

بررسی تجربی تاثیر انرژی تخلیه بر عملکرد، نوع و میزان انتشار گازهای آلاینده و سمی در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،
behnam1687@gmail.com

بهنام کرمزاده

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، mrshabgard@tabrizu.ac.ir

محمد رضا شبگرد*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی خوی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران،
ah.gholipoor@uut.ac.ir

احد قلی پور*

استاد، گروه شیمی فیزیک، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، hemayatt@tabrizu.ac.ir

حمایت شکاری

چکیده

سیال‌های دی الکتریک مورد استفاده در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی، اغلب روغن های معدنی می باشد که از تجزیه این روغن ها در گرمای بالا، گازهای آلاینده و سمی تولید می شود که بطور جدی بر سلامت اپراتورها تاثیر گذاشته و محیط زیست را آلوده می کند. در این تحقیق تاثیر میزان انرژی تخلیه (شدت جریان و زمان روشنی پالس) بر نوع و میزان انتشار گازهای آلاینده هیدروکربنی و سمی، نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار، زبری سطح بدست آمده، ضخامت لایه انجماد مجدد تشکیل شده و چگالی ترک های ایجاد شده در سطح نمونه های ماشینکاری شده از جنس فولاد گرمکار AISI H13 مطالعه شد. مطابق نتایج بدست آمده با افزایش میزان انرژی تخلیه نرخ برداشت ماده، نرخ سایش ابزار، زبری سطح قطعه کار و ضخامت لایه سفید افزایش می یابد. همچنین با افزایش میزان انرژی تخلیه از 30 mj به 160 mj، غلظت گازهای CO، CO₂، H₂S، SO₂، NO، و NO₂ تولید شده در فرآیند EDM، به ترتیب ۴۷/۵٪، ۷/۷٪، ۳۱٪، ۲۴/۵٪، ۶/۲٪، و ۱۶/۷٪ افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: ماشینکاری تخلیه الکتریکی، انرژی تخلیه، گازهای آلاینده و سمی، نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار، کیفیت سطح ماشینکاری شده.

Experimental Investigation of the Effects of Discharge Energy on the Performance, Type and Amount of Emission of Polluting and Toxic Gases in EDM Process

B. Karamzadeh

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

M. R. Shabgard

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

A. Gholipoor

Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty of Khoy, Urmia University of technology, Urmia, Iran

H. Shekari

Department of Physical Chemistry, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

The dielectric fluids used in the electric discharge machining process are mostly mineral oils, which produce polluting and toxic gases from the decomposition of these oils at high temperatures, which seriously affect the health of operators and pollute the environment. In this research, the effects of discharge energy (current and pulse on time) on the type and amount of emitted hydrocarbon and toxic pollutant gas, material removal rate, tool wear rate, surface roughness, recast layer thickness and density of cracks created on the surface of machined samples made of AISI H13 hot-work steel was studied. According to the results, material removal rate, tool wear rate, surface roughness and recast layer thickness are increased by increasing the amount of discharge energy. Also the concentration of CO, CO₂, H₂S, SO₂, NO, and NO₂ gases produced in the EDM process were increased 47.5%, 7.7%, 31%, 24.5%, 6.2%, and 16.7%, with increasing discharge energy from 30 mj to 160 mj.

Keywords: Electrical Discharge Machining, Discharge Energy, Polluting and Toxic Gases, Material Removal Rate, Tool Wear Rate, Machined Surface Quality.

۱- مقدمه

معایب و محدودیت هایی همچون نرخ براده برداری^۲ پایین، نرخ سایش ابزار^۳ و زبری سطح^۴ بالا، ترک های سطحی، تغییرات متالورژیکی و زیر سطحی قطعات ماشینکاری شده، ایجاد لایه انجماد مجدد^۵ و منطقه متاثر از گرما^۶ روی سطوح ماشینکاری می باشد [۲]. علاوه بر

ماشینکاری تخلیه الکتریکی^۱ از پرکاربردترین روش های ماشینکاری غیر سنتی می باشد که از انرژی گرمایی برای ماشینکاری استفاده می کند [۱]. این فرآیند نقش مهمی را در صنایع ماشینکاری نوین مخصوصاً در ماشینکاری مواد سخت با استحکام بالا و هادی جریان الکتریکی ایفا می نماید. با وجود کاربردهای وسیع، این فرآیند دارای

² Material Removal Rate (MRR)

³ Tool Wear Rate (TWR)

⁴ Surface Roughness (SR)

⁵ Recast Layer Thickness (RLT)

⁶ Heat Affected Zone (HAZ)

¹ Electrical Discharge Machining (EDM)

موارد ذکر شده، به علت اینکه سیال دی الکتریک سنتی و تجاری مورد استفاده در ماشینکاری EDM از روغن های معدنی از جمله نفت سفید می باشد، در اثر گرمای ایجاد شده در هنگام ماشینکاری، این سیال ها تجزیه و باعث انتشار گازهای آلاینده و سمی می شود و علاوه بر به خطر انداختن سلامتی اپراتور، آلودگی محیط زیست را به دنبال دارد [۳]. همچنین روغن های معدنی مورد استفاده، امکان بازیافت و استفاده مجدد را نداشته و و امکان انفجار و اشتعال پذیری آنها بالا می باشد [۴].

از این رو محققان تلاش کرده اند به منظور تولید سبز و پایدارتر کردن فرآیند EDM (افزایش بهره وری انرژی، کاهش آلودگی های زیست محیطی، افزایش ایمنی فرآیند و سلامت عملگر که از ویژگی های کلیدی تولید پایدار هستند)، روغن های گیاهی را جایگزین روغن های معدنی کنند [۵]. استفاده از فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک و نیمه خشک [۶ و ۷] از دیگر روشهای حصول تولید سبز می باشد. همچنین محققان به منظور افزایش راندمان فرآیند از روش های جدیدی همچون ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی [۸]، فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک پودرهای اضافه شده به مایع دی الکتریک [۹]، و فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی [۱۰]، استفاده کرده اند.

والاکی و راوود [11]، با جایگزین کردن روغن نباتی زاید به جای نفت سفید به عنوان دی الکتریک در فرآیند EDM، به بررسی تاثیر پارامترهای ورودی شامل شدت جریان، ولتاژ گپ، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس، بر روی نرخ براده برداری، و نرخ سایش ابزار پرداختند. ساداکوپان و مولی پراسانت [12]، اثرات استفاده از سه نوع دی الکتریک مختلف (بیودیزل، نفت سفید و روغن ترانسفورماتور) در ماشینکاری EDM آلایژ آلومینیوم ۶۰۶۳ را بر روی نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح بررسی کردند. موغال و همکاران [13]، به منظور بهبود کیفیت سطح پایه ایمپلنت دندان از جنس آلایژ Ti6 Al4 VELI ماشینکاری شده با روش EDM از مخلوط کردن پودر SiC در مایع دی الکتریک استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد افزودن پودر SiC به سیال دی الکتریک، باعث کاهش ضخامت لایه انجماد مجدد و زبری سطح و افزایش سختی سطح و بهبود کیفیت سطح می گردد. جیودین و سیدهی [14]، تاثیر پارامترهای ورودی فرآیند EDM به کمک پودرهای اضافه شده به سیال دی الکتریک^۱ را بر ولتاژ شکست دی الکتریک و نرخ براده برداری بررسی نمودند. آنها از سه نوع پودر با اندازه های میکرونی و با غلظت های مختلف استفاده نمودند و مشاهده کردند با افزایش غلظت پودرها ولتاژ شکست دی الکتریک کاهش می یابد. مطابق نتایج این محققان، مقاومت الکتریکی بالاتر پودر کاربرد سیلیم باعث شد اثر کمتری روی ولتاژ شکست دی الکتریک داشته باشد. وان تایو لی [15]، پارامترهای اصلی فرآیند EDM به کمک پودرهای اضافه شده به سیال دی الکتریک از جمله شدت جریان، زمان روشنی پالس و غلظت پودر کاربرد تنگستن بکار برده شده را در ماشینکاری فولاد SKD61 مطالعه نمودند. نتایج بررسی آنها نشان داد شدت جریان، زمان روشنی پالس و غلظت پودر بر مشخصه های

ماشینکاری و سلامت سطح تاثیر گذاشته و با افزایش آنها، نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار، یک روند صعودی دارند. تیا قاراجان و همکاران [۱۶]، به بررسی تجربی و تجزیه و تحلیل نرخ انتشار آئروسول^۲ در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی برای سه نوع قطعه کار فولاد ابزار، فولاد معمولی و آلومینیوم پرداختند. آنها از روش طراحی آزمایشی تاگوچی برای پیشنهاد شرایط فرآیندی مناسب برای تولید سبز استفاده کردند. این محققان تغییرات قابل توجهی در میزان انتشار آئروسول ها برای مواد مختلف قطعه کار مشاهده کردند که به تفاوت در دمای ذوب و تبخیر آنها نسبت داده شد. آنها گزارش نمودند که اکثر اجزای آئروسول های منتشره از مواد قطعه کار تشکیل شده و اجزای با نقطه ذوب پایین تر غلظت نسبی بالاتری در آئروسول تولیدی دارند. ویسوناس و همکاران [۱۷] به مطالعه مسائل پایداری و ایمنی فرآیند EDM از جمله انتشارات خطرناک مانند دود، آئروسول ها، اجزای فلزی تجزیه شده، و تشعشعات الکترومغناطیسی پرداختند. این مطالعه استفاده از سیالات دی الکتریک سبز را برای بهبود نرخ براده برداری، زبری سطح و سختی سطح در مقایسه با سیالات دی الکتریک هیدروکربنی سنتی پیشنهاد می کند. این پژوهش جزئیات خاصی در مورد انواع یا مقادیر گازهای اندازه گیری شده ارائه نمی دهد و بیشتر بر روی پایداری عمومی و مسائل زیست محیطی مرتبط با فرآیند EDM تمرکز دارد. متیو و همکاران [۱۸] تحلیلی از انتشار آئروسول ها و ارزیابی خطر در فرآیند EDM ارائه کردند. آنها غلظت آئروسول ها در ناحیه تنفس اپراتور EDM را در شدت جریان ها، زمان های روشنی پالس، فشارهای شستشو و سطوح دی الکتریک مختلف اندازه گیری کردند. نتایج نشان داد که غلظت آئروسول با افزایش جریان، مدت زمان روشنی پالس و سطح دی الکتریک افزایش می یابد، اما با افزایش فشار فلاشینگ کاهش می یابد. آنها جنبه های ایمنی ذاتی و خطرات آتش سوزی مرتبط با فرآیند EDM را تحت شرایط عملیاتی مختلف بررسی کردند. نتایج این محققان نشان داد که فرآیند EDM به دلیل استفاده از سیال دی الکتریک قابل احتراق (نفت سفید) و دماهای بالای تولید شده در طول فرآیند در برابر خطرات آتش سوزی و انفجار آسیب پذیر است. لپرت [۱۹] اثرات زیست محیطی ماشینکاری تخلیه الکتریکی را مطالعه نمود. این مطالعه دستورالعمل هایی برای توسعه فرآیند EDM برای به حداقل رساندن اثرات زیست محیطی آن ارائه می کند.

پس از بررسی منابع علمی مختلف مشاهده گردید تحقیقات در خصوص اندازه گیری تجربی انتشار گازهای آلاینده و سمی هنگام استفاده از دی الکتریک نفت سفید در فرآیند EDM انجام پذیرفته است. بنابراین، در این پژوهش تلاش شد داده هایی در مورد نوع و میزان انتشار گازهای سمی در فرآیند EDM ارائه شود تا بتوان یک استراتژی کنترل مناسب جهت افزایش پایداری فرآیند EDM توسعه داد. بنابراین تاثیر میزان انرژی تخلیه بر نوع و میزان انتشار گازهای آلاینده هیدروکربنی و سمی، نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار، زبری سطح بدست آمده، ضخامت لایه انجماد مجدد تشکیل شده بر روی سطح ماشینکاری شده و چگالی ترک های ایجاد شده در سطح نمونه

² Aerosol

¹ Powder mixed EDM (PMEDM)

جدول ۱- ترکیب شیمیایی قطعه کار

عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
Fe	۹۱/۷۳	Mn	۰/۴
Cr	۵/۲	S	۰/۰۳
C	۰/۳۹	V	۱/۱
Si	۰/۹	Cu	۰/۲۵

جدول ۲- خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی فولاد H13

مقدار	مشخصه
۷/۸۰	چگالی (g/cm ³) در دمای 20°C
۱۴۲۷	دمای ذوب (°C)
۱۵۹۰-۱۲۰۰	استحکام کششی نهایی (MPa) در دمای 20°C
۱۳۸۰-۱۰۰۰	تنش تسلیم (MPa) در دمای 20°C
۳۱۵	مدول الاستیک (GPa) در دمای 20°C
۲۸/۶	رسانایی گرمایی (W/mK)

در این پژوهش از نفت سفید به عنوان مایع دی الکتریک استفاده گردید. در این تحقیق شدت جریان در سه سطح (۱۲، ۱۶ و ۳۲ آمپر) و زمان روشنی پالس در سه سطح (۱۲/۸، ۲۵ و ۵۰ میکروثانیه) به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده و آزمایشاتی با روش طراحی عاملی کامل انجام گردید تا تاثیر انرژی تخلیه بر پارامترهای خروجی مطالعه شود. پارامترهای ثابت آزمایش ها زمان خاموشی پالس (۶/۴ میکروثانیه)، ولتاژ مدار باز (۲۰۰ ولت) و قطبیت ابزار (مثبت) در نظر گرفته شدند. مدت زمان هر تست ثابت و به مدت ۵ دقیقه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است، سطوح پارامترهای ورودی متغیر و ثابت، بر اساس محدودیت های دستگاه، محدودیت های اندازه گیری خروجی های فرآیند (گازهای آلاینده ایجاد شده در طول فرآیند)، پس از انجام آزمایشات اکتشافی و مطالعه تحقیقات مختلف انجام شده [۲۰-۲۲] تعیین گردید.

برای محاسبه نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار؛ نمونه ها قبل و بعد از هر تست کاملاً تمیز و پلیسه گیری شده، سپس وزن آنها با ترازوی دیجیتال سارتوریوس^۲ با دقت ۰.۰۰۰۱ gr اندازه گیری شده و با استفاده از روابط (۱) و (۲)، نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار محاسبه گردید.

$$MRR = \left(\frac{M_{W1} - M_{W2}}{\rho_w t} \right) \times 10^3 \quad (1)$$

$$TWR = \left(\frac{M_{T1} - M_{T2}}{\rho_T t} \right) \times 10^3 \quad (2)$$

در رابطه (۱)، M_{W1} وزن قطعه کار قبل از ماشین کاری (gr)، M_{W2} وزن قطعه بعد از ماشین کاری (gr)، t مدت زمان ماشین کاری (min)، ρ_w چگالی قطعه کار (gr/cm³) و MRR مقدار نرخ براده برداری (mm³/min) می باشد.

در رابطه (۲)، M_{T1} وزن ابزار قبل از ماشین کاری (gr)، M_{T2} وزن ابزار بعد از ماشین کاری (gr)، t مدت زمان ماشین کاری (min)، ρ_T

های ماشینکاری شده قطعه کار از جنس فولاد گرمکار AISI H13 مطالعه شد.

۲- مواد و روش ها

در پژوهش حاضر به منظور انجام عملیات ماشینکاری با فرآیند تخلیه الکتریکی از دستگاه اسپارک شارمیلز روبرفورم^۱ ۲۰۰ با مولد ایزوپالس، استفاده شده است (شکل ۱). در این ماشین محور Z توسط مکانیزم سرو و بر اساس ولتاژ گپ کنترل می شود و پارامترهای ورودی دستگاه همچون جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس از طریق کنترل پنل دستگاه، کنترل می شوند. قطعه کار مورد استفاده در این مطالعه، فولاد گرمکار از جنس AISI H13 با مقطع مستطیلی در ابعاد ۷×۸ میلی متر است که پس از برش با دستگاه برشکاری سیمی به ارتفاع ۱۸ میلی متر، سطوح پیشانی آن برای انجام ماشینکاری EDM، سنگ زنی و پولیش کاری شده است. فولاد H13 یکی از انواع فولادهای ابزار گرمکار است که به دلیل مقاومت بالا در برابر حرارت و شوک حرارتی، کاربرد گسترده ای در صنایع مختلف دارد. این فولاد به دلیل ترکیب شیمیایی خود، ویژگی هایی مانند پایداری در دمای بالا و مقاومت در برابر سایش را دارد و به همین دلیل برای ساخت ابزارهایی که در دماهای بالا کار می کنند، مناسب است. این فولاد به دلیل خواص منحصر به فرد خود در صنایع مختلفی مانند ساخت ابزارهای برشی، قالب های فورجینگ و تزریق پلاستیک مورد استفاده قرار می گیرد. ترکیب شیمیایی قطعه کار که رسانای الکتریسیته بوده و دارای خاصیت مغناطیسی است، در جدول ۱ آمده است. ابزار مورد استفاده در این مطالعه از جنس مس با خلوص ۹۹٪ به شکل استوانه ای با قطر خارجی ۱۴ میلی متر و ارتفاع ۲۰ میلی متر می باشد که با عملیات تراشکاری تهیه شده است. خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و حرارتی قطعه کار در جدول ۲ آورده شده است.



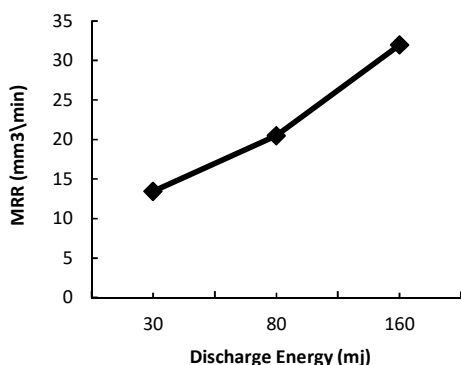
شکل ۱- دستگاه اسپارک شارمیلز روبرفورم ۲۰۰

^۲ Sartorius CP۲۲۴S

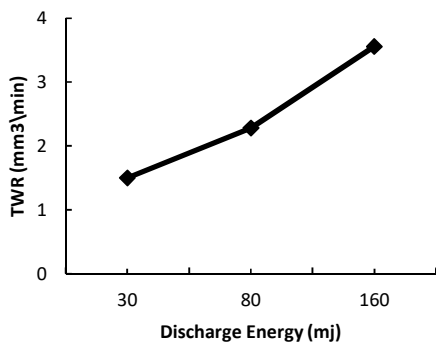
^۱ Charmilles Roboform



شکل ۲- آنالایزر چمیست برای اندازه گیری غلظت گازهای منتشر شده



شکل ۳- تاثیر میزان انرژی تخلیه بر نرخ براده برداری در فرآیند EDM



شکل ۴- تاثیر میزان انرژی تخلیه بر نرخ سایش ابزار در فرآیند EDM

رابطه بین انرژی تخلیه الکتریکی، شدت جریان و مدت زمان روشنی پالس در ماشینکاری تخلیه الکتریکی را می توان با معادله (۳)، بیان کرد:

$$E = K \times I^2 \times t \quad (3)$$

در رابطه ۳، E انرژی تخلیه الکتریکی (J)، I شدت جریان (A)، t مدت زمان روشنی پالس (S) و k مقدار ثابتی است که به عواملی مانند ولتاژ، خواص سیال دی الکتریک و مواد الکترود بستگی دارد. مطابق رابطه ۳، با افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس،

چگالی ابزار (gr/cm³) و TWR مقدار نرخ سایش ابزار (mm³/min) می باشد.

به منظور بررسی کیفیت سطوح ایجاد شده پس از عملیات ماشینکاری، چگالی ترک های به وجود آمده در سطوح نمونه ها پس از عملیات ماشینکاری، و محاسبه ضخامت لایه انجماد مجدد تشکیل شده بر روی سطح ماشینکاری شده تصاویری از سطح نمونه ها و سطح مقطع نمونه ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی تهیه شد.

جهت اندازه گیری زبری سطح نمونه های ماشینکاری شده از دستگاه پروفیلومتر شریف سولار^۱ استفاده گردید. پروفیلومتر یک دستگاه اندازه گیری پروفایل سطح با استفاده از سوزن متحرک است. در این دستگاه سوزن با سرعت متغیر و مسافت قابل تنظیم روی سطح نمونه حرکت می کند و جابجایی سوزن در راستای محور Z به وسیله حسگر خازنی اندازه گیری می شود. دقت اندازه گیری در راستای محور Z بیشتر از ۵۰ نانومتر می باشد. به منظور تعیین عدد زبری سطح هر نمونه، زبری سطوح از ۵ مسیر مختلف اندازه گیری شده و میانگین آنها به عنوان عدد زبری سطح آن نمونه انتخاب شد.

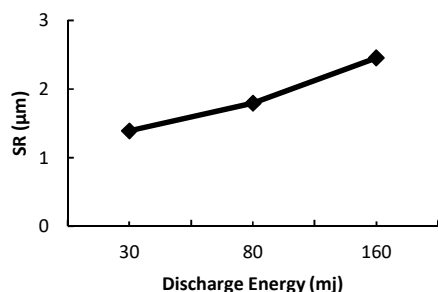
با توجه به اینکه در فرآیند EDM انتشار گازهای آلاینده و سمی از محل ماشینکاری، پیوسته نبوده و بصورت منقطع می باشد، اندازه گیری نوع و مقدار انتشار این گازها در طی عملیات ماشینکاری، از طریق حبس آنها در داخل محفظه لاستیکی آکاردیونی (شکل ۱) و استفاده از آنالایزر مدل چمیست^۲ 600 که یک آنالایزر قابل حمل برای تعیین نوع و میزان گازهای منتشره است، انجام شد. این ابزار مجهز به مدار پنوماتیکی است که می تواند تا ۶ حسگر فلکس^۳ را در خود جای دهد. روش اندازه گیری نوع و میزان انتشار گازهای آلاینده برای تمامی نمونه ها به اینصورت انجام پذیرفت که پس از اتمام مدت ماشینکاری، پروب آنالایزر به داخل سوراخ ایجاد شده در سطح محفظه لاستیکی آکاردیونی وارد شده و به مدت ۸۰ ثانیه در داخل محفظه نگه داشته شد و خروجی گازهای آلاینده یادداشت گردید. آنالایزر مذکور در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳- نتایج

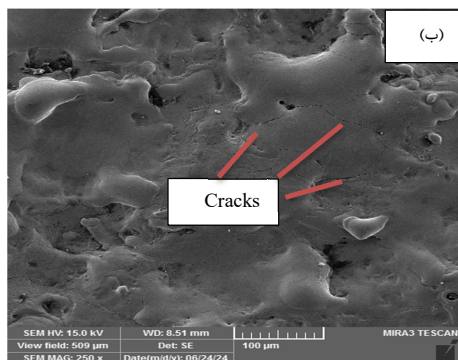
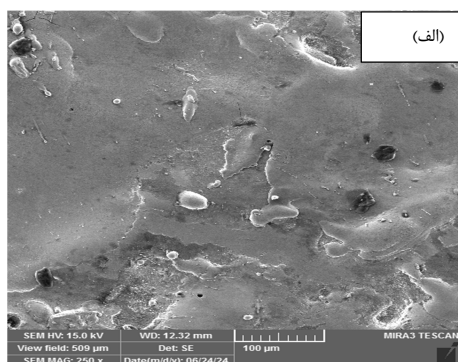
۳-۱- بررسی نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار

شکل های ۳ و ۴ نشان دهنده تاثیر میزان انرژی تخلیه (شدت جریان و مدت زمان روشنی پالس) بر نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار می باشد. مطابق رابطه ۳ با افزایش میزان انرژی تخلیه، نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار افزایش می یابد.

¹ Sharif Solar
² CHEMIST
³ FLEX Sensor



شکل ۵- تاثیر میزان انرژی تخلیه بر زبری سطح ماشینکاری شده در فرآیند EDM



شکل ۶- توپوگرافی و ترکهای ایجاد شده در سطح ماشینکاری شده با فرآیند EDM، (الف) در سطح انرژی پایین (30 mj) (ب) در سطح انرژی بالا (160 mj)

ترک های سطحی در فرآیند EDM به دلیل تنش های حرارتی ناشی از چرخه های گرمایش و سرمایش سریع ایجاد می شوند. افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس و در نتیجه افزایش انرژی هر تخلیه باعث گرم شدن شدیدتر و سریعتر سطح قطعه کار و به دنبال آن خنک شدن سریع می شود و باعث افزایش تنش حرارتی و در نتیجه تنش های پسماند می شود. تنش حرارتی بیشتر و سرعت خنک سازی سریع، احتمال تشکیل ترک را افزایش می دهد و در نتیجه تراکم ترک های سطحی بیشتر می شود.

۳-۲-۳- بررسی توپوگرافی سطح ماشینکاری شده
همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود با افزایش شدت جریان و

میزان انرژی تخلیه افزایش یافته و در نتیجه میزان حرارت ایجاد شده در سطح قطعه کار و ابزار افزایش می یابد و باعث ایجاد چاله مذاب بزرگتری در سطح ابزار و قطعه کار می گردد.

در فرآیند EDM، حذف مواد به دلیل گرمایش موضعی شدید ناشی از تخلیه الکتریکی رخ می دهد. هر تخلیه یک کانال پلاسما ایجاد می کند که مقدار کمی از مواد را از قطعه کار و ابزار ذوب و تبخیر می کند. افزایش شدت جریان باعث افزایش انرژی تخلیه شده و هر جرقه انرژی بیشتری را حمل می کند که منجر به تولید دمای بالاتر در کانال پلاسما می شود. افزایش انرژی باعث می گردد مواد بیشتری با هر بار تخلیه ذوب و تبخیر شوند و در نتیجه حجم مواد حذف شده در هر جرقه افزایش می یابد. همچنین با افزایش شدت جریان، سرعت ذوب شدن و فرسودگی مواد ابزار نیز افزایش می یابد که منجر به نرخ سایش بالاتر ابزار می شود.

از طرفی پالس های طولانی تر به این معنی است که تخلیه برای مدت بیشتری فعال می ماند و اجازه می دهد انرژی بیشتری به قطعه کار و ابزار منتقل شود. با افزایش مدت زمان روشنی پالس، شدت جریان یکسان انرژی کل بیشتری را در طول هر تخلیه ارائه می دهد و باعث نفوذ عمیق تر جرقه به سطح قطعه کار و ابزار شده و حفره های بزرگتری در قطعه کار و ابزار ایجاد می کند و منجر به برداشت مواد بیشتر در هر جرقه می شود. در نتیجه، سرعت حذف کلی مواد افزایش یافته و نرخ براده برداری و سایش ابزار بیشتر می شود.

۳-۲-۲- بررسی سلامت سطح بدست آمده پس از فرآیند EDM

۳-۲-۱- بررسی زبری سطح بدست آمده
مطابق شکل ۵ زبری سطح قطعه کار با افزایش میزان انرژی تخلیه (شدت جریان و مدت زمان روشنی پالس) افزایش می یابد.

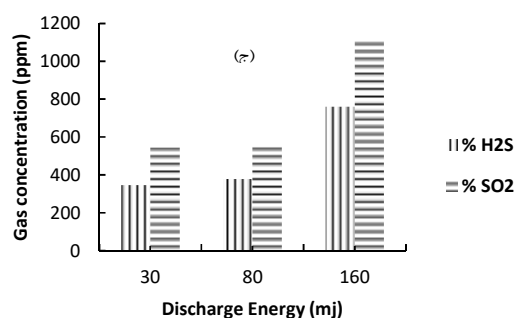
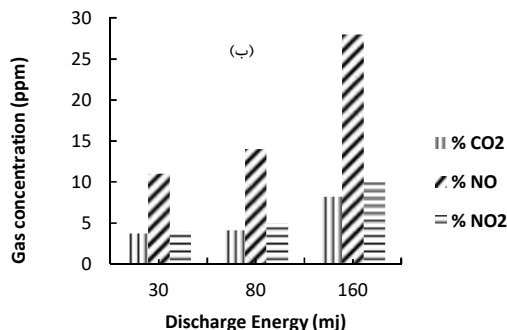
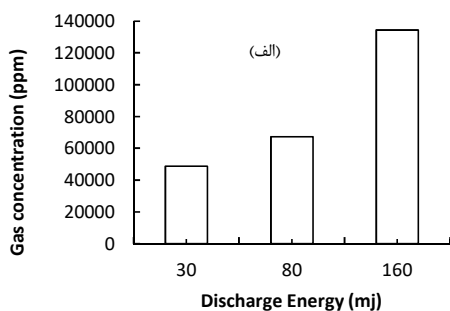
زبری سطح در فرآیند EDM در درجه اول تحت تأثیر اندازه و عمق حفره های ایجاد شده توسط هر تخلیه الکتریکی است. افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس منجر به تخلیه های پرا انرژی تر می شود که حفره های بزرگتر و عمیق تر را روی سطح قطعه کار ایجاد می کند. همچنین انرژی بیشتر، منجر به ذوب شدن حجم های بیشتری از مواد و متعاقباً جامد شدن مجدد آنها می شود و بافت های سطحی خشن تری ایجاد کرده و زبری سطح را افزایش می دهد.

۳-۲-۲- بررسی چگالی ترک های سطحی بوجود آمده
مطابق شکل ۶، افزایش میزان انرژی تخلیه (افزایش شدت جریان و مدت زمان روشنی پالس) منجر به افزایش چگالی ترک های سطحی می شود.

زمان روشنی پالس، انرژی هر تخلیه افزایش یافته و حفره های بزرگتر و عمیق تری را روی سطح قطعه کار ایجاد می کند. انرژی تخلیه بیشتر همچنین منجر به افزایش عیوب سطحی مانند ریز ترک ها و گودال ها شده و کیفیت سطح را بیشتر کاهش می دهد.

۳-۲-۴- بررسی ضخامت لایه سفید ایجاد شده

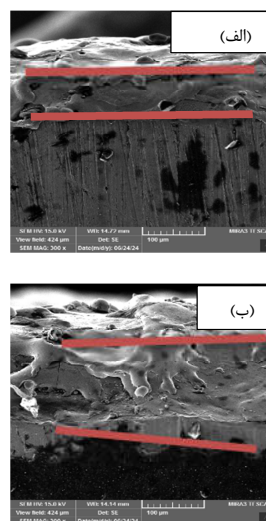
مطابق شکل ۷، با افزایش میزان انرژی تخلیه (افزایش شدت جریان و مدت زمان روشنی پالس)، ضخامت لایه سفید تشکیل شده در سطح قطعه کار افزایش می یابد.



شکل ۸- غلظت گازهای (الف) CO، (ب) CO₂، NO و NO₂، (ج) SO₂ و H₂S، در انرژی های تخلیه مختلف

گازهای CO₂ و CO از تجزیه حرارتی ترکیبات آلی موجود در سیال دی الکتریک و اکسیداسیون کربن موجود در الکترود یا قطعه کار تولید می شود. افزایش شدت جریان منجر به ایجاد جرقه های با دماهای بالاتر شده و تجزیه حرارتی سیال دی الکتریک و فرآیندهای اکسیداسیون را افزایش می دهد، بنابراین تبدیل کربن به CO و CO₂ را تسهیل کرده و غلظت آنها را در ناحیه ماشینکاری افزایش می دهد. مدت زمان روشنی پالس طولانی تر نیز مدت زمان حرارت وارده بر سطح قطعه کار را بیشتر کرده و احتمال تجزیه حرارتی و اکسیداسیون را بالا برده و میزان انتشار گازهای یاد شده را افزایش می دهد. داده های درج شده در شکل ۸ مویید افزایش ۴۷/۵٪ تولید گاز CO و ۷/۷٪ تولید گاز CO₂ می باشد.

گازهای SO₂ و H₂S معمولاً از محتوای گوگرد موجود در سیال دی الکتریک، ماده قطعه کار و یا الکترود تولید می شوند. افزایش شدت



شکل ۷- ضخامت لایه سفید ایجاد شده در سطح ماشینکاری شده با فرآیند EDM، (الف) سطح انرژی تخلیه پایین (30 mj)، (ب) سطح انرژی تخلیه بالا (160 mj)

لایه سفید یک لایه نازک، سخت، شکننده و حاوی ترک های بسیار ریز می باشد که بر روی سطح قطعه کار به دلیل انجماد مجدد مواد مذاب تشکیل می شود. ضخامت این لایه تحت تأثیر شدت جریان و مدت زمان روشنی پالس است. افزایش انرژی تخلیه هر جرقه که ناشی از افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس می باشد، باعث می شود که مقدار و زمان اعمال حرارت به سطح قطعه کار افزایش یافته و حجم بیشتری از مواد قطعه کار را ذوب کند که درصدی از این مواد ذوب شده، دوباره منجمد گردیده و لایه سفید ضخیم تری تشکیل می دهند.

۳-۳- بررسی نوع و میزان انتشار گازهای آلاینده و سمی

در فرآیند EDM، به دلیل واکنش های حرارتی و شیمیایی بین الکترود، قطعه کار و سیال دی الکتریک، گازهای مختلفی مانند CO₂، CO، SO₂، H₂S، NO و NO₂ تولید می شود. شکل های ۸ و ۹، غلظت گازهای مختلف تولید شده در انرژی های تخلیه مختلف در فرآیند EDM را به تفکیک و بصورت یکجا نمایش می دهد. مطابق شکل ۸، غلظت این گازها با افزایش میزان انرژی تخلیه از 30 mj به 160 mj به دلیل افزایش انرژی ورودی و زمان برهمکنش طولانی، بیشتر می شود.

- [7] Preetkanwal SB, Sarabjeet SS, Payal HS, Sandeep K. Magnetic Field Influence on Surface Modifications in Powder Mixed EDM. Silicon. 2018;11:415-423.
- [8] Kolli M. Influence of span 20 surfactant and graphite powder added in dielectric fluid on EDM of titanium alloy. Bonfring Int. J. Ind. Eng. Manag. Sci. 2014; 4:62-67.
- [9] Ishfaq K, Asad M, Anwar S, Pruncu CI, Saleh M, Ahmad S. A comprehensive analysis of the effect of graphene-based dielectric for sustainable electric discharge machining of Ti-6Al-4V. Materials (Basel). 2021;14:1-24.
- [10] Tong H, Li Y, Wang Y. Experimental research on vibration assisted EDM of micro-structures with non-circular cross-section. Journal of Material Processing Technology. 2008;208: 289-298.
- [11] Valaki JB, Rathod PP. Assessment of operational feasibility of waste vegetable oil based bio-dielectric fluid for sustainable electric discharge machining (EDM). Int. J. Adv. Manufac. Technol. 2016; 87 (5): 1509-1518.
- [12] Sadagopan P, Mouliprasanth B. Investigation on the influence of different types of dielectrics in electrical discharge machining. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017; 92 (1): 277-291.
- [13] Mughal MP, Farooq MU, Mumtaz J, Mia M, Shareef M, Javed M, Jamil M, Pruncu CI. Surface modification for osseointegration of Ti6Al4V ELI using powder mixed sinking EDM. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2021; 13: 104-145.
- [14] Jeavudeen S, Siddhi J H. Powder additives influence on dielectric strength of EDM fluid and material removal. Int. J. Machining and Machinability of Materials. 2020; 22(1):47-61.
- [15] Van Tao Le. The influence of additive powder on machinability and surface integrity of SKD61 steel by EDM process, Materials and Manufacturing Processes. 2021; 36(9): 1084-1098.
- [16] Thiyagarajan S, Sivapirakasam SP, Mathew J, Surianarayanan M, Sundareswaran K. Influence of workpiece materials on aerosol emission from die sinking electrical dischargemachining process. Process Safety and Environmental Protection. 2014; 92:739-749.
- [17] Viswanth VS, Ramanujam R, Rajyalakshmi G. A Review of Research Scope on Sustainable and Eco-Friendly Electrical Discharge Machining (E-EDM). Materials Today: Proceedings. 2018;5:12525-12533.
- [18] Jose M, Sivapirakasam SP, Surianarayanan M. Analysis of Aerosol Emission and Hazard Evaluation of Electrical Discharge Machining (EDM) Process. Industrial Health. 2010;48:478-486.
- [19] Leppert T. A Review on Ecological and Health Impacts of Electro Discharge Machining (EDM). AIP Conf. Proc., Poland 2017.
- [20] Shabgard MR, Farzaneh S, Gholipoor A. Investigation of the surface integrity characteristics in wire electrical discharge machining of Inconel 617. J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 2017;39:857-864.
- [21] Lee HT. Influence of EDM process parameters on surface defects and roughness. Chin. J. Mater. Sci. 1996; 28:270-278.
- [22] Lee HT, Yur JP. Characteristic analysis on EDMed surfaces using Taguchi method approach. Mater. Manuf. Process. 2000;15:781-806.

جریان منجر به ایجاد تخلیه های الکتریکی قوی تر و افزایش حرارت در ناحیه ماشینکاری شده و باعث آزاد شدن گوگرد از مواد قطعه کار و سیال دی الکتریک گردیده و در اثر واکنش آن با اکسیژن و هیدروژن منجر به افزایش تولید گازهای مذکور می شود. مدت زمان پالس طولانی تر نیز زمان بیشتری را برای آزاد شدن گوگرد و واکنش با اکسیژن و هیدروژن فراهم می کند و در نتیجه غلظت این گازها را افزایش می دهد. بنابراین همانطور که در نمودارهای شکل ۸ مشاهده می شود، با افزایش انرژی تخلیه، میزان انتشار گازهای H_2S و SO_2 به ترتیب ۲۴/۵٪ و ۳۱٪ افزایش می یابد.

گازهای NO و NO_2 از واکنش نیتروژن موجود در هوا یا مایع دی الکتریک با اکسیژن در دماهای بالا تولید می شوند. افزایش شدت جریان، دما را در ناحیه تخلیه افزایش داده و تشکیل NO و NO_2 را از طریق اکسیداسیون نیتروژن تسهیل می کند. همچنین دماهای بالاتر، واکنش های شیمیایی تولید این اکسیدهای نیتروژن را تسریع کرده و غلظت آنها را افزایش می دهد. همچنین پالس های طولانی تر دمای بالا را برای مدت طولانی تری در سطح ماشینکاری حفظ می کنند و باعث افزایش اکسیداسیون نیتروژن شده و غلظت گازهای یاد شده می شود. بنابراین مطابق شکل ۸، با افزایش انرژی تخلیه، میزان انتشار گازهای NO و NO_2 به ترتیب ۱۶/۷٪ و ۶/۲٪ افزایش می یابد.

۴- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر نوع و میزان انتشار گازهای آلاینده و سمی در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی و همچنین عملکرد این فرآیند در انرژی های تخلیه مختلف، مورد مطالعه قرار گرفت. مطابق نتایج بدست آمده، با افزایش انرژی تخلیه (شدت جریان و زمان روشنی پالس)، نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار، زبری سطح، ضخامت لایه سفید تشکیل شده، چگالی ترک های ایجاد شده روی سطوح ماشینکاری شده افزایش می یابد. همچنین مشاهده گردید با افزایش میزان انرژی تخلیه از 30 mJ به 160 mJ به دلیل افزایش انرژی ورودی و زمان برهمکنش طولانی، غلظت گازهای CO ، CO_2 ، H_2S ، SO_2 ، NO ، و NO_2 تولید شده در فرآیند EDM، به ترتیب ۴۷/۵٪، ۷/۷٪، ۳۱٪، ۲۴/۵٪، ۶/۲٪، ۱۶/۷٪ افزایش می یابد.

۵- مراجع

- [1] Joshi SN, Pande SS. Intelligent process modeling and optimization of die-sinking electric discharge machining. Applied Soft Computing. 2011;11:2743-2755.
- [2] Seyedzavvar M, Shabgard MR. Influence of Tool Material on the Electrical Discharge Machining of AISI H13 Tool Steel. Advanced Materials Research. 2012; 445:988-993.
- [3] Gupta K, Gupta MK. Developments in nonconventional machining for sustainable production: A state-of-the-art review. Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci. 2019; 233:4213-4232
- [4] Nanu D, Nanu A. Perspectives of the dimensional processing through electric erosion processing. Nonconv Technol. 2008;3:61-64.
- [5] Valaki JB, Rathod PP. Assessment of operational feasibility of waste vegetable oil based bio-dielectric fluid for sustainable electric discharge. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016;87:1509-1518.
- [6] Joshi S, Govindan P, Malshe A, Rajurkar K. Experimental characterization of dry EDM performed in a pulsating magnetic field. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2011; 60: 239-242.