



Numerical and Experimental Investigation of Magnetic Field and Ultrasonic Vibrations Assisted EDM Process

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Shabgard M.R.^{*1} PhD,
Gholipour A.¹ PhD,
Mohammadpourfard M.² PhD

How to cite this article

Shabgard M.R, Gholipour A, Mohammadpourfard M. Numerical and Experimental Investigation of Magnetic Field and Ultrasonic Vibrations Assisted EDM Process. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(1):159-169.

ABSTRACT

In this investigation, finite element method was used to model single discharge of ultrasonic vibrations and magnetic field assisted electrical discharge machining (MUEDM) process. Regarding good correlation between theoretical recast layer thickness obtained by process modeling and experimental recast layer thickness obtained by experiments with maximum error of 8.6%, the developed numerical model was used to find the temperature distribution at workpiece surface and predict the created craters dimensions on workpiece surface. The influences of applying ultrasonic vibrations to tool electrode simultaneous with applying external magnetic field around gap distance of electrical discharge machining (EDM) process, on plasma flushing efficiency, recast layer thickness and created craters dimensions were found by numerical and experimental analysis. The experimental and numerical results showed that applying magnetic field around gap distance and ultrasonic vibrations to tool electrode, simultaneously, at EDM process increases plasma flushing efficiency and decreases recast layer thickness. Also, applying magnetic field around gap distance and ultrasonic vibrations to tool electrode, simultaneously, at EDM process, leads to higher depth and volume of created craters on machined surface and lower craters radius.

Keywords Electrical Discharge Machining; Ultrasonic Vibrations of Tool; External Magnetic Field; Numerical Analysis

CITATION LINKS

[1] Intelligent process modeling and optimization of ... [2] Correlation of input parameters with tool material on the output ... [3] Influence of tool material on the electrical discharge machining ... [4] Pulse train analysis in ... [5] A review on recent developments ... [6] Effects of ultrasonic vibrations ... [7] Spark erosion with ... [8] Solutions for technological performances increasing at ultrasonic ... [9] Numerical study of the dielectric liquid around an electrical discharge ... [10] Effects of simultaneous ultrasonic vibration of the tool ... [11] A study of ultrasonically aided micro-electrical-discharge machining by the application ... [12] Process research on high-speed small hole drilling by EDM combined with ... [13] Magnetic field assisted micro ... [14] Investigation of the effects of magnetic field on near-dry ... [15] Analysis of electromagnetic ... [16] Single-spark analysis of removal phenomenon in ... [17] Experimental investigation of the influence of tools ultrasonic vibrations and ... [18] Study of the effect of tools ultrasonic vibrations and external magnetic ... [19] Experimental study of the effects of abrasive particle size and work ... [20] Numerical and experimental study of the effects of ... [21] Investigation of the surface integrity characteristics in wire ... [22] Characteristic analysis on EDMed surfaces using ... [23] Theoretical models of the electrical discharge ... [24] Heat conduction model for the calculation of the volume ... [25] Transient temperatures in a semi-infinite cylinder ... [26] Experimental study of distribution of energy during EDM process ... [27] Process simulation of micro electro-discharge ... [28] Thermal stresses due ... [29] Quantitative expressions for some aspects of surface integrity of electro ... [30] Theoretical models of the electrical ... [31] Electro-thermal modeling of anode ... [32] Mathematical and numerical modeling of the effect of input-parameters on the flushing ... [33] Numerical and experimental study of the effects of ... [34] Investigation of micro-EDM material removal characteristics ... [35] A finite element model of EDM ... [36] Study on the effect of ultrasonic assisted electrical discharge machining ... [37] Experimental investigation and 3D finite element prediction of the white layer thickness, heat affected ...

¹Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Chemical & Petroleum Engineering Department, Chemical Engineering Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran

*Correspondence

Address: Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Postal Code: 5166616471
Postal Code: 5166616471
Phone: +98 (41) 33356026
Fax: +98 (41) 33356026
mrshabgard@tabrizu.ac.ir

Article History

Received: June 27, 2018
Accepted: October 08, 2018
ePublished: January 01, 2019

بررسی تجربی و عددی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه ارتعاشات التراسونیک ابزار و میدان مغناطیسی خارجی

محمدرضا شبگرد* PhD

گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

احد قلی‌پور PhD

گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

موسی محمدپور فرد PhD

گروه مهندسی شیمی و نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

در این مطالعه تک‌جرقه فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار با استفاده از روش اجزای محدود، مدل‌سازی شد. با توجه به همخوانی خوب ضخامت لایه دوباره منجمد شده تئوری به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی و ضخامت لایه دوباره منجمد شده تجربی به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها با بیشترین خطای ۸/۶٪، از مدل‌سازی عددی انجام‌شده برای به‌دست‌آوردن توزیع دما در سطح قطعه کار و پیش‌بینی ابعاد حفره‌های تشکیل‌شده روی سطوح ماشین‌کاری‌شده استفاده شد. با استفاده از آنالیز عددی و تجربی انجام شده، تاثیر اعمال همزمان میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ و ارتعاشات التراسونیک به ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما، ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل‌شده روی سطح قطعه کار و ابعاد حفره‌های تشکیل‌شده روی سطوح ماشین‌کاری‌شده مطالعه شد. نتایج عددی و تجربی نشان دادند که اعمال همزمان میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ و ارتعاشات التراسونیک به ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما را افزایش داده و ضخامت لایه دوباره منجمد شده را کاهش می‌دهد. همچنین اعمال همزمان میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ و ارتعاشات التراسونیک به ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی موجب افزایش عمق و حجم حفره‌ها و کاهش شعاع حفره‌های تشکیل‌شده روی سطح قطعه کار می‌شود.

کلیدواژه‌ها: فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ارتعاشات التراسونیک ابزار، میدان مغناطیسی خارجی، آنالیز عددی

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۴/۰۶

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۱۶

*نویسنده مسئول: mrshabgard@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (EDM) یکی از پرکاربردترین روش‌های ماشین‌کاری پیشرفته است^[1] و نقش مهمی در صنایع ماشین‌کاری مدرن ایفا می‌نماید^[2]. با وجود کاربردهای فراوان فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، این فرآیند دارای محدودیت‌هایی از قبیل نرخ براده‌برداری و سلامتی سطوح ماشین‌کاری‌شده پایین است^[3]. بنابراین محققان مختلف، روش‌های ماشین‌کاری جدید بر پایه فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی مانند فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه ارتعاشات التراسونیک (UEDM)^[4] و فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی (MEDM)^[5] را به‌منظور برطرف کردن این محدودیت‌ها معرفی کرده‌اند. اعمال ارتعاشات التراسونیک به ابزار و قطعه کار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، برای نخستین بار توسط مورتی و فیلیپ در سال ۱۹۸۷ میلادی^[4] و همچنین توسط کرم و همکاران در سال ۱۹۸۹ میلادی^[6] به‌منظور بهبود دفع براده‌ها از فاصله گپ ماشین‌کاری و در نتیجه کاهش آلودگی گپ و تعداد پالس‌های غیرنرمال بررسی شد که می‌تواند منجر به حل مشکلات و محدودیت‌های فرآیند

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی شود و عملکرد فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی را بهبود دهد^[7].

مارینسکو و همکاران^[8] در مطالعه‌ای که در مورد فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه ارتعاشات التراسونیک ابزار انجام دادند، ضمن بررسی نحوه براده‌برداری در این فرآیندها، به این نتیجه رسیدند که اعمال ارتعاشات التراسونیک به ابزار موجب افزایش نرخ براده‌برداری در این فرآیندها می‌شود. *شروانی‌تبار* و *مبادرسانی*^[9]، تاثیر ارتعاشات التراسونیک ابزار، میدان سرعت و توزیع فشار در سیال دی‌الکتریک اطراف حباب بخار ایجادشده را روی روند تشکیل حباب به‌وجودآمده و رفتار سیال دی‌الکتریک اطراف حباب در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌صورت عددی مطالعه کردند. *شروانی‌تبار* و همکاران^[10]، ارتعاشات التراسونیک را به‌صورت همزمان به ابزار و قطعه کار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی اعمال کردند و تاثیر آن را بر رفتار هیدرودینامیک جریان سیال اطراف حباب بخار تولیدشده و نرخ براده‌برداری به‌صورت عددی مطالعه نمودند. طبق نتایج آنها، ارتعاش همزمان ابزار و قطعه کار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و همچنین افزایش فرکانس و دامنه ارتعاشات، طول عمر حباب را افزایش داده و سرعت رشد و واژگونی حباب را بیشتر کرده است و منجر به رشد حباب تا بیشترین میزان حجم خود می‌شود که این امر موجب افت فشار درون حباب به کمترین میزان خود می‌شود و در نتیجه مقدار ماده برداشته‌شده از سطح قطعه کار و نرخ براده‌برداری بهبود می‌یابد.

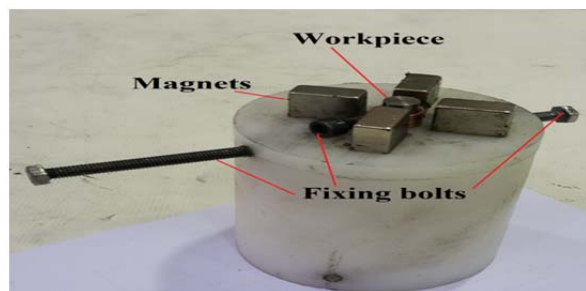
گائو و لیو^[11]، فرآیند میکروماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه ارتعاشات التراسونیک قطعه کار را مورد بررسی قرار دادند. مطابق با نتایج آنها ارتعاشات التراسونیک قطعه کار تاثیر بسزایی روی عملکرد فرآیند میکروماشین‌کاری تخلیه الکتریکی دارد. آنها نشان دادند که بازده فرآیند میکروماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و همچنین دقت ابعادی سوراخ ماشین‌کاری‌شده با این فرآیند با اعمال ارتعاشات التراسونیک به قطعه کار بهبود می‌یابد. *بروئین* و همکاران، اولین محققانی بودند که در سال ۱۹۷۸ میلادی، میدان مغناطیسی را در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی اعمال و آن را بررسی کردند^[5]. *کائو و ژنگ*^[12]، فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی را مطالعه کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که با این روش، نرخ براده‌برداری بیشتر و سایش ابزار کمتری به دست می‌آید. *یئو* و همکاران^[13]، فرآیند میکروماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی را مطالعه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که سوراخ‌های با عمق بیشتری را می‌توان با فرآیند میکروماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی، ماشین‌کاری نمود. *قلی‌پور* و همکاران^[14] به بررسی تاثیر اعمال میدان مغناطیسی حول فاصله گپ در فرآیند تخلیه الکتریکی نیمه‌خشک پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با اعمال میدان مغناطیسی، نرخ براده‌برداری فرآیند تخلیه الکتریکی نیمه‌خشک افزایش می‌یابد.

فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی به‌کمک میدان مغناطیسی توسط *تامورا* و *کونید*^[15] بررسی شد. همچنین آنها یک مدل دو بُعدی با روش اجزای محدود به‌منظور پیداکردن مکانیزم نیروی الکترومغناطیس اعمال‌شده به سیم در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی را به‌کمک میدان مغناطیسی توسعه دادند. *گوویندان* و همکاران^[16]، برداشت ماده از قطعه کار در حالت تک‌جرقه در فرآیند EDM خشک به‌همراه میدان مغناطیسی را به‌صورت تجربی و عددی مطالعه نمودند. آنها تاثیر پارامترهای

کارهای حساس با عملکردی مناسب شده است [19]. همچنین شکل ۳، تصویر دستگاه اسپارک به‌همراه مولد ارتعاشات التراسونیک و فیکسچر مغناطیسی مورد استفاده در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار را نشان می‌دهد.



شکل ۱) تصویر دستگاه مولد ارتعاشات التراسونیک



شکل ۲) فیکسچر مورد استفاده برای قطعه کار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌کمک میدان مغناطیسی



شکل ۳) دستگاه اسپارک مورد استفاده در فرآیند EDM به‌همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات التراسونیک

در این پژوهش، شدت جریان تخلیه و زمان روشنی پالس هر کدام در چهار سطح به‌عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شد و طبق اصول طراحی آزمایش‌ها و براساس مدل طرح عاملی کامل، ۱۶ آزمایش در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و ۱۶ آزمایش در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات التراسونیک ابزار و در مجموع ۳۲ آزمایش برای بررسی تاثیر اعمال همزمان میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ و ارتعاشات التراسونیک به ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما و ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطوح ماشین‌کاری شده به‌عنوان پارامترهای خروجی این فرایندها طراحی و انجام شد. همچنین نتایج فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات التراسونیک ابزار، با نتایج فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی و فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه ارتعاشات التراسونیک ابزار [20] مقایسه شدند.

مختلف فرآیند از قبیل شدت جریان، ولتاژ، شدت میدان مغناطیسی و زمان روشنی پالس را روی قطر و عمق حفره‌های تشکیل شده روی قطعه کار به‌صورت تجربی مطالعه کردند و افزایش ۱۳۰٪ نرخ براده‌برداری در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی خشک به‌همراه میدان مغناطیسی را به محدود شدن گسترش کانال پلاسما در اثر نیروی لورنتز تولید شده نسبت دادند. طبق بررسی آنها اعمال میدان مغناطیسی در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی خشک منجر به کاهش قطر و افزایش عمق حفره‌های تولید شده در روی قطعه کار می‌شود. در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نیز هر چند که کاهش قطر حفره‌های تولید شده در اثر اعمال میدان مغناطیسی خیلی کم است، ولی اعمال میدان مغناطیسی به یکنواخت‌تر شدن برداشت ماده از سطح قطعه کار کمک می‌کند. شبگرد و قلی‌پور [18] و همچنین شبگرد و همکاران [17]، به مطالعه تجربی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات التراسونیک ابزار (MUEDEM) پرداخته و به این نتیجه رسیده‌اند که با کاربرد این فرآیند ترکیبی می‌توان به نرخ براده‌برداری بیشتر و سطوح ماشین‌کاری شده با سلامتی بهتر در مقایسه با فرآیند EDM دست یافت.

با توجه به این که تاکنون مطالعه‌ای در زمینه مدل‌سازی این فرآیند ترکیبی جدید انجام نشده، در این پژوهش، مدل اجزای محدود تک‌جرقه فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات التراسونیک ابزار توسعه داده شده و تاثیر اعمال ارتعاشات التراسونیک به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما (PFE)، ضخامت لایه دوباره منجمد شده (RLT) تشکیل شده و ابعاد حفره‌های تشکیل شده روی سطوح ماشین‌کاری شده مطالعه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق، برای اعمال همزمان ارتعاشات التراسونیک به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و انجام عملیات ماشین‌کاری با فرآیند تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار، از دستگاه اسپارک شارمیلز روبو فرم ۲۰۰ با مولد ایزوپالس استفاده شده است. برای اعمال ارتعاشات التراسونیک به ابزار، از دستگاه مولد ارتعاشات التراسونیک بندلین ۲۲۰۰ با توان ۲۰۰ وات و فرکانس ارتعاش ۲۰ کیلوهرتز برای ایجاد امواج التراسونیک با دامنه ۱۵ میکرون استفاده شده است. از متمرکزکننده آلومینیومی نیز به‌منظور تقویت دامنه ارتعاشات استفاده می‌شود. شکل ۱ تصویر دستگاه مولد ارتعاشات التراسونیک مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

برای اعمال میدان مغناطیسی به فاصله گپ در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، فیکسچر نشان داده شده در شکل ۲، برای قطعه کار، طراحی و حول فاصله گپ قرار داده شد. جنس این فیکسچر از پلاستیک است و چهار آهنربای ثابت مکعبی نئودیمیوم با شدت مغناطیسی ۱/۳ تسلا به ابعاد ۲۵×۲۰×۱۰ میلی‌متر در محل‌های تعبیه شده در فیکسچر قرار داده می‌شوند. آهنربای نئودیمیوم دارای مقاومت مغناطیسی بسیار بالاتری نسبت به دیگر آهنرباها بوده که در عمل آن را به یک آهنربای دائمی با طیف وسیعی از کاربردهای گوناگون تبدیل کرده است. سائز کوچک و در عین حال قدرت بالای آن خصوصیتی بوده که موجب استفاده از این نوع آهنربا در

آنها انجام شد. ابزار مورد استفاده در این فرآیندها، مس با خلوص ۹۹٪ به قطر خارجی ۱۴ میلی‌متر و ارتفاع ۲۲ میلی‌متر است.

جدول (۳) ترکیب شیمیایی فولاد H13

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

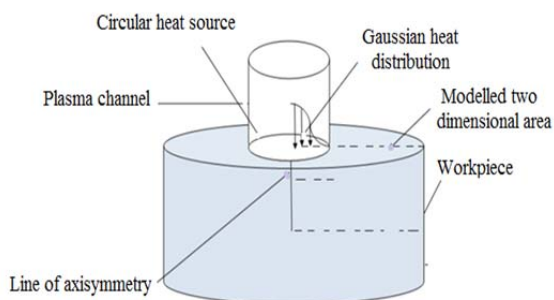
۳- مدل‌سازی فرآیند

برداشت ماده در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی می‌تواند به‌عنوان ذوب و تبخیر قطعه کار در اثر تشکیل کانال پلاسما بین ابزار و قطعه کار مدل شود. این حالت موجب تشکیل حفره‌های تخلیه روی سطح قطعه کار در اثر ذوب و تبخیر آن می‌شود. مطابق با تصاویر گرفته‌شده با دوربین‌های دیجیتالی با فریم بسیار بالا، بهترین شکل برای کانال پلاسما در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، استوانه‌ای است [23]. در این مطالعه نیز کانال پلاسما استوانه‌ای شکل در نظر گرفته شده و با توجه به متقارن بودن انتقال حرارت بین ابزار و قطعه کار، یک مدل سه‌بعدی در سیستم مختصات استوانه‌ای مطابق شکل ۴، برای فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار توسعه داده شده است.

معادله حاکم استفاده‌شده برای انتقال حرارت رسانشی متقارن به قطعه کار ناشی از تک‌جرقه فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بدون تولید گرمای داخلی در سیستم مختصات استوانه‌ای با رابطه ۱ بیان می‌شود [24].

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (1)$$

ρ دانسیته، C_p ظرفیت گرمایی ویژه، T دما، t زمان، k ضریب رسانش حرارتی ماده قطعه کار و r و z محورهای مختصات هستند. برای شبیه‌سازی دقیق فرآیند برداشت ماده در مدل‌سازی اجزای محدود تک‌جرقه فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار، به‌جای منبع حرارتی نقطه‌ای، منبع حرارتی دایره‌ای شکل در نظر گرفته شده است [25].



شکل (۴) تصویر شماتیک مدل فیزیکی مورد استفاده در این پژوهش

در بعضی از کارهای انجام‌شده در مورد مدل‌سازی ریاضی تک‌جرقه فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، محققان توزیع شار حرارتی یکنواختی را در کانال پلاسما در نظر گرفته‌اند که به دور از واقعیت بوده و این موضوع با تکنیک اسپکتروسکوپی به اثبات رسیده است [26]. برخی از محققان نیز توزیع شار حرارتی گوسین را در نظر

سطوح پارامترهای ورودی متغیر، پس از انجام آزمایشات اکتشافی و مطالعه تحقیقات مختلف انجام‌شده [21, 22] تعیین شد. سطوح پارامترهای ورودی متغیر در فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه ارتعاشات مغناطیسی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه ارتعاشات التراسونیک ابزار و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات التراسونیک ابزار منطبق بر یکدیگر و مطابق با جدول ۱ است. پارامترهای ثابت آزمایش‌ها نیز که در همه آزمایش‌ها در نظر گرفته شدند، در جدول ۲ آورده شده است.

جدول (۱) پارامترهای ورودی متغیر و سطوح آنها

پارامتر	زمان روشنی پالس (t _{on} : میکروثانیه)	شدت جریان (I: آمپر)
۱	۶/۴	۴
۲	۱۲/۸	۸
۳	۵۰	۱۶
۴	۱۰۰	۳۲

جدول (۲) پارامترهای ثابت استفاده‌شده در آزمایش‌ها

پارامتر ثابت	سطح آزمایش
زمان خاموشی پالس (μs)	۶/۴
ولتاژ مدار باز (V)	۲۰۰
نوع شست‌وشو	غوطه‌وری در دی‌الکتریک
نوع دی‌الکتریک	روغن فلاکس الف (ELF)

در این تحقیق برای انجام هر آزمایش، یک الکتروود ابزار به کار رفته و زمان انجام هر کدام از آزمایش‌ها ثابت و ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. برای اندازه‌گیری وزن قطعه کار قبل و بعد از انجام آزمایش‌ها، از ترازوی دیجیتالی سارتوریوس CP224S با دقت ۰/۰۰۱ گرم استفاده شد. تعداد پالس‌های نرمال در انتهای زمان ماشین‌کاری نیز با استفاده از یک اسیلوسکوپ و یک مدار الکترونیکی برای ثبت تغییرات ولتاژ گپ و شدت جریان تخلیه با زمان و برنامه نوشته‌شده با نرم‌افزار MATLAB برای شمارش تعداد هر کدام از پالس‌ها به دست می‌آید.

برای محاسبه ضخامت لایه دوباره منجمدشده تشکیل‌شده روی سطح ماشین‌کاری‌شده، پس از برش سطوح ماشین‌کاری‌شده با دستگاه وایرکات و به‌دست‌آوردن سطح مقطع ماشین‌کاری‌شده، انجام عملیات متالوگرافی و اچ‌کردن با محلول ۵٪ نایتینول، از ۲۰ محل مختلف سطح مقطع، تصاویری با میکروسکوپ الکترونی مذکور گرفته شد و پس از محاسبه ضخامت لایه دوباره منجمدشده در این محل‌ها، میانگین آنها به‌عنوان ضخامت لایه دوباره منجمدشده در نظر گرفته می‌شود.

قطعه کار مورد استفاده در این مطالعه، فولاد استوانه‌ای گرمکار از جنس AISI H13 به قطر ۱۰ میلی‌متر بوده که پس از برش با دستگاه برشکاری سیمی به ارتفاع ۲۰ میلی‌متر، سطوح پیشانی آن سنگ‌زنی و پولیش‌کاری شده است. ترکیب شیمیایی قطعه کار در جدول ۳ آمده که رسانای الکتریسیته بوده و دارای خاصیت مغناطیسی است. جنس ابزار مورد استفاده در این مطالعه، مس با خلوص ۹۹٪ و در مورد فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی استوانه‌ای به قطر خارجی ۱۴ میلی‌متر و ارتفاع ۴۰ میلی‌متر بوده که با عملیات تراشکاری تهیه شده است. همچنین در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه ارتعاشات التراسونیک ابزار و میدان مغناطیسی خارجی، برای اتصال ابزار مسی به کِلگی مخصوص التراسونیک برای انجام عملیات ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌کمک ارتعاشات التراسونیک، عملیات رزوه‌کاری روی

۳ و ۴ انتقال حرارتی رخ نمی‌دهد (چون این سطوح دورتر از منبع حرارتی هستند) و شرایط مرزی آنها طبق رابطه ۷ بیان می‌شود. با توجه به شرایط تقارن محوری مرز ۵، انتقال حرارت آن نیز مطابق با رابطه ۷ برابر با صفر در نظر گرفته شد.

همچنین در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، قطعه کار در سیال دی‌الکتریک غوطه‌ور می‌شود، بنابراین مطابق با رابطه ۸، دمای محیط به‌عنوان شرایط اولیه به همه مرزها اعمال می‌شود. شرایط مرزی برای مرز ۱:

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = q_w(r) = \frac{4.55 FVI}{\pi R_p^2} \exp \left[-4.5 \times \left(\frac{r}{R_p} \right)^2 \right] \quad (6)$$

(in $t \geq t_{on}$ and $r < R_p$)

شرایط مرزی برای مرز ۲ (در $t > t_{on}$ و $r > R_p$) و مرزهای ۳، ۴ و ۵:

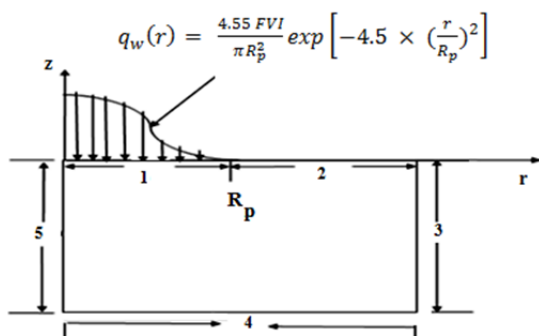
$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

شرایط اولیه (در $t=0$):

$$T(r, z, 0) = T_0 \quad (8)$$

در این پژوهش از نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی الکتریکی-حرارتی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار از روش اجزای محدود و حل معادله انتقال حرارت رسانشی حاکم استفاده شده است. آباکوس یک بسته نرم‌افزاری آنالیز اجزای محدود برای توسعه مدل‌های دو و سه‌بعدی است. این نرم‌افزار به محققان امکان این را می‌دهد که خصوصیات ماده و معادلات مختلف را در داخل برنامه تعریف کنند. برای اعمال شعاع کانال پلاسما در نرم‌افزار آباکوس در پژوهش حاضر، زیربرنامه‌ای در نرم‌افزار فورتین نوشته و از داخل نرم‌افزار آباکوس فراخوانی می‌شود. همچنین گرمای نهان ذوب قطعه کار نیز که یکی از ویژگی‌های مهم حرارتی قطعه کار است و تاثیر زیادی در آنالیز حرارتی و شبیه‌سازی انجام شده دارد، در آنالیز عددی انجام شده در نظر گرفته شد.

شکل ۶، نشان‌دهنده نمونه‌ای از مدل اجزای محدود قطعه کار به همراه توزیع دمایی آن در اثر تک‌جرقه فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌دست‌آمده از آنالیز اجزای محدود فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی است. پس از محاسبه دمای نقاط مختلف قطعه کار در اثر تک‌جرقه فرآیند، نقاطی که دمای آنها به نقطه ذوب جنس قطعه کار می‌رسد به‌عنوان مرز چاله مذاب در نظر گرفته می‌شود و ابعاد حفره‌های ایجادشده در سطح قطعه کار و نرخ براده‌برداری فرآیند به‌صورت تئوری محاسبه می‌شود.



شکل ۵) شماتیک مدل حرارتی فرآیند EDM به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات التراسونیک ابزار

گرفته‌اند[27]. توزیع شار حرارتی گوسین در فاصله شعاعی از محور جرچه که با رابطه ۲ بیان می‌شود[28]، در مدل‌سازی انجام شده در این تحقیق نیز مورد استفاده قرار گرفت.

$$q_r(r) = q_0 \exp \left[-4.5 \left(\frac{r}{R_p} \right)^2 \right] \quad (2)$$

در رابطه ۲، q_0 بیشترین شار حرارتی در مرکز قطعه کار است که با رابطه ۳ بیان می‌شود[28].

$$q_0 = \frac{4.55 F_c VI}{\pi R_p^2} + \frac{M_s \pi^2 f^2 A^2}{T} \quad (3)$$

در رابطه ۳، F_c کسر کل انرژی انتقال‌یافته به قطعه کار، V ولتاژ تخلیه، I شدت جریان تخلیه، R_p شعاع پلاسما، T دوره تناوب نوسان، A دامنه ارتعاش ابزار، f فرکانس ارتعاش ابزار و M_s جرم ذره موجود در کانال پلاسما است.

کسر کل انرژی انتقال‌یافته به قطعه کار، پارامتر مهمی است و مقدار شار حرارتی انتقال‌یافته به قطعه کار را نشان می‌دهد[28] که می‌تواند به‌صورت تجربی یا تئوری تعیین شود. کسر کل انرژی انتقال‌یافته به قطعه کار در مطالعات مختلف برابر با ۳۴٪ [29]، ۱۸٪ [30]، ۱۴٪ [31] و ۵۰٪ [24] تعیین شده است. کسر کل انرژی انتقال‌یافته به قطعه کار، به خصوصیات مکانیکی و حرارتی ابزار و قطعه کار، شدت جریان و زمان روشنی پالس وابسته است[28]. شبگرد و همکاران[32]، رابطه ۴ را برای کسر کل انرژی انتقال‌یافته به قطعه کار توسعه دادند که در این تحقیق از رابطه ۴ برای محاسبه کسر کل انرژی انتقال‌یافته به قطعه کار استفاده شده است.

$$F_c = 5.5998 \times I^{-0.3401} \times t_{on}^{0.2989} \quad (4)$$

I شدت جریان و t_{on} زمان روشنی پالس است.

در این تحقیق، برای بیان شعاع کانال پلاسما (معادل با شعاع منبع حرارتی) در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار از رابطه توسعه‌داده‌شده توسط شبگرد و همکاران[33] استفاده شد که با رابطه ۵ بیان شده است.

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{eq}{2\pi r d \epsilon_0 m} - \frac{e(\vartheta \times B_s)}{m} - \frac{e(\vartheta \times B_E)}{m} + \frac{P_{in}(2rd)}{m} - \frac{P_{out}(2rd)}{m} - \frac{\gamma(2r + 2d)}{m} \quad (5)$$

r شعاع کانال پلاسما، t زمان روشنی پالس، e بار الکتریکی الکترون، q بار الکتریکی حاضر در کانال پلاسما، d فاصله گپ، ϵ_0 ثابت گذردهی خلا، m جرم کانال پلاسما، ϑ سرعت پرتاب ذرات باردار در کانال پلاسما، B_s میدان مغناطیسی ایجادشده حول کانال پلاسما در اثر حرکت ذرات باردار در کانال پلاسما، B_E میدان مغناطیسی خارجی ایجادشده حول کانال پلاسما، P_{in} فشار داخلی کانال پلاسما، P_{out} فشار خارجی وارد بر کانال پلاسما از طرف سیال دی‌الکتریک و γ کشش سطحی ایجادشده در سطح مشترک کانال پلاسما و سیال دی‌الکتریک است.

شکل شماتیک مدل الکتریکی-حرارتی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، با شرایط مرزی اعمال شده در طول زمان روشنی پالس در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۵ و رابطه ۶، حرارت انتقال‌یافته به سطح بالایی قطعه کار در طول زمان روشنی پالس تا شعاع کانال پلاسما به‌صورت توزیع گوسین است (مرز ۱). از مرز ۲،

عددی به صورت زیر است:

درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما با رابطه ۹ بیان می‌شود [35].

$$\% PFE = 100 \times \frac{V_c(EXP)}{V_c(FEM)} \quad (9)$$

$V_c(EXP)$ حجم ماده برداشته شده از قطعه کار به ازای هر پالس به دست آمده از آزمایش و $V_c(FEM)$ حجم ماده ذوب شده از قطعه کار به ازای هر پالس به دست آمده از مدل سازی عددی است. حجم ماده برداشته شده از قطعه کار به ازای هر پالس به دست آمده از آزمایش از رابطه ۱۰ به دست می‌آید.

$$V_c(EXP) = \frac{(M_1 - M_2)}{(NN \times \rho)} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰، M_1 و M_2 وزن قطعه کار قبل و بعد از ماشین کاری، NN تعداد پالس های نرمال در انتهای زمان ماشین کاری و ρ دانسیته قطعه کار است.

حجم ماده ذوب شده از قطعه کار به ازای هر پالس به دست آمده از مدل سازی عددی از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود [32].

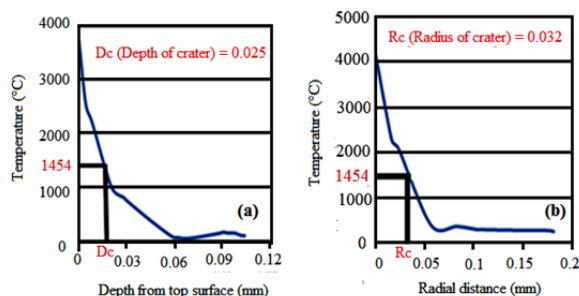
$$V_c(FEM) = \frac{1}{2} \pi D_c R_c^2 \quad (11)$$

جدول ۴ ضخامت لایه دوباره منجمد شده به دست آمده به روش عددی و تجربی

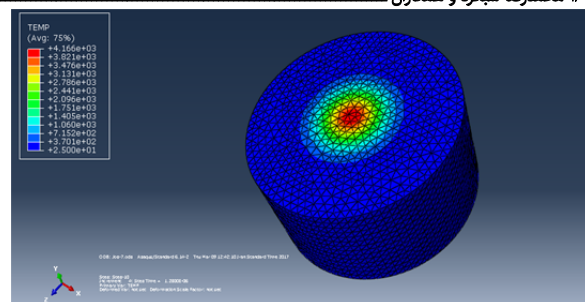
I (A)	t_{on} (μs)	$V_c(EXP)$ (μm^3)	$V_c(FEM)$ (μm^3)	PFE (%)	RLT_{Exp} (μm)	RLT_{Num} (μm)	Error (%)
۸	۱۲/۸	۳۷۷۸/۳۵	۶۰۸۱/۰۵	۶۱/۹۶	۴/۲۵	۴/۶۵	۸/۶
۱۶	۱۲/۸	۷۳۵۵/۲	۱۰۲۸۷	۷۱/۵	۳/۶۵	۳/۹۲	۷/۳
۳۲	۱۲/۸	۱۳۸۵۶/۸۲	۲۱۲۵۲/۸	۶۵/۲	۶/۰۵	۵/۷۳	۵/۲
۸	۵۰	۳۴۹۳۳/۶	۴۲۵۳۹/۷	۸۲/۱۲	۳/۷۱	۳/۶۱	۲/۶
۱۶	۵۰	۵۶۱۱۵/۲۳	۷۴۲۲۶/۵	۷۵/۶	۵/۸۸	۶/۳۲	۷/۴
۳۲	۵۰	۱۱۷۷۸۸	۱۴۴۳۶۵/۷	۸۱/۵۹	۵/۵۱	۵/۱۵	۶/۵

در رابطه ۱۱، D_c عمق چاله مذاب و R_c شعاع چاله مذاب به دست آمده از آنالیز عددی است که مطابق با نمودار ۱ به دست می‌آید. نمودار ۱، نمونه‌ای از منحنی‌های توزیع دمایی به دست آمده از آنالیز اجزای محدود فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار، در راستای عمق و شعاعی قطعه کار است. براساس نمودار ۱، نقاط هم‌دم با نقطه ذوب قطعه کار به عنوان مرز حفره‌های ایجاد شده در راستای عمق و شعاع (عمق و شعاع چاله مذاب به دست آمده از آنالیز عددی) شناخته می‌شوند. در نهایت ضخامت لایه دوباره منجمد شده به روش عددی با رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود [32].

$$RLT_{Num} = D_c - PFE \times D_c \quad (12)$$



نمودار ۱ منحنی توزیع دمایی به دست آمده از آنالیز اجزای محدود قطعه کار در فرآیند EDM به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات التراسونیک ابزار در راستای عمق قطعه کار و در راستای شعاعی قطعه کار ($I=8A$, $t_{on}=12.8\mu s$): (الف) در راستای عمق قطعه کار، (ب) در راستای شعاعی قطعه کار



شکل ۲ نمونه‌ای از مدل اجزای محدود قطعه کار به همراه توزیع دمایی در اثر تک‌جرقه فرآیند EDM با میدان مغناطیسی و ارتعاشات التراسونیک ابزار اعتبارسنجی مدل انتقال حرارت توسعه داده شده

با توجه به این که فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی یک فرآیند تصادفی بوده، برخی فرض‌های ساده‌کننده به شرح زیر در راستای حل مساله در نظر گرفته شده است:

۱- برای آنالیز، فقط یک جرقه در نظر گرفته شده است.
۲- مساله به صورت متقارن محوری (حول محور Z) در نظر گرفته شده است.

۳- انتقال حرارت در سطح قطعه کار به صورت رسانی در نظر گرفته شده است. از انتقال حرارت به صورت تابشی و جابه‌جایی به دلیل کم بودن مقدار آنها در مقایسه با انتقال حرارت هدایت صرف نظر می‌شود [31].

۴- در اثر اعمال منبع حرارتی به سطح قطعه کار در طول زمان روشنی پالس، توزیع شار حرارتی به صورت گوسین در نظر گرفته شده است [28].

۵- خصوصیات ترموفیزیک ماده قطعه کار (مانند ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب رسانش حرارتی) به صورت مستقل از دما در نظر گرفته شده و این فرض با در نظر گرفتن این که ابعاد حفره ایجاد شده در سطح قطعه کار در مقایسه با ابعاد قطعه کار بسیار کوچک بوده، معقول است [34].

۶- فقط کسری از انرژی کلی به سطح قطعه کار انتقال می‌یابد و بقیه از طریق جابه‌جایی و تابش به سیال دی‌الکتریک و از طریق همرفت به ابزار منتقل می‌شود [31].

۷- ابزار و قطعه کار، همگن و همسان‌گرد در نظر گرفته شده است.

۸- دمای محیط برابر با دمای اتاق فرض شده است.

۹- کانال پلاسما، استوانه‌ای و چاله مذاب در سطح قطعه کار کروی شکل فرض شده است [23].

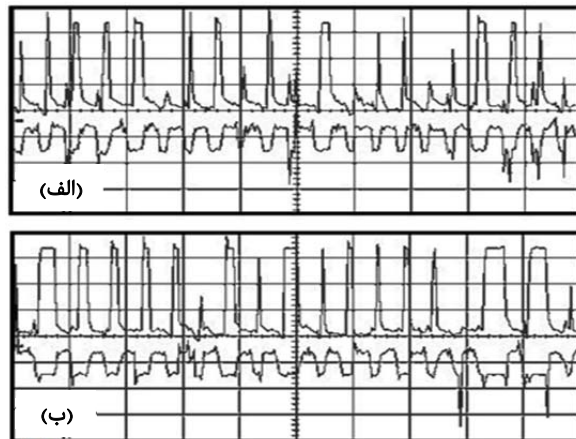
۱۰- هر چاله ایجاد شده در سطح قطعه کار فقط ناشی از یک جرقه است.

به منظور استفاده از مدل سازی الکتریکی- حرارتی انجام شده در مطالعه تاثیر اعمال میدان مغناطیسی حول فاصله گپ و ارتعاشات التراسونیک به ابزار در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی، بر عمق، شعاع و حجم حفره ایجاد شده در سطح قطعه کار، ابتدا باید مدل سازی انجام شده اعتبارسنجی شود.

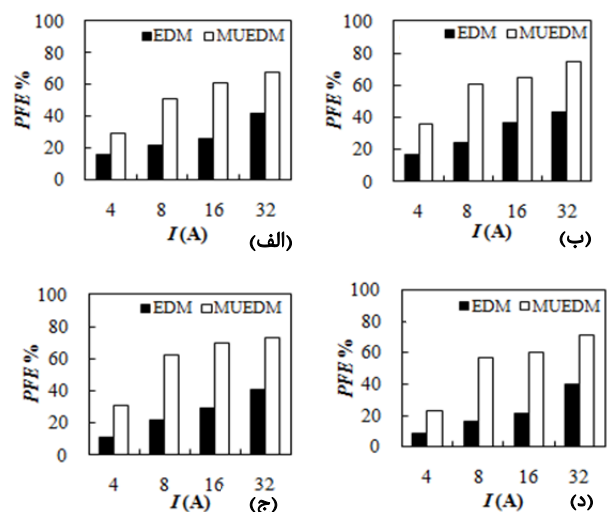
اعتبارسنجی مدل انتقال حرارت توسعه داده شده توسط روش اجزای محدود برای فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار، از طریق محاسبه ضخامت لایه دوباره منجمد شده به روش تجربی و عددی و مقایسه آنها انجام شده است. نتایج این مقایسه در جدول ۴ نشان داده شده و بیانگر همخوانی خوبی بین ضخامت لایه دوباره منجمد شده به دست آمده از روش تجربی و عددی با بیشترین خطای ۸/۶% است. نحوه محاسبه ضخامت لایه دوباره منجمد شده به روش

۴-۱- تأثیر اعمال همزمان ارتعاشات التراسونیک به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما

براساس نمودار ۲ که درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما را در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار، در شدت جریان‌ها و زمان‌های روشنی پالس مختلف مقایسه می‌کند، اعمال همزمان ارتعاشات التراسونیک به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی موجب افزایش درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما می‌شود.



شکل ۷ (الف) فرآیند EDM و فرآیند EDM به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار در $t_{on}=50\mu s$ و $I=16A$; (ب) فرآیند EDM به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار



نمودار ۲ (الف) تأثیر اعمال همزمان ارتعاشات التراسونیک به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، بر درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما؛ (الف) $t_{on}=6.4\mu s$ ، (ب) $t_{on}=12.8\mu s$ ، (ج) $t_{on}=50\mu s$ ، (د) $t_{on}=100\mu s$

۲- با اعمال نیروی لورنتز به کانال پلاسما در نتیجه اعمال میدان مغناطیسی حول فاصله گپ در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، گسترش کانال پلاسما محدود می‌شود. از طرفی فشار آکوستیک ایجادشده در اثر ارتعاشات التراسونیک ابزار، زمانی که ابزار پایین می‌رود، مثبت است و به فشار موضعی سیال دی‌الکتریک وارد بر کانال پلاسما، افزوده و فشار هیدرواستاتیک کلی وارد بر کانال پلاسما بیشتر می‌شود. در نتیجه با اعمال میدان مغناطیسی حول فاصله گپ و ارتعاشات التراسونیک به ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، کانال پلاسما باریک‌تر می‌ماند و چگالی انرژی آن افزایش می‌یابد [14].

۳- کاهش فاصله گپ و افزایش فشار هیدرواستاتیک کلی وارد بر کانال پلاسما با حرکت ابزار به سمت پایین موجب افزایش چگالی الکترون‌ها در کانال پلاسما می‌شود. بنابراین فاصله بین ذرات باردار و میانگین مسیر آزاد حرکت الکترون‌ها در کانال پلاسما کاهش پیدا می‌کند و چگالی انرژی پلاسما افزایش می‌یابد [36].

۴- با اعمال ارتعاشات التراسونیک به ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ذرات بدون حرکت خنثی حاضر در کانال پلاسما به حرکت در می‌آیند و موجب افزایش چگالی انرژی کانال پلاسما براساس رابطه ۱۳ می‌شوند [36].

$$\delta E_z = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} M_s u^2(t) dt = \frac{M_s U^2}{4} = M_s \pi^2 f^2 A^2 \quad (13)$$

T زمان ارتعاش، A دامنه ارتعاشات، M_s جرم ذرات حاضر در کانال پلاسما و u معادله ارتعاش ابزار در زمان t است.

همچنین با وقوع پدیده کاویتاسیون و برخورد جت سیال با سرعت

افزایش چگالی انرژی تخلیه‌شده به کانال پلاسما، دمای کانال پلاسما، فشار و گرادیان فشار کانال پلاسما با اعمال همزمان ارتعاشات التراسونیک به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، با توجه به دلایل زیر و در نظر گرفتن پدیده جوشش حجمی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های براده‌برداری فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی [2]، موجب افزایش درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما می‌شود:

۱- با اعمال میدان مغناطیسی حول فاصله گپ و ارتعاشات التراسونیک به ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، آلودگی گپ کاهش می‌یابد. اعمال میدان مغناطیسی حول فاصله گپ از طریق جذب مواد مذاب دوباره منجمدشده معلق در فاصله گپ، موجب کاهش آلودگی گپ می‌شود. از طرفی اعمال ارتعاشات التراسونیک به ابزار با تولید حباب‌های اضافه علاوه بر حباب‌های تولیدشده در اثر جرقه‌زنی، آلودگی گپ را کاهش می‌دهد. این حباب‌ها به دلیل افت فشار کانال پلاسما با کاهش فشار هیدرواستاتیک کلی موثر بر کانال پلاسما با توجه به فشار آکوستیک منفی ایجادشده با حرکت ابزار به سمت بالا ایجاد می‌شوند. حباب‌ها در طول مرحله رشد، سیال دی‌الکتریک را به

اعمال همزمان ارتعاشات التراسونیک به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی موجب افزایش درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما و کاهش آلودگی گپ می‌شود. درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما تاثیر زیادی روی ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطوح ماشینکاری شده دارد و با افزایش میزان ماده‌ای که از چاله مذاب به بیرون دفع می‌شود، ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطوح ماشینکاری شده کاهش می‌یابد. همچنین کاهش آلودگی گپ موجب کاهش احتمال چسبیدن آلودگی‌های فلزی یا کربنی معلق در فاصله گپ روی سطوح ماشینکاری می‌شود و می‌تواند موجب کاهش ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطوح ماشینکاری شده شود.

براساس نمودار ۳، با افزایش شدت جریان تخلیه، ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطوح ماشینکاری شده در هر دو فرآیند افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان این گونه بیان نمود که با افزایش شدت جریان تخلیه، علی‌رغم افزایش دما، فشار و نرخ تغییرات فشار کانال پلاسما که منجر به افزایش درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما می‌شود (نمودار ۲)، به دلیل تولید حجم زیادی از مواد مذاب در شدت جریان‌های بالاتر، در نهایت مقدار ماده مذابی که دوباره سرد می‌شود و به سطح قطعه کار می‌چسبد و بنابراین ضخامت لایه دوباره منجمد شده افزایش می‌یابد.

همچنین مطابق با نمودار ۴، با افزایش زمان روشنی پالس، ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطوح ماشینکاری شده در شدت جریان‌های پایین، کاهش و در شدت جریان‌های بالا افزایش می‌یابد. با افزایش زمان روشنی پالس، دمای کانال پلاسما افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به افزایش فشار و نرخ تغییرات فشار کانال پلاسما شود و درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما را افزایش دهد. در ادامه و با افزایش بیشتر زمان روشنی پالس، کانال پلاسما گسترش می‌یابد و شعاع کانال پلاسما بیشتر می‌شود. بنابراین فشار و نرخ تغییرات فشار کانال پلاسما، کاهش و درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما نیز کاهش می‌یابد. افزایش درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما موجب کاهش ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطح ماشینکاری می‌شود و کاهش این پارامتر موجب افزایش ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطح ماشینکاری می‌شود [37].

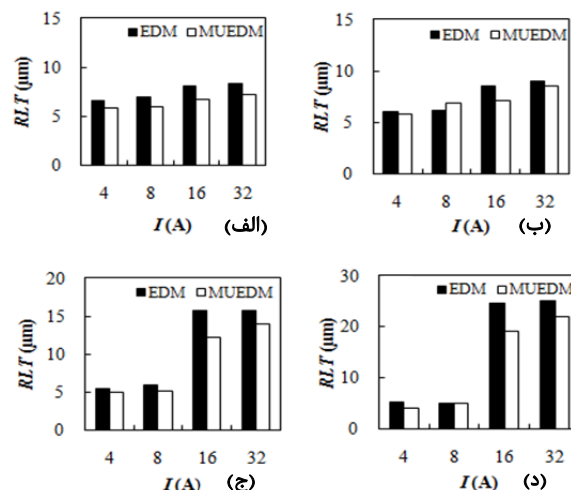
در شدت جریان‌های پایین، با توجه به این که حجم ماده مذاب کم است، با افزایش زمان روشنی پالس، ابتدا به دلیل افزایش درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما، ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطوح ماشینکاری شده کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر زمان روشنی پالس با وجود کاهش درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما با توجه به گسترش کانال پلاسما، عمق چاله مذاب، کاهش و شعاع چاله مذاب بیشتر می‌شود. کاهش عمق چاله مذاب می‌تواند موجب کاهش ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطح ماشینکاری شده شود [20].

در شدت جریان‌های بالاتر، حجم مذاب تولید شده بیشتر است. با افزایش زمان روشنی پالس به دلیل افزایش مقدار مذاب تولید شده (علی‌رغم افزایش درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب

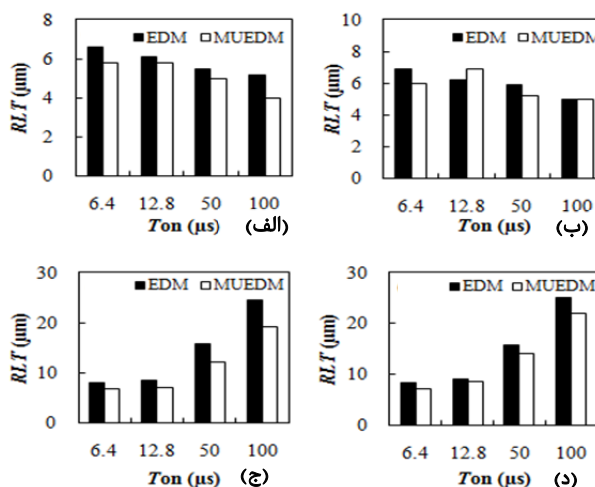
بالا ۱۱۰ متر بر ثانیه) با سطح قطعه کار در اثر اعمال ارتعاشات التراسونیک به ابزار، مقدار ماده مذابی که از چاله مذاب به بیرون دفع می‌شود و در نتیجه درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما افزایش می‌یابد.

۲-۴- تاثیر اعمال همزمان ارتعاشات التراسونیک به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی بر ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطح قطعه کار

نمودارهای ۳ و ۴، ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطوح ماشینکاری شده را در فرآیندهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی و ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار در شدت جریان‌ها و زمان‌های روشنی پالس مختلف مقایسه می‌کند. براساس نمودارهای ۳ و ۴، اعمال همزمان ارتعاشات التراسونیک به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی، موجب کاهش ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطوح ماشینکاری شده می‌شود.



نمودار ۳ (تاثیر اعمال همزمان ارتعاشات التراسونیک به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی بر ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطوح ماشینکاری شده؛ الف) $t_{on}=100\mu s$ (د)، $t_{on}=50\mu s$ (ج)، $t_{on}=12.8\mu s$ (ب)، $t_{on}=6.4\mu s$

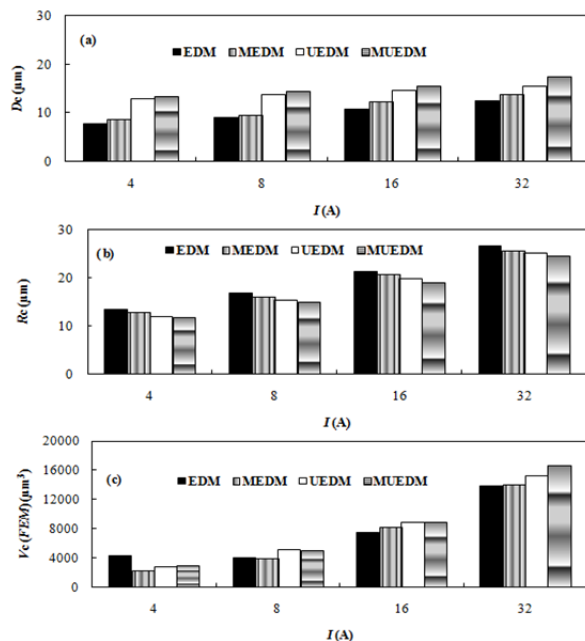


نمودار ۴ (تاثیر اعمال همزمان ارتعاشات التراسونیک به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی، بر ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطوح ماشینکاری شده؛ الف) $I=32A$ (د)، $I=16A$ (ج)، $I=8A$ (ب)، $I=4A$

مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در کاهش ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطوح ماشین‌کاری شده با فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح مقطع قطعات ماشین‌کاری شده نیز براساس شکل ۸، نشان‌دهنده کم‌تر بودن ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطوح ماشین‌کاری شده با فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار نسبت به سایر فرایندها است.

۳-۴- بررسی تاثیر اعمال همزمان میدان مغناطیسی حول فاصله گپ و ارتعاشات التراسونیک به ابزار در فرآیند EDM بر عمق، شعاع و حجم حفره ایجاد شده در سطح قطعه کار

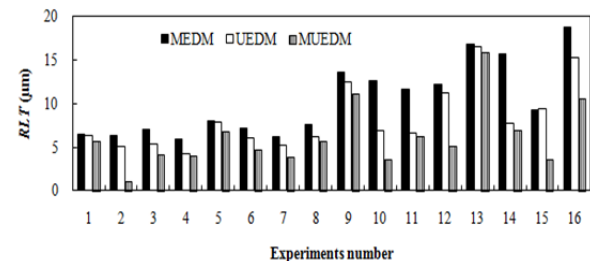
نمودار ۶ عمق حفره ایجاد شده، شعاع حفره ایجاد شده و حجم حفره ایجاد شده روی سطح قطعه کار ناشی از تک‌جرقه فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه ارتعاشات التراسونیک ابزار را که از مدل‌سازی الکتریکی- حرارتی فرآیند به دست آمده است، در شدت جریان‌های مختلف با هم مقایسه می‌کند. مطابق با نمودار ۶، اعمال میدان مغناطیسی حول فاصله گپ و ارتعاشات التراسونیک به ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی موجب افزایش عمق و حجم حفره ایجاد شده روی سطح قطعه کار در اثر تک‌جرقه فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و کاهش شعاع حفره ایجاد شده روی سطح قطعه کار می‌شود.



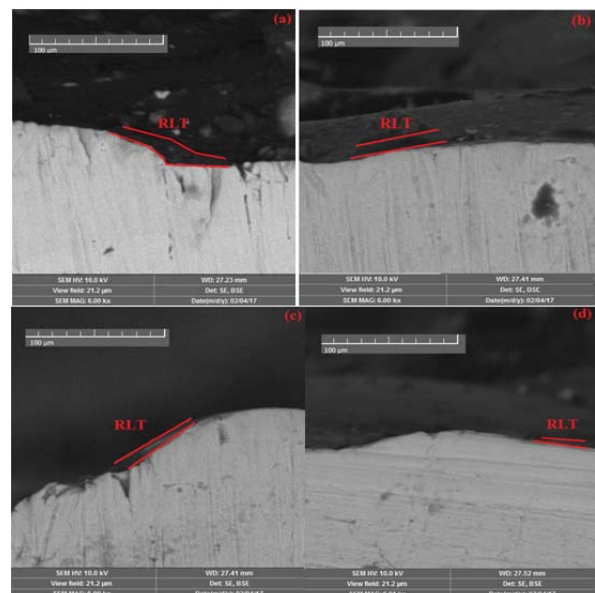
نمودار ۶ عمق حفره ایجاد شده، شعاع حفره ایجاد شده و حجم حفره ایجاد شده روی سطح قطعه کار ناشی از تک‌جرقه فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه ارتعاشات التراسونیک ابزار و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار به‌دست‌آمده از مدل‌سازی الکتریکی- حرارتی در $t_{on}=6.4\mu s$ (الف) عمق حفره ایجاد شده، (ب) شعاع حفره ایجاد شده، (ج) حجم حفره ایجاد شده روی سطح قطعه کار

به عبارت دیگر عمق و حجم حفره ایجاد شده در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات

توسط کانال پلاسما، ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطح ماشین‌کاری شده افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر زمان روشنی پالس، کاهش درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما به دلیل گسترش کانال پلاسما، مزید بر علت می‌شود و ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطح ماشین‌کاری شده افزایش می‌یابد [20].



نمودار ۵ مقایسه ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطوح ماشین‌کاری شده مربوط به فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه ارتعاشات التراسونیک ابزار و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار



شکل ۸ لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده در فرآیند EDM، فرآیند EDM به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی، فرآیند EDM به‌همراه ارتعاشات التراسونیک ابزار و فرآیند EDM به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار در $I=8A$ و $t_{on}=12.8\mu s$ (الف) فرآیند EDM، (ب) فرآیند EDM به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی، (ج) فرآیند EDM به‌همراه ارتعاشات التراسونیک ابزار، (د) فرآیند EDM به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار در $I=8A$ و $t_{on}=12.8\mu s$

نمودار ۵، ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطوح ماشین‌کاری شده مربوط به فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه ارتعاشات التراسونیک ابزار را نشان می‌دهد. مطابق با نمودار ۵، ضخامت لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده روی سطوح ماشین‌کاری شده در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار، کمتر از سایر فرایندها بوده و نشان‌دهنده تاثیر مثبت اعمال همزمان ارتعاشات التراسونیک به ابزار و میدان

برای نشریه دیگری فرستاده نشده است.

تعارض منافع: این مقاله هیچگونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: محمدرضا شبلغرد (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۴۰٪)؛ احد قلی‌پور (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ موسی محمدپور فرد (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه (۲۰٪)

منابع مالی: منابع مالی خاصی برای انجام این تحقیق استفاده نشده است.

منابع

- 1- Joshi SN, Pande SS. Intelligent process modeling and optimization of die-sinking electric discharge machining. *Applied Soft Computing*. 2011;11(2):2743-2755.
- 2- Shabgard MR, Seyedzavvar MS. Correlation of input parameters with tool material on the output parameters of electrical discharge machining process. *Advanced Materials Research*. 2012;445:994-999.
- 3- Seyedzavvar MS, Shabgard MR. Influence of tool material on the electrical discharge machining of AISI H13 tool steel. *Advanced Materials Research*. 2012;445:988-993.
- 4- Murthy VSR, Philip PK. Pulse train analysis in ultrasonic assisted EDM. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1987;27(4):469-477.
- 5- Shabgard MR, Gholipour A, Baseri H. A review on recent developments in machining methods based on electrical discharge phenomena. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;87(5-8):2081-2097.
- 6- Kremer D, Lebrun JL, Hosari B, Moisan A. Effects of ultrasonic vibrations on the performances in EDM. *CIRP Annals*. 1989;38(1):199-202.
- 7- Zhang JH, Lee TC, Lau WS, Ai X. Spark erosion with ultrasonic frequency. *Journal of Materials Processing Technology*. 1997;68(1):83-88.
- 8- Marinescu NI, Ghiculescu D, Jitianu G. Solutions for technological performances increasing at ultrasonic aided electrodischarge machining. *International Journal of Material Forming*. 2009;2:681.
- 9- Shervani Tabar MT, Mobadersany N. Numerical study of the dielectric liquid around an electrical discharge generated vapor bubble in ultrasonic assisted EDM. *Ultrasonics*. 2013;53(5):943-955.
- 10- Shervani Tabar MT, Maghsoudi K, Shabgard MR. Effects of simultaneous ultrasonic vibration of the tool and the workpiece in ultrasonic assisted EDM. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science & Mechanics*. 2013;14(1):1-9.
- 11- Gao C, Liu Z. A study of ultrasonically aided micro-electrical-discharge machining by the application of workpiece vibration. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;139(1-3):226-228.
- 12- Cao MR, Geng XD. Process research on high-speed small hole drilling by EDM combined with magnetic field and water dispersant. *Advanced Materials Research*. 2011;189-193:269-272.
- 13- Yeo SH, Murali M, Cheah HT. Magnetic field assisted micro electro-discharge machining. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2004;14(11):1526.
- 14- Gholipour A, Baseri H, Shakeri M, Shabgard MR. Investigation of the effects of magnetic field on near-dry electrical discharge machining performance. *Proceedings*

التراسونیک ابزار بیشترین مقدار و شعاع حفره ایجادشده در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات التراسونیک ابزار کمترین مقدار است. اعمال همزمان میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ و ارتعاشات التراسونیک به ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، شعاع کانال پلاسما را کاهش می‌دهد. بنابراین با اعمال میدان مغناطیسی حول فاصله گپ و ارتعاشات التراسونیک به ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، شعاع حفره ایجادشده روی سطح قطعه کار ناشی از تک‌جرقه فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، کاهش و عمق حفره ایجادشده افزایش می‌یابد. وقوع پدیده کاویتاسیون در اثر اعمال ارتعاشات التراسونیک به ابزار نیز مزید بر علت شده است تا عمق حفره ایجادشده افزایش یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش اجزای محدود برای حل معادله انتقال حرارت حاکم بر فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌همراه ارتعاشات التراسونیک ابزار و میدان مغناطیسی خارجی و شبیه‌سازی این فرآیند استفاده شد. با توجه به همخوانی خوب ضخامت لایه دوباره منجمدشده تشکیل‌شده روی سطوح ماشین‌کاری‌شده به‌دست‌آمده با روش تجربی و آنالیز عددی با بیشترین خطای ۸/۶٪، از مدل اجزای محدود توسعه‌داده‌شده برای مطالعه تاثیر اعمال همزمان ارتعاشات التراسونیک به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ بر درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما، ضخامت لایه دوباره منجمدشده تشکیل‌شده روی سطوح ماشین‌کاری‌شده و ابعاد حفره‌های تشکیل‌شده روی سطح قطعه کار استفاده شد. نتایج عمده این پژوهش به‌صورت زیر است:

- ۱- با اعمال همزمان ارتعاشات التراسونیک به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما در همه شدت جریان‌ها و زمان‌های روشنی پالس افزایش می‌یابد.
- ۲- با اعمال همزمان ارتعاشات التراسونیک به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ضخامت لایه دوباره منجمدشده تشکیل‌شده روی سطوح ماشین‌کاری‌شده در همه شدت جریان‌ها و زمان‌های روشنی پالس کاهش می‌یابد.
- ۳- افزایش درصد بهره‌وری دفع مواد مذاب از چاله مذاب توسط کانال پلاسما و کاهش ضخامت لایه دوباره منجمدشده تشکیل‌شده روی سطوح ماشین‌کاری‌شده با اعمال همزمان ارتعاشات التراسونیک به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ، بیشتر از حالتی است که میدان مغناطیسی حول فاصله گپ و ارتعاشات التراسونیک به ابزار به‌صورت مجزا اعمال شود.
- ۴- اعمال میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ و ارتعاشات التراسونیک به ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی موجب افزایش عمق و حجم حفره‌ها و کاهش شعاع حفره‌های تشکیل‌شده روی سطح قطعه کار می‌شود.

تشکر و قدردانی: نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت دانشگاه تبریز در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی نمایند.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده و همچنین جهت بررسی یا چاپ

- during EDM process for utilization in thermal models. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2012;55(19-20):5053-5064.
- 27- Allen P, Chen X. Process simulation of micro electro-discharge machining on molybdenum. Journal of Materials Processing Technology. 2007;186(1-3):346-355.
- 28- Yadav V, Jain VK, Dixit PM. Thermal stresses due to electrical discharge machining. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2002;42(8):877-888.
- 29- Rajurkar KP, Pandit SM. Quantitative expressions for some aspects of surface integrity of electro discharge machined components. Journal of Engineering for Industry. 1984;106(2):171-177.
- 30- Di Bitonto DD, Eubank PT, Patel MR, Barrufet MA. Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model. Journal of Applied Physics. 1998;66(9):4095.
- 31- Yeo SH, Kurnia W, Tan PC. Electro-thermal modeling of anode and cathode in micro-EDM. Journal of Physics D Applied Physics. 2007;40(8):2513.
- 32- Shabgard MR, Ahmadi R, Seyedzavvar MS, Nadimi Babil Oliaei S. Mathematical and numerical modeling of the effect of input-parameters on the flushing efficiency of plasma channel in EDM process. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2013;65:79-87.
- 33- Shabgard MR, Gholipour A, Mohammadpourfard M. Numerical and experimental study of the effects of ultrasonic vibrations of tool on machining characteristics of EDM process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;96(5-8):2657-2669.
- 34- S Wong Y, Rahman M, S Lim H, Han H, Ravi N. Investigation of micro-EDM material removal characteristics using single RC-pulse discharges. Journal of Materials Processing Technology. 2003;140(1-3):303-307.
- 35- Marafona J, Chousal JAG. A finite element model of EDM based on the Joule effect. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006;46(6):595-602.
- 36- Shabgard MR, Khosrozadeh B. Study on the effect of ultrasonic assisted electrical discharge machining process on residual stress and hardness of Ti-6Al-4V alloy. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(8):169-176. [Persian]
- 37- Shabgard MR, Nadimi Babil Oliaei S, Seyedzavvar MS, Najadebrahimi A. Experimental investigation and 3D finite element prediction of the white layer thickness, heat affected zone, and surface roughness in EDM process. Journal of Mechanical Science and Technology. 2011;25(12):3173-3183.
- of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture. 2014;230(4):744-751.
- 15- Tomura S, Kunieda M. Analysis of electromagnetic force in wire-EDM. Precision Engineering. 2009;33(3):255-262.
- 16- Govindan P, Gupta A, Joshi SS, Malshe A, Rajurkar KP. Single-spark analysis of removal phenomenon in magnetic field assisted dry EDM. Journal of Materials Processing Technology. 2013;213(7):1048-1058.
- 17- Shabgard M, Gholipour A. Experimental investigation of the influence of tools ultrasonic vibrations and external magnetic field on machining characteristics at EDM process. Modares Mechanical Engineering. 2018;17(12):495-504. [Persian]
- 18- Shabgard MR, Gholipour A, Mohammadpourfard M. Study of the effect of tools ultrasonic vibrations and external magnetic field on machined surface integrity at EDM process. Modares Mechanical Engineering. 2018;18(7):97-107. [Persian]
- 19- Shabgard MR, Arabzadeh Tabriz F, Gholipour A. Experimental study of the effects of abrasive particle size and work piece hardness in magnetic abrasive flow machining. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(8):131-138. [Persian]
- 20- Shabgard MR, Gholipour A, Mohammadpourfard M. Numerical and experimental study of the effects of ultrasonic vibrations of tool on machining characteristics of EDM process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;96(5-8):2657-2669.
- 21- Shabgard MR, Farzaneh S, Gholipour A. Investigation of the surface integrity characteristics in wire electrical discharge machining of Inconel 617. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2017;39(3):857-864.
- 22- Lee HT, Yur JP. Characteristic analysis on EDMed surfaces using Taguchi method approach. Materials and Manufacturing Processes. 2000;15(6):781-806.
- 23- Eubank PT, Patel MR, Barrufet MA, Bozkurt B. Theoretical models of the electrical discharge machining process. III. the variable mass, cylindrical plasma model. Journal of Applied Physics. 1998;73(11):7900.
- 24- Van Dijck FS, Dutré WL. Heat conduction model for the calculation of the volume of molten metal in electric discharges. Journal of Physics D Applied Physics. 1974;7(6):899.
- 25- Beck JV. Transient temperatures in a semi-infinite cylinder heated by a disk heat source. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1981;24(10):1631-1640.
- 26- Singh H. Experimental study of distribution of energy