

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

مطالعه اثر میدان مغناطیسی بر زبری سطح قطعه کار در ماشین کاری تخلیه الکتریکی ماده مرکب آلومینیوم 413 تقویت شده با آلومینا

مقاله پژوهشی

احمدرضا میزبانی¹، سید احسان میر محمدصادقی^{2*}، علی مختاریان²

1- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران.

2- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران.

* e.mirmohammadsadeghi@iaukhsh.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
در این پژوهش، تأثیر پارامترهای ورودی ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر روی زبری سطح قطعه کار از جنس ماده مرکب A413 تقویت شده با Al_2O_3 2/5%، در دو حالت با حضور میدان مغناطیسی و بدون وجود میدان مغناطیسی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. تحقیق ارائه شده با رویکرد طراحی آزمایشات به روش تاگوچی بر مبنای آرایه متعامد L9 و تکنیک سطوح تکراری به انجام رسیده است. پارامترهای ورودی این آزمایشات شامل ولتاژ (دو سطحی)، شدت جریان (سه سطحی)، زمان روشنی پالس (سه سطحی) و زمان خاموشی پالس (سه سطحی) در نظر گرفته شده است. نتایج آزمایشات نشان دهنده کاهش زبری سطح ماشین کاری شده تا 32 درصد در حضور میدان مغناطیسی می باشد. تحلیل نتایج شامل تعیین نمودارهای نسبت سیگنال به نویز متناظر با هر یک از پارامترهای ورودی و آنالیز واریانس توسط نرم افزار Minitab صورت گرفته است. نتایج به دست آمده گویای بهبود کیفیت سطح قطعه کار در حضور میدان مغناطیسی در مقایسه با شرایط ماشین کاری بدون وجود میدان مغناطیسی است. همچنین بر مبنای نتایج حاصل از آنالیز واریانس در هر دو حالت مذکور، شدت جریان مؤثرترین پارامتر ورودی بر روی زبری سطح قطعه کار از جنس ماده مرکب A413 تقویت شده با 2/5% Al_2O_3 ، تعیین شده است.	دریافت: 1401/03/31 پذیرش: 1401/08/03 کلید واژگان: میدان مغناطیسی ماشین کاری تخلیه الکتریکی زبری سطح نسبت سیگنال به نویز آنالیز واریانس

Study of the Effect of Magnetic Field on the Surface Roughness of the Work Piece in Electric Discharge Machining of Al₂O₃-Reinforced A413 Composite

Ahmadreza Mizbani¹, Seyed Ehsan Mir Mohammad Sadeghi^{2*}, Ali Mokhtarian²

1- MSc. Student, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran.

* e.mirmohammadsadeghi@iaukhsh.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Dor:

20.1001.1.24233226.1402.17.1.7.1

Keywords:

Magnetic Field

Electric Discharge Machining

Surface Roughness

Signal-to-Noise Ratio

Analysis of Variance

Abstract

In this research, the effect of electric discharge machining input parameters on the surface roughness of A413 composite reinforced with 2.5% Al₂O₃, in two cases with the presence of a magnetic field and without a magnetic field was investigated and compared. The research presented with Taguchi experiment design approach which is based on L9 orthogonal array and iterative surface technique. The input parameters of these experiments include voltage (two levels), current intensity (three levels), pulse on-time (three levels) and pulse off-time (three levels). Experiments results show machined surface roughness reduction in presence of magnetic field up to 32 percent. The analysis of the results included the determination of signal-to-noise ratio diagrams corresponding to each of the input parameters and analysis of variance by Minitab software. The results show that the surface quality of the workpiece improves in the presence of a magnetic field compared to machining conditions without a magnetic field. Also, based on the results of analysis of variance in both cases, the current intensity is the most effective input parameter on the surface roughness of the workpiece made of A413 composite reinforced with 2.5% Al₂O₃.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Ahmadreza Mizbani, Seyed Ehsan Mir Mohammad Sadeghi, Ali Mokhtarian, Study of the Effect of Magnetic Field on the Surface Roughness of the Work Piece in Electric Discharge Machining of Al₂O₃-Reinforced A413 Composite, New Process in Material Engineering, 2023, 17(1), 83-95.

1- مقدمه

نیاز گسترده به ماشین کاری فلزات و آلیاژهای سخت و مقاوم در مقابل گرما، به پیشرفت‌های مهندسی در این زمینه انجامیده است. از آن جمله می‌توان به ماشین کاری با روش تخلیه الکتریکی¹ که کاربرد وسیعی به‌ویژه برای قطعات با سختی بالا یافته است اشاره کرد. فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به شکل صنعتی نخستین بار توسط دو دانشمند روس در سال 1943 با اختراع مدار رلاکسیون² و در قالب ساخت یک دستگاه فرز به کار گرفته شد [1-2]. مطالعات انجام شده در زمینه ماشین کاری تخلیه الکتریکی، عمدتاً بر روی تغییر و کنترل تنظیمات بهینه پارامترهای ماشین کاری با توجه به جنس قطعه کار متمرکز است. عمده تمرکز محققان نیز بر روی استفاده از روش‌های تحلیل آماری و بهینه‌سازی و به‌ویژه مبحث طراحی آزمایش‌ها بوده است. مطالعه اولیه بر روی این فرآیند توسط اردن و گین³ [3] در سال 1980 صورت گرفته است. آنها تأثیرات پودر مخلوط را در دی‌الکتریک ماشین کاری تخلیه الکتریکی بررسی کرده و اظهار داشتند که نرخ براده برداری⁴ با افزایش غلظت پودر افزایش می‌یابد. بعدها کانسال و همکاران⁵ [4] تأثیر پودر سیال دی‌الکتریک را روی آلیاژ فولاد AISI 52100 بررسی نموده و اظهار کردند که غلظت بالای پودر سیلیکون، نرخ براده برداری بیشتری ایجاد می‌کند و سختی سطح را افزایش می‌دهد. مینگ و هی⁶ [5] تأثیر انواع مختلفی از مواد افزودنی را در مایع دی‌الکتریک در طی ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد کربن بالا بر نرخ براده برداری و زبری سطح⁷ قطعه کار مطالعه کردند. این پژوهش نشان داد که افزودنی‌ها، کیفیت سطح را بهبود بخشیده و می‌توانند نرخ براده برداری را افزایش داده و نرخ سایش ابزار⁸ را کاهش دهند. پاک و فتاحی [6] اثرات افزودن انواع نانو پودر به دی‌الکتریک و اعمال نوسانات فراصوتی از طریق ابزار به‌طور هم‌زمان در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد H13 را مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که استفاده هم‌زمان از ذرات نانو پودر و اعمال امواج فراصوتی به‌طور میانگین نرخ براده برداری را تا 30 درصد افزایش

می‌دهد. سیدو و همکاران⁹ [7] تأثیر مواد افزودنی پودر مس و گرافیت را بر ماشین کاری تخلیه الکتریکی سه نوع متفاوت از کامپوزیت با زمینه فلزی¹⁰ بررسی کرده و گزارش کردند که رسانایی بالای ذرات معلق مس منجر به بزرگ شدن جرقه‌ها و کاهش در میزان عایق بودن دی‌الکتریک برای کانال پلاسما بین الکترودها می‌شود. موهن و همکاران¹¹ [8] ماشین کاری تخلیه الکتریکی با الکتروود لوله‌ای خالی را برای سوراخ کردن کامپوزیت کاربید سیلیسیم 6025 بکار بردند. طبق مطالعات آنها، الکتروود مدور، نرخ براده برداری را بهبود می‌بخشد و همچنین در ارتباط با شستشوی تزریقی، ماشین کاری تخلیه الکتریکی با الکتروود لوله‌ای، نرخ براده برداری بالاتر و نرخ سایش ابزار و زبری سطح قطعه کار پایین‌تری را به دنبال دارد. کوپن و همکاران¹² [9] ماشین کاری تخلیه الکتریکی اینکونل 718 همراه با دوران ابزار را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که دوران ابزار، نرخ براده برداری را به شدت افزایش می‌دهد. دو و همکاران¹³ [10] در پژوهش مشابهی تأثیرات پارامترهای ورودی مانند زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس بر پارامترهای خروجی از قبیل نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار در طی ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژهای مختلف را با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها تاگوجی بررسی کردند. لطفی و دانشمند [11] به بررسی تأثیر شدت جریان، ولتاژ، زمان روشنی و زمان خاموشی پالس و نانو ذرات اکسید تیتانیوم بر نرخ براده برداری، سایش ابزار و زبری سطح ماده مرکب آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات اکسید تیتانیوم در طی فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد با افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس، سایش ابزار و زبری سطح زیاد شده و با افزایش زمان خاموشی پالس سایش ابزار کم می‌شود. بسیاری از تحقیقات انجام شده در این زمینه در خصوص بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر پارامترهای خروجی ماشین کاری تخلیه الکتریکی است. چاتپادهای و همکاران¹⁴ [12] به بررسی نرخ براده برداری و نرخ سایش

همکاران¹⁸ [17] ویژگی‌های سطحی (شامل توپوگرافی سطح و مقدار زبری سطح) و نیز آب‌گریزی آلیاژ Ni-Ti در طی ماشین کاری تخلیه الکتریکی تحت میدان مغناطیسی و با تغییر پارامترهای ورودی شدت جریان، ولتاژ و زمان روشنی پالس را مورد مطالعه تجربی قرار دادند. شبگرد و همکاران [18] به بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر روی فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به صورت عددی و آزمایشگاهی پرداختند. آنها همچنین یک مدل ریاضی برای تخمین شعاع کانال پلاسما ارائه کردند. نتایج تحقیق آنها گویای تأثیرات مثبت میدان مغناطیسی بر افزایش راندمان شستشوی پلاسما¹⁹ و کاهش ضخامت لایه بازسازی شده²⁰ قطعه کار است. براوالا و پاندی²¹ [19] یک مدل ریاضی جهت پیش‌بینی نرخ براده برداری قطعه کار در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با بهره‌گیری از یک میدان مغناطیسی به همراه ایجاد حباب‌های هوا درون دی‌الکتریک ارائه کردند. نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده در این تحقیق مدل پیشنهادی را با خطای کمتر از 10 درصد تأیید می‌کنند. کومار و همکاران²² [20] ماشین کاری تخلیه الکتریکی سوپر آلیاژ اینکونل 706 در حضور میدان مغناطیسی و با اضافه کردن پودر سیلیکون در دی‌الکتریک را مورد مطالعه قرار دادند. آنها با استفاده از رویکرد طراحی آزمایشات تاگوجی و آنالیز واریانس به بررسی تأثیر شدت-جریان، زمان خاموشی و روشنی پالس بر روی نرخ براده برداری و زبری سطح قطعه کار پرداختند. رونیار و شانديلا [21] مطالعه‌ای آزمایشگاهی بر روی میزان زبری سطح و ضخامت لایه بازسازی شده قطعه کار از جنس آلیاژ آلومینیوم 6061 ماشین کاری تخلیه الکتریکی با قرارگیری در میدان مغناطیسی و با استفاده از اضافه کردن پودر آلومینیوم در دی‌الکتریک را به انجام رساندند. در این تحقیق پارامترهای ورودی شامل شدت جریان، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، میدان مغناطیسی و غلظت پودر در دی‌الکتریک انتخاب شده‌اند. همچنین آنها یک مدل ریاضی مرتبه دوم برای تخمین مقادیر خروجی با استفاده از آنالیز واریانس و رگرسیون²³ ارائه کردند.

الکتروود در ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد EN-8 با کمک میدان مغناطیسی و دوران الکتروود ابزار پرداختند. آنها از روش طراحی آزمایشات تاگوجی با در نظر گرفتن 8 پارامتر ورودی با سطوح مختلف استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها گویای تأثیر مطلوب دوران ابزار و میدان مغناطیسی بر خروجی‌های ماشین کاری شامل افزایش نرخ براده برداری از قطعه کار و کاهش نرخ سایش ابزار می‌باشد. قلی پور و همکاران [13] به بررسی تأثیر یک میدان مغناطیسی دورانی در اطراف گپ ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه‌خشک بر روی نرخ براده برداری از قطعه کار، نرخ سایش ابزار و زبری سطح قطعه کار از جنس X210Cr12 با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوجی پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که وجود میدان مغناطیسی موجب افزایش نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار و کاهش زبری سطح می‌شود. گوپتا و جوشی¹⁵ [14] یک مدل ریاضی برای ارزیابی و پیش‌بینی اثر میدان مغناطیسی بر روی عمق و قطر کانال پلاسما در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک ارائه کردند. آنها با انجام آزمایش‌های ماشین کاری و تعیین مقادیر تجربی، مدل ارائه شده را اعتبارسنجی و تأیید نمودند. ژانگ و همکاران¹⁶ [15] از میدان مغناطیسی در جهت کاهش مصرف انرژی و کاهش تأثیرات منفی زیست محیطی (شامل انتشار کربن و سروصدای ماشین کاری) در طی ماشین کاری تخلیه الکتریکی قطعه کار از جنس Ti6Al4V استفاده کردند. نتایج بهینه به‌دست آمده از تحقیق آنها گویای کاهش قابل ملاحظه نرخ سایش الکتروود، مصرف انرژی و سروصدای ماشین کاری بوده است. رونیار و شانديلا¹⁷ [16] به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس، غلظت پودر آلومینیوم اضافه شده به دی‌الکتریک و نیز میدان مغناطیسی بر روی نرخ براده برداری قطعه کار از جنس آلیاژ آلومینیوم 6061 و نرخ سایش ابزار پرداختند. نتایج تحقیق آنها بیانگر افزایش نرخ براده برداری و کاهش نرخ سایش ابزار به دنبال افزایش شدت میدان مغناطیسی است. فنگ و

خان و همکاران²⁴ [22] تأثیر اعمال میدان مغناطیسی به کمک آهنربای دائمی را بر روی ماشین کاری تخلیه الکتریکی با الکتروود مسی بر روی قطعه کاری از جنس اینکونل 625 مورد بررسی قرار دادند. نتایج کار آن‌ها مشخص کرد که اعمال میدان مغناطیس دائم بر فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی اینکونل 625 موجب افزایش نرخ براده برداری و افزایش نرخ سایش ابزار و کاهش زبری سطح قطعه کار ماشین کاری شده می‌گردد.

سلیمانی مهر و همکاران [23] با اعمال میدان الکترومغناطیس در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک یک سیم‌پیچ مسی به بررسی اثر اعمال میدان الکترومغناطیس در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی پرداختند. نتایج کار آن‌ها مشخص نمود که اعمال میدان موجب افزایش راندمان ماشین کاری و نرخ براده برداری و موجب کاهش سایش ابزار و زبری سطح ماشین کاری شده گردیده است. آن‌ها دریافته‌اند که اعمال میدان توسط سیم‌پیچ مسی زمانی مؤثرتر است که جریان الکتریکی مستقیم به دو سر سیم‌پیچ اعمال گردد.

ابلیاز و همکاران²⁵ [24] تأثیر اعمال محیط میدان مغناطیسی را بر عملکرد ماشین کاری تخلیه الکتریکی قطعه کامپوزیتی زمینه آلومینیومی با ذرات کاربید سیلیسیوم تقویت شده مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها میدان مغناطیسی را در دو اندازه 0/33 و 0/66 تسلا²⁶ اعمال کردند. آن‌ها پی بردند که اعمال میدان مغناطیسی شدید در زمان اعمال حداکثر شدت جریان تخلیه الکتریکی بیشترین افزایش در نرخ براده برداری را به همراه دارد. این در حالی است که اعمال میدان مغناطیسی متوسط (برابر 0/33 تسلا یا 3300 گاوس²⁷) بیشترین بهبود در کیفیت سطح نهایی ماشین کاری را به همراه دارد.

کومار و همکاران [25] تأثیر اعمال میدان مغناطیسی را بر ماشین کاری تخلیه الکتریکی اینکونل 706 به همراه استفاده از پودر سیلیکون و بروم در دی‌الکتریک مورد بررسی قرار دادند. آزمایشات صورت گرفته در تحقیق آن‌ها بر اساس طراحی آزمایش تاگوجی می‌باشد. آن‌ها با بررسی آنالیز

واریانس صورت گرفته بر روی پارامترهای اعمالی فرایند و نتایج به‌دست‌آمده متوجه شدند که پارامتر شدت جریان بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری و زبری سطح در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی اینکونل 706 در حضور میدان مغناطیسی دائم دارد.

مختاریان و همکاران [26] به بررسی تأثیر وجود پودر آلومینا در سیال دی‌الکتریک بر پارامترهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی ماده مرکب آلومینیوم 413 تقویت شده با 5 درصد آلومینا پرداختند. در این تحقیق از میدان مغناطیسی استفاده نشده است. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق مشخص می‌کند که استفاده از پودر آلومینیوم به‌اندازه 3 گرم بر لیتر در سیال دی‌الکتریک موجب کاهش نرخ براده برداری و سایش ابزار و بهبود کیفیت سطح ماشین کاری می‌گردد.

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در زمینه ماشین کاری تخلیه الکتریکی ماده مرکب آلومینیوم 413 تقویت‌شده با 2/5 درصد آلومینا، مشخص می‌شود که تاکنون پژوهشی در خصوص بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر پارامترهای خروجی ماشین کاری این ماده صورت نگرفته است. تحقیق حاضر، بر مبنای طراحی آزمایش‌ها با بهره‌مندی از رویکرد تاگوجی در دو حالت کلی ماشین کاری تخلیه الکتریکی در حضور میدان مغناطیسی و بدون وجود میدان مغناطیسی بوده است. هم‌چنین در این تحقیق از آهنرباهای حلقه‌ای استفاده شده است که می‌تواند باعث اعمال یکنواخت میدان مغناطیسی بر ماده قطعه کار حین فرایند گردد. پارامترهای ورودی آزمایش‌ها شامل ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس و پارامتر خروجی مورد بررسی میزان زبری سطح قطعه کار می‌باشند. هم‌چنین، جهت بررسی میزان تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی، ترسیم گراف‌های نسبت سیگنال به نویز²⁸ زبری سطح بر حسب تغییرات پارامترهای ورودی و نیز آنالیز واریانس²⁹ در نرم‌افزار Minitab به انجام رسیده است.

2- مواد و روش تحقیق

2-1- ماده

قطعه کار اولیه جهت انجام آزمایشها از ماده مرکب A413 تقویت شده با Al_2O_3 2/5، فراهم شده است. لازم به ذکر است که نمونه قطعه کار اولیه مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از یک کوره ذوب مقاومتی که دما و سرعت چرخش پروانه همزن قابل کنترل است، تولید شده است. برای ساخت نمونه ابتدا آلیاژ آلومینیوم A413 در داخل بوته گرافیتی قرار داده شد و با استفاده از کوره مقاومتی تا دمای ذوب حرارت داده شد. پس از ذوب کامل آلیاژ با فرو بردن همزن گرافیتی در مذاب، عمل همزدن در حین افزودن پودر تقویت کننده آلومینا به میزان 2/5 درصد وزنی به مذاب به انجام رسید. سپس مذاب در داخل قالب فلزی مکعب مستطیلی شکل ریخته گری شد. درصد عناصر تشکیل دهنده و برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی این آلیاژ در جدولهای (1) تا (3) آورده شده اند.

جدول (1): درصد عناصر تشکیل دهنده آلیاژ آلومینیوم A413 [27].

عصر	درصد
سیلیسیم	13-11
آهن	1.3
مس	1
منیزیم	0.1
منگنز	0.35
نیکل	0.5
روی	0.5
قلع	0.15
تیتانیوم	-
سایر	0.25
آلومینیوم	بالانس

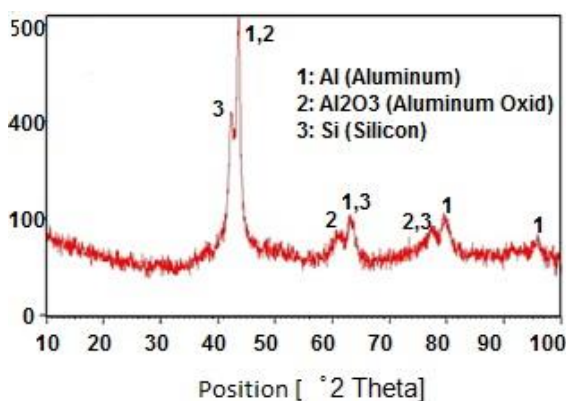
جدول (2): خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم A413 [27].

مشخصه	مقدار (واحد)
استحکام نهایی	290 (مگا پاسکال)
استحکام تسلیم	130 (مگا پاسکال)
درصد افزایش طول	3.5 (درصد در 51 میلی متر)
سختی	80 (برینل)
استحکام برشی	170 (مگا پاسکال)
استحکام خستگی	130 (مگا پاسکال)

جدول (3): خواص فیزیکی آلیاژ آلومینیوم A413 [27].

مشخصه	مقدار (واحد)
جرم حجمی	2.66 (گرم بر سانتی متر مکعب)
محدوده دمایی ذوب	574-582 (درجه سانتی گراد)
گرمای ویژه	963 (ژول بر کیلوگرم درجه سانتی گراد)
ضریب انبساط حرارتی	21.6 (میکرومتر بر متر درجه کلون)
رسانایی حرارتی	121 (وات بر متر درجه کلون)
رسانایی الکتریکی	31 (%IACS)

افزودن پودر آلومینا به آلومینیوم A413 موجب افزایش چقرمگی، مقاومت در برابر سایش و خستگی می گردد. شکل (1) نمودار شدت اشعه X بازتابش شده از ماده مرکب آلومینیوم 413 تقویت شده با 2/5 درصد آلومینا را به صورت تابعی از زاویه نشان می دهد.



شکل (1): نمودار شدت اشعه X بازتابش شده از ماده مرکب آلومینیوم 413 تقویت شده با 2/5 درصد Al_2O_3 .

در شکل (1) دیده می شود که برای این نمونه قله های متعددی در زوایای متفاوت و با شدت های متفاوت وجود دارد. هر کدام از این قله ها مربوط به صفحه ای خاص از نمونه است. همان طور که از نتایج آزمون XRD مشخص است، هریک از این موج ها یک صفحه کریستالی را نشان می دهد. یکنواختی منحنی موج و تکرار موقعیت های منظم ذرات، حاکی از وجود همگن پودر Al_2O_3 در ماتریس آلومینیوم 413 و داشتن کامپوزیتی مطلوب می باشد.

2-2- روش تحقیق

در این پژوهش، الکتروود ابزار از جنس مس، به قطر 10 میلی متر و ارتفاع 73 میلی متر با چگالی 8/9 گرم بر سانتیمتر مکعب و با قطبیت مثبت مورد استفاده قرار گرفته



شکل (3): نحوه قرار گرفتن آهنرباها در اطراف محل ماشین کاری تخلیه الکتریکی جهت ایجاد میدان مغناطیسی.

به علاوه، جهت ایجاد میدان مغناطیسی در اطراف محل ماشین کاری از دو آهنربای حلقوی مشابه به قطرهای داخلی و خارجی به ترتیب 45 و 80 میلی متر مطابق شکل (3) استفاده شده است. آهنرباها از نوع فریتی بوده و قدرت میدان مغناطیسی آهنرباهای مورد استفاده 0/35 تسلا (3500 گاوس) می باشد. انتخاب آهنرباها با این مقدار قدرت میدان مغناطیسی بر اساس بررسی نتایج تحقیقات گذشته مبنی بر انتخاب میدان مغناطیسی متوسط به منظور دستیابی به کیفیت سطح ماشین کاری بهتر صورت گرفته است [24]. آهنربا به سطح روی قطعه کار چسبیده و فاصله شعاعی آهنربا تا الکتروود ابزار 17/5 میلی متر می باشد. همچنین، تمامی قطعات پس از انجام آزمایش و ماشین کاری توسط دستگاه زبری سنج Mahr M300-RD18 مورد ارزیابی کیفیت سطح قرار می گیرند. لازم به ذکر است سطح مورد نظر جهت اندازه گیری زبری سطح، سطح قاعده سوراخ استوانه ای ایجاد شده بر روی قطعه کار به قطری معادل قطر ابزار یعنی 10 میلی متر است.

است. همچنین، دستگاه ماشین کاری مورد استفاده در این پژوهش، ماشین اسپارک تهران اکرام مدل 204H است. ابتدا قطعه کار و الکتروود ابزار مربوط به هر آزمایش را بر روی دستگاه تخلیه الکتریکی (به ترتیب در قطب های منفی و مثبت) بسته و بر طبق جدول طراحی آزمایش ها، پارامترهای ورودی برای هر قطعه را بر روی دستگاه تنظیم نموده، سپس ماشین کاری الکتریکی بر روی هر قطعه انجام می شود. ماشین کاری تخلیه الکتریکی انجام شده بر روی هر قطعه کار در طی آزمایش مربوطه، شامل 5 دقیقه سوراخ کاری بر روی قطعه است. سیستم شستشو در دستگاه مورد استفاده، از نوع غوطه وری و پاششی است. به این معنا که در حین ماشین کاری، قطعه کار کاملاً در سیال دی الکتریک (نفت سفید) غوطه ور شده و یک جریان پاششی برای شستشوی بهتر برقرار است. فاصله سر نازل پاشش سیال تا گپ بین الکتروود ابزار و قطعه کار در تمام آزمایش های ماشین کاری مقدار ثابتی می باشد.

شکل (2) نمایی از فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی و نحوه اعمال سیال دی الکتریک در این پژوهش (بدون حضور میدان مغناطیسی) را نمایش می دهد.



شکل (2): نمایی از فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی و نحوه اعمال سیال دی الکتریک (بدون حضور میدان مغناطیسی).

2-3- طراحی آزمایش

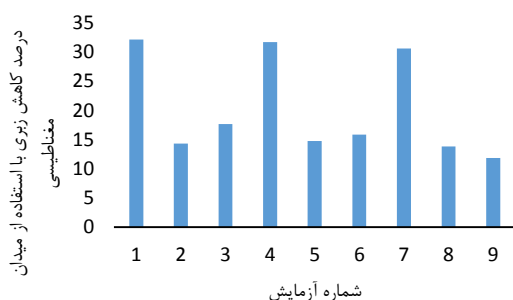
در این تحقیق، اثر چهار پارامتر ورودی شامل ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس، بر روی زبری سطح قطعه کار در ماشین کاری به روش تخلیه الکتریکی ماده مرکب A413 تقویت شده با $2/5\% \text{Al}_2\text{O}_3$ در طی دو حالت متفاوت در حضور میدان مغناطیسی و بدون وجود میدان مغناطیسی، مورد بررسی قرار گرفت. نوع و تعداد سطوح پارامترهای ورودی بر مبنای تنظیمات قابل حصول بر دستگاه و با انجام یک سری آزمایش‌های اولیه جهت بررسی شدت تأثیر سطوح مختلف پارامترهای ورودی بر خروجی‌های ماشین کاری مشخص می‌شود. پس از تعیین پارامترها و سطوح هر یک، باید نحوه انجام آزمایش‌ها تعیین شود. با توجه به تعداد پارامترها و سطوح انتخابی و با توجه به هزینه و زمان بر بودن انجام کامل آزمایش‌ها، در این پژوهش از طراحی آزمایشات کسری تاگوشی استفاده شده است [28]. البته، برای کمینه‌سازی تعداد آزمایش‌ها از آرایه متعامد L_9 (شامل 9 آزمایش برای هر حالت) و تکنیک سطوح تکراری (با تکرار سطح ولتاژ 80) استفاده شده است زیرا که دستگاه اسپارک مورد استفاده دارای تنها 2 سطح ولتاژ (برخلاف سه سطحی بودن دیگر پارامترهای ورودی) است. تکنیک سطوح تکراری به عنوان تکنیک عملیات ساختنی³⁰ برای طراحی آزمایش تاگوشی ارائه گردیده است. در این تکنیک در شرایطی که یکی از متغیرهای آزمایش تعداد سطح کمتری نسبت به سایر متغیرها داشته باشد، طراح می‌تواند یکی از سطوح را تکرار نماید. اینکه کدام سطح تکرار گردد بستگی به میزان اثرگذاری سطوح مختلف بر روی پارامترهای خروجی فرآیند دارد [29]. لازم به توضیح است که تکرار سطح اول برای سطح سوم ولتاژ به دلیل مشاهده تأثیر محسوس‌تر این سطح از ولتاژ (هم‌زمان با تغییر سایر ورودی‌ها) بر روی زبری سطح در طی آزمایش‌های اولیه بوده است. در جدول (4)، پارامترهای ورودی ماشین کاری و سطوح آنها آورده شده است. همچنین، جدول (5) نیز الگوی طراحی و انجام آزمایش‌ها بر روی قطعات را نشان می‌دهد.

جدول (4): متغیرهای ماشین کاری و سطوح انتخابی آن‌ها.

متغیر	سطوح انتخابی
ولتاژ (ولت)	250-80
جریان (آمپر)	20-15-10
زمان روشنی پالس (میکروثانیه)	100-50-35
زمان خاموشی پالس (میکروثانیه)	200-70-30

جدول (5): الگوی انجام آزمایش‌ها بر مبنای رویکرد طراحی تاگوشی.

شماره آزمایش	ولتاژ (V)	جریان (A)	زمان روشنی پالس (μs)	زمان خاموشی پالس (μs)
1	80	10	35	30
2	80	15	50	70
3	80	20	100	200
4	250	10	50	200
5	250	15	100	30
6	250	20	35	70
7	80	10	100	70
8	80	15	35	200
9	80	20	50	30



شکل (4): درصد کاهش زبری سطح EDM شده با استفاده از میدان مغناطیسی نسبت به حالت بدون استفاده از میدان مغناطیسی.

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج آزمایش‌ها

پس از تنظیم پارامترهای ورودی (ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس) برای هر آزمایش و ماشین کاری قطعات از جنس ماده مرکب A413 تقویت شده با $2/5\% \text{Al}_2\text{O}_3$ ، مقدار زبری سطح قطعه کار توسط دستگاه زبری سنج تعیین می‌شود. نتایج حاصل در طی 9 آزمایش طراحی شده در جدول (6) آورده شده است.

جدول (6): زبری سطح ماشین کاری قطعه از جنس ماده مرکب A413 تقویت شده با $2/5\% \text{Al}_2\text{O}_3$ پس از ماشین کاری EDM

شماره	زبری سطح EDM	زبری سطح EDM	درصد کاهش
-------	--------------	--------------	-----------

آزمایش	شده با استفاده از میدان مغناطیسی (μm)	شده بدون استفاده از میدان مغناطیسی (μm)	زبری با استفاده از میدان
1	3/012	4/438	32/13
2	8/678	10/129	14/32
3	10/965	13/318	17/66
4	3/134	4/588	31/69
5	8/284	9/718	14/75
6	7/723	9/177	15/84
7	3/298	4/750	30/56
8	9/098	10/552	13/78
9	12/769	14/483	11/83

همان‌طور در جدول (6) قابل مشاهده است، زبری سطح تعیین شده برای قطعه کار در هر یک از آزمایشات طراحی شده با رویکرد تاگوچی، مقدار کوچک تری را در حالت ماشین کاری تخلیه الکتریکی در حضور میدان الکتریکی در مقایسه با حالت بدون وجود میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. در واقع، این نتایج گویای تأثیر مثبت و قابل توجه میدان مغناطیسی بر روی افزایش کیفیت سطح قطعه کار از جنس ماده مرکب A413 تقویت شده با $2/5\% \text{ Al}_2\text{O}_3$ در حین ماشین کاری تخلیه الکتریکی است.

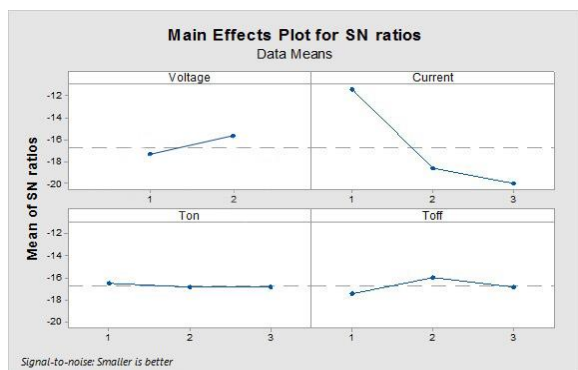
ماشین کاری تخلیه الکتریکی یک فرایند ماشین کاری غیر تماسی است که در آن با تشکیل کانال پلاسما ناشی از یونیزه شدن مواد قطعه کار، ابزار و سیال دی الکتریک موجب افزایش میزان الکترون‌های آزاد و اعمال جرقه در فاصله بین الکتروود ابزار و قطعه کار می‌گردد که فرایند براده برداری را در بردارد. اعمال میدان مغناطیس به فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی موجب تبدیل حرکت آزاد (نامنظم) ذرات باردار داخل کانال پلاسما با یک سرعت مشخص به یک حرکت منظم، به دلیل اعمال نیروی لورنتز³¹، می‌گردد که منجر به محدود کردن گسترش کانال پلاسما و براده برداری مؤثرتر می‌گردد. همچنین از رسوب براده‌ها حین ماشین کاری به دلیل اعمال نیروی ناشی از میدان مغناطیسی و خروج آن‌ها از ناحیه پلاسما اجتناب می‌گردد. بهبود کیفیت سطح ماشین کاری شده ناشی از خروج براده‌های ماشین کاری شده از ناحیه گپ بین الکتروود ابزار و قطعه کار به خاطر اعمال نیروی الکترومغناطیس وارد شده می‌باشد که به یکنواختی و در نتیجه کیفیت سطح بهتر

ماشین کاری منجر می‌شود، بنابراین از دخالت براده‌ها در فرایند تخلیه الکتریکی جلوگیری شده و از چسبیدن براده ناشی از تخلیه الکتریکی مجدد با حضور براده‌های قبلی به سطح ماشین کاری شده جلوگیری می‌شود [30]. به علاوه اعمال میدان مغناطیسی بر موقعیت و توزیع جرقه‌های ماشین کاری با تبدیل انرژی تخلیه جرقه به موج الکترومغناطیس بین الکتروود ابزار و قطعه کار تأثیر می‌گذارد [31] که این امر نیز به یکنواختی بیشتر ماشین کاری سطح در این فرآیند کمک می‌نماید، به طوری که به دلیل توزیع منظم انرژی تخلیه الکتریکی بین یون‌های هجوم برنده به طرف سطح قطعه کار و در نتیجه ایجاد یکنواختی بیشتر در عمق حفره‌های سطح ماشین کاری شده، زبری سطح کاهش می‌یابد.

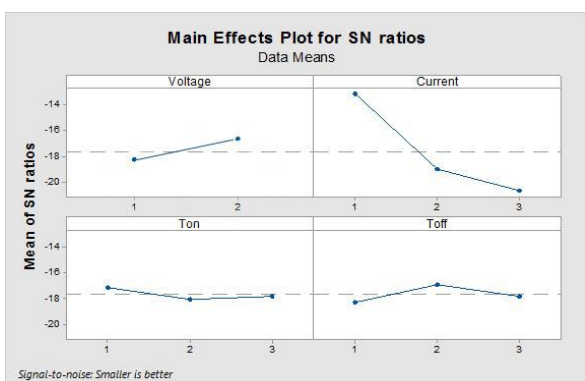
شکل (4) درصد کاهش زبری سطح ماشین کاری شده به روش تخلیه الکتریکی با استفاده از میدان مغناطیسی را نسبت به حالت بدون استفاده از میدان مغناطیسی (حالت معمول) نشان می‌دهد. مطابق شکل (4) میزان کاهش زبری سطح به کمک میدان مغناطیسی 14 تا 32 درصد می‌باشد. همان‌طور که از شکل (4) و جدول (6) مشخص است بیشترین درصد کاهش زبری سطح (30 تا 32 درصد) مربوط به شرایط آزمایش با جریان تنظیمی 10 آمپر (کمترین جریان مورد آزمایش) می‌باشد؛ زیرا در این حالت در هر دو حالت ماشین کاری با و بدون حضور میدان مغناطیسی به دلیل پایین بودن سطح جریان الکتریکی تنظیمی، کیفیت سطح بهتر و در کل میزان زبری سطح در سطوح کم جریان الکتریکی، کمتر می‌باشد (این امر به دلیل کاهش اثرات تخریب سطحی ناشی از جرقه و ماشین کاری ظریف تر در سطوح پایین جریان الکتریکی می‌باشد)؛ بنابراین کاهش زبری سطح ماشین کاری شده در حالت ماشین کاری تخلیه الکتریکی در حضور میدان مغناطیسی درصد بیشتری از زبری سطح پایه (حالت بدون استفاده از میدان مغناطیسی) را به خود اختصاص می‌دهد.

سایر محققان نیز نتایج نسبتاً مشابهی با نتایج تحقیق حاضر به دست آوردند. لین و همکاران³² [32] با استفاده از میدان

شیب کندی افزایش پیدا می کند و در پی آن از سطح 2 به سطح 3، به دلیل افزایش یکنواختی در نحوه توزیع یون های هجوم برنده به سطح قطعه کار شاهد ایجاد بالانس بین دو علت مذکور و در نتیجه عدم تغییر محسوس در کیفیت سطح قطعه کار هستیم. همچنین، در هر دو حالت، افزایش زمان خاموشی پالس از سطح 1 به سطح 2 منجر به افزایش زبری سطح می شود و به دنبال افزایش آن از سطح 2 به سطح 3، به دلیل ایجاد فرصت کافی جهت شستشوی ناحیه ماشین کاری توسط دی الکتریک و در نتیجه ایجاد نظم در حرکت (بدون تداخل و انرژی افزایی) یون های مثبت به طرف سطح قطعه کار موجب بهبود کیفیت سطح قطعه کار می شود.



شکل (5): نمودارهای نسبت سیگنال به نویز زبری سطح برحسب پارامترهای ورودی در حالت ماشین کاری تخلیه الکتریکی با استفاده از میدان مغناطیسی.



شکل (6): نمودارهای نسبت سیگنال به نویز زبری سطح برحسب پارامترهای ورودی در حالت ماشین کاری تخلیه الکتریکی بدون میدان مغناطیسی.

جهت تعیین درجه تأثیر و اهمیت و قابلیت اطمینان هر یک از پارامترهای ورودی بر روی زبری سطح قطعه کار در هر

مغناطیس متوجه شدند که در شرایط شدت جریان ثابت زبری سطح کاهش می یابد. قلی پور و همکاران [13] نیز تأثیر استفاده از میدان مغناطیسی در کاهش زبری سطح ماشین کاری را گزارش نموده اند. آن ها حداکثر بهبود در کیفیت سطح ماشین کاری شده را 30 درصد گزارش نموده اند. بت و همکاران³³ [33] بهبود قابل توجه کیفیت سطح ماشین کاری شده را در ماشین کاری تخلیه الکتریکی در شرایط شدت جریان پایین گزارش نموده اند.

3-2- نسبت سیگنال به نویز

در این بخش با انجام تحلیل نسبت سیگنال به نویز زبری سطح در نرم افزار Minitab به بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی ماشین کاری ماده مرکب A413 تقویت شده با Al_2O_3 2/5% بر روی کیفیت سطح قطعه کار به طور جداگانه و در دو حالت کلی ماشین کاری در حضور میدان مغناطیسی و بدون وجود میدان مغناطیسی پرداخته می شود. لازم به توضیح است برای زبری سطح قطعه کار، افزایش (کاهش) نسبت سیگنال به نویز نشان دهنده کاهش (افزایش) هر یک آنها است. شکل های (5) و (6) بیانگر نتایج نسبت سیگنال به نویز زبری سطح قطعه کار پس از ماشین کاری ماده مرکب A413 تقویت شده با Al_2O_3 2/5% برحسب پارامترهای ورودی به ترتیب در دو حالت با حضور میدان مغناطیسی در اطراف گپ ماشین کاری و بدون حضور میدان مغناطیسی است. همان طور که مشاهده می شود، در هر دو حالت با افزایش ولتاژ و با وجود افزایش انرژی یون های مثبت در برخورد با سطح قطعه کار، مقدار زبری سطح به دلیل توزیع یکنواخت تر جرقه های الکتریکی ایجاد شده بر روی سطح قطعه کار کاهش می یابد. همچنین در هر دو حالت با افزایش شدت جریان، به دلیل افزایش تعداد یون های مثبت و در نتیجه افزایش شدت بمباران یون ها بر سطح قطعه کار و ایجاد حفره های بیشتر بر سطح، زبری سطح افزایش می یابد. با مشاهده نمودار زمان روشنی پالس می توان پی برد که در هر دو حالت با افزایش زمان روشنی پالس از سطح 1 به سطح 2، کانال پلاسما تقویت شده و شدت بمباران یون ها افزایش یافته و مقدار زبری سطح با

در تحقیق حاضر تأثیر پارامترهای ورودی شامل ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس بر روی پارامتر خروجی زبری سطح قطعه کار در طی ماشین کاری ماده مرکب A413 تقویت شده با Al_2O_3 2/5 در دو حالت با استفاده و بدون استفاده از میدان مغناطیسی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. در این راستا، روش طراحی آزمایش تاگوشی با انتخاب آرایه متعامد L9 بکار گرفته شد.

نتایج آزمایشات نشان‌دهنده کاهش زبری سطح تا 32 درصد در حالت ماشین کاری تخلیه الکتریکی در حضور میدان مغناطیسی نسبت به حالت بدون وجود میدان مغناطیسی می‌باشد. این میزان کاهش زبری سطح در پایین‌ترین سطح شدت جریان انتخابی (10 آمپر) به دست آمده است، زیرا در سطوح پایین شدت جریان عدد پایه زبری سطح به دلیل ماشین کاری ظریف‌تر پایین می‌باشد که این امر باعث کاهش درصد قابل توجهی از زبری در حضور میدان مغناطیسی می‌گردد.

بهبود کیفیت سطح ماشین کاری شده ناشی از خروج براده‌های ماشین کاری شده از ناحیه گپ بین الکتروود ابزار و قطعه کار به خاطر اعمال نیروی الکترومغناطیس وارد شده و همچنین تبدیل انرژی تخلیه جرقه به موج الکترومغناطیس بین الکتروود ابزار و قطعه کار می‌باشد که به یکنواختی سطح ماشین کاری شده در فرآیند تخلیه الکتریکی کمک می‌نماید.

با استفاده از نرم‌افزار Minitab نمودارهای نسبت سیگنال به نویز زبری سطح متناظر با هر یک از پارامترهای ورودی ترسیم شدند و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. همچنین جهت تعیین میزان اهمیت و تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر زبری سطح قطعه کار در هر یک از حالت‌های ماشین کاری با حضور میدان مغناطیسی در اطراف محل ماشین کاری و بدون حضور میدان مغناطیسی آنالیز واریانس مقادیر تعیین شده برای زبری سطح قطعه کار در طی آزمایشات طراحی شده به انجام رسید. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که شدت جریان مؤثرترین پارامتر در طی این

یک از حالت‌های ماشین کاری در حضور میدان مغناطیسی و بدون حضور میدان مغناطیسی و مقایسه بین آنها، آنالیز واریانس مقادیر به دست آمده با در نظر گرفتن سطح اطمینان 95٪ با مقدار P کمتر 0/05 در نرم‌افزار Minitab به انجام رسیده است. در جدول‌های (7) و (8) نتایج آنالیز واریانس زبری سطح ماشین کاری تخلیه الکتریکی در دو حالت با حضور و بدون حضور میدان مغناطیسی آورده شده است. همان‌طور که از جدول (7) قابل مشاهده است، شدت جریان، پارامتر ورودی با بالاترین درجه اهمیت و تأثیر بر روی زبری سطح قطعه کار در طی ماشین کاری در حضور میدان مغناطیسی است و پس از آن به ترتیب پارامترهای ولتاژ، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس در رتبه‌های بعدی اهمیت قرار دارند. همچنین با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (8)، در حالت ماشین کاری بدون حضور میدان مغناطیسی نیز بیشترین تأثیر مربوط به شدت جریان است و پس از آن به ترتیب پارامترهای ورودی زمان خاموشی پالس، ولتاژ و زمان روشنی پالس در درجات بعدی تأثیر قرار می‌گیرند.

جدول (7): نتایج آنالیز واریانس زبری سطح در حالت ماشین کاری تخلیه الکتریکی در حضور میدان مغناطیسی.

رتبه تأثیر	P	F	MS	SS	DF	متغیر
2	0/005	14/164	5/0523	5/0523	1	V
1	0/0013	24/272	43/875	87/75	2	I
3	0/058	4/748	1/8907	3/7815	2	T_on
4	0/177	2/248	1/7805	3/561	2	T_off

جدول (8): نتایج آنالیز واریانس زبری سطح در حالت ماشین کاری تخلیه الکتریکی بدون میدان مغناطیسی.

رتبه تأثیر	P	F	MS	SS	DF	متغیر
3	0/0461	5/851	6/3663	6/3663	1	V
1	0/0005	34/673	36/2053	72/4107	2	I
4	0/1099	3/263	2/2461	4/4922	2	T_on
2	0/002	4/194	2/2450	4/4901	2	T_off

4- نتیجه‌گیری

Aravindan, "Multi-characteristics optimization in EDM of NiTi alloy, NiCu alloy and BeCu alloy using Taguchi's approach and utility concept", Alexandria engineering journal, vol. 57, no, 4, pp. 2807-2817, 2018.

[11] ع. ا. لطفی نیستانک و س. دانشمند، "بررسی ماشین کاری تخلیه الکتریکی ماده مرکب آلومینیوم تقویت شده با نانو ذرات اکسید تیتانیوم"، فصلنامه علمی پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره 13، شماره 2، صفحه 27-43، تابستان 1398.

[12] K. D. Chattopadhyay, P. S. Satsangi, S. Verma & P. C. Sharma, "Analysis of rotary electrical discharge machining characteristics in reversal magnetic field for copper-en8 steel system", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 38, no, 9, pp. 925-937, 2008.

[13] A. Gholipoor, H. Baseri, M. Shakeri & M. 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.

[14] A. Gupta & S. S. Joshi, "Modelling effect of magnetic field on material removal in dry electrical discharge machining", Plasma Science and Technology, vol. 19, no, 2, pp. 1-10, 2017.

[15] Z. Zhang, H. Yu, Y. Zhang, K. Yang, W. Li, Z. Chen & G. Zhang, "Analysis and optimization of process energy consumption and environmental impact in electrical discharge machining of titanium superalloys", Journal of Cleaner Production, vol. 198, pp. 833-846, 2018.

[16] A. H. Rouniyar & P. Shandilya, "Fabrication and experimental investigation of magnetic field assisted powder mixed electrical discharge machining on machining of aluminum 6061 alloy", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 233, no, 12, pp. 2283-2291, 2019.

[17] C. C. Feng, L. Li, C. S. Zhang, G. M. Zheng, X. Bai & Z. W. Niu, "Surface characteristics and hydrophobicity of Ni-Ti alloy through magnetic mixed electrical discharge machining", Materials, vol. 12, no, 3, pp. 388, 2019.

[18] M. R. Shabgard, A. Gholipoor & M.

فرایند در هر یک از حالات مذکور بوده است. پارامترهای مؤثر بعدی برای حالت ماشین کاری در حضور میدان مغناطیسی به ترتیب ولتاژ، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس و برای حالت بدون وجود میدان مغناطیسی به ترتیب زمان خاموشی پالس، ولتاژ و زمان روشنی پالس تعیین شده‌اند.

5- مراجع

[1] ف. بیغال، "روش‌های ماشین کاری مدرن"، انتشارات طراح، چاپ ششم، 1389.

[2] D. Naderi & E. Ghasemi, "Fundamentals of machining using spark and wire cut", Tarrah publication, 2009.

[3] A. Erden & S. Bilgin, "Role of impurities in electric discharge machining", in: 21st Conference of Machine Tool Design and Research, London, pp. 345-350, 1980.

[4] H. K. Kansal, S. Singh & P. Kumara, "EDM drilling optimization using stochastic techniques", Procedia CIRP, vol. 67, no, 1, pp. 350-355, 2018.

[5] Q. Y. Ming & L. Y. He, "Thermographic analysis of spark location distribution in sinking EDM", Procedia CIRP, vol. 68, pp. 280-285, 2018.

[6] ه. فتاحی و ع. پاک، "بررسی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک امواج فراصوتی با استفاده از مخلوط نانو پودرهای اکسید تیتانیوم، اکسید روی و اکسید آلومینیوم در دی‌الکتریک"، نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره 50، شماره 3، صفحه 541-550، 1397.

[7] S. S. Sidhu, A. Batish & S. Kumar, "Improving EDM performance by adapting gap servo-voltage to machining state", Journal of Manufacturing Processes, vol. 37, pp. 101-113, 2019.

[8] B. Mohan, A. Rajadurai & K. G. Satyanarayana, "Study on micro reciprocated wire-EDM for complex indexing structure", Procedia CIRP, vol. 68, pp. 120-125, 2018.

[9] P. Kuppan, A. Rajadurai & S. Narayanan, "Pulse efficiency and gap status of rotary ultrasonic assisted electrical discharge machining and EDM milling", Procedia CIRP, vol. 68, pp. 783-788, 2018.

[10] A. Dev, K. M. Patel, P. M. Pandey & S.

Journal of Mechanical and Materials Engineering, vol. 15, no, 1, pp.1-11, 2020.

[27] A. Data, "NADCA product specification standards for die castings", Arlingt. Height. NADCA, 2003.

[28] ب. مسعودی و س. دانشمند، "بررسی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، بر روی ماده مرکب پایه آلومینیوم 2024 با استفاده از تحلیل مقدار کل نرمال شده پارامترها (TNQL) و نسبت سیگنال به نویز (S/N)"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره 11، شماره 1، صفحه 91-110، 1396.

[29] R. K. Roy, "A primer on the Taguchi method", Society of Manufacturing Engineers (SME), 2010.

[30] Y.C. Lin, H.S. Lee, "Machining characteristics of magnetic force-assisted EDM", International journal of machine tools and manufacture, vol. 48, no, 11, pp.1179-1186, 2008.

[31] H. Qiang, H. Yong & Z. Wansheng, "Research of two-dimension EDM spark locations detection using electromagnetic method", Measurement, vol. 31, no, 2, pp.117-122, 2002.

[32] Y. C. Lin, F. P. Chuang, A. Wang & H. M. Chow, "Machining characteristics of hybrid EDM with ultrasonic vibration and assisted magnetic force", International journal of precision engineering and manufacturing, vol. 15, no, 6, pp.1143-1149, 2014.

[33] G. Bhatt, A. Batish & A. Bhattacharya, "Experimental investigation of magnetic field assisted powder mixed electric discharge machining", Particulate Science and Technology, vol. 33, no, 3, pp.246-256, 2015.

6- پی‌نوشت

[1] Electrical Discharge Machining (EDM)

[2] Relaxation Circuit

[3] Erden & Bilgin

[4] Material Removal Rate (MRR)

[5] Kansal et al

[6] Ming & He

[7] Surface Roughness (SR)

[8] Tool Wear Rate (TWR)

[9] Sidhu et al

[10] Metal Matrix Composite

[11] Mohan et al

[12] Kuppan et al

[13] Dev et al

[14] Chattopadhyay et al

[15] Gupta & Joshi

[16] Zhang et al

[17] Rouniyar & Shandilya

[18] Feng et al

Mohammadpourfard, "Investigating the effects of external magnetic field on machining characteristics of electrical discharge machining process, numerically and experimentally", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 102, pp. 55-65, 2019.

[19] H. Beravala & P. M. Pandey, "Modelling of material removal rate in the magnetic field and air-assisted electrical discharge machining", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 234, no, 7, pp. 1286-1297, 2020.

[20] S. Kumar, M. Goud & N. M. Suri, "Experimental investigation of magnetic-field-assisted electric discharge machining by silicon-based dielectric of Inconel 706 superalloy", Sādhanā, vol. 45, no, 253, pp. 1-8, 2020.

[21] A. K. Rouniyar & P. Shandilya, "Experimental investigation on recast layer and surface roughness on aluminum 6061 alloy during magnetic field assisted powder mixed electrical discharge machining", Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 29, pp. 7981-7992, 2020.

[22] M. Y. Khan, P. S. Rao & B. S. Pabla, "An experimental study on magnetic field-assisted-EDM process for Inconel-625", Advances in Materials and Processing Technologies, pp.1-27, 2022.

[23] S. S. Zabihi, H. Soleimanimehr, S. E. Haghghi & A. Maghsoudpour, "Design and Fabrication of Magnetic Field System for Improving EDM Process", Advanced Journal of Science and Engineering, vol. 3, no, 1, pp.55-64, 2022.

[24] T. R. Ablyaz, P. S. Bains, S. S. Sidhu, K. R. Muratov & E. S. Shlykov, "Impact of magnetic field environment on the EDM performance of Al-SiC metal matrix composite", Micromachines, vol. 12, no, 5, pp.469, 2021.

[25] S. Kumar, M. Goud & N. M. Suri, "An investigation of magnetic-field-assisted EDM by silicon and boron based dielectric of Inconel 706", Silicon, vol. 13, no, 12, pp.4747-4755, 2021.

[26] M. Shahbazi Dastjerdi, A. Mokhtarian & P. Saraeian, "The effect of alumina powder in dielectric on electrical discharge machining parameters of aluminum composite A413-Al2O3 by the Taguchi method, the signal-to-noise analysis and the total normalized quality loss", International

- [19] Plasma Flushing Efficiency
- [20] Recast Layer
- [21] Beravala & Pandey
- [22] Kumar et al
- [23] Regression
- [24] Khan et al
- [25] Ablyaz et al
- [26] Tesla
- [27] Gauss
- [28] Signal to Noise (S/N)
- [29] Analysis of Variance (ANOVA)
- [30] Dummy Treatment
- [31] Lorentz Force
- [32] Lin et al
- [33] Bhatt et al