



Experimental Investigation of Machining Parameters of Near Dry Electrical Discharge Machining (EDM) of Mo40 Steel Using Vegetable Oil

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Nasri M.¹ MSc,

Rouhani Esfahani E.^{*2} PhD

How to cite this article

Nasri M, Rouhani Esfahani E. Experimental Investigation of Machining Parameters of Near Dry Electrical Discharge Machining (EDM) of Mo40 Steel Using Vegetable Oil. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(6):1539-1549.

ABSTRACT

Near dry Electrical Discharge Machining (EDM) is one of the advanced methods for removing materials environmentally friendly. Combining the minimum quantity of lubricant (MQL) and vegetable oil not only reduces health hazards and costs, but also improves the process. This research has been conducted on Mo40 steel and the mixture of vegetable oil and air has been used as dielectric. The effect of electric current variables, open circuit voltage, pulse on and off time and air pressure were studied on material removal rate (MRR), tool wear rate (TWR), and surface roughness (Ra), using the method of designing the central composition of the response surface. The results showed that the increase in ampere, pulse on time and open circuit voltage increase the MRR; also, increase of the pulse off time improves washing of the environment that prevent short-circuit and all had an effect on the MRR. Also, increasing the ampere and open circuit voltage leads to an increase in the TWR and increasing the pulse on time, as well as the increase in pulse off time, reduces the TWR. Increasing the air pressure reduced the dielectric density and increased the TWR. On the other hand, the increase in the ampere and the pulse on time as well as the open circuit voltage increased Ra and increase in the pulse off time and the air pressure reduced Ra. This method has led to an increase of 200% in MRR, 30% reduction in TWR, and 60% reduction in Ra compared to the kerosene immersion method.

Keywords Near Dry Electrical Discharge Machining; Response Surface Method; Air Pressure; Vegetable Oil

¹Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

²Modern Manufacturing Technologies Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

*Correspondence

Address: University Square, Najafabad, Isfahan, Iran. Postal Code: 8514143131

Phone: -

Fax: -

e.rouhani@pmc.iaun.ac.ir

Article History

Received: May 05, 2018

Accepted: December 22, 2018

ePublished: June 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Electrical discharge machining (EDM): Practices in Malaysian industries and possible change towards green manufacturing [2] Study on the dry electrical discharge machining [3] Assessment of operational feasibility of waste vegetable oil based bio-dielectric fluid for sustainable electric discharge machining (EDM) [4] Investigations on technical feasibility of Jatropha curcas oil based bio dielectric fluid for sustainable electric discharge machining (EDM) [5] Investigation on the influence of different types of dielectrics in electrical discharge machining [6] Investigation of biodiesel dielectric in sustainable electrical discharge machining [7] Investigation of near dry EDM compared with wet and dry EDM processes [8] Research on material removal rate of powder mixed near dry electrical discharge machining [9] Machining efficiency of powder mixed near dry electrical discharge machining based on different material combinations of tool electrode and workpiece electrode [10] Near dry electrical discharge machining [11] Deep-type hole machining by inner jetted aerosol dielectric ablation [12] Experimental investigation on near-dry EDM using glycerin-air mixture as dielectric medium [13] Investigation and study the effect of the gas type and pressure on the performance of near dry electrical discharge machining [14] Investigation and study of the tool material and the dielectric fluid rate effect on the performance of near dry electrical discharge machining [15] Experimental characterization of material removal in dry electrical discharge drilling [16] Optimization of material removal rate in dry electro-discharge machining process [17] Study of dry EDM with oxygen-mixed and cryogenic cooling approaches

مطالعه تجربی متغیرهای خروجی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نیمه‌خشک فولاد Mo40 با استفاده از روغن گیاهی

مهران نصری MSc

گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

احسان روحانی‌اصفهانی PhD

مرکز تحقیقات فناوری‌های نوین ساخت و تولید، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

چکیده

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نیمه‌خشک یکی از روش‌های نوین براده‌برداری سازگار با محیط زیست است. با ترکیب روش حداقل مقدار روانکار و روغن گیاهی علاوه بر کاهش مضرات سلامتی و کاهش هزینه‌ها به بهبود فرآیند منجر می‌شود. این تحقیق روی فولاد Mo40 صورت گرفت و از ترکیب روغن گیاهی و هوا به عنوان دی‌الکتریک استفاده شد. اثر متغیرهای جریان الکتریکی، ولتاژ مدار باز، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و فشار هوا بر نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح و با استفاده از روش طراحی ترکیب مرکزی سطح پاسخ مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که افزایش آمپر، زمان روشنی پالس، ولتاژ مدار باز موجب دوام کانال پلاسما و افزایش نرخ براده‌برداری شده و زمان خاموشی پالس با شست‌وشوی بهتر محیط از ذرات اتصال کوتاه را کمتر کرده و همگی منجر به تاثیر بر نرخ براده‌برداری شده‌اند. همچنین افزایش متغیرهای آمپر و ولتاژ مدار باز منجر به افزایش سایش الکترود ابزار شده و افزایش زمان روشنی پالس و نیز افزایش زمان خاموشی پالس، کاهش نرخ سایش ابزار را به همراه دارد. افزایش فشار هوا موجب کاهش تراکم دی‌الکتریک و افزایش نرخ سایش ابزار شد. از طرف دیگر افزایش آمپر و زمان روشنی پالس و همچنین ولتاژ مدار باز موجب افزایش زبری سطح، افزایش زمان خاموشی پالس و فشار هوا به علت شست‌وشوی بهتر موجب کاهش زبری سطح شدند. انتخاب این روش منجر به افزایش ۲۰۰٪ میزان نرخ براده‌برداری و کاهش ۳۰٪ نرخ سایش ابزار و کاهش ۶۰٪ زبری سطح نسبت به روش غوطه‌وری نفت سفید شده است.

کلیدواژه‌ها: ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نیمه‌خشک، روش سطح پاسخ، فشار هوا، روغن گیاهی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۱

*نویسنده مسئول: e.rouhani@pmc.iaun.ac.ir

۱- مقدمه

در حال حاضر تولید سبز یک استراتژی منطقی و درازمدت برای رقابت در فضای کسب و کار است. تولیدات پاک روند جدید تولیدی هستند که حتی قطعات فلزی را در بر می‌گیرند. محققان همواره در حال توسعه راه‌های تولید سازگار با محیط زیست و در عین حال حفظ الزامات فنی از جمله نرخ براده‌برداری بالا، افزایش دقت تولیدات، کاهش نرخ سایش ابزار و همچنین کاهش زبری سطح هستند. از طرف دیگر امروزه با پیشرفت در زمینه ماشین‌کاری مواد پیشرفته، روش‌های ماشین‌کاری غیرتماسی بسیار مورد توجه قرار گرفته است و محققان همواره درصدد تلاش برای تکمیل این فرآیندها بوده‌اند. یکی از روش‌های تولید مورد مطالعه محققان، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی است که به علت استفاده از مشتقات هیدروکربنی نفت (مانند نفت سفید- پارافین- روغن ترانس و غیره) به عنوان دی‌الکتریک و همچنین تجزیه آنها در دمای بالا و بروز گازهای خطرناک و سمی برای محیط زیست و انسان و همچنین احتمال خطرات آتش‌سوزی و جانی به عنوان یک روش مضر و ناپاک تولیدی شناخته می‌شود^[1]. همه موارد فوق باعث گسترش انواع دی‌الکتریک‌ها از جمله روش‌های خشک (هوا،

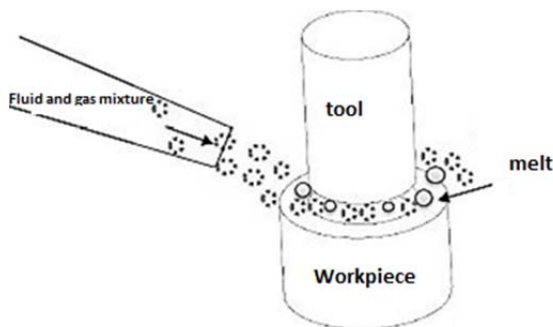
نیتروژن و غیره) و نیمه‌خشک با استفاده از ترکیب انواع سیالات و گازها^[2]، انواع بیودیزل‌ها و روغن‌های گیاهی^[3] و غیره شده‌اند. جانک و همکاران^[3] به مطالعه روی قابلیت عملیاتی جایگزین کردن روغن‌های برگشت‌پذیر گیاهی با دی‌الکتریک‌های معمول در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی پرداختند و دریافتند که روغن‌های گیاهی مصرف‌شده می‌تواند جایگزین خوبی به جای نفت سفید باشد و مشاهده کردند که نرخ براده‌برداری روغن گیاهی برگشت‌پذیر، بیشتر از نفت است. در تحقیق دیگری همان محققان^[4] به بررسی تاثیر دی‌الکتریک روغن کرچک در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی پرداختند و مشاهده کردند که روغن کرچک نسبت به نفت سفید، نرخ براده‌برداری بالاتری را ایجاد می‌کند و کاملاً پایدار و با محیط‌زیست سازگار است و می‌تواند جایگزین خوبی به جای نفت سفید باشد. ساداکاپن و همکاران^[5] به بررسی تاثیر انواع دی‌الکتریک‌ها در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلومینیوم 6063 پرداختند و دریافتند که بیودیزل‌ها می‌توانند جایگزین خوبی به جای روغن‌های هیدروکربنی از جمله نفت یا روغن ترانس شود و می‌توانند به خوبی شرایط ماشین‌کاری مناسب را به وجود آورند. کوئگ و همکاران^[6] به بررسی در مورد استفاده از بیودیزل‌ها در ماشین‌کاری پایدار ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی پرداختند و به برتری جایگزینی روغن کانولا و آفتاب‌گردان به جای دی‌الکتریک‌های هیدروکربنی با توجه به نرخ براده‌برداری و سایش ابزار و مشکلات محیط زیست پی بردند، مشاهده کردند که نرخ براده‌برداری روغن آفتاب‌گردان تقریباً دوبرابر دی‌الکتریک‌های سنتی است. قلی‌پور و همکاران^[7] به بررسی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نیمه‌خشک در مقایسه با خشک و تر پرداختند و دریافتند که ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نیمه‌خشک با ترکیب هوا و آب دیونیزه روی فولاد spk شرایط ماشین‌کاری بهتری را ایجاد می‌کند. زوبای و همکاران^[8, 9] به تحقیق روی نرخ براده‌برداری ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی دی‌الکتریک سه‌فازی (گاز و مایع و پودر) بر جنس‌های مختلف قطعه‌کار با جنس ابزارهای مختلف پرداختند و دریافتند که با افزایش جریان الکتریکی، زمان روشنی پالس، دبی، فشار هوا، زمان خاموشی پالس و سرعت چرخش ابزار، نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد و با افزایش مقدار غلظت پودر ابتدا نرخ براده‌برداری افزایش و سپس کاهش می‌یابد. کاوو و همکاران^[10] روی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نیمه‌خشک تحقیق کرده و دریافتند که با تلفیق دستگاه کمترین مقدار روان‌کار (MQL) و سوراخکاری ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و نیز فرآیند وایرکات می‌توان در حالت نیمه‌خشک شرایط ماشین‌کاری و تلرانس‌های ابعادی را بهبود بخشید. ساو و همکاران^[11] روی سوراخکاری عمیق با ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و جت داخلی با دی‌الکتریک آروسل آب و اکسیژن مطالعه کردند و دریافتند که با این روش علاوه بر کاهش فرسایش ابزار می‌توان سوراخ‌های عمیق را به خوبی تولید کرد. دهاکار و همکاران^[12] روی ترکیب گلسیرین و هوا به عنوان دی‌الکتریک نیمه‌خشک در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی فولاد تندبر گرید ۲ تحقیق کردند و دریافتند که نرخ براده‌برداری دی‌الکتریک انتخاب‌شده بالاتر از هوا است. رجیب‌نسب و همکاران^[13, 14] به بررسی ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی نیمه‌خشک فولاد Mo40 با سه ابزار مسی، مس-کروم و مس-قلع پرداختند و دریافتند که با افزایش دبی و فشار سیال، نرخ براده‌برداری با ابزار مسی افزایش می‌یابد. گوپند/ن و همکاران^[15] روی نرخ براده‌برداری در سوراخکاری با روش تخلیه الکتریکی خشک تحقیق کردند و به تاثیر ولتاژ گپ، جریان الکتریکی تخلیه و

با توجه به پژوهش‌های گذشته در رابطه با روغن‌های گیاهی به‌علت خواص خوب ماشین‌کاری روغن آفتاب‌گردان از جمله نرخ براده‌برداری بالا، نرخ سایش کم ابزار، زبری سطح کمتر در مقایسه با دی‌الکتریک‌های متداول، عدم ایجاد مشکل برای محیط زیست و سلامتی، نقطه اشتعال بالاتر، ویسکوزیته پایین، تعلیق‌ذرات ناخالص، عدم صدمه‌زدن به اجزای ماشین، عمر بالا، دسترسی آسان و همچنین کم‌هزینه بودن به‌عنوان سیال پایه انتخاب شد که مشخصات آن در جدول ۱ ذکر شده است [6].

در آزمایش‌های ماشین‌کاری، به‌منظور استفاده از روش نیمه‌خشک با استفاده از دستگاه حداقل مقدار روان‌کار، هوا با روغن آفتاب‌گردان مخلوط و توسط نازل مربوطه به‌عنوان دی‌الکتریک، به محل ماشین‌کاری پاشش شد و عمل شست‌وشو و دورکردن براده‌ها صورت گرفت (شکل ۱).

جدول ۱) مشخصات روغن آفتاب‌گردان [6]

مشخصه	روغن آفتاب‌گردان
نقطه‌جوش (°C)	۲۷۴
ویسکوزیته	۳۲/۶
چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۰/۹۲
ثابت دی‌الکتریک	۳



شکل ۱) شماتیک چیدمان آزمایش‌ها [14]

در دستگاه حداقل مقدار روان‌کار با استفاده از ترکیب سیال و گاز با استفاده از کنترل دبی و فشار سیال-گاز و همچنین نازل مخصوص و افزایش فشار می‌توان مخلوط گاز و سیال را به‌سرعت از سطح مقطع کوچکی عبور داد و این فرآیند موجب پودرشدن سیال و ترکیب آن با گاز هنگام خروج از نازل و همچنین کاهش مصرف سیال می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود دستگاه مورد استفاده در این پژوهش ساخت مرکز تحقیقات فناوری‌های نوین ساخت و تولید دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد (MQL-P02) است. این دستگاه شیرهای کنترل دبی هوا و سیال، فشار هوا و فرکانس دارد و دارای دو نازل خروجی با سطح مقطع‌های قابل تغییر است. در این پژوهش سطح مقطع نازل خروجی دستگاه کمترین مقدار روان‌کار به‌علت خروج روان روغن ۲ میلی‌متر و ثابت انتخاب شده است.

برای این که بتوان آزمایش‌ها را یکسان و با کمترین خطا انجام داد از یک سه‌نظام کوچک ۱۰ میلی‌متری همراه با دنباله‌ای از جنس Mo40 که در محور عمودی دستگاه بسته می‌شود، استفاده شد و انجام باز و بست ابزار را آسان‌تر ساخت و همچنین با استفاده از گیره کوچک با موقعیت‌دهنده V شکل و قراردادن یک تیغچه چهارگوش سنگ‌زده زیر قطعه‌کار نیاز یکسان بسته‌شدن قطعات را برآورده ساخت.

سرعت چرخش الکتروود و همچنین فشار هوای درون ابزار بر نرخ براده‌برداری فولاد ۳۰۴ پی بردند. قریشی و همکاران [16] روی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی خشک فولاد آلیاژی با استفاده از دی‌الکتریک گاز اکسیژن تحقیق کردند و دریافتند که با افزایش سرعت دوران الکتروود، فشار گاز، جریان الکتریکی، ولتاژ گپ و نسبت زمان روشنی به خاموشی پالس، نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد. لیکو/ینگ و همکاران [17] ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی خشک و ترکیب اکسیژن با روش فریزکردن را بررسی کردند و دریافتند که با استفاده از اکسیژن، نرخ براده‌برداری دوبرابر می‌شود.

محققان همواره در تلاش هستند که بهترین دی‌الکتریک را با توجه به شرایط ماشین‌کاری انتخاب کنند، در نتیجه بهتر است به‌جای استفاده از مشتقات نفتی از روغن‌های گیاهی که از نظر مسایل محیط زیستی و سلامتی ضرر به‌مراتب کمتری دارند، استفاده کرد. از آن بهتر استفاده کمینه از این روغن‌ها به‌علت کاهش هزینه‌ها، کاهش مضرات زیست محیطی و غیره است که با استفاده از روش نیمه‌خشک (استفاده از دستگاه کمترین مقدار روان‌کار) و ترکیب هوا با روغن گیاهی هم می‌توان فرآیند را بهبود و هم به این امر تحقق بخشید. در این تحقیق به بررسی استفاده از روش نیمه‌خشک ترکیب هوا با روغن گیاهی با استفاده از ترکیب روغن آفتاب‌گردان و هوا به‌عنوان دی‌الکتریک پرداخته شده و با تغییر پارامترهای ولتاژ مدار باز، جریان الکتریکی، فشار هوا و زمان خاموشی و روشنی پالس میزان تغییرات نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار و میزان زبری سطح قطعه‌کار از جنس فولاد Mo40 با ابزاری از جنس مس بررسی و تحلیل می‌شود. در این تحقیق با استفاده از قرارداری نازل دستگاه حداقل مقدار روان‌کار کنار قطعه کار شست‌وشو و پاشش دی‌الکتریک به‌صورت خارجی با فشار انجام می‌شود.

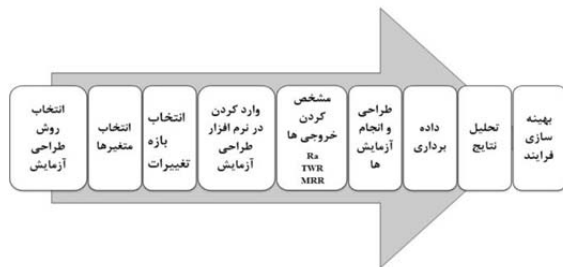
آزمایش‌ها با نرم‌افزار طراحی آزمایش دیزاین اکسپرت ۷ و با روش سطح پاسخ (RSM) با ترکیب مرکزی (CCD) در سه سطح طراحی می‌شوند و در مرحله بعدی ۵۰ آزمایش طراحی شده و بعد از انجام داده‌ها با همان نرم‌افزار تحلیل می‌شوند، بهترین رابطه ورودی‌های فرآیند با خروجی‌های آن مشخص شده و بهینه‌ترین حالت پارامترهای ورودی با توجه به حداکثر نرخ براده‌برداری، کمترین نرخ سایش ابزار و کمترین زبری سطح انتخاب می‌شود.

۲- مواد و روش انجام آزمایش‌ها

در این مقاله به‌ازای هر آزمایش یک الکتروود ابزار و یک قطعه‌کار استفاده می‌شود. الکتروودهای مورد استفاده برای هر آزمایش از استوانه توپر خالص مسی به قطر ۸ میلی‌متر و طول ۲۵ میلی‌متر با چگالی ۸/۹۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب و قطعه‌کار از جنس فولاد آلیاژی Mo40 با قطر ۲۵ میلی‌متر و طول ۱۰ میلی‌متر با چگالی ۷/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. الکتروودها و قطعه‌کارها بعد از برش‌کاری با ارنواری، کف‌تراشی و سمباده‌زنی شدند، قبل و بعد از انجام آزمایش‌ها تمامی قطعه‌کارها و الکتروودها با ترازوی دیجیتال مدل AND-GF300 با قدرت تشخیص ۰/۰۱ گرم وزن و با دستگاه زبری‌سنج با قدرت تشخیص ۰/۰۰۱ میکرومتر زبری متوسط قسمت ماشین‌کاری‌شده اندازه‌گیری شد.

تمام آزمایش‌ها روی دستگاه اسپارک پیش‌رانه ۵۰۱ که به ژنراتور ایزوپالس مجهز است، انجام شد. جریان نامی دستگاه از ۳۳/۰ تا ۵۰ آمپر، زمان روشنی پالس از ۳ تا ۱۵۰ میکروثانیه، زمان خاموشی پالس از ۶ تا ۸۰۰ میکروثانیه و ولتاژ مدار باز آن از ۱۰۰ تا ۲۲۰ ولت به‌صورت پله‌ای می‌توانند تنظیم شوند.

بعد از بسته شدن هر قطعه کار و ابزار توسط چهار پیچ روی محور عمودی دستگاه و استفاده از ولتاژ مدار باز ۲۲۰ ولت، جریان ۳۳/۰ آمپر، زمان روشنی پالس ۳ میکروثانیه و زمان خاموشی پالس ۶ میکروثانیه بدون حضور دی الکتریک براساس میزان جرقه زدن هر طرف، قطعه کار و ابزار نسبت به هم تراز شدند (شکل ۳).



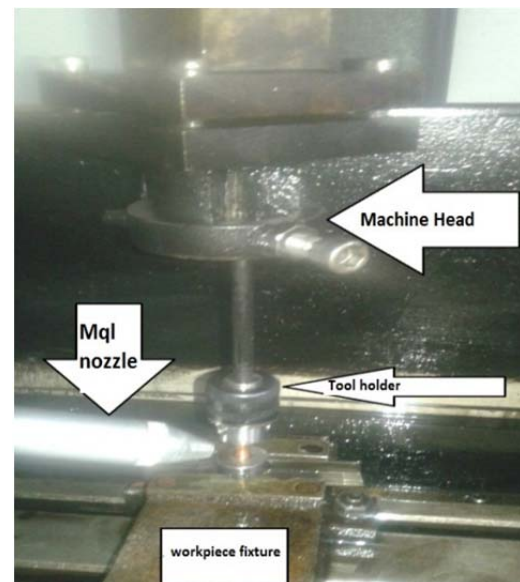
شکل ۴) مسیر طراحی و انجام آزمایش‌ها

جدول ۲) طراحی آزمایش‌ها

شماره آزمایش	جریان الکتریکی (آمپر)	خاموشی پالس (میکروثانیه)	روشنی پالس (میکروثانیه)	فشار هوا (بار)	ولتاژ مدار باز (ولت)
۱	۳	۱۰۰	۸۰۰	۴	۱۰۰
۲	۹	۴۰۰	۲۰۰	۴	۱۰۰
۳	۹	۴۰۰	۲۰۰	۲	۲۲۰
۴	۳	۲۰۰	۴۰۰	۳	۱۶۰
۵	۹	۲۰۰	۴۰۰	۳	۱۶۰
۶	۳	۴۰۰	۲۰۰	۲	۱۰۰
۷	۳	۴۰۰	۸۰۰	۲	۲۲۰
۸	۶	۲۰۰	۴۰۰	۳	۱۶۰
۹	۶	۴۰۰	۴۰۰	۳	۱۶۰
۱۰	۳	۱۰۰	۸۰۰	۲	۲۲۰
۱۱	۶	۲۰۰	۴۰۰	۲	۱۶۰
۱۲	۹	۱۰۰	۸۰۰	۴	۲۲۰
۱۳	۳	۴۰۰	۲۰۰	۴	۲۲۰
۱۴	۹	۱۰۰	۸۰۰	۲	۲۲۰
۱۵	۳	۴۰۰	۸۰۰	۴	۲۲۰
۱۶	۶	۲۰۰	۸۰۰	۳	۱۶۰
۱۷	۹	۴۰۰	۸۰۰	۴	۲۲۰
۱۸	۳	۱۰۰	۸۰۰	۴	۲۲۰
۱۹	۹	۱۰۰	۲۰۰	۲	۲۲۰
۲۰	۹	۴۰۰	۸۰۰	۲	۱۰۰
۲۱	۶	۲۰۰	۴۰۰	۳	۱۶۰
۲۲	۶	۲۰۰	۴۰۰	۳	۱۶۰
۲۳	۹	۱۰۰	۲۰۰	۴	۲۲۰
۲۴	۹	۱۰۰	۲۰۰	۲	۱۰۰
۲۵	۳	۱۰۰	۲۰۰	۴	۲۲۰
۲۶	۹	۱۰۰	۸۰۰	۲	۱۰۰
۲۷	۳	۴۰۰	۸۰۰	۴	۱۰۰
۲۸	۹	۴۰۰	۲۰۰	۲	۱۰۰
۲۹	۳	۱۰۰	۸۰۰	۲	۱۰۰
۳۰	۳	۴۰۰	۲۰۰	۲	۲۲۰
۳۱	۹	۴۰۰	۸۰۰	۲	۲۰۰
۳۲	۳	۱۰۰	۲۰۰	۲	۱۰۰
۳۳	۶	۲۰۰	۲۰۰	۳	۱۶۰
۳۴	۶	۲۰۰	۴۰۰	۳	۲۲۰
۳۵	۳	۱۰۰	۲۰۰	۴	۱۰۰
۳۶	۹	۴۰۰	۲۰۰	۴	۲۲۰
۳۷	۶	۱۰۰	۴۰۰	۳	۱۶۰
۳۸	۹	۴۰۰	۸۰۰	۴	۱۰۰
۳۹	۶	۲۰۰	۴۰۰	۴	۱۶۰
۴۰	۶	۲۰۰	۴۰۰	۳	۱۶۰
۴۱	۶	۲۰۰	۴۰۰	۳	۱۰۰
۴۲	۶	۱۰۰	۲۰۰	۲	۲۲۰
۴۳	۹	۱۰۰	۲۰۰	۴	۱۰۰
۴۴	۶	۲۰۰	۴۰۰	۳	۱۶۰
۴۵	۳	۴۰۰	۲۰۰	۴	۱۰۰
۴۶	۶	۲۰۰	۴۰۰	۳	۱۶۰
۴۷	۳	۴۰۰	۸۰۰	۲	۱۰۰
۴۸	۹	۱۰۰	۸۰۰	۴	۱۰۰
۴۹	۶	۲۰۰	۴۰۰	۳	۱۶۰
۵۰	۶	۲۰۰	۴۰۰	۳	۱۶۰



شکل ۲) دستگاه حداقل مقدار روان کار استفاده شده در آزمایش‌ها



شکل ۳) ابزار و قطعه کار بسته شده برای آزمایش عدم توازی

۳- طراحی آزمایش

مسیر طراحی و انجام آزمایش‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده است.

با توجه به اینکه برای بررسی این تحقیق به تغییرات ۵ متغیر در سه سطح نیاز است و اگر قرار باشد آزمایش‌ها به طور کامل انجام شود به ۲۴۳ (۳^۵) آزمایش و نمونه نیاز است که این امر به خاطر زمان بردن و صرف هزینه‌های زیاد ممکن نیست، از این رو با استفاده از علم طراحی آزمایش و روش آماری طراحی آزمایش سطح پاسخ با ترکیب مرکزی در نرم افزار طراحی آزمایش ۵۰ آزمایش طراحی شده و در جدول ۲ گردآوری شده است. در این طراحی آزمایش، ۸ نقطه مرکزی و ۱ نقطه ستاره‌ای و ۱ نقطه فاکتوریل وجود دارد. با استفاده از محدودیت‌های دستگاه‌های مورد آزمایش دامنه پارامترهای ورودی مشخص شده است. دامنه تغییرات پارامترهای ورودی در جدول ۳ و پارامترهای ثابت در طول فرآیند در جدول ۴ قابل مشاهده است.

روشنی پالس، T_{off} نشان‌دهنده زمان خاموشی پالس، P نشان‌دهنده فشار هوا است که تغییرات آن تأثیر مستقیم روی دبی هوای خروجی می‌گذارد، V_{opc} نشان‌دهنده ولتاژ مدار باز و Ra نشان‌دهنده زبری سطح بر حسب میکرومتر است.

تابع γ بیانگر تابع انتقال تطبیقی است و تنها MRR به تابع انتقال رادیکال برای مطابقت بیشتر نیاز داشت.

پارامترهای موثر در مدل تطبیق‌شده در جدول ۵ مشخص شده است و این پارامترها سبب تغییرات اساسی در خروجی‌های فرآیند می‌شوند.

جدول ۵) پارامترهای مدل‌های تطبیق‌شده بر داده‌ها

MRR	TWR	Ra
درجه ۲	درجه ۲	درجه ۲
۲	۲	۲
ضریب تعیین برازش	ضریب تعیین برازش	ضریب تعیین برازش
۰/۹۹۳۸	۰/۸۶۵۷	۰/۹۷۶۹
سطح معنی‌داری (کمتر از ۰/۰۵)	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
سطح معنی‌داری عدم برازش (بیشتر از ۰/۰۵)	۰/۰۶۶۰	۰/۰۶۵۳
تابع انتقال داده	ندارد	ندارد
$\gamma = 0.5$	$\gamma = 1$	$\gamma = 1$
I T_{on} V_{opc} $I \times T_{off}$ $I \times V_{opc}$ $T_{on} \times V_{opc}$ $T_{off} \times V_{opc}$ I^2 $T_{on} \times P$ T_{off}^2	I T_{on} V_{opc} $I \times P$ $I \times V_{opc}$ $T_{off} \times V_{opc}$ $T_{on} \times T_{off}$ $T_{on} \times V_{opc}$ $T_{off} \times V_{opc}$ I^2 $T_{on} \times P$ P T_{off}	I T_{on} V_{opc} $I \times V_{opc}$ I^2 T_{off}^2 $I \times T_{off}$ $I \times T_{on}$ V_{opc}^2 T_{on}^2 $T_{on} \times P$ P T_{off}

۴-۱- تحلیل نرخ براده‌برداری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از جدول آنالیز واریانس و اصلاح مدل، معادله رگرسیون منطبق‌شده با مدل اصلاح‌شده برای نرخ براده‌برداری بر حسب متغیرهای ورودی فرآیند به‌صورت رابطه ۳ خواهد بود. با جایگذاری پارامترهای ورودی می‌توان نرخ براده‌برداری را تقریب زد:

$$\begin{aligned} \text{Sqrt(MRR)} = & -0.97134 + 0.18774 \times I \\ & +1.75459E-3 \times T_{on} \\ & -4.05746E-3 \times V_{opc} \\ & +9.43186E-5 \times I \times T_{off} \\ & -3.00304E-4 \times I \times V_{opc} \\ & -5.46335E-6 \times T_{off} \times V_{opc} \\ & -7.58933E-6 \times T_{on} \times V_{opc} \\ & +0.012373 \times I^2 \\ & -7.55882E-6 \times T_{off}^2 \end{aligned}$$

۴-۱-۱- تأثیر همزمان آمپر و خاموشی پالس بر نرخ براده‌برداری

همان‌طور که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود وقتی سه متغیر ولتاژ مدار باز، فشار هوا و زمان روشن‌پالس در حالت میانه قرار دارند با افزایش همزمان آمپر و افزایش زمان خاموشی پالس تا ۲۵۰ میکروثانیه نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد و حداکثر پاسخ در حد میانه زمان خاموشی پالس مشاهده می‌شود چرا که افزایش آمپر باعث تشکیل کانال پلاسما بزرگ‌تر و قوی‌تر و همچنین

جدول ۳) پارامترهای ورودی و محدوده تغییرات آنها

متغیر	واحد	بازه تغییرات
α	-	+۱
فشار هوا	بار	۴
جریان الکتریکی	آمپر	۹
زمان روشن‌جرقه	میکروثانیه	۸۰۰
زمان خاموشی جرقه	میکروثانیه	۴۰۰
ولتاژ مدار باز	ولت	۲۲۰

جدول ۴) پارامترهای ثابت

پارامتر ثابت	سطح آزمایش
زمان انجام آزمایش‌ها برای هر نمونه	۲ دقیقه
شخص آزمایش‌کننده	یک نفر
دبی سیال روغن	۱۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه
عدم وجود ناخاسی	روغن آفتاب‌گردان، قطعه‌کار و ابزار
قطبیت ابزار	[+]
فاصله بین قطعه‌کار و ابزار	ثابت و اتوماتیک
زمان شست‌وشو و روی کار	ثابت و اتوماتیک
عدم وجود آب	روغن آفتاب‌گردان، هوای خروجی

آزمایش‌ها در یک روز و با سه تکرار صورت پذیرفت. بعد از جمع‌آوری، نمونه‌ها دوباره وزن شدند و تغییرات وزنی آنها نسبت به قبل به دست آمد، همچنین توسط دستگاه زبری‌سنجی زبری سطح آنها سنجیده شد. بعد از به‌دست‌آوردن نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار وارد نرم‌افزار طراحی آزمایش و سپس تحلیل شدند. برای به‌دست‌آوردن نرخ براده‌برداری حجمی و نرخ سایش حجمی ابزار از روابط ۱ و ۲ استفاده شده است:

$$MRR \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \right) = \frac{1000 \times \Delta w}{\rho_w \times s}$$

در رابطه ۱ پارامتر MRR بیانگر نرخ براده‌برداری بر حسب میلی‌متر مکعب بر دقیقه و Δw بیانگر وزن ازدست‌رفته قطعه‌کار بعد از ماشین‌کاری (بر حسب گرم) و ρ_w بیانگر چگالی قطعه‌کار (بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب) و s بیانگر زمان ماشین‌کاری بر حسب دقیقه است:

$$TWR \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \right) = \frac{1000 \times \Delta w}{\rho_t \times s}$$

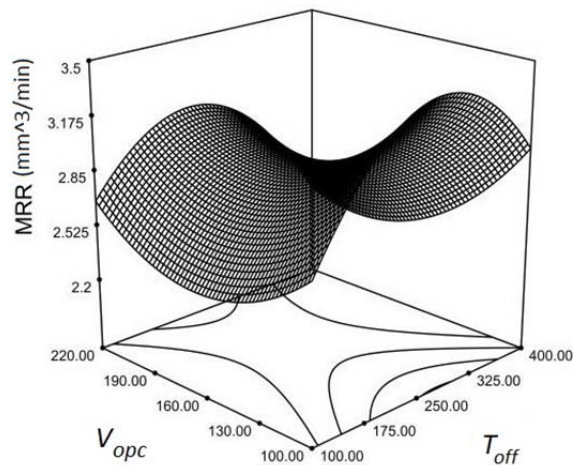
در رابطه ۲ پارامتر TWR بیانگر نرخ سایش ابزار بر حسب میلی‌متر مکعب بر دقیقه و Δw_t بیانگر وزن ازدست‌رفته ابزار بعد از ماشین‌کاری (بر حسب گرم) و ρ_t بیانگر چگالی الکتروود ابزار (بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب) و s بیانگر زمان ماشین‌کاری بر حسب دقیقه است.

۴- نتایج و بحث

براساس تحلیل واریانس انجام‌شده بهترین مدل انطباقی بر داده‌های MRR و TWR و Ra (زبری سطح) طبق ضریب تعیین رگرسیون مدل برازش‌شده بالاتر و سطح معنی‌داری مدل کمتر از ۰/۰۵ و سطح معنی‌داری عدم برازش بزرگ‌تر از ۰/۰۵ مدل‌های جدول ۵ پیشنهاد می‌شود.

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود مدل‌های انتخاب برای هر سه نوع متغیر خروجی از نوع درجه ۲ مسطح هستند و پارامترهای تأثیرگذار هر مدل استخراج شده است. پارامتر I نشان‌دهنده شدت جریان الکتریکی، T_{on} نشان‌دهنده زمان

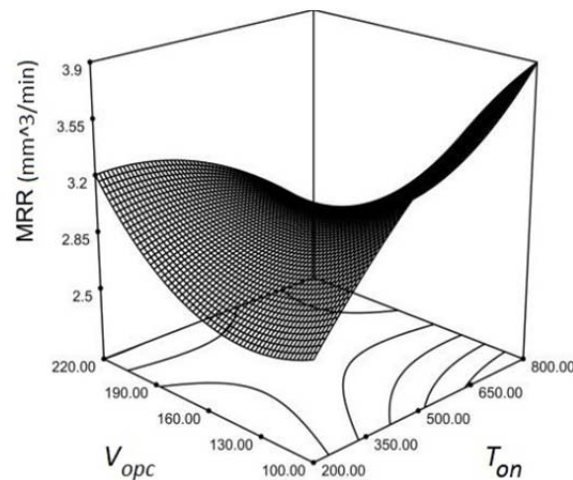
افزایش زمان خاموشی پالس شست و شو بهتر صورت گرفته و اتصال کوتاه کمتر رخ می دهد.



نمودار (۳) نمودار سه بعدی تاثیر همزمانی دو متغیر زمان خاموشی پالس و ولتاژ مدار باز بر MRR

۴-۱-۴- تاثیر همزمان زمان روشنی پالس و ولتاژ مدار باز بر نرخ براده برداری

همان طور که در نمودار ۴ مشاهده می شود وقتی سه متغیر آمپر، زمان خاموشی پالس و فشار هوا در حالت میانه قرار دارند با افزایش زمان روشنی پالس تا حد بالایی و ولتاژ مدار باز تا حد بالایی نرخ براده برداری افزایش می یابد بدیهی است که با افزایش زمان روشنی پالس میزان جرقه در واحد زمان افزایش یافته و منجر به افزایش نرخ براده برداری می شود.



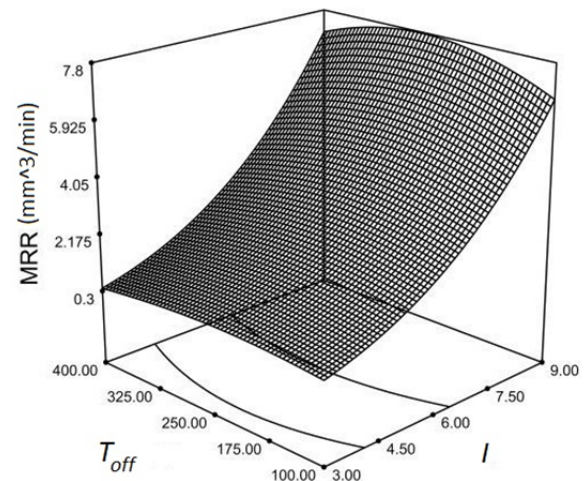
نمودار (۴) نمودار سه بعدی تاثیر همزمانی دو متغیر زمان روشنی پالس و ولتاژ مدار باز بر MRR

۴-۲- تحلیل نرخ سایش ابزار

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول آنالیز واریانس و اصلاح مدل، معادله رگرسیون منطبق شده با مدل اصلاح شده برای نرخ سایش ابزار بر حسب متغیرهای ورودی فرآیند به صورت رابطه ۴ خواهد بود. با جای گذاری پارامترهای ورودی می توان نرخ سایش ابزار را تقریب زد:

(۴)

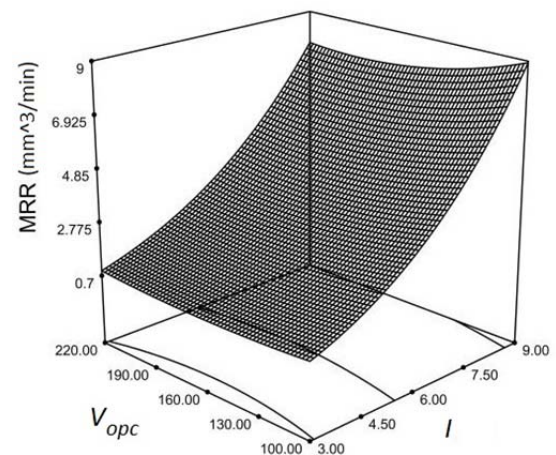
$$\begin{aligned} \text{TWR} = & -0.19413 - 0.11679 \times I \\ & -1.75273\text{E} - 3 \times T_{\text{off}} \\ & +8.44205\text{E} - 4 \times T_{\text{on}} \end{aligned}$$



نمودار (۱) نمودار سه بعدی تاثیر همزمان دو متغیر آمپر و خاموشی پالس بر MRR

۴-۲-۲- تاثیر همزمان آمپر و ولتاژ مدار باز بر نرخ براده برداری

همان طور که در نمودار ۲ مشاهده می شود وقتی سه متغیر زمان خاموشی پالس، فشار هوا و زمان روشنی پالس در حالت میانه قرار دارند با افزایش همزمان آمپر و کاهش ولتاژ مدار باز نرخ براده برداری افزایش می یابد، لیکن اثر آمپر خیلی بیشتر است به دلیل اینکه ولتاژ مدار باز شروع کننده یونیزاسیون دی الکتریک است و اما به علت اینکه ضریب آمپر در فرمول کار و توان دو هست در نتیجه اثر بیشتری در نرخ براده برداری دارد.

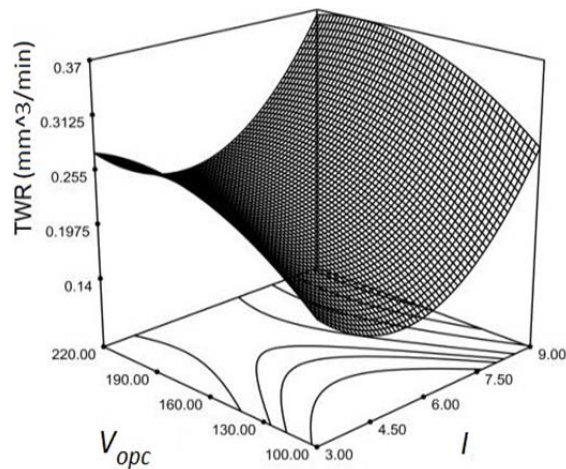


نمودار (۲) نمودار سه بعدی تاثیر همزمان دو متغیر آمپر و ولتاژ مدار باز بر MRR

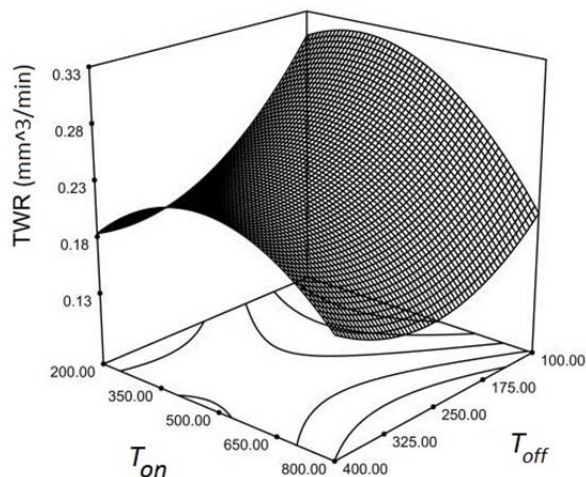
۴-۳-۱-۴- تاثیر همزمان زمان خاموشی پالس و ولتاژ مدار باز بر نرخ براده برداری

همان طور که در نمودار ۳ مشاهده می شود وقتی سه متغیر آمپر، زمان روشنی پالس و فشار هوا در حالت میانه قرار دارند با افزایش زمان خاموشی پالس بین ۱۷۵ تا ۳۲۵ میکروثانیه و ولتاژ مدار باز تا حد بالایی نرخ براده برداری افزایش می یابد به این علت که با افزایش زمان خاموشی پالس شست و شو افزایش پیدا کرده و منجر به پایداری پلاسما می شود. همچنین افزایش ولتاژ مدار باز منجر به افزایش انرژی جرقه و در نتیجه نرخ براده برداری می شود.

کربوره و باعث کاهش ساییش ابزار شده و همچنین افزایش زمان خاموشی پالس شست‌وشو را افزایش داده و ساییش کمتری ایجاد می‌کند.



نمودار (۶) نمودار سه‌بعدی تأثیر همزمانی دو متغیر آمپر و ولتاژ مدار باز بر TWR



نمودار (۷) نمودار سه‌بعدی تأثیر همزمانی دو متغیر زمان روشن پالس و زمان خاموشی پالس بر TWR

۴-۲-۴-۴- تأثیر همزمان زمان روشن پالس و فشار هوا بر نرخ ساییش ابزار

همان‌طور که در نمودار ۸ مشاهده می‌شود وقتی سه متغیر آمپر و زمان خاموشی پالس و ولتاژ مدار باز در حالت میانه قرار دارند با افزایش زمان روشن پالس تا حد میانه و فشار هوا تا حد بالایی نرخ ساییش ابزار افزایش می‌یابد. به علت اینکه با افزایش فشار هوا تراکم روغن آفتاب‌گردان در هوا کمتر شده، اتصال کوتاه را در فرآیند افزایش داده و منجر به ساییش بیشتر ابزار می‌شود.

در حالت افزایش زمان روشن پالس تا حد بالایی خود به‌علت زدودن سطح کربوره ابزار نرخ ساییش ابزار کاهش می‌یابد.

۴-۲-۴-۵- تأثیر همزمان زمان روشن پالس و ولتاژ مدار باز بر نرخ ساییش ابزار

همان‌طور که در نمودار ۹ مشاهده می‌شود وقتی سه متغیر آمپر، زمان خاموشی پالس و فشار هوا در حالت میانه قرار دارند با افزایش زمان روشن پالس تا حد میانه و ولتاژ مدار باز تا حد بالایی نرخ ساییش ابزار افزایش می‌یابد. به علت اینکه با افزایش

$$+0.21251 \times P$$

$$+4.65540E - 3 \times V_{opc}$$

$$+7.00798E - 3 \times I \times P$$

$$-3.34028E - 7 \times I \times V_{opc}$$

$$+5.42243E - 7 \times T_{off} \times T_{on}$$

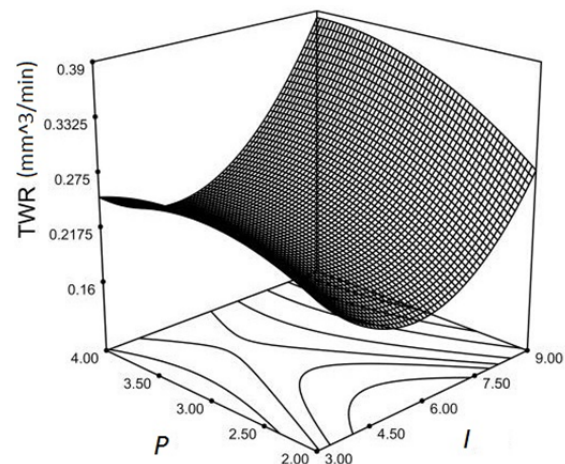
$$+1.74636E - 6 \times T_{off} \times V_{opc}$$

$$-5.72809E - 5 \times \langle T \rangle_{(on)} \times P$$

$$+9.33603E - 3 \times I^2$$

۴-۲-۴-۱- تأثیر همزمان آمپر و فشار هوا بر نرخ ساییش ابزار

همان‌طور که در نمودار ۵ مشاهده می‌شود وقتی سه متغیر ولتاژ مدار باز، زمان خاموشی و روشن پالس در حالت میانه قرار دارند با افزایش همزمان آمپر و افزایش فشار هوا نرخ ساییش ابزار افزایش می‌یابد زیرا افزایش فشار هوا منجر به کاهش تراکم روغن در هوا شده و روغن آفتاب‌گردان زمان کمتری در محیط ماشین‌کاری می‌ماند و این امر منجر به کاهش زمان دوام جرقه شده و سطح ابزار را کربوره می‌کند و باعث عدم یکنواختی مقاومت دی‌الکتریک در فاصله‌ی ابزار و قطعه‌کار شده و منجر به اتصال کوتاه و ساییش ابزار می‌شود. از طرف دیگر افزایش آمپر انرژی جرقه‌ها را افزایش داده و منجر به افزایش ساییش ابزار و افزایش نرخ براده‌برداری قطعه‌کار می‌شود.



نمودار (۵) نمودار سه‌بعدی تأثیر همزمانی دو متغیر آمپر و فشار هوا بر TWR

۴-۲-۴-۲- تأثیر همزمان آمپر و ولتاژ مدار باز بر نرخ ساییش ابزار

همان‌طور که در نمودار ۶ مشاهده می‌شود وقتی سه متغیر زمان خاموشی پالس، فشار هوا و زمان روشن پالس در حالت میانه قرار دارند با افزایش همزمان آمپر و افزایش ولتاژ مدار باز نرخ ساییش ابزار افزایش می‌یابد. به‌علت اینکه افزایش ولتاژ مدار باز منجر به افزایش انرژی جرقه شده و با افزایش توان براده‌برداری منجر به ساییش بیشتر الکترود ابزار می‌شود.

۴-۲-۴-۳- تأثیر همزمان زمان خاموشی و روشن پالس بر نرخ ساییش ابزار

همان‌طور که در نمودار ۷ مشاهده می‌شود وقتی سه متغیر آمپر، فشار هوا و ولتاژ مدار باز در حالت میانه قرار دارند با کاهش زمان روشن پالس تا حد پایینی و کاهش زمان خاموشی پالس از حد میانه تا حد پایینی نرخ ساییش ابزار افزایش می‌یابد.

بدیهی است که افزایش زمان روشن پالس باعث زدودن سطح

ولتاژ مدار باز و افزایش آمپر باعث دوام کانال پلاسما شده و این امر منجر به افزایش ساییش ابزار می‌شود.

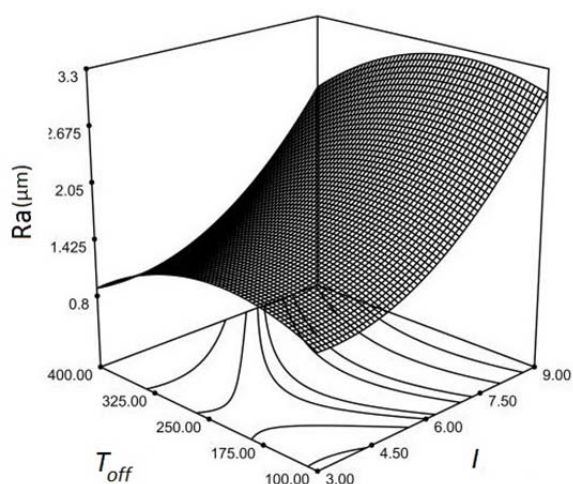
$$+8.37698E - 6 \times T_{on}^2$$

$$-0.21699 \times P^2$$

$$-7.66625E - 5 \times V_{opc}^2$$

۴-۳-۱- تاثیر همزمان آمپر و خاموشی پالس بر زبری سطح

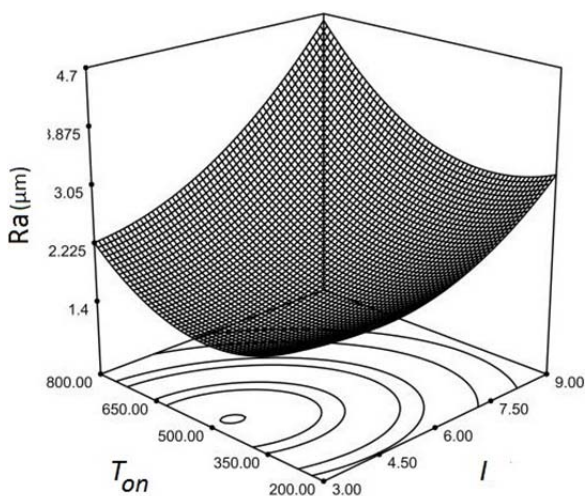
همان‌طور که در نمودار ۱۰ مشاهده می‌شود وقتی سه متغیر ولتاژ مدار باز، فشار هوا و زمان روشنی پالس در حالت میانه قرار دارند با افزایش همزمان آمپر و کاهش زمان خاموشی پالس زبری سطح افزایش می‌یابد و حداکثر پاسخ در حد پایینی زمان خاموشی پالس مشاهده می‌شود. افزایش آمپر انرژی جرقه‌ها را افزایش داده و سطح کار بیشتری به‌ازای هر جرقه‌کننده می‌شود و چاله‌های بزرگتری ایجاد می‌کند، از طرف دیگر افزایش زمان خاموشی پالس میزان شست‌وشو را افزایش داده و زبری سطح کاهش می‌یابد.



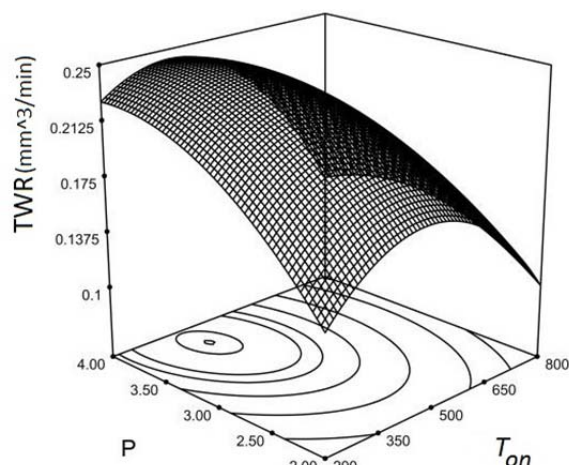
نمودار ۱۰) نمودار سه‌بعدی تاثیر همزمانی دو متغیر آمپر و خاموشی پالس بر Ra

۴-۳-۲- تاثیر همزمان آمپر و روشنی پالس بر زبری سطح

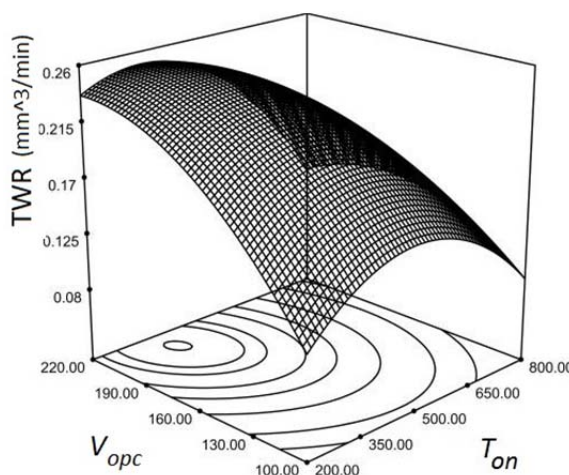
همان‌طور که در نمودار ۱۱ مشاهده می‌شود وقتی متغیرهای ولتاژ مدار باز، فشار هوا و زمان خاموشی پالس در حد میانه خود باشد با افزایش همزمان آمپر تا حد بالایی و روشنی پالس در حد بالا زبری سطح افزایش می‌یابد. به علت اینکه افزایش آمپر و زمان روشنی پالس منجر به افزایش انرژی جرقه‌ها و قوی‌تر شدن کانال پلاسما شده و باعث افزایش زبری سطح می‌شود.



نمودار ۱۱) نمودار سه‌بعدی تاثیر همزمانی دو متغیر آمپر و زمان روشنی پالس بر Ra



نمودار ۸) نمودار سه‌بعدی تاثیر همزمانی دو متغیر زمان روشنی پالس و فشار هوا بر TWR



نمودار ۹) نمودار سه‌بعدی تاثیر همزمانی دو متغیر زمان روشنی پالس و ولتاژ مدار باز بر TWR

۴-۳-۳- تحلیل زبری سطح

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از جدول آنالیز واریانس و اصلاح مدل، معادله رگرسیون منطبق‌شده با مدل اصلاح‌شده برای زبری سطح بر حسب متغیرهای ورودی فرآیند به‌صورت رابطه ۵ خواهد بود. با جای‌گذاری پارامترهای ورودی می‌توان زبری سطح را تقریب

زد:

(۵)

$$Ra = -5.50284E - 3 - 0.46594 \times I$$

$$+8.08090E - 3 \times T_{off}$$

$$-0.010033 \times T_{on}$$

$$+0.90751 \times P$$

$$+0.030004 \times V_{opc}$$

$$-1.45175E - 4 \times I \times T_{off}$$

$$+3.57204E - 4 \times I \times T_{on}$$

$$-5.10590E - 4 \times I \times V_{opc}$$

$$+2.07766E - 4 \times T_{on} \times P$$

$$+0.055113 \times I^2$$

$$-1.82931E - 5 \times T_{off}^2$$

به این منظور از قسمت بهینه‌سازی نرم‌افزار طراحی آزمایش استفاده کرده تا مقادیر بهینه متغیرهای فرآیند به دست آید. هدف از بهینه‌سازی در فرآیند MRR بیشتر در Ra و TWR کمتر است.

در این قسمت متغیرهای فرآیند را در دامنه خود قرار داده و MRR در حالت بیشینه، Ra و TWR در حالت کمینه و اهمیت متغیرها و پاسخ‌ها روی حد متوسط تنظیم می‌شود.

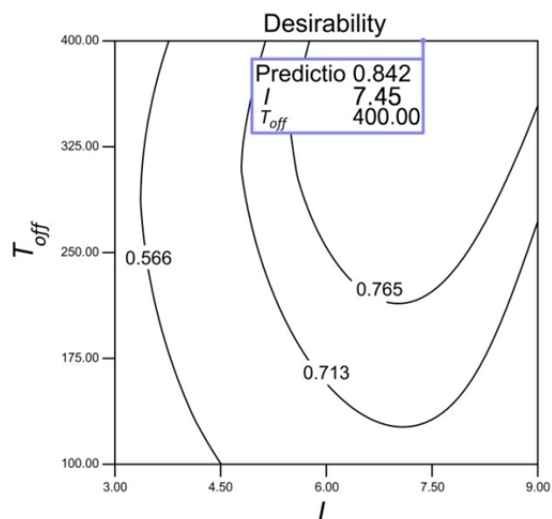
نرم‌افزار با استفاده از بهینه‌کردن تابع و متغیرهای تاثیرگذار ۳۰ نقطه بهینه‌شده را نمایش می‌دهد. در جدول ۶ سه نقطه از این نقاط نمایش داده شده است.

در نمودار ۱۴ نمودار سه‌بعدی مطلوبیت نقطه ۱ جدول ۵ نمایش داده شده است. هر چه عدد تابع مطلوبیت به ۱ نزدیک‌تر باشد نقطه مورد نظر خطای کمتری از نظر پیش‌بینی دارد و همچنین بهینه‌تر است.

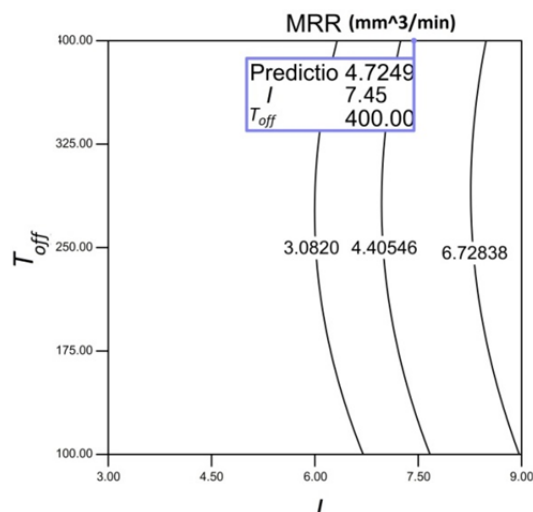
در نمودارهای ۱۵، ۱۶ و ۱۷ وضعیت نقطه ۱ نسبت به بقیه نقاط در متغیرهای خروجی نشان داده شده است.

جدول ۶) برترین نقاط بهینه‌سازی

شماره نقطه بهینه	I	T _{off}	T _{on}	P	V _{opc}	MRR	TWR	Ra
۱	۷/۴۵	۴۰۰	۴۰۱	۲	۱۰۰	۴/۷۲۵	۰/۰۹۷	۱/۱۰۹
۲	۷/۴۴	۴۰۰	۴۰۶	۲	۱۰۰	۴/۷۴۰	۰/۰۹۵	۱/۱۰۴
۳	۷/۴۶	۳۹۵	۴۳۱	۲	۱۰۰	۴/۸۸۵	۰/۱۰۰	۱/۱۴۸



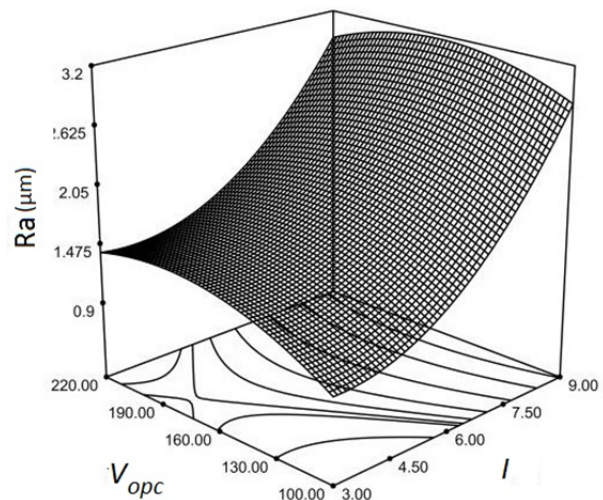
نمودار ۱۴) کانتور مطلوبیت نقطه ۱ جدول ۵



نمودار ۱۵) کانتور پاسخ بهینه MRR نسبت به کل پاسخ‌ها

۴-۳-۳- تاثیر همزمان آمپر و ولتاژ مدار باز بر زبری سطح

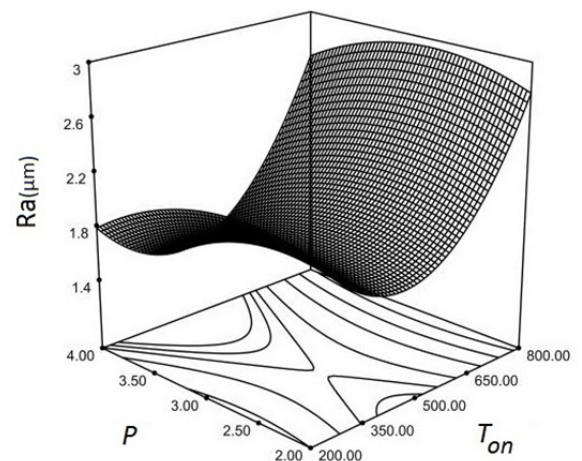
همان‌طور که در نمودار ۱۲ مشاهده می‌شود وقتی سه متغیر زمان خاموشی پالس، فشار هوا و زمان روشن پالس در حالت میانه قرار دارند با افزایش همزمان آمپر و افزایش ولتاژ مدار باز زبری سطح افزایش می‌یابد. به علت اینکه افزایش آمپر و ولتاژ مدار باز منجر به افزایش انرژی جرقه‌ها و قوی‌تر شدن کانال پلاسما شده و باعث ایجاد چاله‌های عمیق روی قطعه‌کار شده و زبری سطح را افزایش می‌دهد.



نمودار ۱۲) نمودار سه‌بعدی تاثیر همزمانی دو متغیر آمپر و ولتاژ مدار باز بر Ra

۴-۳-۴- تاثیر همزمان زمان روشن پالس و فشار هوا بر زبری سطح

همان‌طور که در نمودار ۱۳ مشاهده می‌شود وقتی سه متغیر آمپر، زمان خاموشی پالس و ولتاژ مدار باز در حالت میانه قرار دارند با افزایش زمان روشن پالس تا حد بالایی و کاهش فشار هوا تا حد پایین زبری سطح افزایش می‌یابد. افزایش فشار هوا منجر به شست‌وشوی بهتر و همچنین کاهش زبری سطح می‌شود.



نمودار ۱۳) نمودار سه‌بعدی و نمودار سه‌بعدی تاثیر همزمانی دو متغیر زمان روشن پالس و فشار هوا بر Ra

۴-۴- بهینه‌سازی فرآیند

هدف از بهینه‌سازی فرآیند یافتن متغیرهای فرآیند با هدف بهینه‌سازی برخی از توابع هدف و البته عدم تخطی از محدودیت‌های موجود است.

۵- جمع‌بندی نتایج

(۱) افزایش آمپر در فرآیند منجر به افزایش نرخ براده‌برداری، افزایش نرخ سایش ابزار و همچنین افزایش زبری سطح می‌شود.
 (۲) افزایش زمان روشنی پالس منجر به افزایش نرخ براده‌برداری، کاهش نرخ سایش ابزار و همچنین افزایش زبری سطح می‌شود.
 (۳) افزایش زمان خاموشی پالس منجر به کاهش نرخ براده‌برداری، کاهش نرخ سایش ابزار و همچنین کاهش زبری سطح می‌شود.
 (۴) تاثیر فشار هوا در نرخ براده‌برداری ناچیز و افزایش آن باعث کاهش زبری سطح و افزایش سایش ابزار می‌شود.
 (۵) افزایش ولتاژ مدار باز منجر به افزایش نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار و همچنین زبری سطح می‌شود.
 (۶) در این تحقیق بیشترین نرخ براده‌برداری ۸/۶۵۵ میلی‌متر مکعب بر دقیقه و بیشترین نرخ سایش ابزار ۰/۵۱۵ میلی‌متر مکعب بر دقیقه و زبری سطح حداکثری ۴/۲۳۴ میکرومتر به دست آمده است.

(۷) بهینه‌ترین حالت برای بیشترین نرخ براده‌برداری و کمترین نرخ سایش ابزار و همچنین کمترین زبری سطح با انتخاب جریان ۷/۴۵ آمپری و زمان خاموشی پالس ۴۰۰ میکروثانیه و زمان روشنی پالس تقریباً ۴۰۰ میکروثانیه و فشار هوا دو بار و ولتاژ مدار باز ۱۰۰ ولت به دست آمد.

(۸) نتایج مقایسه اولین نقطه بهینه با روش غوطه‌وری با دی‌الکتريک نفت سفید نشان داد که نرخ براده‌برداری روش انتخابی دوبرابر نفت سفید افزایش یافته، نرخ سایش ابزار به نصف کاهش و زبری سطح نزدیک به سه‌برابر کاهش پیدا کرده است.

تشکر و قدردانی: از جناب آقای مهندس حمید طاهری مدیر محترم کارگاه‌ها و آزمایشگاه‌های دانشگاه آزاد نجف‌آباد، همچنین جناب آقای دکتر حمید زارع‌پور ریاست محترم مرکز تحقیقات فناوری‌های نوین ساخت و تولید دانشگاه آزاد نجف‌آباد، همچنین جناب آقای /امیر سلیمان‌یان مدیریت قالب‌سازی ایلینا و همچنین جناب آقای ضیایی مدیریت تراش‌کاری بژ اصفهان سپاس‌گزاری می‌شود.
تأییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.
تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

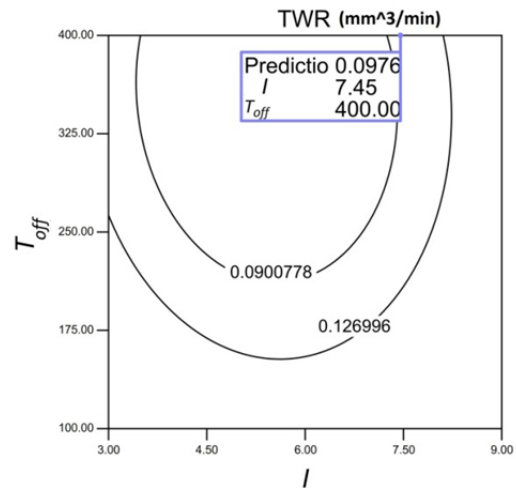
سهم نویسندگان: مهران نصری (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ احسان روحانی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

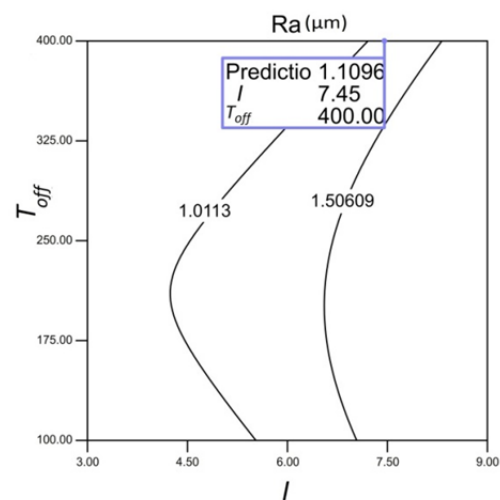
۶- پی‌نوشت

علائم

Ra	زبری سطح قطعه‌کار
MRR	نرخ براده‌برداری قطعه‌کار
TWR	نرخ سایش ابزار
P	فشار هوا
T _{off}	زمان خاموشی پالس
T _{on}	زمان روشنی پالس
I	جریان الکتریکی
V _{pc}	ولتاژ مدار باز
ρ_t	چگالی ابزار
ρ_w	چگالی قطعه‌کار
ΔW	وزن ازدست‌رفته قطعه‌کار حین ماشین‌کاری
ΔW_t	وزن ازدست‌رفته ابزارحین ماشین‌کاری
α	متغیر تعیین‌کننده سطوح تغییرات در سطح پاسخ
S	زمان ماشین‌کاری



نمودار (۱۶) کانتور پاسخ بهینه TWR نسبت به کل پاسخ‌ها



نمودار (۱۷) کانتور پاسخ بهینه Ra نسبت به کل پاسخ‌ها

۴-۴- مقایسه اولین نقطه بهینه با روش غوطه‌وری با دی‌الکتريک نفت سفید

بدیهی است که شرایط بهینه ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی دی‌الکتريک نفت سفید با روش بررسی‌شده متفاوت است لیکن به‌منظور ارزیابی عملکردی این روش و امکان‌پذیری جایگزینی آن با دی‌الکتريک‌های مرسوم در صنعت آزمایشی با پارامترهای اولین نقطه بهینه روش مورد بررسی (با جریان ۷/۴۵ آمپری، زمان خاموشی پالس ۴۰۰ میکروثانیه، زمان روشنی پالس تقریباً ۴۰۰ میکروثانیه و ولتاژ مدار باز ۱۰۰ ولت) با استفاده از دی‌الکتريک نفت سفید و روش غوطه‌وری و ابزار و قطعه‌کار با مشخصات قبلی و سه بار تکرار انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۷ با نتایج حالت بهینه نقطه شماره ۱ مقایسه شده است.
 مقایسه نتایج نشان‌داده در جدول ۷ صحت عملکردی انتخاب این روش برای جایگزینی با روش‌های سنتی را تأیید می‌کند.

جدول ۷ مقایسه اولین نقطه بهینه با روش غوطه‌وری با دی‌الکتريک نفت سفید

TWR	MRR	Ra	روش
۰/۱۳۴	۲/۲۴۲	۳/۷۰۸	نفت (غوطه‌وری)
۰/۰۹۲	۴/۶۸۳	۱/۱۰۸	روغن آفتاب‌گردان با روش کمترین مقدار روان‌کار در حالت نقطه بهینه ۱

- 9- Bai X, Zhang Q, Zhang J, Kong D, Yang T. Machining efficiency of powder mixed near dry electrical discharge machining based on different material combinations of tool electrode and workpiece electrode. *Journal of Manufacturing Processes*. 2013;15(4):474-482.
- 10- Kao CC, Tao J, Shih AJ. Near dry electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007;47(15):2273-2281.
- 11- Cao Z, Liu Z, Ling J, Qiu M, Wang X. Deep-type hole machining by inner jetted aerosol dielectric ablation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;78(9-12):1989-1998.
- 12- Dhakar K, Dvivedi A. Experimental investigation on near-dry EDM using glycerin-air mixture as dielectric medium. *Materialstoday Proceedings*. 2017;4(4):5344-5350.
- 13- Rajabinasab F, Hadad MJ, Abedini V. Investigation and study the effect of the gas type and pressure on the performance of near dry electrical discharge machining. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;15(20):360-364. [Persian]
- 14- Rajabinasab F, Hadad MJ, Abedini V, Hajjighorbani RA. Investigation and study of the tool material and the dielectric fluid rate effect on the performance of near dry electrical discharge machining. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;15(20):365-370. [Persian]
- 15- Govindan P, Joshi SS. Experimental characterization of material removal in dry electrical discharge drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2010;50(5):431-443.
- 16- Ghoreishi M, Tahmasbi V. Optimization of material removal rate in dry electro-discharge machining process. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(12):113-121. [Persian]
- 17- Liqing L, Yingjie S. Study of dry EDM with oxygen-mixed and cryogenic cooling approaches. *Procedia CIRP*. 2013;6:344-350.
- 1- Abbas NM, Yusoff N, Mahmod R. Electrical discharge machining (EDM): Practices in Malaysian industries and possible change towards green manufacturing. *Procedia Engineering*. 2012;41:1684-1688.
- 2- Beşliu I, Schulze HP, Coteață M, Amarandei D. Study on the dry electrical discharge machining. *International Journal of Material Forming*. 2010;3(Supple 1):1107-1110.
- 3- Valaki JB, Rathod PP. Assessment of operational feasibility of waste vegetable oil based bio-dielectric fluid for sustainable electric discharge machining (EDM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;87(5-8):1509-1518.
- 4- Valaki JB, Rathod PP, Sankhavara CD. Investigations on technical feasibility of Jatropha curcas oil based bio dielectric fluid for sustainable electric discharge machining (EDM). *Journal of Manufacturing Processes*. 2016;22:151-160.
- 5- Sadagopan P, Mouliprasanth B. Investigation on the influence of different types of dielectrics in electrical discharge machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;92(1-4):277-291.
- 6- Ng PS, Kong SA, Yeo SH. Investigation of biodiesel dielectric in sustainable electrical discharge machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;90(9-12):2549-2556.
- 7- Gholipoor A, Baseri H, Shabgard MR. Investigation of near dry EDM compared with wet and dry EDM processes. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015;29(5):2213-2218.
- 8- Bai X, Zhang QH, Yang TY, Zhang JH. Research on material removal rate of powder mixed near dry electrical discharge machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;68(5-8):1757-1766.