مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند1396، دوره 17، شماره 12، ص‌ص 495-504

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی تاثیر همزمان ارتعاشات فراصوتی ابزار و میدان مغناطیسی خارجی بر مشخصات خروجی در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی

محمدرضا شبگرد[1*]، احد قلی‌پور[2]

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 5166616471، mrshabgard@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 16 مهر 1396

پذیرش: 18 آذر 1396

ارائه در سایت: 01 دی 1396

کلید واژگان:

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی

میدان مغناطیسی خارجی

ارتعاشات فراصوتی ابزار

نرخ براده برداری

نرخ سایش ابزار

چکیده

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی یکی از پرکاربردترین روش‌های ماشین‌کاری غیرسنتی برای ماشین‌کاری های در ابعاد کوچک، ماشین‌کاری اشکال پیچیده و ماشین‌کاری مواد سخت با استحکام بالا می باشد. در این مطالعه برای غلبه بر مشکلات و محدودیت‌های فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی مانند نرخ براده برداری پایین، فرآیند ترکیبی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات فراصوتی ابزار معرفی شده و برای ماشین‌کاری فولاد گرمکار AISI H13 از آن استفاده می شود. در این تحقیق، با انتخاب شدت جریان و زمان روشنی پالس به‌عنوان پارامترهای ورودی متغیر موثر بر عملکرد فرآیند، آزمایشاتی به روش فول فاکتوریل طراحی شده تا تاثیر اعمال میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات فراصوتی ابزار بر نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار مشخص شود. مطابق نتایج این مطالعه، اعمال همزمان میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ و ارتعاشات فراصوتی به ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، علی‌رغم افزایش نرخ سایش ابزار، نرخ براده برداری را نسبت به فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی در بیشترین حالت 60٪، نسبت به فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی در بیشترین حالت 55٪ و نسبت به فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار در بیشترین حالت 40٪ افزایش می دهد. این افزایش در همه زمان‌های روشنی پالس و شدت جریان‌ها، به جز در شدت جریان 32 آمپر اتفاق می‌افتد. در شدت جریان 32 آمپر به دلیل تداخل اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ و ارتعاشات فراصوتی به ابزار، نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار کاهش می‌یابد.

Experimental investigation of the influence of tools ultrasonic vibrations and external magnetic field on machining characteristics at EDM process

Mohammadreza Shabgard*, Ahad Gholipoor

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
* P.O.B. 5166616471, Tabriz, Iran, mrshabgard@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 October 2017
Accepted 09 December 2017
Available Online 22 December 2017

Keywords:
Electrical Discharge Machining
External Magnetic Field
Tools Ultrasonic Vibrations, Material Removal Rate
Tool Wear Rate

ABSTRACT

Electric discharge machining is one of the most widely used non-traditional machining techniques which use thermal energy for machining in small dimensions, machining complex shapes and machining hard materials with high strength such as ceramics and heat-treated steels. In this study the ultrasonic vibrations and magnetic field assisted EDM process as a new hybrid process was introduced and used for machining of AISI H13 too steel, to solve the EDM process limitations such as low material removal rate. In this investigation, several experiments were designed and performed based on full factorial method by selecting pulse current and pulse duration as most effective parameters of EDM process in order to study the effects of applying ultrasonic vibrations to tool electrode and external magnetic field around gap distance of EDM process, simultaneously, on material removal rate and tool wear rate. According the results, applying ultrasonic vibrations to tool electrode and external magnetic field around gap distance of EDM process, simultaneously, despite the increases of tool wear rate, increases the material removal rate as compared with EDM (60%), ultrasonic vibrations assisted EDM (40%) and magnetic field assisted EDM processes (55%) in all pulse durations and pulse currents except in pulse current of 32 A. In pulse current of 32 A, because of the interference of the influences of applying ultrasonic vibrations to tool electrode and external magnetic field around gap distance, the material removal rate and tool wear ratio are decreased.

1- مقدمه

فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی[1] یکی از روشهای ماشین‌کاری غیرسنتی می‌باشد که از انرژی گرمایی برای ماشین‌کاری استفاده می کند [2,1]. این فرآیند نقش مهمی را در صنایع ماشین‌کاری مدرن مخصوصا در ماشین‌کاری مواد سخت با استحکام بالا و هادی جریان الکتریکی ایفا می‌نماید، هر چند که

[1] Electrical discharge machining (EDM)

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Shabgard, A. Gholipoor, Experimental investigation of the influence of tools ultrasonic vibrations and external magnetic field on machining characteristics at EDM process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 495-504, 2018 (in Persian)

تلاش‌هایی نیز برای ماشین‌کاری مواد غیرهادی جریان الکتریکی مانند سرامیک‌هایی مثل زیرکونیا و آلومینا با این فرآیند صورت پذیرفته است [3].

در کنار کاربردهای وسیع فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، این فرآیند دارای محدودیت‌هایی از قبیل ایجاد نرخ براده برداری پایین است [5, 4]. بنابراین محققان مختلفی روش‌های ماشین‌کاری جدیدی بر پایه فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی مانند فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی[1] [6]، فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودرهای اضافه شده به دی‌الکتریک[2] [7]، فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی[3] [8]، فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی خشک[4] [9] و فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک[5] [10] به منظور برطرف کردن این محدودیت‌ها معرفی کرده اند.

در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی، به منظور بهبود دفع براده های تولید شده از فاصله گپ، ارتعاشات فراصوتی به ابزار، قطعه‌کار و یا سیال دی‌الکتریک اعمال می‌شود و ماشین‌کاری در این شرایط انجام می‌گیرد [11].

شروانی تبار و مبادرسانی [12]، تاثیر ارتعاشات فراصوتی ابزار، میدان سرعت و توزیع فشار در سیال دی‌الکتریک اطراف حباب بخار به‌وجود آمده را بر روی روند تشکیل حباب به‌وجود آمده و رفتار سیال دی‌الکتریک اطراف حباب در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، به‌صورت عددی مطالعه کردند. شروانی تبار و همکاران [13]، رفتار دینامیکی حباب بخار به‌وجود آمده در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی بعد از پدیده گلویی شدن آن و زمانی که حباب به شکل ساعت شنی در آمده و به دو بخش تقسیم شده (که موجب تشکیل دو جت آب می‌شود که به سمت ابزار و قطعه‌کار حرکت می‌کنند و با آن‌ها برخورد می‌کنند) را به‌صورت عددی در سه حالت ابزار و قطعه‌کار با سطح صاف و مسطح، با سطح مقعر و با سطح محدب مطالعه نمودند. این جت‌های مایع براده های تولید شده را از گپ ماشین‌کاری دفع می‌کنند و ابزار و قطعه‌کار را فرسایش می‌دهند. آن‌ها از روش المان مرزی برای شبیه‌سازی مسئله استفاده کردند. نتایج عددی مطالعه نشان داد که بیشترین سرعت جت مایع و پهن‌ترین شکل جت مایع با استفاده از ابزار و قطعه‌کار با سطح مقعر به دست می آید که منجر به بیشترین نرخ براده‌برداری می شود. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که نرخ براده‌برداری به دست آمده با ابزار و قطعه‌کار با سطح صاف کمی بیشتر از ابزار و قطعه‌کار با سطح محدب است. فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با انرژی تخلیه بسیار کم و به همراه ارتعاشات فراصوتی قطعه‌کار توسط اگاشیرا و همکاران [14]، مورد مطالعه قرار گرفت. این محققان از ارتعاشات فراصوتی جهت بهبود دفع براده ها از فاصله گپ و کاهش آلودگی گپ و پالس‌های غیرنرمال (در شرایط استفاده از ولتاژ کم) استفاده کردند. مطابق نتایج آن‌ها فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با انرژی تخلیه بسیار کم می تواند منجر به نرخ سایش ابزار کمتر و سطوح صاف‌تر با سلامتی بهتر گردد. فرآیند میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با ابزار دارای سطح مقطع غیردایروی، در حالی‌که قطعه‌کار دارای ارتعاشات فراصوتی است، توسط تانگ و همکاران [15]، به‌منظور افزایش دفع براده ها از گپ ماشین‌کاری (با افزایش میزان گردش سیال دی‌الکتریک) و کاهش آلودگی گپ و تعداد پالس‌های اتصال کوتاه (که نهایتا منجر به بهبود کارایی، دقت و پایداری فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، می شود) مطالعه شد. آن‌ها تاثیر فرکانس و دامنه ارتعاشات و نیز تاثیر پارامترهای الکتریکی مانند ولتاژ مدار باز و ظرفیت خازنی را بر روی زمان ماشین‌کاری، دقت ابعادی و شکل امواج تخلیه مطالعه کردند. این محققان یک مدل کنترل پروسه منطبق با نتایج آزمایشگاهی و برای بهینه سازی پارامترهای ارتعاشی (فرکانس و دامنه ارتعاشات) توسعه دادند. مطابق نتایج آن‌ها، استفاده از فرکانس ارتعاشات 6 کیلوهرتز و دامنه 3 میکرون، بازده ماشین‌کاری به بیش از 18 برابر افزایش یافته و دقت ابعادی تا 10.5 میکرون بهبود می‌یابد. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که با تعیین دامنه ارتعاشات تقریبا برابر با فاصله گپ، نتایج بهتری به دست می‌آید. لیو و همکاران [16]، برای سوراخ‌کاری میکروسوراخ‌های عمیق در قطعه‌کار از جنس سیلیکون کارباید، ارتعاشات فراصوتی را به سیال دی‌الکتریک در فرآیند میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی اعمال کردند. آن‌ها همچنین نانوفیبرهای کربن را به داخل سیال دی‌الکتریک مرتعش اضافه کرده و این روش جدید ماشین‌کاری را بررسی کردند. آن‌ها تاثیر اعمال ارتعاش به سیال دی‌الکتریک و اضافه کردن نانوفیبرهای کربن به داخل سیال دی‌الکتریک را بر روی عمق سوراخ، هندسه سوراخ، توپوگرافی سطح سوراخ ماشین‌کاری شده، پایداری ماشین‌کاری و رسوب ماده ابزار بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که عملکرد ماشین‌کاری با اعمال ارتعاشات فراصوتی به سیال دی‌الکتریک (به دلیل اثرات ارتعاش و کاویتاسیون ناشی از ارتعاش که منجر به افزایش دفع براده ها از گپ ماشین‌کاری شده و از رسوب ماده ابزار بر روی قطعه‌کار می کاهد) بهبود می یابد. مطابق نتایج این محققان بهترین عملکرد ماشین‌کاری با فرآیند میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، با اعمال ارتعاشات فراصوتی به سیال دی‌الکتریک و اضافه کردن نانوفیبرهای کربن به داخل سیال دی‌الکتریک، به‌دست می آید. چن و چانگ [17]، فرآیند میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی قطعه‌کار را برای عملیات میکروسوراخ‌کاری مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تاثیر دوران ابزار را نیز در این مطالعه بررسی کردند. این محققان به این نتیجه رسیدند که با اعمال ارتعاشات فراصوتی در فرایند میکروماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، بازده بیشتر، پیشروی بیشتر و پرداخت سطح بهتری به‌دلیل بهبود دفع براده‌ها از فاصله گپ و کاهش میزان آلودگی گپ و تعداد پالس‌های غیرنرمال، به دست می‌آید.

در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی، یک میدان مغناطیسی به محدوده ابزار، گپ و قطعه‌کار اعمال شده و ماشین‌کاری تحت این شرایط انجام می شود. در این فرآیند به‌دلیل اعمال نیروی مغناطیسی بر قطرات مذاب، نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد [18].

تیموری و باصری [19]، در مطالعه خود در مورد فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی خشک به کمک میدان مغناطیسی و به همراه ارتعاشات فراصوتی قطعه‌کار، تاثیر جنس ابزار، هندسه ابزار (تعداد سوراخ‌های ابزار)، اعمال میدان مغناطیسی به فاصله گپ در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی خشک و همچنین تاثیر پارامترهایی پروسه مانند شدت جریان تخلیه، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، سرعت دورانی ابزار، فشار گاز ورودی و شدت ارتعاش فراصوتی را بر روی نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار، زبری سطح ماشین‌کاری شده و مقدار اورکات[6] به وجود آمده، مطالعه نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ابزار برنجی نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار و

[1] ultrasonic vibrations assisted EDM (UEDM)
[2] Powder mixed EDM
[3] Magnetic field assisted EDM (MEDM)
[4] Dry EDM
[5] Near Dry EDM
[6] Overcut

زبری سطح ماشین‌کاری شده بیشتری نسبت به ابزار مسی دارد، همچنین با توجه به این‌که نرخ جریان گاز با افزایش تعداد سوراخ‌های ابزار بیشتر شده و وضعیت دفع براده‌ها بهبود می‌یابد، ابزار با دو سوراخ خارج از مرکز منجر به نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار و مقدار اورکات بیشتر و زبری سطح کمتری نسبت به ابزار با یک سوراخ خارج از مرکز می شود. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که به‌دلیل بهبود دفع براده‌های تولید شده از فاصله گپ و در نتیجه کاهش میزان آلودگی گپ، تعداد پالس‌های غیرنرمال مانند آرک و زمان تاخیر جرقه و افزایش پایداری فرآیند با اعمال میدان مغناطیسی به فاصله گپ، نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و مقدار اورکات افزایش یافته و زبری سطح ماشین‌کاری شده کاهش می یابد. مطابق نتایج این محققان، نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار، مقدار اورکات به وجود آمده و زبری سطح ماشین‌کاری شده با افزایش شدت ارتعاش فراصوتی بیشتر می‌شود. با اعمال میدان مغناطیسی پالسی به فاصله گپ در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی خشک توسط جوشی و همکاران [20]، به دلیل افزایش برخوردهای بین ذرات باردار در کانال پلاسما و تولید نیروی لورنتز که به افزایش چگالی پلاسما و مقدار یونیزاسیون می انجامد، منجر به افزایش نرخ براده برداری تا 130 % می‌شود. آن‌ها تاثیر پارامترهای پروسه مانند شدت میدان مغناطیسی، شدت جریان تخلیه، فشار گاز، سرعت دورانی ابزار، ولتاژ، زمان خاموشی پالس و فرکانس را بر روی نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار و مقدار اورکات به‌وجود آمده در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی خشک، مطالعه کرده و به این نتیجه رسیدند که با اعمال میدان مغناطیسی، به‌دلیل محدود کردن کانال پلاسما، مقدار اورکات به‌وجود آمده و نرخ سایش ابزار منفی کاهش می یابد. آن‌ها توپوگرافی سطح ماشین‌کاری شده را با تصاویر میکروسکوب الکترونی آنالیز کرده و به این نتیجه رسیدند که میکرو ترکها، حفرات و فرورفتگی های روی سطح ماشین‌کاری شده در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی خشک به کمک میدان مغناطیسی کمتر از فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی خشک است، هر چند که آنالیز ترکیب سطح ماشین‌کاری شده، آلیاژسازی بیشتری را روی سطح ماشین‌کاری شده در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی خشک به کمک میدان مغناطیسی نشان می‌دهد.

کائو و ژنگ [21]، میدان مغناطیسی را به فاصله گپ در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و در ماشین‌کاری سوراخ‌های کوچک اعمال کرده و به این نتیجه رسیدند که با این روش، نرخ براده‌برداری بیشتر و نرخ سایش ابزار کمتری به دست می‌آید.

با توجه به عدم بررسی فرآیند هیبریدی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار و میدان مغناطیسی خارجی، در این مطالعه این فرآیند هیبریدی مورد مطالعه قرار گرفته و تاثیر اعمال همزمان ارتعاشات فراصوتی به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار بررسی شده است.

2- شرایط آزمایش های تجربی

در این تحقیق، برای انجام عملیات سوراخ‌کاری با فرآیند تخلیه الکتریکی از دستگاه اسپارک شارمیلز روبوفرم[1] 200 با مولد ایزوپالس، استفاده می‌شود. "شکل 1"، تصویر این دستگاه را نشان می‌دهد.

برای اعمال ارتعاشات فراصوتی به ابزار، از دستگاه مولد ارتعاشات فراصوتی بندلین[2] 2200 با توان 200 وات و فرکانس ارتعاش 20 کیلوهرتز برای ایجاد امواج فراصوتی با دامنه 15 میکرون استفاده می‌شود. از متمرکز کننده آلومنیومی به‌منظور تقویت دامنه ارتعاشات استفاده می‌گردد. "شکل 2"، تصویر دستگاه مولد ارتعاشات فراصوتی 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 3"، برای قطعه‌کار طراحی و در حول فاصله گپ قرار داده می شود. جنس این فیکسچر از پلاستیک بوده و چهار آهنربای ثابت مکعبی نئودیمیوم[3] با شدت مغناطیسی 1.2 تسلا به ابعاد 10×20×25 میلی متر در محل‌های تعبیه شده در فیکسچر قرار داده می شوند.

شکل، ابعاد، شدت میدان مغناطیسی، تعداد و مکان آهنرباها در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی نیز با توجه به آزمایشات اکتشافی انجام شده قبل از شروع تست‌های اصلی و با در نظر گرفتن بیشترین نرخ براده‌برداری به‌دست آمده به‌عنوان پارامتر خروجی، مشخص گردید [22].

"شکل 4"، تصویر دستگاه اسپارک مورد استفاده به همراه مولد ارتعاشات فراصوتی و فیکسچر مخصوص اعمال میدان مغناطیسی خارجی را در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار و میدان مغناطیسی خارجی[4] نشان می دهد.

Fig. 1 The spark machine which was used for machining

شکل 1 تصویر دستگاه اسپارک استفاده شده برای انجام عملیات ماشین‌کاری

Fig.2 The ultrasonic vibration generator used for machining

شکل 2 تصویر دستگاه مولد ارتعاشات فراصوتی استفاده شده برای انجام عملیات ماشین‌کاری

[1] Charmilles Roboform 200

[2] Bandelin

[3] Neodymium magnet

[4] Ultrasonic vibrations and magnetic field assisted EDM (MUEDM)

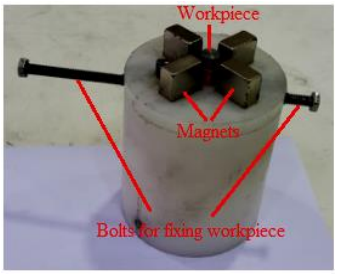

Fig. 3 The fixture which was used at magnetic field assisted EDM

شکل 3 فیکسچر مورد استفاده برای قطعه‌کار در فرآیند EDM به کمک میدان مغناطیسی

Fig. 4 The spark machine which was used at ultrasonic vibrations and magnetic field assisted EDM

شکل 4 تصویر دستگاه اسپارک مورد استفاده در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار و میدان مغناطیسی خارجی

در این تحقیق به منظور بررسی تجربی تاثیر همزمان اعمال میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ و ارتعاشات فراصوتی به ابزار بر بازده ماشین‌کاری در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی فولاد H13، شدت جریان تخلیه و زمان روشنی پالس بعنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده (با توجه به اهمیت و تاثیر زیاد آن‌ها برخروجی های فرآیند [23]) و طبق اصول طراحی آزمایشات و براساس مدل طرح عاملی کامل[1]، 16=4×4 آزمایش در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، 16=4×4 آزمایش در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی، 16=4×4 آزمایش در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار و 16=4×4 آزمایش در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار و در مجموع 64 آزمایش برای بررسی تاثیر پارامترهای ورودی بر روی نرخ براده‌برداری[2] و نرخ سایش ابزار[3]، به دست آمده از ماشین‌کاری بعنوان پارامترهای خروجی این فرآیندها طراحی شد.

سطوح پارامترهای ورودی متغیر در فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار و میدان مغناطیسی، منطبق بر یکدیگر و مطابق جدول 1، است. پارامترهای ثابت آزمایش ها نیز که در همه آزمایش ها رعایت شد، در جدول 2، آورده شده است.

در این تحقیق برای انجام هر تست یک الکترود ابزار و زمان انجام هر کدام از آزمایش ها ثابت و 10 دقیقه در نظرگرفته شد. همچنین هر آزمایش دو بار تکرار شده و میانگین آن‌ها به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شد.

برای محاسبه نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار، قطعه‌کار و ابزار قبل و بعد از هر تست کاملاً تمیز شده، سپس وزن آن‌ها با ترازوی دیجیتال سارتوریوس[4] CP224S با دقت 0.0001 گرم اندازه‌گیری شده و با استفاده از رابطه (1 و 2)، نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار، محاسبه می‌گردد.

$$MRR = \left(\frac{M_{W1} - M_{W2}}{\rho_W t}\right) \times 10^6 \qquad (1)$$

در رابطه (1)، MRR مقدار نرخ براده‌برداری، M_{W1} وزن قطعه‌کار قبل از ماشین‌کاری، M_{W2} وزن قطعه بعد از ماشین‌کاری، t مدت زمان ماشین‌کاری و ρ_W چگالی قطعه کار است.

$$TWR = \left(\frac{M_{T1} - M_{T2}}{\rho_T t}\right) \times 10^6 \qquad (2)$$

در رابطه (2)، TWR مقدار نرخ سایش ابزار، M_{T1} وزن ابزار قبل از ماشین‌کاری، M_{T2} وزن ابزار بعد از ماشین‌کاری، t مدت زمان ماشین‌کاری و ρ_T چگالی ابزار است.

قطعه‌کار مورد استفاده در این مطالعه، فولاد استوآن‌های گرمکار از جنس H13 به قطر 10 میلی‌متر است که پس از برش با دستگاه برش‌کاری سیمی به ارتفاع 20 میلی‌متر، سطوح پیشانی آن سنگ‌زنی و پولیش‌کاری شده است. ترکیب شیمیایی قطعه‌کار که رسانای الکتریسیته بوده و دارای خاصیت مغناطیسی است، در جدول 4 آمده است.

جنس ابزار مورد استفاده در این مطالعه مس با خلوص 99%، و در مورد فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی، استوانه‌ای به قطر خارجی 14 میلی متر و ارتفاع 40 میلی‌متر می‌باشد که با عملیات تراش‌کاری تهیه شده است. مشخصات ابزار مسی در جدول 5 آمده است.

همچنین در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار و فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار و میدان مغناطیسی خارجی، برای اتصال ابزار مسی به کلگی مخصوص فراصوتی برای انجام عملیات ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاشات فراصوتی، عملیات رزوه‌کاری روی آن‌ها انجام گردید. ابزار مورد استفاده در این فرآیندها، مس با خلوص 99%، به قطر خارجی 14 میلی متر و ارتفاع 22 میلی‌متر می‌باشد.

جدول 1 پارامترهای ورودی متغیر و سطوح آن‌ها

Table 1 Input variables and their levels

	زمان روشنی پالس (میکرو ثانیه)	شدت جریان (آمپر)
1	6.4	4
2	12.8	8
3	50	16
4	100	32

جدول 2 پارامترهای ثابت استفاده شده در آزمایش ها

Table 1 The fixed parameters at experiments

پارامتر ثابت	سطح آزمایش
زمان خاموشی پالس (µs)	6.4
ولتاژ مدار باز (V)	200
نوع دی الکتریک	روغن فلاکس اِلف[5]
قطبیت	مثبت

[1] Full factorial
[2] Material removal rate (MRR)
[3] Tool wear rate (TWR)
[4] Sartorius
[5] Oil Flux ELF

جدول 3 خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی فولاد H13

Table 3 The physical, mechanical and thermal properties of H13 tool steel

مشخصه	مقدار
دانسیته (g/cm^3) در دمای 20°C	7.80
دمای ذوب (°C)	1427
استحکام کششی نهایی (MPa) در دمای 20°C	1200-1590
تنش تسلیم (MPa) در دمای 20°C	1000-1380
مدول الاستیک (GPa) در دمای 20°C	215
نسبت پواسون	0.27-0.3
رسانایی حرارتی (W/Mk)	28.6

جدول 4 ترکیب شیمیایی فولاد H13

Table 4 Chemical composition of H13 tool steel

عنصر	درصد وزنی ٪	عنصر	درصد وزنی ٪
Fe	91.73	Mn	0.4
Cr	5.2	V	1.1
C	0.39	Cu	0.25
Si	0.9	S	0.03

جدول 5 مشخصات اصلی ابزار مسی [24]

Table 5 The main properties of copper tool

مشخصه	مقدار
وزن مخصوص (g/cm^3)	8.94
دمای ذوب (°C)	1065-1083
رسانایی حرارتی (W/Mk)	388
گرمای ویژه (J/kgk)	385
ضریب انبساط حرارتی (1/°C)	1.67×10^{-6}
مقاومت الکتریکی (nΩcm)	17.1

3- نتایج و بحث

"شکل 5"، تاثیر شدت جریان تخلیه را بر روی نرخ براده‌برداری فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در مقایسه با فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار نشان می دهد.

مطابق "شکل 5"، با افزایش شدت جریان تخلیه، نرخ براده‌برداری فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی، در همه زمان‌های روشنی پالس، افزایش می یابد.

با افزایش شدت جریان تخلیه از 4 آمپر تا 32 آمپر، به دلیل افزایش میزان انرژی تخلیه شده به فاصله گپ و افزایش میزان حرارت تولید شده بر روی سطح قطعه‌کار (مطابق رابطه (3))، مقدار ماده ذوب شده و در نتیجه میزان نرخ براده برداری بیشتر می شود. این پدیده در همه زمان‌های روشنی پالس مشاهده شد.

$$Q = R \times I^2 \times T_{on} \quad (3)$$

در رابطه (3)، Q میزان حرارت تولید شده، R مقاومت الکتریکی بین ابزار و قطعه‌کار برحسب اهم، I مقدار شدت جریان تخلیه برحسب آمپر، و T_{on} زمان روشنی پالس بر حسب میکروثانیه می باشد.

مطابق "شکل 5"، نرخ براده برداری فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، در همه سطوح شدت جریان های تخلیه به جز در 32 آمپر، و همه زمان های روشنی پالس، بیشتر از فرآیند های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی می باشد. نرخ براده برداری فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، نسبت به فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی در بیشترین حالت 60٪، نسبت به فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی در بیشترین حالت 55٪ و نسبت به فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار در بیشترین حالت 40٪ بیشتر است.

افزایش چگالی کانال پلاسما، دمای کانال پلاسما، فشار کانال پلاسما و در نهایت افزایش گرادیان فشار کانال پلاسما با اعمال ارتعاشات فراصوتی به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند تخلیه الکتریکی با توجه به دلایل زیر، موجب افزایش میزان ماده مذاب دفع شده از چاله مذاب شده (با در نظر گرفتن پدیده جوشش حجمی[1]) و بنابراین نرخ براده برداری افزایش می یابد.

ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی، با شتاب بالایی مطابق روابط (4-6) حرکت می کند [25].

$$U(t) = A \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (4)$$

$$V(t) = \frac{dU(t)}{dt} = 2\pi f A \cos(2\pi f t + \varphi) \quad (5)$$

$$a(t) = = \frac{dU(t)}{dt} = -4(\pi f)^2 A \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (6)$$

در روابط (4-6)، $U(t)$ دامنه ارتعاش در لحظه t، A دامنه ارتعاش بیشینه، ω فرکانس زاویه ای، φ اختلاف فاز، $V(t)$ سرعت حرکت ابزار، $a(t)$ شتاب و t زمان می باشد.

انتشار امواج فراصوتی موجب ایجاد یک فشار آکوستیک موثر بر کانال پلاسما مطابق روابط (7-9)، می شود.

$$P_{ac} = 2\pi c \rho f_{us} z \quad (7)$$

$$z = A \sin(\omega t) \quad (8)$$

$$\omega = 2\pi f_{us} \quad (9)$$

که در آن P_{ac} فشار آکوستیک، c سرعت صوت در سیال دی‌الکتریک، ρ چگالی سیال دی‌الکتریک، f_{us} فرکانس امواج فراصوتی، z تغییر طول ابزار و A دامنه ارتعاش فراصوتی می باشد.

در نیمه دوم تناوب، زمانی که ابزار پایین می رود، فشار آکوستیک مثبت بوده و موجب افزایش فشار هیدرواستاتیکی کلی می‌شود. فشار کلی هیدرواستاتیک (P_{ht}) از مجموع فشار آکوستیک و فشار موضعی سیال موجود در گپ (P_h) مطابق رابطه (10) بدست می‌آید.

$$P_{ht} = P_{ac} + P_h \quad (10)$$

با افزایش فشار در گپ از رشد عرضی کانال پلاسما ممانعت بیشتری بعمل می‌آید و کانال پلاسما در طول زمان روشنی پالس باریک تر و چگال تر باقی مانده و دانسیته جریان و انرژی بیشتر می‌شود.

همچنین با اعمال میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ، گسترش کانال پلاسما، به‌دلیل ایجاد نیروی لورنتز موثر بر کانال پلاسما، محدود می‌شود.

همچنین در نیمه دوم تناوب، با کاهش فاصله گپ در اثر حرکت رو به پایین ابزار، فشار هیدرواستاتیکی گپ افزایش یافته و باعث افزایش دانسیته الکترونی (n) و در نتیجه موجب کاهش میانگین فاصله بین ذره‌ای (a) مطابق رابطه (11) و موجب کاهش میانگین مسافت آزاد الکترون‌ها (λ_e) مطابق رابطه (12) می‌شود. این عوامل موجب کاهش لگاریتم کولمب ($ln\ A$) مطابق

[1] Bulk boiling

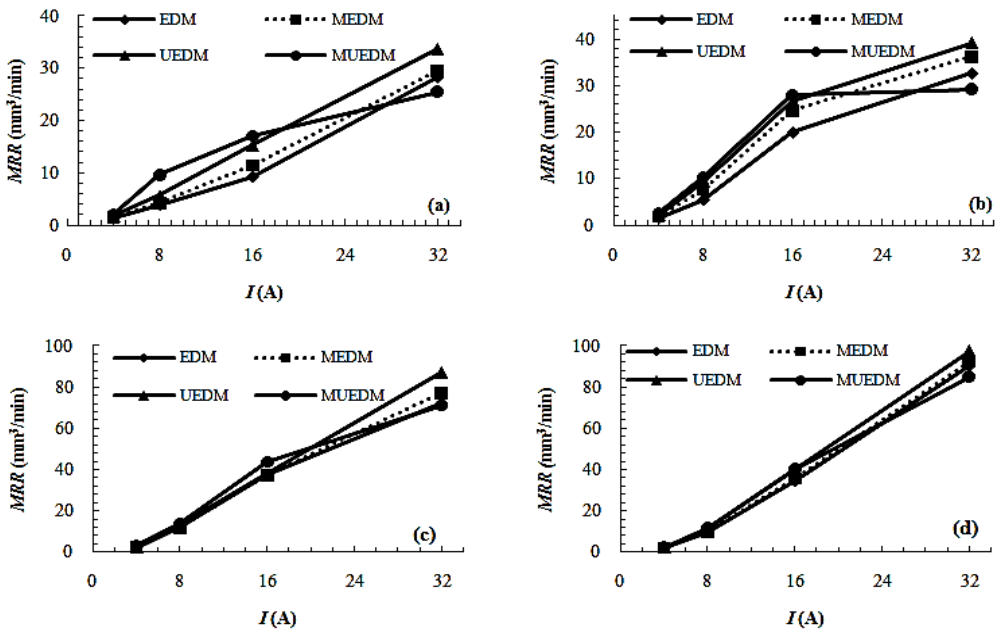

Fig. 5 Effects of pulse current on material removal rate of MUEDM as compared with EDM, MEDM and UEDM processes at (a) T_{on}=6.4μs (b) T_{on} =12.8μs (c) T_{on} =50μs (d) T_{on} =100μs

شکل 5 تاثیر شدت جریان تخلیه بر نرخ براده برداری فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در مقایسه با فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار در (a) T_{on} =6.4μs (b) T_{on} =12.8μs (c) T_{on} =50μs (d) T_{on} =100μs

رابطه (13) شده، بنابراین هدایت الکتریکی (σ) مطابق رابطه (14) افزایش می یابد و بنابراین دانسیته انرژی کانال پلاسما افزایش می‌یابد [25].

$$a = \left(\frac{3}{4\pi n}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{11}$$

$$\lambda_e = \frac{1}{nQ_{ei}} \tag{12}$$

$$\ln A = \ln\left(\frac{12\pi(\varepsilon_0 K_B T_e)^{\frac{3}{2}}}{Z^2 e^3 n_e^{\frac{1}{2}}}\right),\ Z = \frac{n_i}{n_e} \tag{13}$$

$$\sigma = \gamma_g \frac{2(4\pi\varepsilon_0)^2(2K_B T)^{\frac{3}{2}}}{\pi^{\frac{3}{2}}\ Z^2\ m_e^{\frac{1}{2}} \ln A} \tag{14}$$

که در آن Q_{ei} مقطع توزیع حرارتی الکترون- یون می باشد و بیان کننده احتمال برخورد یک الکترون با یک یون است و با رابطه (15) بیان می شود، e بار الکترون، m_e جرم الکترون، ε_0 ضریب گذردهی خلا، T_e دمای الکترون، K_B ثابت بولتزمن، γ_g یک ثابت عددی است که به مقدار Z بستگی دارد، Z میزان یونیزاسیون ناشی از حرکت الکترون‌ها، n_i کل یون‌های مثبت و منفی و n_e دانسیته الکترونی است.

$$Q_{ei} = 4\pi\left(\frac{Ze^2}{12\pi\varepsilon_0 K_B T_e}\right)^2 \ln A \tag{15}$$

ارتعاشات قادرند ذرات خنثی ای را که توسط میدان الکتریکی گپ شتابدار نشده‌اند به حرکت وادار کرده و سبب افزایش انرژی شوند. مقدار انرژی افزایش یافته توسط رابطه (16) محاسبه می‌شود.

$$\delta E_z = \frac{1}{T}\int_0^r \frac{1}{2} M_s u^2(t)dt = \frac{M_s U^2}{4} = M_s \pi^2 f^2 A^2 \tag{16}$$

که در آن T دوره تناوب نوسان، A دامنه ارتعاش، M_s جرم ذره موجود در پلاسما و u معادله ارتعاش ابزار در هر لحظه است.

حرکت ابزار به سمت بالا، موجب ایجاد فشار آکوستیک منفی و کاهش فشار هیدرواستاتیکی کلی می شود. افت فشار درون کانال پلاسما موجب تولید حباب‌هایی علاوه بر حباب‌های ایجاد شده به خاطر اسپارک می‌شود. در فرآیند فروپاشی حباب (با حرکت ابزار به پایین و افزایش فشار)، پدیده کاویتاسیون رخ داده و انرژی پتانسیل ناشی از انبساط حباب به انرژی جنبشی تبدیل شده و جت سیال با سرعت بالا (110 متر بر ثانیه) تشکیل و به سطح قطعه‌کار و ابزار برخورد می نماید و موجب جدا شدن ذرات فلزی و کربنی از آن‌ها می‌شود. این جت سیال همچنین مواد و ذرات فلزی و کربنی و سایر آلودگی‌های گپ را با خود به بیرون از فاصله گپ هدایت کرده و موجب کاهش آلودگی گپ و تعداد پالس‌های غیرطبیعی مانند آرک و اتصال کوتاه شده و پایداری فرآیند را افزایش می‌دهد. همچنین در این وضعیت، تعداد دفعات رفت و برگشتی کلگی دستگاه کمتر می شود و لذا زمان مفید ماشین‌کاری و نرخ براده‌برداری افزایش می یابد.

براساس قانون پیوستگی سیالات حبابهای ایجاد شده در طی فرآیند رشد سبب جابجایی دی‌الکتریک به بیرون از گپ شده و موقع فروپاشی موجب حرکت سیال دی‌الکتریک به سمت مرکز قطعه‌کار می شوند و بدین طریق به شستشوی گپ کمک می‌کنند (ارتعاش فراصوتی قطعه‌کار مایع دی‌الکتریک گپ را پمپاژ کرده و آن را با دی‌الکتریک تمیز جایگزین می‌کند)، که این مورد می‌تواند به کاهش شعاع کانال پلاسما کمک کند.

کاهش آلودگی گپ با اعمال میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ با جذب مواد مذاب دوباره منجمد شده معلق در فاصله گپ و دفع بهتر براده های تولید شده و آلودگی ها به بیرون از فاصله گپ نیز می تواند موجب کاهش شعاع کانال پلاسما شود. همچنین، نیروی حاصل از میدان مغناطیسی حاصل از حرکت ذرات باردار درون کانال پلاسما در راستای کاهش شعاع کانال پلاسما می باشد. در این تحقیق با توجه به نحوه جایگذاری قطبین N و S آهنرباها در فیکسچر مخصوص و با در نظر گرفتن قانون دست راست، نیروی ناشی از میدان مغناطیسی خارجی نیز در راستای کاهش شعاع کانال پلاسما و محدود کردن آن می باشد.

با اعمال همزمان میدان مغناطیسی به فاصله گپ و ارتعاشات فراصوتی ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، در شدت جریان ها و زمان های روشنی پالس پایین، میزان دفع براده ها از فاصله گپ بهبود یافته و آلودگی گپ کمتر می‌شود و بنابراین تعداد جرقه های غیر طبیعی کاهش یافته و نرخ براده برداری بیشتر می‌شود، ولی در شدت جریان 32 آمپر، مقدار براده تولید شده خیلی بیشتر از حالت‌های قبلی است و حرکت براده‌ها در اثر اعمال ارتعاشات فراصوتی (حرکت عمودی براده‌ها)، حرکت براده‌ها در اثر اعمال میدان مغناطیسی (حرکت افقی براده‌ها) و برخورد براده‌ها با یکدیگر، موجب کاهش اثر دفع براده ها توسط هر یک از تکنیک‌های بالا شده و لذا مقدار براده بیشتری در فاصله گپ باقی می‌ماند و آلودگی گپ و احتمال جرقه آرک افزایش یافته و نرخ براده برداری کاهش می‌یابد [26].

"شکل 6"، تاثیر زمان روشنی پالس را بر روی نرخ براده برداری فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در مقایسه با فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار نشان می دهد.

مطابق "شکل 6"، با افزایش زمان روشنی پالس تا 50 میکرو ثانیه، نرخ براده برداری فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی، در همه شدت جریان‌ها افزایش می یابد، اما بعد از 50 میکرو ثانیه این روند متوقف شده یا کاهش می یابد.

با افزایش زمان روشنی پالس از 6.4 میکروثانیه تا 50 میکروثانیه، در همه شدت جریان‌های تخلیه، میزان انرژی تخلیه شده به فاصله گپ افزایش یافته و منجر به نرخ براده‌برداری بیشتر می شود. اما بعد از 50 میکرو ثانیه تا 100 میکروثانیه، به‌دلیل افزایش میزان آلودگی فاصله گپ ناشی از حضور براده های تولید شده در فاصله گپ، تعداد جرقه های آرک افزایش یافته و میزان نرخ براده برداری کاهش می یابد و یا روند افزایشی آن متوقف می‌شود. "شکل 7"، تاثیر شدت جریان تخلیه را بر روی نرخ سایش ابزار فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در مقایسه با فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار نشان می دهد.

مطابق "شکل 7"، با افزایش شدت جریان تخلیه، نرخ سایش ابزار فرآیند های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی، در همه زمان‌های روشنی پالس، افزایش می یابد.

با افزایش شدت جریان تخلیه از 4 آمپر تا 32 آمپر در همه زمان‌های روشنی پالس، به‌دلیل افزایش میزان انرژی تخلیه شده به فاصله گپ و افزایش میزان حرارت تولید شده بر روی سطح ابزار مطابق رابطه (3)، مقدار ماده ذوب شده از ابزار و میزان نرخ سایش ابزار بیشتر می شود.

مطابق "شکل 7"، نرخ سایش ابزار فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، در همه سطوح شدت جریان‌های تخلیه به جز در 32 آمپر، و همه زمان‌های روشنی پالس، بیشتر از فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی می باشد.

عدم توانایی تخلیه فاصله گپ از انبوه براده‌های تولید شده در شدت جریان 32 آمپر، به‌دلیل تداخل حرکت براده‌ها در اثر اعمال ارتعاشات فراصوتی و میدان مغناطیسی خارجی به فاصله گپ، که موجب افزایش تعداد جرقه های غیرطبیعی می شود علت اصلی کمتر بودن نرخ سایش ابزار فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار نسبت به فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه

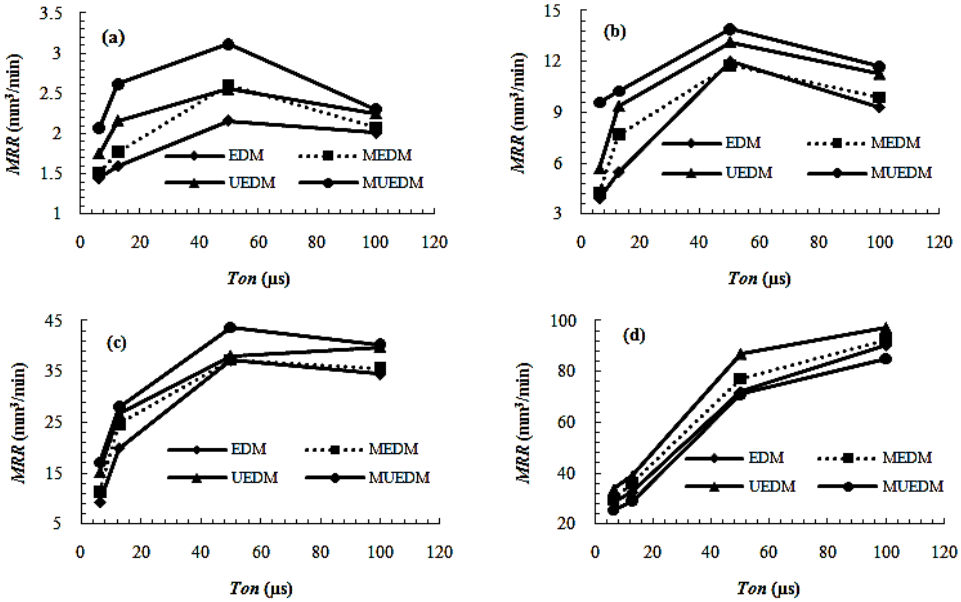

Fig. 6 Effects of pulse duration on material removal rate of MUEDM as compared with EDM, MEDM and UEDM processes at (a) *I*=4A (b) *I*=8A (c) *I* =16A (d) *I* =32A

شکل 6 تاثیر زمان روشنی پالس بر نرخ براده برداری فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در مقایسه با فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار در (a) *I* =4A (b) *I* =8A (c) *I* =16A (d) *I* =32A

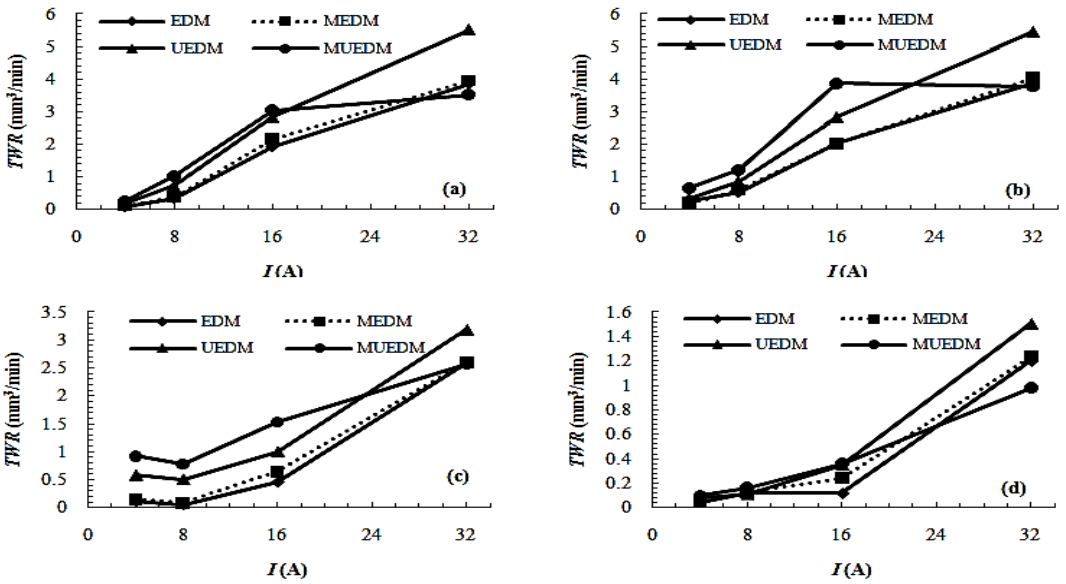

Fig. 7 Effects of pulse current on tool wear rate of MUEDM as compared with EDM, MEDM and UEDM processes at (a) T_{on} =6.4μs (b) T_{on} =12.8μs (c) T_{on} =50μs (d) T_{on} =100μs

شکل 7 تاثیر شدت جریان تخلیه بر نرخ سایش ابزار فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در مقایسه با فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار در (a) T_{on} =6.4μs (b) T_{on} =12.8μs (c) T_{on} =50μs (d) T_{on} =100μs

الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی است. در سایر شرایط ماشین‌کاری به دلیل تولید براده کمتر در فاصله گپ، نه تنها تداخلی در خروج براده ها از فاصله گپ با اعمال ارتعاشات فراصوتی و میدان مغناطیسی خارجی رخ نداده بلکه به بهبود دفع براده‌ها از فاصله گپ، آلودگی کمتر فاصله گپ و نرخ سایش ابزار بیشتر منجر می‌شود.

"شکل 8"، تاثیر زمان روشنی پالس را بر روی نرخ سایش ابزار فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در مقایسه با فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار نشان می دهد.

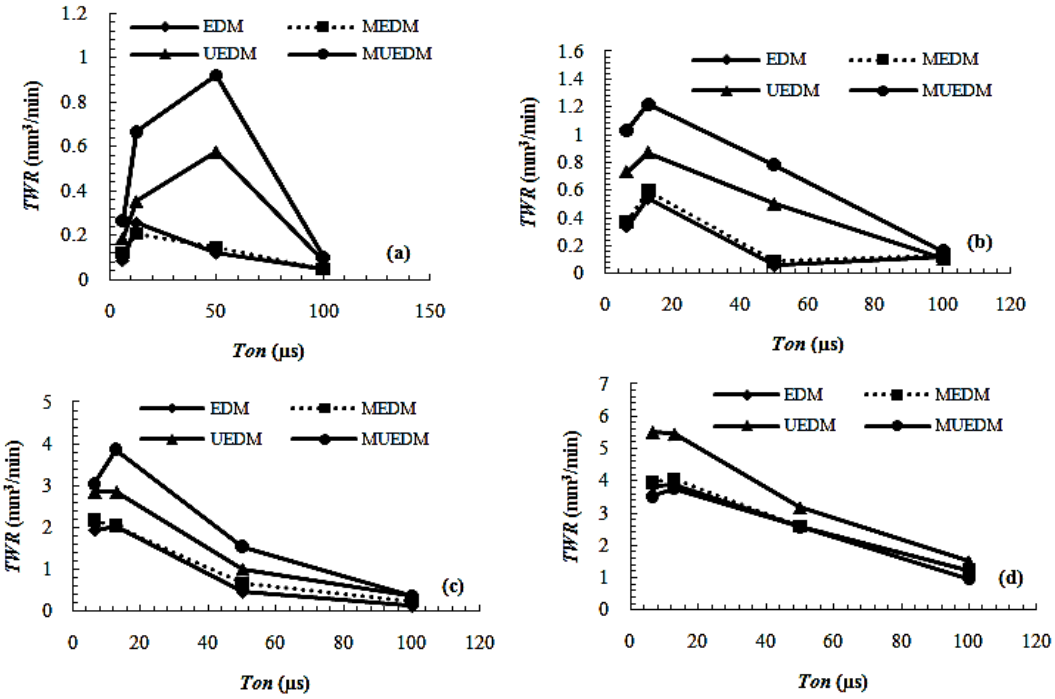

Fig. 8 Effects of pulse duration on tool wear rate of MUEDM as compared with EDM, MEDM and UEDM processes at (a) I =4A (b) I =8A (c) I=16A (d) I =32A

شکل 8 تاثیر زمان روشنی پالس بر نرخ سایش ابزار فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در مقایسه با فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار در (a) I =4A (b) I =8A (c) I =16A (d) I =32A

مطابق "شکل 8"، با افزایش زمان روشنی پالس تا 12.8 میکروثانیه، نرخ سایش ابزار فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی، در همه شدت جریان‌ها افزایش می‌یابد، اما بعد از 12.8 میکروثانیه نرخ سایش ابزار کاهش می‌یابد.

با افزایش زمان روشنی پالس از 6.4 میکروثانیه تا 12.8 میکروثانیه، در همه شدت جریان‌های تخلیه، میزان انرژی تخلیه شده به فاصله گپ مطابق رابطه (3) افزایش یافته و منجر به نرخ سایش ابزار بیشتر می‌شود. همچنین با توجه به قطبیت مثبت مورد استفاده در آزمایش ها، به‌دلیل محدود بودن کانال پلاسما تا 12.8 میکرو ثانیه، حرکت بیشتر الکترون‌ها و برخورد آن‌ها با ابزار (قطب مثبت) موجب افزایش نرخ سایش ابزار می‌شود ولی با افزایش زمان روشنی پالس از 12.8 میکروثانیه تا 100 میکروثانیه به‌دلیل بزرگ بودن کانال پلاسما و افزایش حرکت و برخورد یون‌های مثبت با سطح قطعه‌کار (قطب منفی) و کاهش برخورد الکترون‌ها با سطح ابزار، نرخ سایش ابزار کاهش می‌یابد.

4- نتیجه‌گیری

در این مطالعه فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، بعنوان یک فرآیند هیبریدی جدید معرفی شد و تاثیر شدت جریان تخلیه و زمان روشنی پالس بعنوان مهمترین پارامترهای ورودی بر نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار این فرآیند در مقایسه با فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی خارجی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاشات فراصوتی ابزار بررسی شد. نتایج بارز این مطالعه را می توان بصورت زیر دسته بندی نمود.

- نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در همه سطوح شدت جریان‌های تخلیه به جز در 32 آمپر و همه زمان‌های روشنی پالس، بیشتر از سایر فرآیندها می باشد.
- نرخ براده‌برداری فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، نسبت به فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی در بیشترین حالت 60٪، نسبت به فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی در بیشترین حالت 55٪ و نسبت به فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار در بیشترین حالت 40٪ بیشتر است.
- با افزایش شدت جریان تخلیه، نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، در همه زمان‌های روشنی پالس، افزایش می یابد.
- با افزایش زمان روشنی پالس تا 50 میکرو ثانیه، نرخ براده‌برداری فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، در همه شدت جریان‌ها افزایش می یابد، اما بعد از 50 میکروثانیه روند افزایشی نرخ براده برداری متوقف شده یا کاهش می یابد.
- با افزایش زمان روشنی پالس تا 12.8 میکرو ثانیه، نرخ سایش ابزار فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، در همه شدت جریان‌ها افزایش می‌یابد، اما بعد از 12.8 میکرو ثانیه نرخ سایش ابزار کاهش می یابد.

5- مراجع

[1] B. Bojorquez, R. T. Marloth, O. S. Es-Said, Formation of a crater in the workpiece on an electrical discharge machine, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 9, No. 1, pp. 93-97, 2002.

[2] M. T. Shervani-Tabar, A. Abdullah, M. R. Shabgard, Numerical study on the dynamics of an electrical discharge generated bubble in EDM, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 30, No. 1, pp. 503–514, 2006.

[3] T. Matsuo, E. Oshima, Investigation on the optimum carbide content and machining condition for wire EDM of zirconia ceramics, *CIRP Annals*, Vol. 41, No. 1, pp. 231–234, 1992.

[4] M. Seyedzavvar, M. R. Shabgard, Influence of tool material on the electrical discharge machining of AISI H13 tool steel, *Advanced Materials Research*, Vol. 445, No. 1, pp. 988-993, 2012.

[5] M. R. Shabgard, M. Seyedzavvar, S. N. Bavil Oliaei, A. Ivanov, A numerical method for predicting depth of heat affected zone in EDM process for AISI H13 tool steel, *Journal of Scientific & Industrial Research*, Vol. 70, No.1, pp. 493-499, 2011.

[6] M. R. Shabgard, B. Khosrozadeh, Study on the effect of ultrasonic assisted electrical discharge machining process on residual stress and hardness of Ti-6Al-4V alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 169-176, 2016. (in Persian فارسی)

[7] M. Shabgard, B. Khosrozadeh, Comparative study of adding nanopowders in dielectric effects on outputs and surface integrity of Ti-6Al-4V alloy in electrical discharge machining, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 41-50, 2016. (in Persian فارسی)

[8] A. Gholipoor, H. Baseri, M. Shakeri, M. R. Shabgard, Investigation of the effects of magnetic field on near-dry electrical discharge machining performance, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 230, No. 4, pp. 744-751, 2016.

[9] E. Uhlmann, T. Schimmelpfennig, I. Perfilov, J. Streckenbach, L. Schweitzer, Comparative analysis of Dry-EDM and conventional EDM for the manufacturing of micro holes in Si3N4-TiN, *Procedia CIRP*, Vol. 42, No. 1, pp. 173-178, 2016.

[10] A. Gholipoor, H. Baseri, M. Shakeri, Experimental investigation of near dry EDM process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 106-112, 2014. (in Persian فارسی)

[11] M. R. Shabgard, B. Sadizadeh, K. Amini, H. Pourziaie, Comparative study and mathematical modeling of machining parameters in ultrasonic-assisted EDM of AISI H13 tool steel by the application of workpiece vibration, *Advanced Materials Research*, Vol. 154, No.1, pp. 1604-1613, 2011.

[12] M. T. Shervani-Tabar, N. Mobadersany, Numerical study of the dielectric liquid around an electrical discharge generated vapor bubble in ultrasonic assisted EDM, *Ultrasonics*, Vol. 53, No. 1, pp. 943–955, 2013.

[13] M. T. Shervani-Tabar, M. H. Seyed-Sadjadi, M. R. Shabgard, Numerical study on the splitting of a vapor bubble in the ultrasonic assisted EDM process with the curved tool and workpiece, *Ultrasonics*, Vol. 53, No. 1, pp. 203–210, 2013.

[14] K. Egashira, A. Matsugasako, H. Tsuchiya, M. Miyazaki, Electrical discharge machining with ultralow discharge energy, *Precision Engineering*, Vol. 30, No. 1, pp. 414–420, 2006.

[15] H. Tong, Y. Li, Y. Wang, Experimental research on vibration assisted EDM of micro-structures with non-circular cross-section, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 208, No. 1, pp. 289–298, 2008.

[16] P. J. Liew, J. Yan, T. Kuriyagawa, Fabrication of deep micro-holes in reaction-bonded SiC by ultrasonic cavitation assisted micro-EDM, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 76, No. 1, pp. 13–20, 2014.

[17] G. L. Chern, Y. Chuang, Study on vibration-EDM and mass punching of micro-holes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 180, No. 1, pp. 151–160, 2006.

[18] R. Teimouri, H. Baseri, Effects of magnetic field and rotary tool on EDM performance, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 14, No. 1, pp. 316–322, 2012.

[19] R. Teimouri, H. Baseri, Experimental study of rotary magnetic field-assisted dry EDM with ultrasonic vibration of workpiece, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 67, No. 5, pp. 1371-1384, 2013.

[20] S. Joshi, P. Govindan, A. Malshe, K. Rajurkar, Experimental characterization of dry EDM performed in a pulsating magnetic field, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 60, No. 1, pp. 239–242, 2011.

[21] M. R. Cao, X. D. Geng, Process research on high-speed small hole drilling by EDM combined with magnetic field and water dispersant, *Advanced Materials Research*, Vol. 189-193 pp. 269-272, 2011.

[22] Gholipoor, *Numerical and Experimental Investigation of the Effects of External Magnetic Field and Ultrasonic Vibrations of Copper Tool on Machining Characteristics of AISI H13 Tool Steel, in Electrical Discharge Machining (EDM) Process, Simultaneously*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, 2017. (in Persia فارسی)

[23] M. Shabgard, S. Farzaneh, A. Gholipoor, Investigation of the surface integrity characteristics in wire electrical discharge machining of Inconel 617, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 39, No. 3, pp. 857–864, 2017.

[24] F. S. V. Dijck, W. L. Dutr, Heat conduction model for the calculation of the volume of molten metal in electric discharges, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 7, No. 1, pp. 899-910, 1974.

[25] M. R. Shabgard, H. Kakolvand, M. Seyedzavvar, R. M. Shotorbani, Ultrasonic assisted EDM: Effect of the workpiece vibration in the machining characteristics of FW4 Welded Metal, *Frontiers of Mechanical Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 419–428, 2011.

[26] J. M. Jafferson, P. Hariharan, J. Ram Kumar, Effects of Ultrasonic Vibration and Magnetic Field in Micro-EDM Milling of Nonmagnetic Material, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 29, No. 1, pp. 357–363, 2014.