



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

محمدرضا شهبگرد^{1*}، احد قلی پور²

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:

ماشین کاری تخلیه الکتریکی
میدان مغناطیسی خارجی
ارتعاشات فراصوتی ابزار
نرخ براده برداری
نرخ سایش ابزار

چکیده

ماشین کاری تخلیه الکتریکی یکی از پرکاربردترین روش‌های ماشین کاری غیرسنتی برای ماشین کاری های در ابعاد کوچک، ماشین کاری اشکال پیچیده و ماشین کاری مواد سخت با استحکام بالا می باشد. در این مطالعه برای غلبه بر مشکلات و محدودیت‌های فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی مانند نرخ براده برداری پایین، فرآیند ترکیبی ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات فراصوتی ابزار معرفی شده و برای ماشین کاری فولاد گرمکار AISI H13 از آن استفاده می شود. در این تحقیق، با انتخاب شدت جریان و زمان روشنی پالس به عنوان 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 ماشین کاری تخلیه الکتریکی، علی‌رغم افزایش نرخ سایش ابزار، نرخ براده برداری را نسبت به فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی در بیشترین حالت 60٪، نسبت به فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی در بیشترین حالت 55٪ و نسبت به فرآیند ماشین کاری 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 می افتد. در شدت جریان 32 آمپر به دلیل تداخل اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ و ارتعاشات فراصوتی به ابزار، نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار کاهش می یابد.

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 tool 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 to 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

می باشد که از انرژی گرمایی برای ماشین کاری استفاده می کند [2,1]. این فرآیند نقش مهمی را در صنایع ماشین کاری مدرن مخصوصاً در ماشین کاری مواد سخت با استحکام بالا و هادی جریان الکتریکی ایفا می نماید، هر چند که

فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی¹ یکی از روشهای ماشین کاری غیرسنتی

¹ Electrical discharge machining (EDM)

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تلاش‌هایی نیز برای ماشین کاری مواد غیرهادی جریان الکتریکی مانند سرامیک‌هایی مثل زیرکونیا و آلومینا با این فرآیند صورت پذیرفته است [3]. در کنار کاربردهای وسیع فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی، این فرآیند دارای محدودیت‌هایی از قبیل ایجاد نرخ براده برداری پایین است [5]. 4. بنابراین محققان مختلفی روش‌های ماشین کاری جدیدی بر پایه فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی مانند فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی¹ [6]، فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودرهای اضافه شده به دی الکتریک² [7]، فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی³ [8]، فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک⁴ [9] و فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک⁵ [10] به منظور برطرف کردن این محدودیت‌ها معرفی کرده اند.

در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی، به منظور بهبود دفع براده های تولید شده از فاصله گپ، ارتعاشات فراصوتی به ابزار، قطعه کار و یا سیال دی الکتریک اعمال می شود و ماشین کاری در این شرایط انجام می گیرد [11].

شروانی تبار و مبادرسانی [12]، تاثیر ارتعاشات فراصوتی ابزار، میدان سرعت و توزیع فشار در سیال دی الکتریک اطراف حباب بخار به وجود آمده را بر روی روند تشکیل حباب به وجود آمده و رفتار سیال دی الکتریک اطراف حباب در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی، به صورت عددی مطالعه کردند. شروانی تبار و همکاران [13]، رفتار دینامیکی حباب بخار به وجود آمده در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی بعد از پدیده گلوئی شدن آن و زمانی که حباب به شکل ساعت شنی در آمده و به دو بخش تقسیم شده (که موجب تشکیل دو جت آب می شود که به سمت ابزار و قطعه کار حرکت می کنند و با آن‌ها برخورد می کنند) را به صورت عددی در سه حالت ابزار و قطعه کار با سطح صاف و مسطح، با سطح مقعر و با سطح محدب مطالعه نمودند. این جت‌های مایع براده های تولید شده را از گپ ماشین کاری دفع می کنند و ابزار و قطعه کار را فرسایش می دهند. آن‌ها از روش المان مرزی برای شبیه سازی مسئله استفاده کردند. نتایج عددی مطالعه نشان داد که بیشترین سرعت جت مایع و پهن ترین شکل جت مایع با استفاده از ابزار و قطعه کار با سطح مقعر به دست می آید که منجر به بیشترین نرخ براده برداری می شود. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که نرخ براده برداری به دست آمده با ابزار و قطعه کار با سطح صاف کمی بیشتر از ابزار و قطعه کار با سطح محدب است. فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با انرژی تخلیه بسیار کم و به همراه ارتعاشات فراصوتی قطعه کار توسط آگاشیرا 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 ماشین کاری تخلیه الکتریکی با انرژی تخلیه بسیار کم می تواند منجر به نرخ سایش ابزار کمتر و سطوح صاف تر با سلامتی بهتر گردد. فرآیند میکرو ماشین کاری تخلیه الکتریکی با ابزار دارای سطح مقطع غیردایروی، در حالی که قطعه کار دارای ارتعاشات فراصوتی است، توسط تانگ و همکاران [15]، به منظور افزایش دفع براده ها از گپ ماشین کاری (با افزایش میزان گردش سیال دی الکتریک) و کاهش آلودگی گپ و تعداد پالس‌های اتصال

کوتاه (که نهایتا منجر به بهبود کارایی، دقت و پایداری فرآیند ماشین کاری 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 ماشین کاری، 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 ماشین کاری به بیش از 18 برابر افزایش یافته و دقت ابعادی تا 10.5 میکرون بهبود می یابد. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که با تعیین دامنه ارتعاشات تقریبا برابر با فاصله گپ، نتایج بهتری به دست می آید. لیو و همکاران [16]، برای سوراخ کاری میکروسوراخ‌های عمیق در قطعه کار از جنس سیلیکون کارباید، ارتعاشات فراصوتی را به سیال دی الکتریک در فرآیند میکرو ماشین کاری تخلیه الکتریکی اعمال کردند. آن‌ها همچنین نانوفیبرهای کربن را به داخل سیال دی الکتریک مرتعش اضافه کرده و این روش جدید ماشین کاری را بررسی کردند. آن‌ها تاثیر اعمال ارتعاش به سیال دی الکتریک و اضافه کردن نانوفیبرهای کربن به داخل سیال دی الکتریک را بر روی عمق سوراخ، هندسه سوراخ، توپوگرافی سطح سوراخ ماشین کاری شده، پایداری ماشین کاری و رسوب ماده ابزار بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که عملکرد ماشین کاری با اعمال ارتعاشات فراصوتی به سیال دی الکتریک (به دلیل اثرات ارتعاش و کاپیتاسیون ناشی از ارتعاش که منجر به افزایش دفع براده ها از گپ ماشین کاری شده و از رسوب ماده ابزار بر روی قطعه کار می کاهد) بهبود می یابد. مطابق نتایج این محققان بهترین عملکرد ماشین کاری با فرآیند میکرو ماشین کاری تخلیه الکتریکی، با اعمال ارتعاشات فراصوتی به سیال دی الکتریک و اضافه کردن نانوفیبرهای کربن به داخل سیال دی الکتریک، به دست می آید. چن و چانگ [17]، فرآیند میکرو ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی قطعه کار را برای عملیات میکروسوراخ کاری 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 میکرو ماشین کاری تخلیه الکتریکی، بازده بیشتر، پیشروی بیشتر و پرداخت سطح بهتری به دلیل بهبود دفع براده‌ها از فاصله گپ و کاهش میزان آلودگی گپ و تعداد پالس‌های غیرنرمال، به دست می آید.

در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی، یک میدان مغناطیسی به محدوده ابزار، گپ و قطعه کار اعمال شده و ماشین کاری تحت این شرایط انجام می شود. در این فرآیند به دلیل اعمال نیروی مغناطیسی بر قطرات مذاب، نرخ براده برداری افزایش می یابد [18].

تیموری و باصری [19]، در مطالعه خود در مورد فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک به کمک میدان مغناطیسی و به همراه ارتعاشات فراصوتی قطعه کار، تاثیر جنس ابزار، هندسه ابزار (تعداد سوراخ‌های ابزار)، اعمال میدان مغناطیسی به فاصله گپ در فرآیند ماشین کاری 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 براده برداری، نرخ سایش ابزار، زبری سطح ماشین کاری شده و مقدار اورکات⁶ به وجود آمده، مطالعه نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ابزار برنجی نرخ براده برداری، 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

فراصوتی بندلین² 2200 با توان 200 وات و فرکانس ارتعاش 20 کیلوهرتز برای ایجاد امواج فراصوتی با دامنه 15 میکرون استفاده می‌شود. از متمرکز کننده آلومنیومی به منظور 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 ماشین کاری تخلیه الکتریکی، فیکسچر نشان داده شده در "شکل 3"، برای قطعه کار طراحی و در حول فاصله گپ قرار داده می‌شود. جنس این فیکسچر از پلاستیک بوده و چهار آهنربای ثابت مکعبی نئودیمیوم³ با شدت مغناطیسی 1.2 تسلا به ابعاد 25×20×10 میلی متر در محل‌های تعبیه شده در فیکسچر قرار داده می‌شوند.

شکل، ابعاد، شدت میدان مغناطیسی، تعداد و مکان آهنرباها در فرآیند ماشین کاری 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 براده برداری به دست آمده به عنوان 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 ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار و میدان مغناطیسی خارجی⁴ نشان می‌دهد.



Fig. 1 The spark machine which was used for machining

شکل 1 تصویر دستگاه اسپارک استفاده شده برای انجام عملیات ماشین کاری



Fig.2 The ultrasonic vibration generator used for machining

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

زبری سطح ماشین کاری شده بیشتری نسبت به ابزار مسی دارد، همچنین با توجه به این که 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 براده برداری، نرخ سایش ابزار و مقدار اورکات بیشتر و زبری سطح کمتری نسبت به ابزار با یک سوراخ خارج از مرکز می‌شود. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که به دلیل 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 ماشین کاری شده کاهش می‌یابد. مطابق نتایج این محققان، نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار، مقدار اورکات به وجود آمده و زبری سطح ماشین کاری شده با افزایش شدت ارتعاش فراصوتی بیشتر می‌شود. با اعمال میدان مغناطیسی پالسی به فاصله گپ در فرآیند ماشین کاری 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 می‌انجامد، 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 براده برداری، نرخ سایش ابزار و مقدار اورکات به وجود آمده در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک، مطالعه کرده و به این نتیجه رسیدند که با اعمال میدان مغناطیسی، به دلیل محدود کردن کانال پلاسما، مقدار اورکات به وجود آمده و نرخ سایش ابزار منفی کاهش می‌یابد. آن‌ها توپوگرافی سطح ماشین کاری شده را با تصاویر میکروسکوب الکترونی آنالیز کرده و به این نتیجه رسیدند که میکرو ترکها، حفرات و فرورفتگی‌های روی سطح ماشین کاری شده در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک به کمک میدان مغناطیسی کمتر از فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک است، هر چند که آنالیز ترکیب سطح ماشین کاری شده، آلیاژسازی بیشتری را روی سطح ماشین کاری شده در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک به کمک میدان مغناطیسی نشان می‌دهد.

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

با توجه به عدم بررسی فرآیند هیبریدی ماشین کاری 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 ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار بررسی شده است.

2- شرایط آزمایش های تجربی

در این تحقیق، برای انجام عملیات سوراخ کاری با فرآیند تخلیه الکتریکی از دستگاه اسپارک شارمیلز روبروم¹ 200 با مولد ایزوپالس، استفاده می‌شود. "شکل 1"، تصویر این دستگاه را نشان می‌دهد.

برای اعمال ارتعاشات فراصوتی به ابزار، از دستگاه مولد ارتعاشات

² Bandelin

³ Neodymium magnet

⁴ Ultrasonic vibrations and magnetic field assisted EDM (MUEDM)

¹ Charmilles Roboform 200

دو بار تکرار شده و میانگین آن‌ها به عنوان خروجی در نظر گرفته شد. برای محاسبه نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار، قطعه کار و ابزار قبل و بعد از هر تست کاملاً تمیز شده، سپس وزن آن‌ها با ترازوی دیجیتال سارتوریوس⁴ 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.

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

در رابطه (1)، مقدار نرخ براده‌برداری، M_{W1} وزن قطعه کار قبل از ماشین کاری، M_{W2} وزن قطعه بعد از ماشین کاری، t مدت زمان ماشین کاری و ρ_w چگالی قطعه کار است.

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

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

قطعه کار مورد استفاده در این مطالعه، فولاد استوانه‌ای گرمکار از جنس H13 به قطر 10 میلی‌متر است که پس از برش با دستگاه برش کاری سیمی به ارتفاع 20 میلی‌متر، سطوح پیشانی آن سنگ‌زنی و پولیش کاری شده است. ترکیب شیمیایی قطعه کار 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 ماشین کاری تخلیه الکتریکی و فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی، استوانه‌ای به قطر خارجی 14 میلی‌متر و ارتفاع 40 میلی‌متر می‌باشد که با عملیات تراش کاری تهیه شده است. مشخصات ابزار مسی در جدول 5 آمده است.

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

جدول 1 پارامترهای ورودی متغیر و سطوح آن‌ها

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

جدول 2 پارامترهای ثابت استفاده شده در آزمایش‌ها

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

⁴ Sartorius

⁵ Oil Flux ELF



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

شکل 3 فیکسچر مورد استفاده برای قطعه کار 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 ماشین کاری 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 ماشین کاری در فرآیند ماشین کاری 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 بر خروجی های فرآیند [23]) و طبق اصول طراحی آزمایشات و براساس مدل طرح عاملی کامل¹، $4 \times 4 = 16$ آزمایش در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی، $4 \times 4 = 16$ آزمایش در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی، $4 \times 4 = 16$ آزمایش در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار و $4 \times 4 = 16$ آزمایش در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار و در مجموع 64 آزمایش برای بررسی تاثیر پارامترهای ورودی بر روی نرخ براده‌برداری² و نرخ سایش ابزار³، به دست آمده از ماشین کاری بعنوان پارامترهای خروجی این فرآیندها طراحی شد.

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

در این تحقیق برای انجام هر تست یک الکتروود ابزار و زمان انجام هر کدام از آزمایش‌ها ثابت و 10 دقیقه در نظر گرفته شد. همچنین هر آزمایش

¹ Full factorial

² Material removal rate (MRR)

³ Tool wear rate (TWR)

جدول 3 خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی فولاد H13

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

مشخصه	مقدار
دانشسته (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 براده برداری فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در مقایسه با فرآیندهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی، ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار نشان می دهد.

مطابق "شکل 5"، با افزایش شدت جریان تخلیه، نرخ براده برداری فرآیندهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، ماشین کاری تخلیه الکتریکی، ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی، در همه زمان های 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 قطعه کار (مطابق رابطه (3))، مقدار ماده ذوب شده و در نتیجه میزان نرخ براده برداری بیشتر می شود. این پدیده در همه زمان های 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 قطعه کار بر حسب اهم، I مقدار شدت جریان تخلیه بر حسب آمپر، و T_{on} زمان روشنی پالس بر حسب میکروثانیه می باشد.

مطابق "شکل 5"، نرخ براده برداری فرآیند ماشین کاری 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 ماشین کاری تخلیه الکتریکی، ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی می باشد. نرخ براده برداری فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، نسبت به فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی در بیشترین حالت 60٪، نسبت به فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی در بیشترین حالت 55٪ و نسبت به فرآیند ماشین کاری 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 حجمی¹) و بنابراین نرخ براده برداری افزایش می یابد.

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

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

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

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

در روابط (6-4)، $U(t)$ دامنه ارتعاش در لحظه t 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 دی الکتریک، ρ چگالی سیال دی الکتریک، 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 می شود. فشار کلی هیدرواستاتیک (P_{ht}) از مجموع فشار آکوستیک و فشار موضعی سیال موجود در گپ (P_h) مطابق رابطه (10) بدست می آید.

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

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

همچنین با اعمال میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ، گسترش کانال پلاسما، به دلیل ایجاد نیروی لورنتز موثر بر کانال پلاسما، محدود می شود.

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 ذره های (a) مطابق رابطه (11) و موجب کاهش میانگین مسافت آزاد الکترون ها (λ_e) مطابق رابطه (12) می شود. این عوامل موجب کاهش لگاریتم کولمب ($\ln A$) مطابق

¹ Bulk boiling

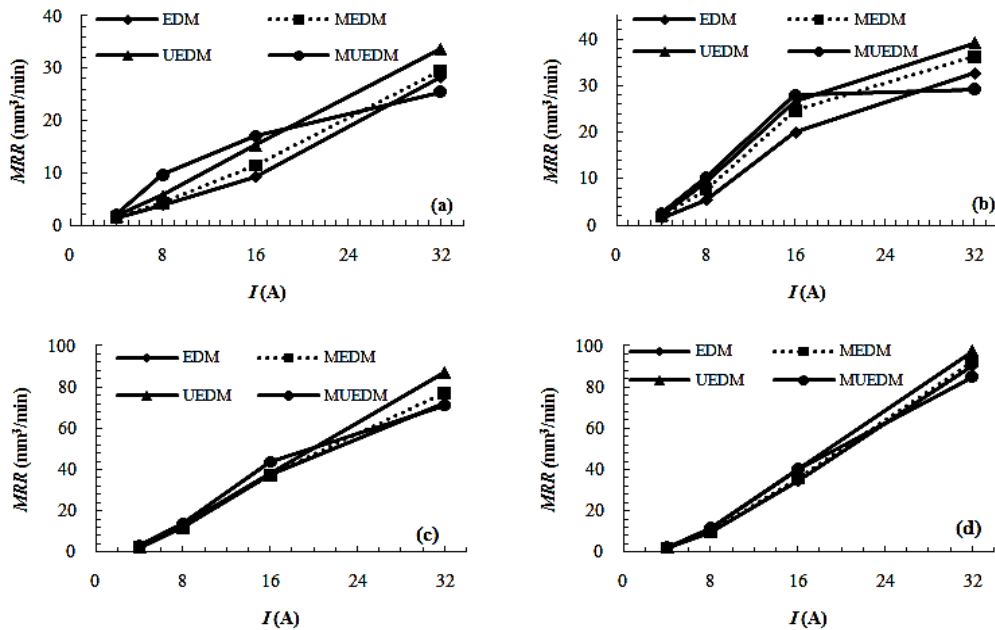


Fig. 5 Effects of pulse current on material removal rate of MUEDM as compared with EDM, MEDM and UEDM processes at (a) $T_{on}=6.4\mu s$ (b) $T_{on}=12.8\mu s$ (c) $T_{on}=50\mu s$ (d) $T_{on}=100\mu s$

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

تولید حباب‌هایی علاوه بر حباب‌های ایجاد شده به خاطر اسپارک می‌شود. در فرآیند فروپاشی حباب (با حرکت ابزار به پایین و افزایش فشار)، پدیده کلویتاسیون 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 قطعه کار و ابزار برخورد می‌نماید 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 می‌شود و لذا زمان مفید ماشین کاری و نرخ براده برداری افزایش می‌یابد.

بر اساس 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 قطعه کار می‌شوند و بدین طریق به شستشوی گپ کمک می‌کنند (ارتعاش فراصوتی قطعه کار 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 آلودگی‌ها به بیرون از فاصله گپ نیز می‌تواند 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 می‌باشد. 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 می‌باشد.

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

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

$$\lambda_e = \frac{1}{nQ_{ei}} \quad (12)$$

$$\ln A = \ln \left(\frac{12\pi(\epsilon_0 K_B T_e)^{\frac{3}{2}}}{Z^2 e^3 n_e^{\frac{1}{2}}} \right), \quad Z = \frac{n_i}{n_e} \quad (13)$$

$$\sigma = \gamma_g \frac{2(4\pi\epsilon_0)^2 (2K_B T)^{\frac{3}{2}}}{\pi^{\frac{3}{2}} Z^2 m_e^{\frac{1}{2}} \ln A} \quad (14)$$

که در آن Q_{ei} مقطع توزیع حرارتی الکترون- یون می‌باشد و بیان کننده احتمال برخورد یک الکترون با یک یون است و با رابطه (15) بیان می‌شود، 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.

$$Q_{ei} = 4\pi \left(\frac{Ze^2}{12\pi\epsilon_0 K_B T_e} \right)^2 \ln A \quad (15)$$

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.

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

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 می‌شود. افت فشار درون کانال پلاسما موجب

میزان نرخ براده برداری کاهش می یابد و یا روند افزایشی آن متوقف می شود. "شکل 7"، تاثیر شدت جریان تخلیه را بر روی نرخ سایش ابزار فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در مقایسه با فرآیندهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی، ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی، در همه زمان های روشنی پالس، افزایش می دهد.

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

با افزایش شدت جریان تخلیه از 4 آمپر تا 32 آمپر در همه زمان های روشنی پالس، به دلیل 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 ماشین کاری 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 فرآیندهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی، ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی می باشد.

عدم توانایی تخلیه فاصله گپ از انبوه براده های تولید شده در شدت جریان 32 آمپر، به دلیل تداخل حرکت براده ها 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 ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار نسبت به فرآیندهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی، ماشین کاری تخلیه

با اعمال همزمان میدان مغناطیسی به فاصله گپ و ارتعاشات فراصوتی ابزار در فرآیند ماشین کاری 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 می شود و بنابراین تعداد جرقه های غیر طبیعی کاهش یافته و نرخ براده برداری بیشتر می شود، ولی در شدت جریان 32 آمپر، مقدار براده تولید شده خیلی بیشتر از حالت های قبلی است و حرکت براده ها در اثر اعمال ارتعاشات فراصوتی (حرکت عمودی براده ها)، حرکت براده ها در اثر اعمال میدان مغناطیسی (حرکت افقی براده ها) و برخورد براده ها با یکدیگر، موجب کاهش اثر دفع براده ها توسط هر یک از تکنیک های بالا شده و لذا مقدار براده بیشتری در فاصله گپ باقی می ماند و آلودگی گپ و احتمال جرقه آرک افزایش یافته و نرخ براده برداری کاهش می یابد [26].

"شکل 6"، تاثیر زمان روشنی پالس را بر روی نرخ براده برداری فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در مقایسه با فرآیندهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی، ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین کاری 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 ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، ماشین کاری تخلیه الکتریکی، ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی، در همه شدت جریان ها 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 جریان های تخلیه، میزان انرژی تخلیه شده به فاصله گپ افزایش یافته و منجر به نرخ براده برداری بیشتر می شود. اما بعد از 50 میکرو ثانیه تا 100 میکروثانیه، به دلیل افزایش میزان آلودگی فاصله گپ ناشی از حضور براده های تولید شده در فاصله گپ، تعداد جرقه های آرک افزایش یافته و

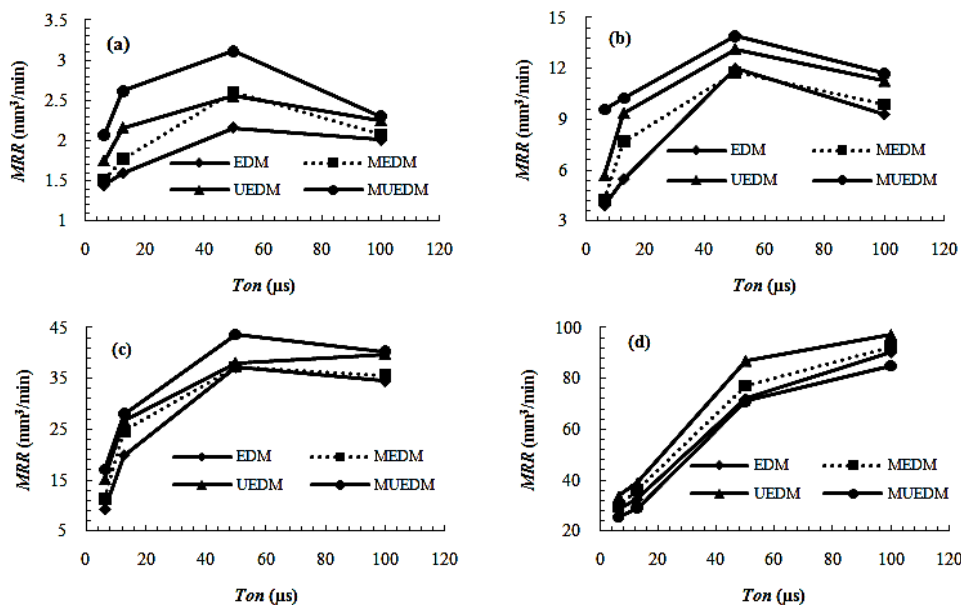


Fig. 6 Effects of pulse duration on material removal rate of MUEDM as compared with EDM, MEDM and UEDM processes at (a) $I=4A$ (b) $I=8A$ (c) $I=16A$ (d) $I=32A$

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

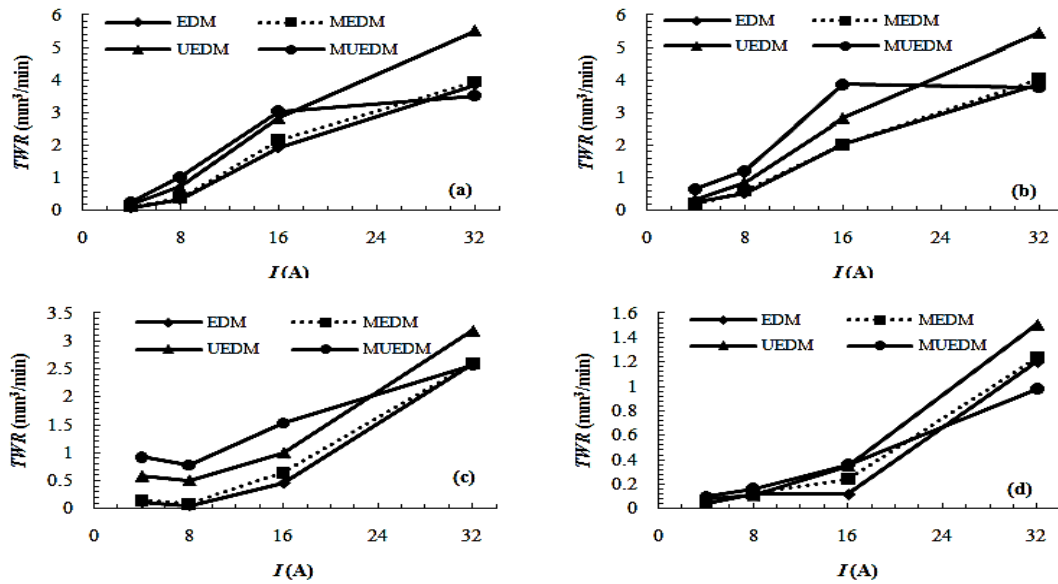


Fig. 7 Effects of pulse current on tool wear rate of MUEDM as compared with EDM, MEDM and UEDM processes at (a) $T_{on}=6.4\mu s$ (b) $T_{on}=12.8\mu s$ (c) $T_{on}=50\mu s$ (d) $T_{on}=100\mu s$

شکل 7 تاثیر شدت جریان تخلیه بر نرخ سایش ابزار فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در مقایسه با فرایندهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی، ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار در $T_{on}=12.8\mu s$ (b) $T_{on}=6.4\mu s$ (a) $T_{on}=100\mu s$ (d) $T_{on}=50\mu s$ (c)

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

التکتریککی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین کاری تخلیه الکتریککی به همراه ارتعاشات فراصوتی است. در سایر شرایط ماشین کاری 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 براده ها از فاصله گپ، آلودگی کمتر فاصله گپ و نرخ سایش ابزار بیشتر منجر می شود.

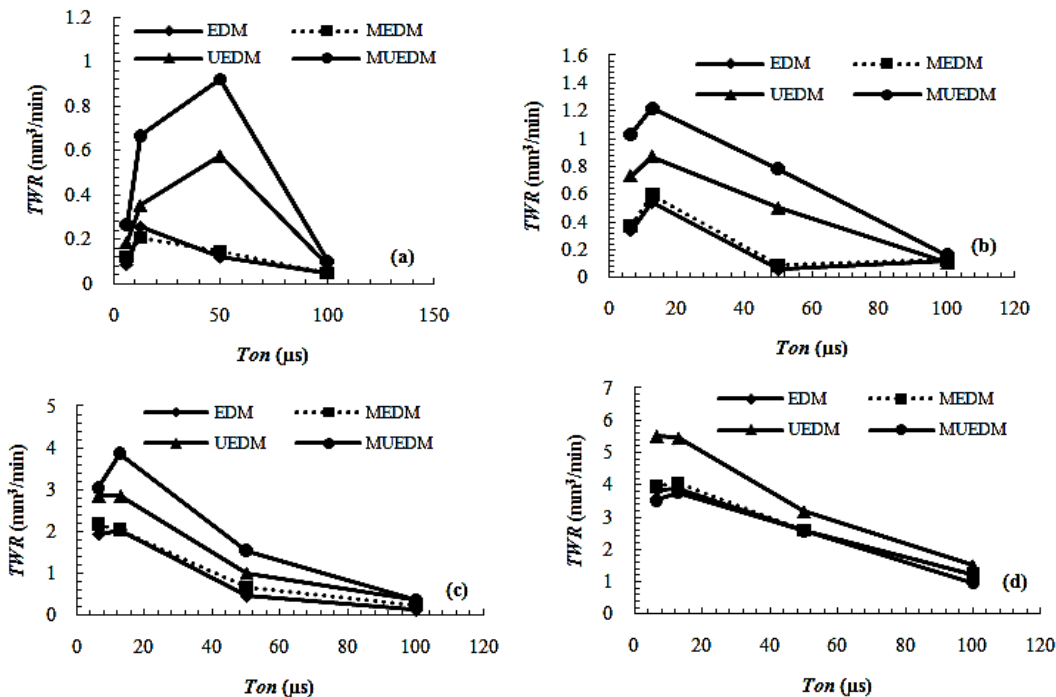


Fig. 8 Effects of pulse duration on tool wear rate of MUEDM as compared with EDM, MEDM and UEDM processes at (a) $I=4A$ (b) $I=8A$ (c) $I=16A$ (d) $I=32A$

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

ارتعاشات فراصوتی ابزار، در همه شدت جریان‌ها افزایش می‌یابد، اما بعد از 12.8 میکرو ثانیه نرخ سایش ابزار کاهش می‌یابد.

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. Bavi 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. Perflou, 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)

مطابق "شکل 8"، با افزایش زمان روشنی پالس تا 12.8 میکروثانیه، نرخ سایش ابزار فرآیندهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، ماشین کاری تخلیه الکتریکی، ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشین کاری 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 آزمایش‌ها، به دلیل 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 به دلیل بزرگ بودن کانال پلاسما و افزایش حرکت و برخورد یون‌های مثبت با سطح قطعه کار (قطب منفی) و کاهش برخورد الکترون‌ها با سطح ابزار، نرخ سایش ابزار کاهش می‌یابد.

4- نتیجه گیری

در این مطالعه فرآیند ماشین کاری 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 ماشین کاری تخلیه الکتریکی، ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی خارجی و ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاشات فراصوتی ابزار بررسی شد. نتایج بارز این مطالعه را می‌توان بصورت زیر دسته بندی نمود.

- نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار فرآیند ماشین کاری 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 می‌باشد.
- نرخ براده برداری فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، نسبت به فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی در بیشترین حالت 60٪، نسبت به فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی در بیشترین حالت 55٪ و نسبت به فرآیند ماشین کاری 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 ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، در همه زمان‌های روشنی پالس، افزایش می‌یابد.
- با افزایش زمان روشنی پالس تا 50 میکرو ثانیه، نرخ براده برداری فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، در همه شدت جریان‌ها افزایش می‌یابد، اما بعد از 50 میکروثانیه روند افزایشی نرخ براده برداری متوقف شده یا کاهش می‌یابد.
- با افزایش زمان روشنی پالس تا 12.8 میکرو ثانیه، نرخ سایش ابزار فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و

- [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.
- [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.