0.009) < \alpha(0.05)$$

از مقدار ضریب همبستگی و ضریب همبستگی تعدیل یافته می‌توان بیان کرد که مدل رگرسیونی مرتبه دوم به میزان ۸۹/۰۴٪ داده‌ها مطابقت دارد.

$$R^2 = 0.8904 (89.04\%)$$

با مشاهده نمودار ۳ پراکندگی توزیع داده‌های تخمین زده شده بر اساس باقیمانده‌ها و ثابت بودن واریانس و پیروی نکردن آن از الگوی خاصی و همچنین در نمودار ۴ قرار گرفتن نقاط در امتداد یک خط مستقیم و در بازه (۲و-۲) می‌توان مناسب بودن مدل رگرسیونی مرتبه دوم کیفیت لبه سوراخ سوراخ را نتیجه گرفت.

جدول ۵: مقادیر بهترین و بدترین حالت‌های تخمین زده شده بر اساس مدل رگرسیونی توسط شمارش صریح کل حالت‌ها

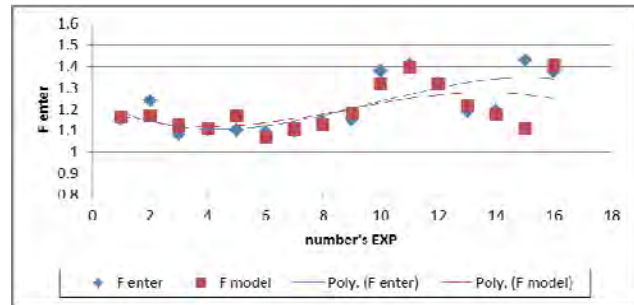
پارامتر خروجی	بدترین حالت		بهترین حالت	
	سطوح پارامتر	مقدار خروجی	سطوح پارامتر	مقدار
F enter	V4 I4 Ton1 R1	1.6315	V4 I4 Ton4 R4	0.8731

در مقایسه بین بهترین حالت مدل رگرسیونی و مقادیر تخمین زده شده S/N کیفیت سطح لبه ورودی سوراخ کاملاً تضاد مشاهده می‌شود، بطوریکه مدل رگرسیونی ولتاژ، جریان الکتریکی، زمان روشنایی پالس و سرعت دورانی را در بیشترین حالت در نظر گرفته است ولی در تحلیل S/N بجزء زمان روشنایی پالس سایر پارامترها را در حداقل مقدار خود تخمین زده است. همچنین از دو حالت مدل رگرسیونی همانطور که مشاهده می‌شود سرعت دورانی و زمان روشنایی پالس با تغییر در حد بالا و پایین تاثیر گذار هستند. مقدار بهترین حالت به این دلیل از یک کمتر بدست آمده است که در شمارش صریح محدوده برای آن در نظر گرفته نشده است که پارامترهای دقیق‌تری را نشان دهد.

۳- تحلیل کیفیت سطح لبه ورودی سوراخ

فرآیند تخلیه الکتریکی علاوه بر وجود جریان الکتریسیته یک فرآیند گرمایی است، در اصل یک فرآیند الکتروترمال می‌باشد و جوشش مواد قطعه‌کار در پدیده‌های ترمودینامیکی در فرآیند دخیل می‌باشد. به همین جهت سرباره‌ها پس از

آزمایشات محدودی که انجام شده است نشان می‌دهد.

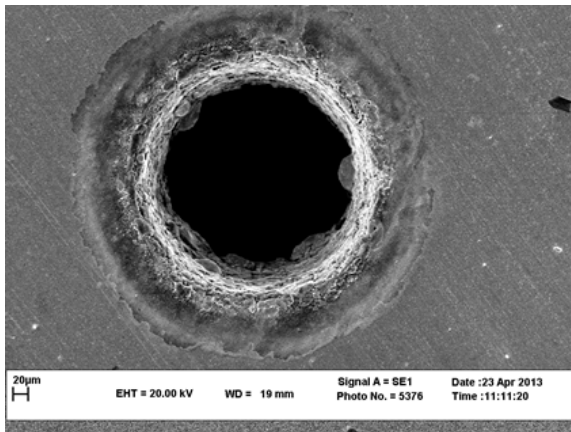


نمودار ۵: منحنی خروجی مدل رگرسیونی و آزمایشات برای کیفیت لبه ورودی سوراخ

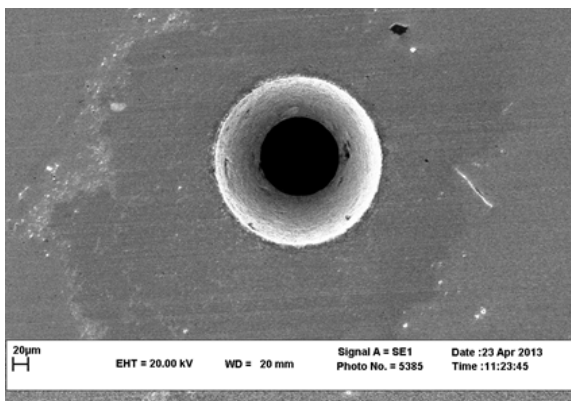
با مطالعه و بررسی تحلیل سیگنال به نویز می‌توان بیان کرد که با توجه به نمودارهای S/N، یک روند مشخص صعودی و نزولی مطلق در برخی از پارامترها ایجاد نشده است. به همین منظور نمی‌شود با اتکا به این تحلیل نتایج رو بررسی کرد و این روش تحلیل پاسخگوی کافی و دقیقی نیست.

با توجه به اینکه مدل رگرسیونی دارای دقت بیشتر و خطای کمتری در مقایسه با تحلیل S/N برای نتایج خروجی دارد، با استفاده از الگوریتم شمارش صریح برای آزمایشات در حالت کلی به تعداد ۱۰۲۴ آزمایش، سعی در بدست آوردن بهترین و بدترین حالت برای کلیه حالت‌های آزمایشی شده است.

می‌کند همین امر سبب می‌شود که تغییرات ولتاژ در سطح کیفیت سوراخ‌ها تاثیر بیشتری داشته باشد (نمودار ۶ و ۷). شکل های ۳ و ۴ سوراخ‌های ۱۱ و ۳ را نشان می‌دهند که در آمپر بالا و در دو ولتاژ کم و زیاد میزان کیفیت سطح متفاوت ایجاد شده است.



شکل ۳: سوراخ ۱۱، 160V، 4A، 0.4µs، 10 rev/min، RC، F=1.14085

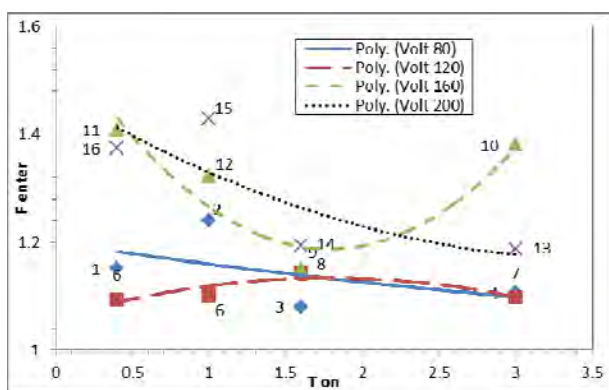


شکل ۴: سوراخ ۳، 80V، 4A، 1.6µs، 25 rev/min، iso-pulse، F=1.0806

ذوب شدن، دوباره منجمد می‌شوند و روی سطح قطعه کار را می‌پوشانند و چون هدایت الکتریکی کمتری دارند باعث می‌شوند که جریان الکتریکی به درستی منتقل نشود و یا منحرف شود که این سبب کاهش کیفیت اطراف قطعه کار (سوراخ) و همچنین خارج شدن سوراخ از مدور بودن می‌شود.

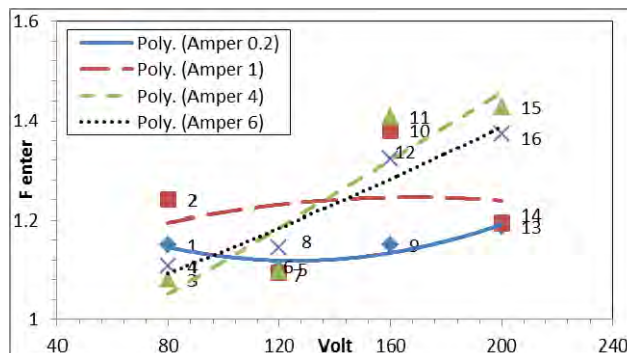
با افزایش ولتاژ، انرژی جرقه و فشار کانال پلاسما افزایش می‌یابد و این سبب می‌شود که پس از هر بار عملیات جرقه‌زنی در سطح سوراخ، میزان کاهش فشار در سطح سوراخ بیشتر باشد و پدیده جوشش حجمی با شدت بیشتری رخ دهد و در نتیجه در سطح سوراخ، سرباره بیشتری ایجاد شود. این اتفاق با افزایش جریان الکتریکی در جریان‌های بالا با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد بطوری که با افزایش جریان در ولتاژهای بالا، انرژی جرقه و فشار کانال بیشتر می‌شود در نتیجه فرآیند ذوب افزایش می‌یابد که باعث ایجاد سرباره بیشتر می‌گردد. ولی با افزایش جریان در ولتاژهای پایین روند تغییرات کیفیت سطح نرخ افزایشی ندارند و بعضاً تغییراتی مشاهده نمی‌شود. همین مطلب نیز در جریان‌های پایین همراه با افزایش ولتاژ صادق است با این تفاوت که افزایش ولتاژ سبب سیر صعودی نمودار شده است. ولتاژ در فرآیند تخلیه الکتریکی نقش فشار در جریان الکتریکی را ایفا

می‌توان اینطور بیان کرد که در سوراخ شماره ۹ مدار RC و با جریان کم برقرار است. ولی در سوراخ شماره ۱۰ مدار ایزوپالس می‌باشد، در سوراخ ۱۱ مدار RC با جریان بالا برقرار است و در سوراخ ۱۲ مدار ایزو پالس استفاده شده است. بیشتر بودن مقادیر کیفیت سطح در سوراخ ۱۲ و ۱۰ به دلیل مدار ایزوپالس است و کم بودن در سوراخ ۹ به سبب مدار RC با جریان کم که بر میزان حمله الکترون‌ها مدت زمان تکمیل شدن مقدار ظرفیت خازن تاثیر دارد که این تفاوت با سوراخ ۱۱ را نشان می‌دهد.

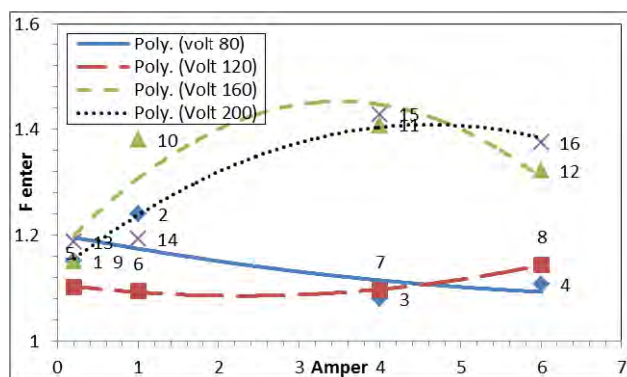


نمودار ۸: تغییرات ولتاژ برحسب روشنایی پالس در کیفیت لبه ورودی سوراخ

با افزایش زمان روشنایی پالس در جریان‌های بالا، کیفیت سطح بهبود می‌یابد ولی همین افزایش در جریان‌های پایین سبب کاهش کیفیت سطح می‌شود این امر بدین دلیل است که در جریان با افزایش Ton انرژی بیشتر می‌شود و تبخیر مواد سریع‌تر صورت می‌گیرد و سبب بهبود کیفیت سطح می‌گردد ولی در



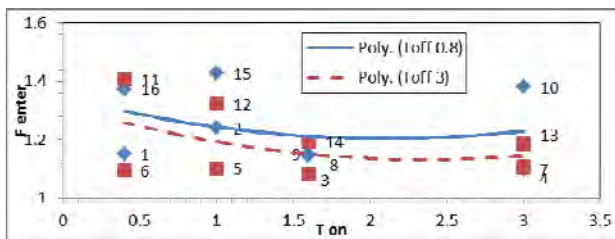
نمودار ۶: تغییرات جریان الکتریکی برحسب ولتاژ در کیفیت لبه ورودی سوراخ



نمودار ۷: تغییرات ولتاژ برحسب جریان الکتریکی در کیفیت لبه ورودی سوراخ

با افزایش مدت زمان روشنایی پالس، کیفیت سطح بهتری مشاهده می‌شود که در ولتاژهای بالا با افزایش مدت روشنایی کیفیت سطح نسبت به ولتاژهای پایین ضعیف‌تر است. علت بهبود سطح در این شرایط این است که با افزایش زمان جرقه زنی، مواد مذاب تبخیر می‌شوند و فرصت کمتری برای منجمد شدن دوباره دارند به همین جهت سرباره‌ها تبخیر شده و کیفیت سوراخ بهبود می‌یابد. تاثیر ولتاژهای بالا را نیز در این نمودار ۸ می‌توان مشاهده کرد. در این نمودار در ولتاژ 160v افزایش ناگهانی در سوراخ ۱۰ مشاهده می‌شود. روند تغییرات این منحنی را

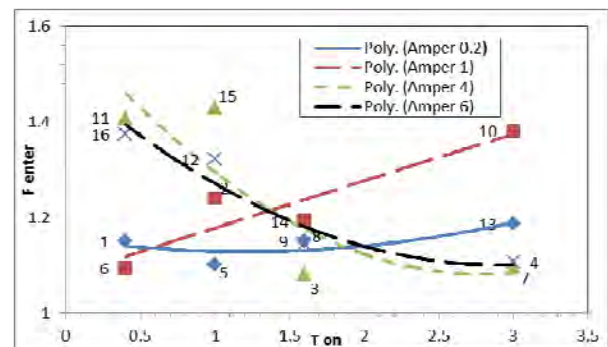
در مدت زمان خاموشی پالس، فرآیند جوشش حجمی برقرار است و رو به کاهش می‌باشد و درحالتی که این زمان کمتر باشد مرحله بعدی جرقه زنی مسلماً زودتر رخ می‌دهد و باعث انباشته شده و ذوب و منجمد شده دوباره سرباره شود که کیفیت سطح را کاهش می‌دهد ولی در Toff بیشتر، منجمد شدن سرباره‌ها افزایش یافته و جرقه‌های بعدی باعث کاهش هدایت الکتریکی سطح کمتر ایجاد می‌شوند و علاوه بر کاهش نرخ برداشت مواد، کیفیت سطح نیز بهبود می‌یابد (نمودار ۱۱).



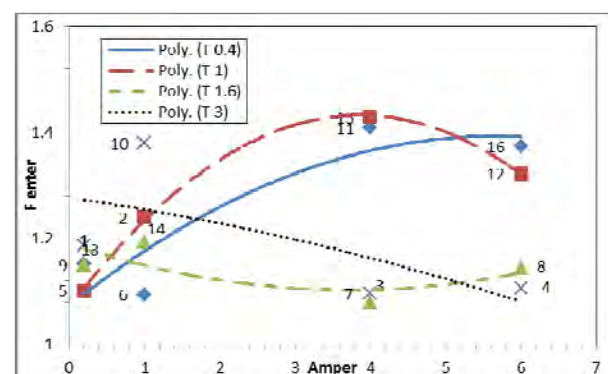
نمودار ۱۱: تغییرات خاموشی پالس بر حسب روشنایی پالس در کیفیت لبه ورودی سوراخ

در حالتی که از منبع تغذیه RC استفاده می‌شود، بدلیل انرژی کمتر جرقه زنی، کیفیت سطح نسبت به منبع تغذیه ایزوپالس بهتر است. در برخی موارد در ولتاژ پایین مانند سوراخ شماره ۲ در مقایسه با سوراخ‌های ۱، ۳ و ۴ با اینکه در مدار RC است، کیفیت سطح مناسبی ندارد، می‌توان اینطور توضیح داد که چون انرژی مدار RC با ولتاژ نسبت مجذور دارد پس در ولتاژهای کمتر، تاثیر در مدار RC بیشتر نمود

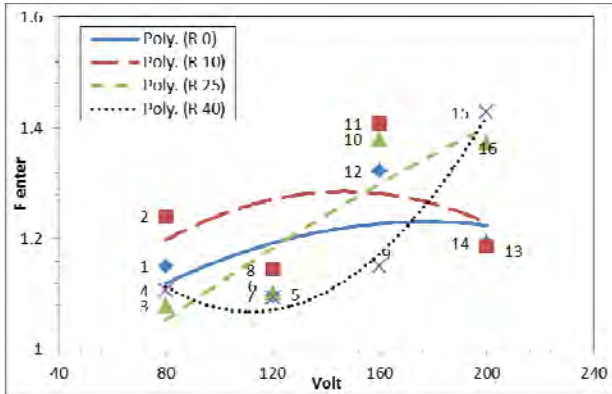
جریان‌های پایین، انرژی ایجاد شده به اندازه‌ای نیست که همه مواد را تبخیر کند و سرباره بیشتر تولید می‌شود که باعث کاهش کیفیت سطح می‌گردد (نمودار ۹). همین روند نیز در حالتی که مدت زمان روشنایی پالس زیاد است با افزایش جریان رخ می‌دهد یعنی کیفیت بعلت تبخیر بیشتر، بهتر می‌گردد و در مدت روشنایی پالس کمتر با افزایش جریان رخ می‌دهد یعنی کیفیت بعلت تبخیر بیشتر، بهتر می‌گردد و در مدت روشنایی پالس کمتر با افزایش جریان بدلیل کاهش انرژی و تبخیر کمتر، سرباره بیشتر ایجاد می‌گردد و کیفیت سطح را کاهش می‌دهد (نمودار ۱۰).



نمودار ۹: تغییرات جریان الکتریکی بر حسب روشنایی پالس در کیفیت لبه ورودی سوراخ



نمودار ۱۰: تغییرات روشنایی پالس بر حسب جریان الکتریکی در کیفیت لبه ورودی سوراخ



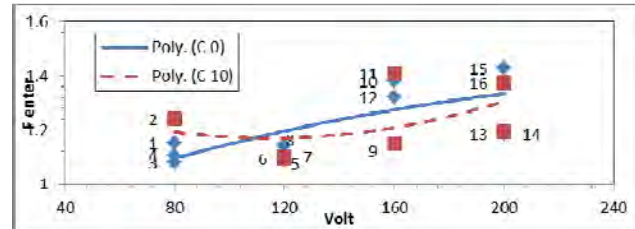
نمودار ۱۴: تغییرات سرعت دورانی RPM بر حسب ولتاژ در کیفیت لبه ورودی سوراخ

همانطور که از معادله مدل رگرسیونی کیفیت لبه ورودی سوراخ می‌توان برداشت کرد که ولتاژ، جریان و روشنایی پالس نسبت مستقیم با کیفیت سطح دارند ولی سرعت دورانی رابطه عکس ایجاد کرده است. از تقابل جریان الکتریکی و روشنایی پالس این بدست می‌آید که افزایش همزمان هر دو سبب کاهش مقدار کیفیت سطح شده است. از نمودار ۲ درصد تاثیرگذاری پارامترهای ورودی در کیفیت سطح نیز نتیجه می‌دهد که ولتاژ و روشنایی پالس و همچنین سرعت دورانی تاثیر بیشتر دارند ولی درصد ولتاژ بیشتر از سایر می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

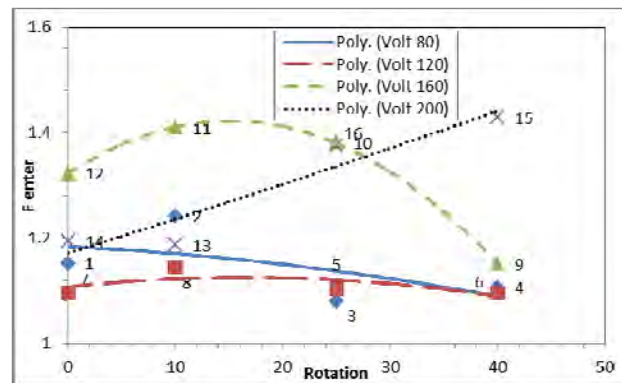
مجموعه تحقیقات انجام شده در این فعالیت علمی با وجود خطاهای ناشی از عوامل اغتشاش گر مانند دقت دستگاه، خطاهای کامپیوتری در اندازه‌گیری ابعاد ابزار، ... که

می‌کند. (نمودار ۱۲).



نمودار ۱۲: مقایسه مولد ایزوپالس و RC در کیفیت لبه ورودی سوراخ

با افزایش سرعت دورانی ابزار در ولتاژهای پایین‌تر کیفیت سطح کمی بهتر می‌شود، اغتشاش ایجاد شده توسط دوران ابزار سبب پراکندگی آلودگی به کمک سیال از محیط شده و جرقه‌های مناسب‌تر در محل مورد نظر ایجاد می‌شوند و کیفیت سطح بهبود می‌یابد ولی در ولتاژهای بالا این مسئله بعلت افزایش انرژی و در ادامه آن جوشش حجمی شدیدتر بوجود آمده به همراه سرعت دورانی بالا باعث پخش مواد در اطراف شده و کیفیت را کاهش می‌دهد (نمودار ۱۳). نکته قابل توجه در مورد سرعت دورانی ابزار و کیفیت سطح این است که کاهش کیفیت در سرعت‌های بالا با نرخ بیشتری صورت می‌گیرد (نمودار ۱۴).



نمودار ۱۳: تغییرات ولتاژ بر حسب سرعت دورانی در کیفیت لبه ورودی

سوراخ



- [۳] 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.
- [۵] M. K. Egashira Kai, "Microdrilling and micromilling of brass using a 10 μm diameter tool," *Japon Society for Precision Engineering*, pp. 649-6493.
- [۶] E. A. Adrian Iosub, Florin Negoescu, "A STUDY ABOUT MICRO-DRILLING BY ELECTRICAL DISCHARGE METHOD OF AN Al/SiC HYBRID COMPOSITE," *INTERNATIONAL JOURNAL Of ACADEMIC RESEARCH*, vol. 2, pp. 6-12, May 2010.
- [۷] 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.
- [۸] W. z. Z.wansheng, Di.shichun, Chi.guanxin, "ultrasonic and electric discharge machining to deep and small hole on titanium alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 120, pp. 101-106, 2000.
- [۹] Y. S. W. M.P. Jahan, M. Rahman , "A study on the quality micro-hole machining of tungsten carbide by micro-EDM process using

همواره در آزمایش‌ها قرار دارد، با توجه به ماهیت فرآیند و انطباق بالای ۹۰٪ مدل بدست آمده کاملاً قابل قبول می‌باشند. به طور کلی دستاوردهای مهم این تحقیق را می‌توان این‌طور بیان کرد:

۱. کیفیت بهتر سطح سوراخ بیشتر متاثر از ولتاژ و جریان پایین است و در این حال زمان روشنایی زیاد نیز تاثیر گذار می باشد. در صورتی که از جریان بالا استفاده شود پیشنهاد می‌گردد زمان روشنایی پالس نیز مقدار بیشتر انتخاب گردد.
۲. زمان خاموشی پالس زیاد نیز در وضعیت بهبود کیفیت سطح تاثیر گذار است.
۳. سرعت دورانی پایین و حتی بدون دوران ابزار در ولتاژهای کم، کیفیت سطح بهتری را ایجاد می‌کند.

مراجع

- [۱] A. Abdollah, "Voltage Injection and Performance Evaluation in EDM," P.H.D, Victoria University of Manchester, 1989.
- [۲] E. C. Jameson, *Electrical Discharge Machining (EDM): Society of Manufacturing Engineers (SME)*, 2001.



- transistor and RC-type pulse generator," *journal of materials processing technology*, vol. 209, pp. 1706–1716, 2009.
- [۱۰] A. I. D. T. Pham, S. Bigot, K. Popov, S. Dimov, "An investigation of tube and rod electrode wear in micro EDM drilling," *journal of manufacturing Technology*, vol. 33, pp. 103-109, 2007.
- [۱۱] K. C. NunMing Liu, T Horng, "Modeling and analysis of the edge disintegration in the EDM drilling cobalt-bonded tungsten carbide," *Journal of manufacturing Technology*, vol. 51, pp. 587–598, 2010.
- [۱۲] 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.