



Statistical Modeling of the Effective Parameters in Electrical Discharge Machining Process of Ti-6Al-4V Alloy Using the Mixtures of Aluminum Oxide and Silicon Oxide in Dielectric

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Oskueyan S.¹ MSc,
Abedini V.*¹ PhD,
Hajjalimohammadi A.¹ PhD

How to cite this article

Oskueyan S, Abedini V, Hajjalimohammadi A. Statistical Modeling of the Effective Parameters in Electrical Discharge Machining Process of Ti-6Al-4V Alloy Using the Mixtures of Aluminum Oxide and Silicon Oxide in Dielectric. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(6):1449-1462.

¹Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, Semnan University, Semnan, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Semnan University, Technical & Engineering Complex, In Front of Sokan Park, Semnan, Iran. Postal Code: 3513119111
Phone: +98 (23) 31533362
Fax: +98 (23) 33654122
v.abedini@semnan.ac.ir

Article History

Received: June 17, 2019
Accepted: February 14, 2020
ePublished: June 20, 2020

ABSTRACT

In this study, the effect of using of aluminum oxide and silicon oxide nanoparticles simultaneously into dielectric has been investigated in the process of electrical discharge machining of titanium alloy Ti-6Al-4V. After analyzing the parameters affecting the process of the electrical discharge machining using nanoparticles, intensity of the current, concentration, pulse on time, and particle composition were considered as input parameters. The effect of each parameters has been investigated on three levels; the material removal rate (MRR), the tool wear rate (TWR) and the surface roughness (SR) of the work piece. With respect to the development of the industry in the use of environmentally friendly dielectrics, deionized water was used as the dielectric fluid. Also, Design Expert software has been employed for the design of the experiments, analysis of the results and optimization of the parameters. The results showed that the best surface morphology is obtained by machining with the addition of nanoparticles in the relative composition of 50%. In this percentage of the composition, the surface roughness has the least value of the crack and the recast layer. In addition, the maximum value of the MRR and minimum value of TWR can be achieved in 12A of current intensity, 100 μ s of pulse on time and 75% of relative composition.

Keywords Electrical Discharge Machining, Ti-6Al-4V, Nanoparticles, Al₂O₃, SiO₂

CITATION LINKS

[1] A review on recent developments in machining methods based on electrical discharge phenomena [2] Improvement of electric discharge machining (EDM) performance of Ti-6Al-4V alloy with added graphite powder to dielectric [3] A review of the current understanding and technology of powder mixed electrical discharge machining (PMEDM) [4] The application of research on powder mixed EDM in rough machining [5] Research developments in additives mixed electrical discharge machining (AEDM): A state of art review [6] Effects of nanopowder TiO₂-mixed dielectric and rotary tool on EDM [7] A dual response surface-desirability approach to process modeling and optimization of Al₂O₃ powder-mixed electrical discharge machining (PMEDM) parameters [8] The use of SiC powder in water as dielectric for micro-slit EDM machining [9] Investigation into some surface characteristics of electrical discharge machined SKD-11 using powder-suspension dielectric oil [10] Influence of graphite powder mixed EDM on the surface integrity characteristics of Inconel 625 [11] Performance of electrical discharge machining using aluminium powder suspended distilled water [12] Investigation of carbon nanotube added dielectric on the surface characteristics and machining performance of Ti-6Al-4V alloy in EDM process [13] Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology [14] Comparison in the performance of EDM and NPMEDM using Al₂O₃ nanopowder as an impurity in DI water dielectric [15] Comparative study of different dielectrics for micro-EDM performance during microhole machining of Ti-6Al-4V alloy [16] Comparative study of adding nanopowders in dielectric effects on outputs and surface integrity of Ti-6Al-4V alloy in electrical discharge machining

مدل‌سازی آماری پارامترهای موثر در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V با استفاده از مخلوط نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم در دی‌الکتریک

سعید اسکوفیان MSc

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

وحید عابدینی PhD*

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

علیرضا حاجی‌علی‌محمدی PhD

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

چکیده

در این پژوهش، اثر استفاده از دو نانوذر اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم به‌صورت همزمان با دی‌الکتریک در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V بررسی شد. پس از بررسی پارامترهای تاثیرگذار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به کمک نانوذرات، ۴ پارامتر شدت جریان، غلظت، زمان روشنی پالس و ترکیب نسبی ذرات به‌عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شدند. اثر هر یک از این پارامترها در سه سطح بر نرخ براده‌برداری، سایش نسبی ابزار و صافی سطح نهایی قطعه بررسی شد. با توجه به پیشرفت صنعت در زمینه مصرف دی‌الکتریک‌های زیست‌محیطی، در این مطالعه آب دی‌یونیزه‌شده، دی‌الکتریک ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بود. همچنین برای طراحی آزمون‌ها، تحلیل نتایج و بهینه‌سازی پارامترها از نرم‌افزار Design Expert استفاده شد. نتایج نشان داد، بهترین کیفیت سطح ماشین‌کاری، با افزودن نانوذرات در ترکیب نسبی ۵۰٪ به‌دست می‌آید. در این درصد از ترکیب، سطح دارای کمترین ترک و لایه ذوب‌شده مجدد است. همچنین در شرایط شدت جریان ۱۲ آمپر، زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه و ترکیب ۷۵٪ از نانوذرات بیشترین میزان نرخ براده‌برداری و حداقل سایش ابزار حاصل می‌شود.

کلیدواژه‌ها: ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، Ti-6Al-4V، نانوذرات، SiO_2 ، Al_2O_3

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۵

*نویسنده مسئول: v.abedini@semnan.ac.ir

مقدمه

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (Electrical Discharge Machining) یکی از روش‌های غیرسنتی ماشین‌کاری است، که در آن حفره‌هایی در سطح قطعه‌کار توسط فرسایش تخلیه الکتریکی ایجاد می‌شود. توانایی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی در تولید قطعات با سختی بالا، اشکال پیچیده و قطعات کوچک است. اما نرخ براده‌برداری کم، زبری سطح بالا، نرخ سایش ابزار بالا، شکل‌گیری لایه ذوب‌شده مجدد ضخیم بر روی سطح کار و مشکلات زیست‌محیطی از محدودیت‌های این فرآیند است [1]. به‌طور کلی هدف از بهبود فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، بالا بردن قابلیت عملکرد ماشین‌کاری برای دستیابی به پارامترهای خروجی برتر و تکنیک ماشین‌کاری مواد جدید در شرایط کاری بهتر است.

اضافه کردن پودر مخلوط‌شده به دی‌الکتریک یکی از روش‌های توسعه‌یافته در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی محسوب می‌شود [2]. بهبود کیفیت سطح با افزودن پودر در دی‌الکتریک که به آن ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر (Powder Mixed Electrical Discharge Machining) گفته می‌شود، امکان‌پذیر شده است. با اضافه کردن پودر، اندازه گپ ماشین‌کاری افزایش پیدا می‌کند و عمل شستشو راحت‌تر انجام می‌شود. استحکام دی‌الکتریک با این روش کاهش یافته و با افزایش عرض کانال تخلیه الکتریکی، حفره‌های ایجادشده قطر بزرگ‌تر و عمق کمتر دارند. علاوه بر این، افزایش فاصله بین الکترودها کاهش شدید اثر خازنی را به‌علت قدرت بیشتر کانال تخلیه به همراه دارد و کیفیت سطح قطعات ماشین‌کاری‌شده با این روش به نسبت روش معمولی بالاتر است [3]. ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر با انتخاب پارامترهای مناسب‌تر، مانند افزایش شدت جریان و کاهش زمان خاموشی پالس زبری سطح بهتری را به نسبت ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی متعارف ایجاد می‌کند [4]. مطالعات انجام‌شده در زمینه ترکیب پودر در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نشان می‌دهد که بهبود قابل توجهی در خواص سطوح ماشین‌کاری به‌وجود می‌آید. بررسی رابطه پیچیده بین پارامترهای ورودی فرآیند و بهینه‌سازی آنها یک موضوع تحقیقاتی مناسب است [5].

باصری و صادقیان تاثیر افزودن پودر اکسید تیتانیوم (TiO_2) به دی‌الکتریک را بر روی خروجی‌های فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی فولاد گرم‌کار H13 مطالعه کردند. پودرهای اکسید تیتانیوم در اندازه‌های ۲۰ نانومتر و در غلظت‌های ۱ تا ۳ گرم بر لیتر به دی‌الکتریک پایه نفتی افزوده شده است. آنها گزارش دادند که با افزودن پودر اکسید تیتانیوم به دی‌الکتریک تا غلظت ۳ گرم در لیتر به‌علت افزایش فاصله بین دو الکترود و تسهیل در خروج مواد حذف‌شده، باعث افزایش نرخ براده‌برداری می‌شود. با افزایش غلظت پودر بیش از ۳ گرم در لیتر پالس‌های غیرطبیعی افزایش یافته و نرخ براده‌برداری کاهش می‌یابد. طبق گزارش آنها افزودن پودر به دی‌الکتریک گپ ماشین‌کاری را افزایش می‌دهد. تمرکز مناسب پودر با تنظیم تخلیه الکتریکی، زمان ماشین‌کاری را کاهش داده و کیفیت سطح بهتری را ایجاد می‌کند [6]. عصارزاده و قریشی [7]، اثر اضافه کردن پودر اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) به دی‌الکتریک را بر روی خروجی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی فولاد ابزار CK45 مطالعه کردند. پودر اکسید آلومینیوم مورد آزمایش آنها در غلظت‌های ۲/۵ و ۲/۸ گرم بر لیتر و در اندازه‌های ۴۵ و ۵۰ میکرومتر به دی‌الکتریک هیدروکربنی افزوده شد. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که افزودن پودر اکسید آلومینیوم به دی‌الکتریک در شرایط جریان و زمان روشنی پالس کم، باعث تولید سطوح بسیار صافی می‌شود. همچنین وجود این ذرات باعث عریض‌تر شدن گپ ماشین‌کاری شده که این امر موجب شستشوی بهتر می‌شود. در حالی که افزایش فاصله گپ با افزایش ولتاژ ماشین‌کاری باعث

نانولوله کربنی به دی‌الکتريک طول و اندازه میکروتورک‌های سطحی را کاهش می‌دهد. کانسِل و همکاران [13]، اثر پودر سیلیسیوم با اندازه دانه ۲۰ تا ۳۰ میکرومتر و غلظت ۰، ۱ و ۲ گرم بر لیتر را در دی‌الکتريک ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی فولاد EN-31 بررسی کردند. آنها با استفاده از مدل‌سازی تجربی دست یافتند که نرخ براده‌برداری با افزایش غلظت پودر بیشتر می‌شود و همچنین با اضافه کردن پودر به سیال دی‌الکتريک، زبری سطح بهبود قابل توجهی پیدا می‌کند و طبق نتایج آنها حداکثر جریان و غلظت ذرات افزودنی تأثیرگذارترین پارامتر در زبری سطح و نرخ براده‌برداری است. کومار و همکاران [14]، از نانوذره اکسید آلومینیوم جهت اصلاح خواص دی‌الکتريک استفاده کردند. آنها اثر پارامترهای جریان، ولتاژ شکست و زمان روشنی پالس را بر روی نرخ براده‌برداری، زبری سطح، بافت سطح و مقدار تنش پسماند در حالت با و بدون نانوذره مورد مطالعه قرار دادند. مشاهده شد وجود نانوذره سبب کیفیت سطح بهتر و نرخ براده‌برداری بیشتر می‌شود. آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V به‌طور گسترده در صنایع هوافضا، موتورهای جت و به‌ویژه در فن‌های تیغه کمپرسور استفاده می‌شود. این آلیاژ دارای مقاومت الکتریکی ۷ تا ۱۰ برابر بیشتر، هدایت گرمایی ۷ تا ۸ برابر کمتر و دمای ذوب ۱۰ تا ۱۵٪ بالاتر از فولاد AISI 1040 دارد که این خصوصیات، ماشین‌کاری آلیاژ تیتانیوم را سخت و دشوار می‌کند [12]. خواص ویژه آلیاژ تیتانیوم مانند نسبت استحکام به وزن بالا، قابلیت کارکرد در دمای بالا، مقاومت بالا در برابر سایش و خوردگی و همچنین سازگاری با محیط زیست را دارد که به‌علت محدودیت‌های ماشین‌کاری این آلیاژ با روش‌های غیرسنتی، از قبیل ماشین‌کاری لیزر، تخلیه الکتریکی و ماشین‌کاری الکتروشیمیایی از آن استفاده می‌شود [15].

با بررسی تحقیقات گذشته مشخص شد، اگر چه مطالعات مناسبی بر روی تأثیر نانوذره‌های مختلف به دی‌الکتريک انجام شده است، ولی هنوز مطالعه مشخصی بر روی افزودن دو یا چند نانوذره به‌طور همزمان به دی‌الکتريک صورت نگرفته است. به‌عبارتی ترکیب همزمان دو نانوذره با توجه به خصوصیات متفاوت هر یک، می‌تواند سبب بهبود کیفیت شرایط ماشین‌کاری شود. در این تحقیق، اثر افزودن همزمان دو نانوذره اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیوم در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

به‌منظور انجام آزمایش‌های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی از نمونه‌های آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V استفاده شد. نمونه‌ها به‌صورت ورق و در ابعاد ۵×۳×۳ میلی‌متر به وسیله دستگاه واتر جت بریده شدند. ابزار مسی به قطر ۱۶ و ارتفاع ۷۰ میلی‌متر با عملیات تراش‌کاری تهیه و پولیش داده شد. ترکیب درصد عناصر آلیاژی قطعه‌کار و مشخصات فیزیکی و مکانیکی قطعه‌کار و ابزار به‌ترتیب در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است.

نایپاداری فرآیند می‌شود. چو و همکاران [8]، اثر اضافه کردن پودر کاربید سیلیسیم با اندازه ۳ تا ۵ میکرومتر و با غلظت ۲۵ گرم در لیتر را در میکروماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V با دو قطبیت بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که افزودن پودر کاربید سیلیسیم به آب خالص انرژی تخلیه را افزایش می‌دهد و زبری سطح را بهبود می‌بخشد. نرخ براده‌برداری با استفاده از پودر کاربید سیلیسیم در آب خالص بیشتر از حالت بدون پودر بوده است. همچنین عمق سوراخ ایجادشده با قطبیت منفی تقریباً ۱۰ برابر بیشتر از حالت مثبت است. یی- فانگ و فو- چن [9] زبری سطح فولاد SKD11 را در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با پودرهای آلومینیوم، مس، کروم و کاربید سیلیسیم بررسی نمودند. طبق نتایج آنها مهم‌ترین ویژگی‌های پودرهای افزودنی که بر روی زبری سطح و لایه ذوب‌شده مجدد تأثیر می‌گذارد اندازه ذرات، غلظت، چگالی، مقاومت الکتریکی و هدایت الکتریکی پودر است که در میان پودرهای اضافه‌شده به دی‌الکتريک، ذرات آلومینیوم بهترین سطح و بعد از آن به‌ترتیب ذرات کروم و کاربید سیلیسیم تأثیر داشته‌اند و ذرات مس در خروجی آزمایش‌ها تأثیری نداشتند. همچنین پودر آلومینیوم در بین پودرهای افزودنی بیشترین کاهش ضخامت لایه ذوب‌شده مجدد را داشته است. تلا و همکاران [10]، اثر اضافه کردن پودر گرافیت با غلظت ۰ تا ۸ گرم بر لیتر را در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی اینکونل ۶۲۵ بررسی کردند. براساس نتایج آنها، با افزودن پودر گرافیت به دی‌الکتريک، دهانه‌های بزرگ و کم‌عمق تشکیل شده و بهترین زبری سطح در غلظت ۶ گرم بر لیتر به‌دست آمد. ضخامت لایه ذوب‌شده مجدد با افزودن پودر به دی‌الکتريک به‌علت کاهش تراکم انرژی تخلیه کاهش می‌یابد. همچنین افزودن پودر گرافیت به دی‌الکتريک باعث کاهش استحکام کششی و افزایش مقاومت خستگی شد. سید و پالانندی [11] پودر آلومینیوم را در دی‌الکتريک آب مقطر با غلظت ۰، ۱ و ۲ گرم بر لیتر در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی فولاد W300 استفاده کردند. براساس نتایج آنها زبری سطح خوب و ضخامت لایه ذوب‌شده مجدد کم و نرخ براده‌برداری بیشتری نسبت به آب مقطر خالص به‌دست آمد. آنها گزارش دادند قطبیت نقش مهمی در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر دارد. طبق نتایج آنها بهره‌وری بالاتر در قطبیت مثبت به‌دلیل نرخ براده‌برداری بیشتر در حداکثر جریان ۱۲ آمپر و در غلظت ۱ گرم بر لیتر به‌دست آمد در حالی که زبری سطح و لایه ذوب‌شده مجدد در قطبیت منفی بهبود یافته است. شبگرد و خسروزاده [12] نحوه تأثیر نانولوله کربنی به دی‌الکتريک را بر روی خصوصیات ماشین‌کاری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بررسی نمودند. افزودن نانولوله کربنی در دی‌الکتريک ثبات ماشین‌کاری را به‌دلیل کاهش جرقه‌های مناسب به‌ویژه در زمان روشنی پالس‌های طولانی حفظ می‌کند. نتایج آنها نشان می‌دهد نرخ براده‌برداری در طول پالس‌های کوتاه کاهش و در پالس‌های طولانی افزایش می‌یابد و کاهش نرخ سایش ابزار در پالس‌های کوتاه در زمان، بسیار برجسته بوده است. همچنین افزودن

آزمایش میزان سایش ابزار برحسب میلی‌متر مکعب مشخص شده و از تقسیم این مقدار بر حجم مواد برداشته شده از قطعه کار، میزان سایش نسبی ابزار از روی رابطه ۳ به دست می‌آید. برای اندازه‌گیری کیفیت سطح از دستگاه زبری‌سنج استفاده شد، که مقدار زبری براساس Ra گزارش شده است. مقدار اندازه اعلام شده، میانگین سه داده در جهات مختلف از سطح قطعه کار است.

جدول ۳) برخی از مشخصات فیزیکی مهم نانوذرات در EDM

چگالی (gr/cm ³)	مقاومت الکتریکی (μΩcm)	رسانایی حرارتی (W/cmK)	نانوذرات
۳/۸۹	۱۰ ^{-۲}	۲-۱/۵	آلومینیوم اکسید
۲/۴	۱۰ ^{-۲} -۱۰ ^{-۴}	۱/۳	سیلیسیم اکسید

طراحی آزمایش و شرایط ماشین‌کاری

در یک طرح مکعب مرکزی سطح پاسخ، محل نقاط محوری با توجه به نقطه مرکز با مقدار آلفا تعیین می‌شوند. سه سطح ۰، ۱ و ۱ که به ترتیب، نشان‌دهنده سطوح پایین، متوسط و بالا است، در این طراحی در نظر گرفته شده است. همچنین برای پاسخ نقطه مرکزی مکعب در وسط صفحات جانبی سه تکرار انجام شده است. متغیرهای ورودی و پارامترهای تنظیمی آزمایش‌ها در جدول ۴ آورده شده است. همچنین در ادامه تصویر تجهیزات استفاده شده برای انجام آزمایش‌های ماشین‌کاری در شکل ۱ نشان داده شده است. جدول ۵ پارامترهای ورودی را در دو فرمت گذشته و واقعی نشان می‌دهد.

جدول ۴) متغیرهای ورودی و پارامترهای تنظیمی اسپارک

متغیر	سطح آزمایش
شدت جریان (آمپر)	۱۲، ۸، ۴
غلظت (گرم بر لیتر)	۳، ۲، ۱
زمان روشنی پالس (میکروثانیه)	۱۰۰، ۵۰، ۲۵
ترکیب ذرات درصد	۷۵، ۵۰، ۲۵
زمان خاموشی پالس (میکروثانیه)	۲۵
ولتاژ مدار باز (ولت)	۱۲۰
ولتاژ ماشین‌کاری (ولت)	۴۰
قطبیت	ابزار (+)، قطعه کار (-)
نوع دی‌الکتریک	آب دی‌یونیزه شده
نانوذرات (۲۰ نانومتر)	آلومینیوم اکسید سیلیسیم اکسید
دبی دی‌الکتریک	۵ لیتر بر دقیقه



شکل ۱) تجهیزات استفاده شده برای انجام آزمایش‌های ماشین‌کاری

جدول ۱) ترکیب درصد عناصر تشکیل‌دهنده آلیاژ Ti-6Al-4V

عناصر تشکیل‌دهنده آلیاژ	مقدار
Ti	۸۹/۵۱
Al	۶/۲۰
V	۳/۹۹
Fe	۰/۱۵
O	۰/۱۳
C	۰/۰۱۵
N	۰/۰۰۷
H	۰/۰۰۲

جدول ۲) خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه کار و ابزار

Cu	Ti-6Al-4V	خاصیت
۴۰۱W/MK	۶۷۷W/MK	هدایت حرارتی
۱۱۰Gpa	۱۱۳Gpa	مدول الاستیک
۱۰۸۴°C	۱۶۶°C	نقطه ذوب
۱۶/۷۸μΩ.cm	۱۷۸μΩ.cm	مقاومت الکتریکی
۸/۹g/cm ³	۴/۴۳g/cm ³	چگالی

جهت انجام آزمایش‌های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی از دستگاه اسپارک پیش‌رانه مدل ۵۱۱ با ژنراتور ایزوپالس استفاده شد. آزمایش‌های ماشین‌کاری طبق اصول طراحی آزمون‌ها با استفاده از نرم‌افزار Expert-Design و براساس روش پاسخ سطح انجام شدند. پارامترهای ورودی شامل شدت جریان تخلیه الکتریکی، غلظت ذرات افزودنی، زمان روشنی پالس و درصد ترکیب نانوذرات هر یک در سه سطح بودند.

همچنین در آزمایش‌ها، برای تعیین مقدار درصد ترکیب ذرات و سهولت در انجام تحلیل‌ها، پودر اکسید آلومینیوم به‌عنوان مبنا انتخاب شده است. برخی از مشخصات مهم دو نانوذره شرح داده شده در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، در جدول ۳ نشان داده شده است. کلیه آزمایش‌های انجام شده در حالت ولتاژ پایین دستگاه EDM صورت گرفته است. زمان انجام هر آزمایش ۱۰ دقیقه و با دو بار تکرار انجام شده است. برای اندازه‌گیری نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار از ترازو دیجیتالی ساتوریس (Sartorius) با دقت ۰/۰۰۱ گرم استفاده شده است. به ترتیب با استفاده از رابطه ۱ و ۲ نرخ براده‌برداری و سایش ابزار محاسبه شده است [6].

$$MRR = \frac{(M_1 - M_2)}{\rho_{Ti} T} \times 10^3 \quad (1)$$

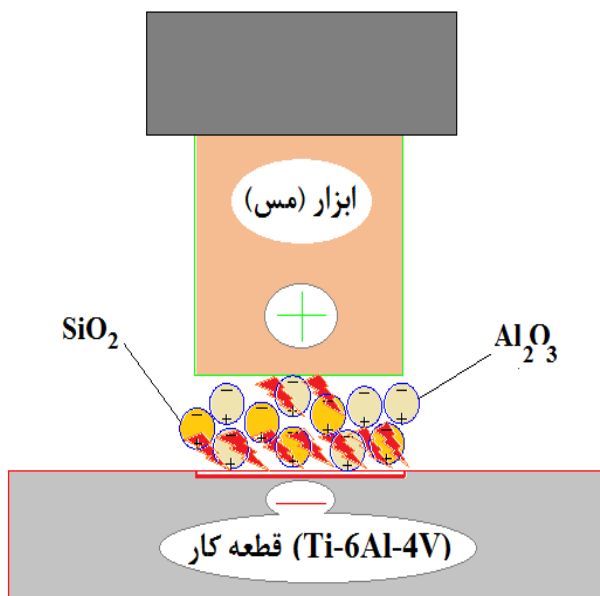
$$TRR = \frac{(M_1 - M_2)}{\rho_{Cu} T} \times 10^3 \quad (2)$$

$$TWR = \frac{\rho_{Cu} T}{MRR} \times 100 \quad (3)$$

در رابطه ۱ و ۲ مقدار نرخ براده‌برداری و سایش ابزار به میلی‌متر مکعب بر دقیقه است. M_1 و M_2 جرم قطعه کار و ابزار به ترتیب قبل و بعد از ماشین‌کاری به گرم و T مدت‌زمان ماشین‌کاری به دقیقه و ρ_{Cu} و ρ_{Ti} به ترتیب چگالی قطعه کار و ابزار گرم بر سانتی‌متر مکعب است. نرخ سایش ابزار معیاری است که درصد حجم جدا شده از ابزار را نسبت به حجم جدا شده از قطعه کار را در هر آزمایش نشان می‌دهد. با وزن کردن جرم ابزار قبل و بعد از انجام هر

شاخص آماری دیگر که به‌طور عمده برای ارزیابی مدل‌سازی مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرند اندازه‌گیری میانگین مقدار تغییرات نقاط در مدل است. نتایجی که از نرخ براده‌برداری در نرم‌افزار طراحی آزمایش‌ها وارد شده بود عدد ۰/۹۶۶۶ را نشان می‌دهد. همچنین در نمودارهای ۱ و ۲ که به‌ترتیب نمودار توزیع احتمال داده و نمودار پراکندگی مقدار باقیمانده‌ها در بازه زمانی است نمایش داده شده است. با توجه به نزدیکی نقاط به خط مورب در نمودار ۱ و پراکندگی نقاط در بازه ۳/۷۷- تا ۳/۷۷+ در نمودار ۲ نشان می‌دهد فرض نرمال بودن باقیمانده‌ها و فرض استقلال باقیمانده‌ها معتبر و برقرار است. همچنین بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که فرضیات رگرسیون معتبر و حاکی از مدل مناسب برای پاسخ نرخ براده‌برداری است.

با توجه به جدول ۷ می‌توان نتیجه گرفت چه فاکتورهایی تاثیر بیشتری در بالا رفتن نرخ براده‌برداری ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی دارند. این فاکتورها به‌ترتیب $(A > C > D > B)$ است. بنابراین در نمودار ۳، اثر ترکیب نانوذرات را در چهار فاکتور ورودی طراحی آزمایش‌ها برای تغییرات پاسخ نرخ براده‌برداری در شدت جریان ۸ آمپر نشان می‌دهد. وجود دو نانوذره به‌طور همزمان اثر یکدیگر را تقویت کرده و باعث افزایش انرژی تخلیه می‌شود و یونیزاسیون کانال پلاسما سریع‌تر رخ می‌دهد. حرف شماره B از نمودار ۴ نشان می‌دهد که غلظت ترکیبی اثر چندانی بر روی نرخ براده‌برداری نداشته و بیشترین تاثیر با A شدت جریان تخلیه در پاسخ آزمایش‌ها گرفته بوده است. تاثیرات روشنی پالس به‌صورت خطی رو به افزایش بوده است به‌طوری که با افزایش زمان روشنی پالس نرخ براده‌برداری هم افزایش می‌یابد. افزودن ترکیب نسبی نانوذرات به دی‌الکتریک تا درصد مشخصی به نرخ براده‌برداری افزوده می‌شود، بعد از آن با بیشتر شدن از یک نسبت مشخص از حجم براده‌برداری آن می‌کاهد.



شکل ۲) نمایش شماتیک مکانیزم مخلوط پودر در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی

جدول ۵) فاکتورهای ورودی و سطوح آنها برای سطح مرکزی CCD

پارامترها	علامت	واحد	کدهای مراحل		
			-۱	۰	+۱
شدت جریان تخلیه	A	آمپر	۱۲	۸	۴
غلظت	B	گرم بر لیتر	۳	۲	۱
زمان روشنی پالس	C	میکروثانیه	۱۰۰	۵۰	۲۵
نسبت ترکیب حجمی ذرات	D	درصد	۷۵	۵۰	۲۵

نتایج و بحث

مدل‌سازی ریاضی نرخ براده‌برداری

روش پاسخ سطح برای یافتن رابطه بین پاسخ مورد نظر آزمایش‌ها و متغیرهای ورودی مستقل با استفاده از شیوه‌های آماری و ریاضی است. در این تحقیق برای تعیین ارتباط بین ذرات و خروجی‌های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی از آن استفاده شده است. نانوذرات معلق‌شده در دی‌الکتریک ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با جذب انرژی، یون‌ها و الکترون‌های زیادی تولید کرده که به سمت الکترودها (قطعه‌کار و ابزار) حرکت می‌کنند که شکل‌گویی این نوع ماشین‌کاری در شکل ۲ نشان داده شده است. این اتفاق موجب افزایش تعداد جرقه‌ها در واحد زمان (فرکانس جرقه‌ها) می‌شود.

استحکام دی‌الکتریک در مورد آب دی‌یونیزه‌شده تقریباً ۱/۸۷ برابر استحکام دی‌الکتریک نفت سفید است. بالاتر بودن استحکام آب دی‌یونیزه‌شده باعث می‌شود که در هنگام ماشین‌کاری زمان تاخیر جرقه نسبت به زمانی که ماشین‌کاری در نفت سفید انجام می‌شود بیشتر باشد. به بیان ساده‌تر، تخلیه الکتریکی در نفت سفید راحت‌تر از آب دی‌یونیزه‌شده انجام می‌شود. به همین دلیل، از نانوذرات در سیال مورد آزمایش استفاده شده است تا استحکام شکست دی‌الکتریک آب دی‌یونیزه‌شده پایین آورده شود و نرخ براده‌برداری افزایش یابد.

نتایج حاصل آزمایش‌های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه ذرات ترکیب‌شده به‌صورت نسبی در جدول ۶ نشان داده شده است. این نتایج شامل تاثیر شدت جریان تخلیه، غلظت افزودنی ذرات، زمان روشنی پالس و ترکیب نسبی پودرها بر روی مشخصه‌های خروجی فرآیند است. تعداد آزمایش‌ها ۲۷ مورد است که همراه با پاسخ آن در جدول ۶ آورده شده است. جزییات آنالیز واریانس برای پاسخ نرخ براده‌برداری در جدول ۷ نشان داده شده است. در صورتی که مقدار معیار P کمتر از ۰/۰۵ باشد مدل معنی‌دار است. با توجه به جدول ۷ مقدار P-value برای مدل طراحی‌شده کمتر از ۰/۰۰۰۱ بوده، در نتیجه مدل معنی‌دار است. همچنین با توجه به جدول ۷، پارامترهای ورودی که اثر متقابل معناداری بر هم ندارند از مدل حذف شدند.

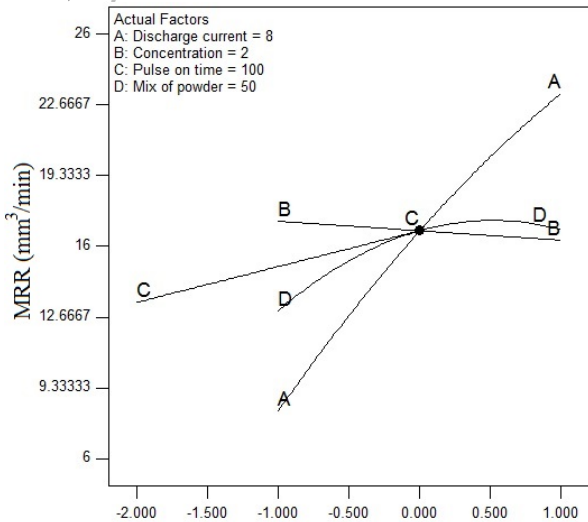
جدول آنالیز واریانس پس از حذف پارامترهای غیرموثر، اصلاح و مدل مورد نظر ایجاد شد. رابطه نرخ براده‌برداری برای مدل اصلاح‌شده به‌صورت رابطه ۴ و به‌ترتیب عوامل کدشده نشان داده شده است.

$$MRR = +15.05 + 6.27A - 0.45B + 1.69C + 1.12D - 0.34AB + 1.21AC + 0.86AD + 0.79CD - 1.02A^2 - 1.86D^2 \quad (4)$$

ردیف	فاکتور				پاسخ		
	شدت جریان (A)	غلظت (g/l)	زمان روشنی پالس (μs)	ترکیب نسبی (درصد)	MRR (g/mm ³)	TWR (%)	SR (μm)
۱	۸	۲	۵۰	۷۵	۱۳/۲۸	۸/۳۱	۵/۴۱
۲	۸	۲	۵۰	۵۰	۱۳/۷۴	۶/۶۳	۴/۵۱
۳	۴	۳	۱۰۰	۲۵	۵/۹	۵/۲۳	۴/۹۷
۴	۸	۲	۲۵	۵۰	۱۱/۸۷	۴/۶۷	۴/۶۱
۵	۸	۲	۵۰	۵۰	۱۲/۷۲	۹/۱۳	۴/۸۴
۶	۴	۱	۲۵	۷۵	۵/۸۵	۴/۱۲	۴/۴۱
۷	۱۲	۲	۵۰	۵۰	۲۰/۵۶	۶/۸۳	۴/۸۵
۸	۴	۱	۲۵	۲۵	۵/۳۰	۵/۹۳	۴/۲۱
۹	۱۲	۱	۲۵	۷۵	۱۶/۹۵	۱۳/۲۴	۵/۱۳
۱۰	۱۲	۳	۲۵	۲۵	۱۴/۲۹	۱۶/۲۳	۴/۶۶
۱۱	۸	۲	۵۰	۲۵	۱۲/۹۵	۹/۹۲	۴/۴۸
۱۲	۱۲	۱	۱۰۰	۷۵	۲۴/۵	۶/۲۸	۶/۵۶
۱۳	۸	۲	۵۰	۵۰	۱۵/۱۷	۹/۱۵	۴/۷۹
۱۴	۴	۲	۵۰	۵۰	۷/۳۵	۳/۸۷	۴/۸۳
۱۵	۴	۳	۲۵	۷۵	۶/۱۰	۵/۹۷	۵/۳۱
۱۶	۱۲	۳	۱۰۰	۷۵	۲۴/۸۷	۷/۳۶	۶/۱۳
۱۷	۱۲	۳	۱۰۰	۲۵	۱۶/۶۱	۳/۸۶	۴/۹۲
۱۸	۸	۱	۵۰	۵۰	۱۷/۲۴	۴/۸۷	۴/۸۶
۱۹	۴	۳	۱۰۰	۷۵	۶/۹۵	۴/۴۰	۵/۱۲
۲۰	۴	۱	۱۰۰	۲۵	۵/۹۵	۳/۳۲	۳/۴۱
۲۱	۴	۳	۲۵	۲۵	۵/۲۰	۶/۰۷	۵/۰۳
۲۲	۱۲	۱	۲۵	۲۵	۱۵/۶۶	۱۰/۹۷	۴/۹۵
۲۳	۸	۳	۵۰	۵۰	۱۳/۰۴	۷/۱۷	۵/۱۵
۲۴	۱۲	۳	۲۵	۷۵	۱۵/۱۰	۱۹/۵۸	۴/۸۹
۲۵	۸	۲	۱۰۰	۵۰	۱۷/۷۷	۳/۰۳	۴/۶۷
۲۶	۴	۱	۱۰۰	۷۵	۶/۲۲	۲/۰۳	۳/۹۱
۲۷	۱۲	۱	۱۰۰	۲۵	۱۸/۴	۲/۱۷	۴/۶۶

جدول ۷) آنالیز واریانس برای نرخ براده برداری

عوامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار p	اهمیت
مدل	۸۵۲/۶۰	۱۰	۸۵/۲۶	۴۶/۳۰	> ۰/۰۰۰۱	معنی دار
شدت جریان (A)	۷۰۷/۳۹	۱	۷۰۷/۳۹	۳۸۴/۱۵	> ۰/۰۰۰۱	
غلظت (B)	۳/۵۷	۱	۳/۵۷	۱/۹۴	۰/۱۸۳۰	
زمان روشنی پالس (C)	۵۲/۱۴	۱	۵۲/۱۵	۲۸/۳۱	> ۰/۰۰۰۱	
ترکیب نسبی (D)	۲۲/۳۸	۱	۲۲/۳۸	۱۲/۱۵	۰/۰۰۳۱	
AB	۱/۸۷	۱	۱/۸۷	۱/۰۲	۰/۳۲۸۴	
AC	۲۳/۶۱	۱	۲۳/۶۱	۱۲/۸۲	۰/۰۰۲۵	
AD	۱۱/۷۲	۱	۱۱/۷۲	۶/۳۶	۰/۰۲۲۶	
CD	۱۰/۰۲	۱	۱۰/۰۲	۵/۴۴	۰/۰۳۳۰	
A ²	۳/۴۳	۱	۳/۴۳	۱/۸۶	۰/۱۹۱۵	
D ²	۱۱/۴۴	۱	۱۱/۴۴	۶/۲۱	۰/۰۲۴۱	
باقیمانده	۲۹/۴۶	۱۶	۱/۸۴	-	-	
عدم انطباق	۲۶/۴۳	۱۴	۱/۸۹	۱/۲۵	۰/۵۳۲۱	غیرمعنی دار
خطای خالص	۳/۰۳	۲	۱/۵۱	-	-	
مقادیر کلی	۸۸۲/۰۷	۲۶	-	-	-	



نمودار ۴) انحراف معیار برای فاکتورها به صورت کد

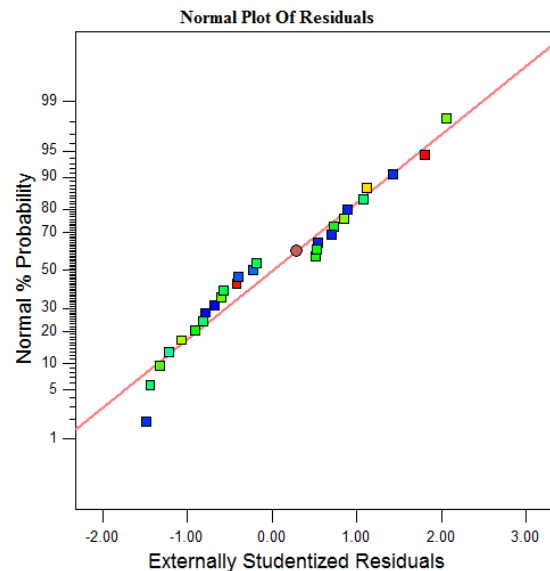
تصویر کانتوری ترکیب دو نانوذره اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم را در غلظت ۲ گرم بر لیتر و زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه، در شدت جریان‌های مختلف در نمودار ۳ نشان داده می‌شود. منحنی کانتوری نشان می‌دهد با افزایش نسبت ترکیب اکسید آلومینیوم نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد.

همچنین وجود نانوذرات از طریق کاهش استحکام شکست دی‌الکتریک و کاهش زمان تاخیر جرقه باعث افزایش نرخ براده‌برداری می‌شود. با افزایش جریان ماشین‌کاری، تاثیر افزودن نانوذرات بر روی نرخ براده‌برداری بیشتر می‌شود. این به علت افزایش انرژی ستون پلاسما و یونیزه شدن دی‌الکتریک در فاصله گپ بیشتر است که باعث ادامه داشتن بیشتر جرقه‌های مفید می‌شود. بنابراین ماشین‌کاری به علت پالس‌های مزاحم ناشی از آلودگی گپ در زمان‌های روشنی پالس طولانی‌تر دچار وقفه نمی‌شود.

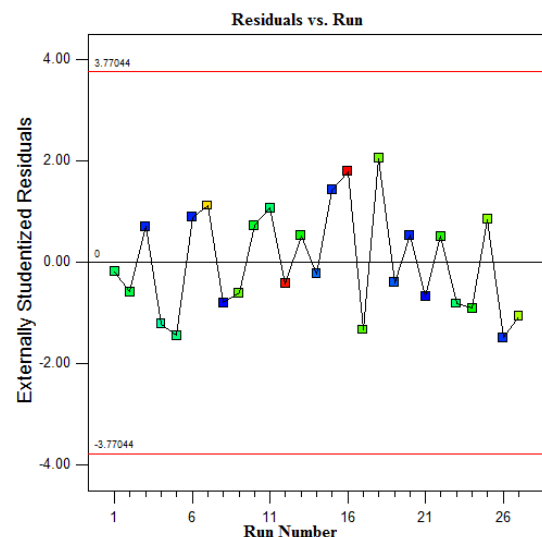
روند افزایش شدت جریان که باعث نرخ براده‌برداری بیشتر می‌شود در نمودار ۵ نشان داده می‌شود که از جریان تخلیه پایین تا بالاترین جریان شکل منحنی تغییر نمی‌کند، اما با ترکیب ذرات در یک جریان تخلیه مشخص، نرخ براده‌برداری متفاوت ایجاد می‌شود. به این ترتیب هر چقدر ترکیب نانوذرات دی‌اکسید آلومینیوم بیشتر شود به همان نسبت نرخ براده‌برداری هم بالاتر می‌رود. بنابراین حداکثر نرخ براده‌برداری تقریباً در ترکیب ۷۰٪ مشاهده می‌شود. هر چقدر ترکیب ذرات اکسید آلومینیوم بالاتر رود مقدار نرخ براده‌برداری به اندازه محدودی به نسبت نانوذرات اکسید سیلیسیم افزایش می‌یابد که علت آن چگالی متفاوت ذرات افزودنی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آنها است که منجر به کاهش زمان تاخیر جرقه و به حداقل رسیدن جرقه‌های آرک و حذف اتصال کوتاه می‌شود.

مدل‌سازی ریاضی نرخ سایش ابزار

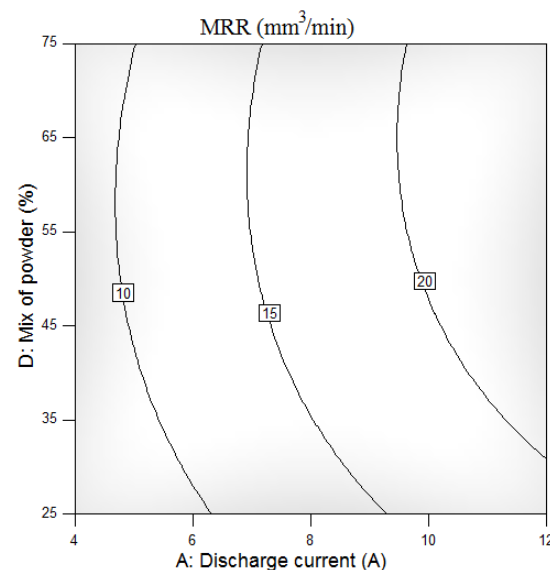
مدل نرخ سایش حجمی ابزار هم مانند نرخ براده‌برداری آن باید قابلیت پیش‌بینی داشته باشد. براساس جدول آنالیز واریانس ارایه شده برای پاسخ سایش نسبی ابزار، نتیجه‌گیری می‌شود که مدل درجه دوم از لحاظ آماری معنی‌دار است. جدول آنالیز واریانس و



نمودار ۱) پراکندگی احتمال داده‌ها برای نرخ براده‌برداری

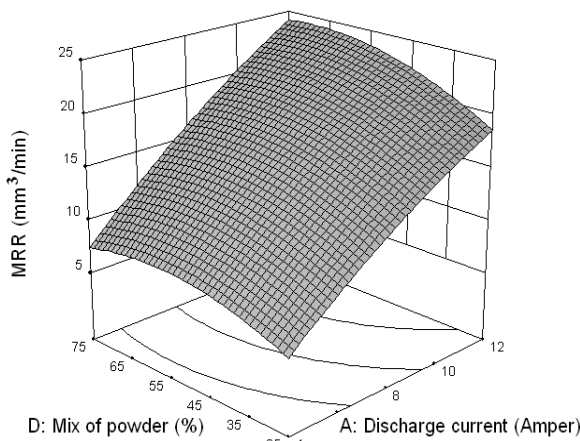


نمودار ۲) ترتیب زمانی مقدار باقی‌مانده نرخ براده‌برداری



نمودار ۳) منحنی مسیر نرخ براده‌برداری در غلظت ۲ گرم بر لیتر و زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه

داشته‌اند که می‌توان در نمودار ۸ اثر چهار فاکتور طراحی را با هم مشاهده کرد. همان طور که از شکل منحنی‌ها درک می‌شود منحنی A و B شدت جریان تخلیه الکتریکی و غلظت پودر افزودنی را در دی‌الکترونیک نشان می‌دهد که رابطه خطی در افزایش سایش ابزار دارد. تاثیر غلظت ترکیبی از همه فاکتورهای ورودی بر روی سایش ابزار کمتر بوده است. منحنی C نشان می‌دهد که با افزایش زمان روشنی پالس، سایش ابزار با شیب تندی پایین می‌آید و همچنین منحنی D که ترکیب نسبی ذرات است در نقطه وسط منحنی به حداقل سایش ابزار رسیده است.



نمودار (۵) سبدهی سطح پاسخ نرخ براده‌برداری نسبت به جریان تخلیه و ترکیب ذرات، غلظت ۲ گرم بر لیتر و زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه

ضرایب معادله رگرسیون مساله به صورت کد شده برای نرخ سایش ابزار به صورت زیر در جدول ۸ آمده است. پارامتر غیرموثر از مدل سایش ابزار حذف شده و جدول آنالیز و واریانس براساس شرایط مدل مورد نظر ایجاد می‌شود. نتایج آماری از مدل رگرسیون، رابطه سایش نسبی ابزار برای مدل اصلاح شده به صورت رابطه ۵ و به ترتیب عوامل کد شده داده شده است.

(۵)

$$\text{TWR} = 5.9426 + 2.45819A + 1.25931B - 2.72817C + 0.421278D + 0.505813AB - 2.00927AC + 1.07831AD - 0.398227BC - 1.61968C^2 + 2.9159D^2$$

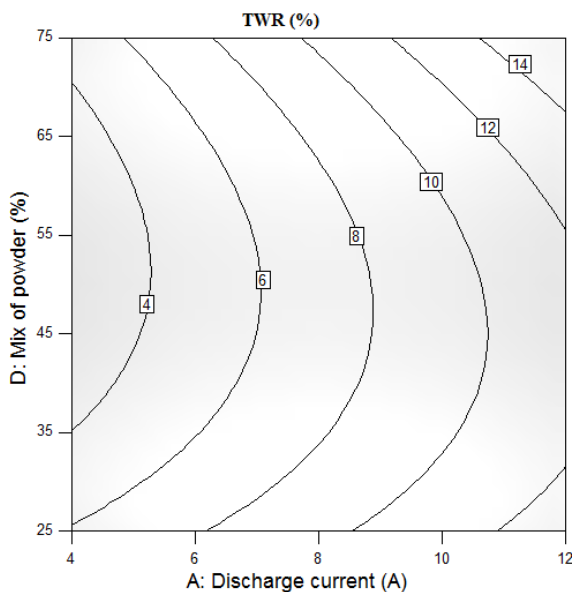
برای ارزیابی مدل‌سازی مناسب، اندازه‌گیری میانگین مقدار تغییرات نقاط در مدل بررسی شده است. نتایجی که از سایش نسبی ابزار در نرم‌افزار طراحی آزمایش‌ها وارد شده بود عدد ۰/۸۳۷۱ را نشان می‌دهد. همچنین در نمودارهای ۶ و ۷ که به ترتیب نمودار توزیع احتمال نرمال داده و نمودار ترتیب زمانی مقدار باقی‌مانده برای سایش ابزار هستند نمایش داده شده است که با توجه به نزدیکی نقاط به خط مورب در نمودار ۶ و پراکندگی نقاط در بازه ۳/۷۷- تا ۳/۷۷+ در نمودار ۷ حاکی از مدل مناسب برای پاسخ سایش نسبی ابزار است.

با توجه به داده‌ها شاخص‌های شدت جریان و زمان روشنی پالس، پارامترهای موثر هستند. در سایش نسبی ابزار برخلاف داده‌های مدل‌سازی نرخ براده‌برداری به ترتیب زمان روشنی پالس و بعد از آن شدت جریان تخلیه الکتریکی بیشترین اثر را بر روی سایش ابزار

جدول ۸ آنالیز واریانس برای نرخ سایش ابزار

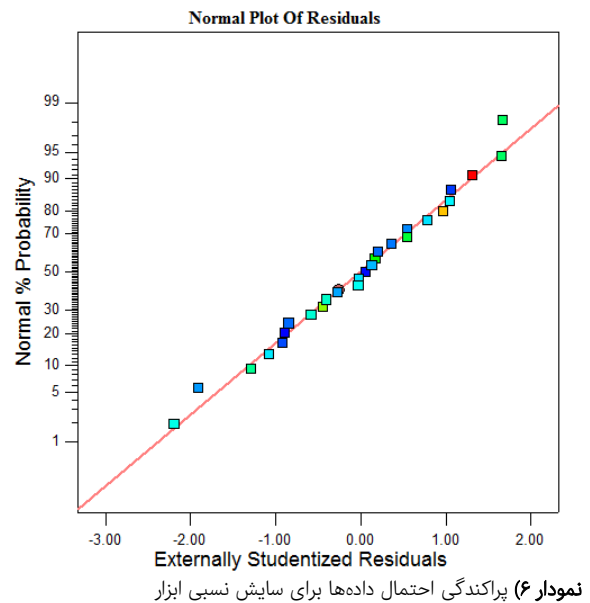
عوامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار p	اهمیت
مدل	۴۰/۸۲	۱۰	۴۰/۸۱	۱۴/۳۶	> ۰/۰۰۰۱	معنی‌دار
شدت جریان (A)	۱۰۸/۶۰	۱	۱۰۸/۶۰	۳۸/۸۱	> ۰/۰۰۰۱	
غلظت (B)	۲۸/۵۰	۱	۲۸/۵۰	۱۰/۱۹	۰/۰۰۵۷	
زمان روشنی پالس (C)	۱۳۳/۱۹	۱	۱۳۳/۱۹	۴۷/۸۸	> ۰/۰۰۰۱	
ترکیب نسبی (D)	۳/۱۹	۱	۳/۱۹	۱/۱۴	۰/۳۰۱۲	
AB	۴/۰۹	۱	۴/۰۹	۱/۴۶	۰/۲۴۴۰	
AC	۶۵/۳۹	۱	۶۵/۳۹	۲۳/۳۷	۰/۰۰۰۲	
AD	۱۸/۶۰	۱	۱۸/۶۰	۶/۶۵	۰/۰۲۰۲	
CD	۲/۵۷	۱	۲/۵۷	۰/۹۲	۰/۳۵۲۳	
A ²	۶/۷۷	۱	۶/۷۷	۲/۴۲	۰/۱۳۹۴	
D ²	۲۸/۳۴	۱	۲۸/۳۴	۱۰/۱۳	۰/۰۰۵۸	
باقیمانده	۴۴/۷۷	۱۶	۲/۸۰	-	-	
عدم انطباق	۴۰/۵۷	۱۴	۲/۹۰	۱/۳۸	۰/۴۹۸۲	غیرمعنی‌دار
خطای خالص	۴/۲۰	۲	۲/۱۰	-	-	
مقادیر کلی	۴۴۶/۵۹	۲۶	-	-	-	

با افزایش شدت جریان به واسطه افزایش چگالی جریان و در پی آن افزایش انرژی حرارتی ایجاد شده در محل تخلیه، نرخ براده‌برداری در دی‌الکتریک آب دی‌یونیزه شده افزایش می‌یابد. به همان نسبت سایش نسبی ابزار هم به علت حرارت ایجاد شده در منطقه ماشین‌کاری رو به افزایش می‌رود که نمودار ۹ منحنی کانتوری آن را نشان می‌دهد. بالابودن استحکام دی‌الکتریک آب دی‌یونیزه شده باعث می‌شود که هنگام ماشین‌کاری در این سیال، زمان تاخیر جرقه بیشتر باشد. بنابراین تخلیه الکتریکی هنگامی که نانوذرات به آب دی‌یونیزه شده اضافه می‌شود راحت‌تر انجام می‌شود که دلیل آن کاهش استحکام شکست دی‌الکتریک به واسطه ذرات معلق که هدایت الکتریکی بالایی دارند، است. آب دی‌یونیزه شده به علت هدایت حرارتی بالای آن تقریباً $3/86$ برابر به نسبت نفت سفید، مصرف کمتری در صنایع ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی دارد. زیرا هدایت حرارتی بالا در منطقه تخلیه الکتریکی باعث خوردگی بیشتر ابزار می‌شود که با افزودن پودر به سیال درصد زیادی از حرارت منتقل شده توسط نانوذرات ترکیب شده جذب و با یک مکانیزم جرقه قوی‌تر و پایدارتر انرژی را به سطح ماشین‌کاری شده انتقال می‌دهد. همان طور که از نمودار ۹ مشخص است شکل منحنی تاثیرات ترکیب نسبی ذرات را تا بالاترین شدت جریان تقریباً ثابت نشان می‌دهد و در نقطه بهینه و در ترکیب 50% حداقل می‌شود.

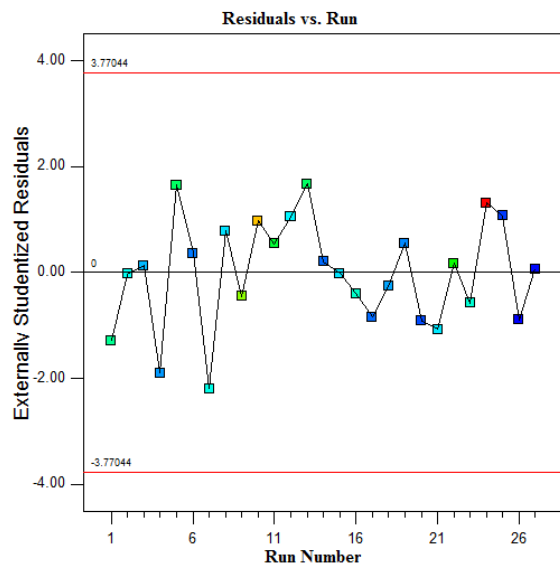


نمودار ۹) نمایش منحنی دوبعدی نرخ براده‌برداری نسبت به جریان تخلیه و ترکیب ذرات، غلظت ۲ گرم بر لیتر و زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه

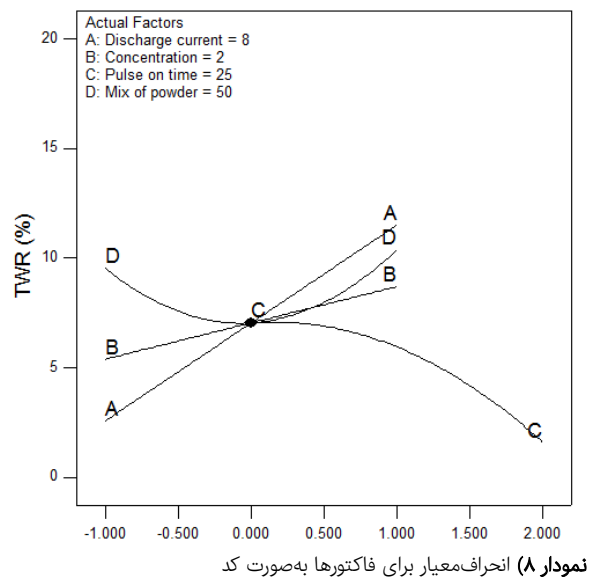
ترکیب 50% از نانوذرات با غلظت ۲ گرم بر لیتر به دی‌الکتریک در نمودار ۱۰ نشان داده شده است که با افزایش زمان روشنی پالس این انرژی باعث تبخیر بیشتری از دی‌الکتریک شده و حباب گاز اطراف کانال پلاسما را بزرگ‌تر می‌نماید که در نهایت به افزایش شعاع کانال پلاسما و کاهش تمرکز انرژی حرارتی در منطقه ماشین‌کاری منجر می‌شود. با افزودن ترکیب 50% از نانوذرات انرژی



نمودار ۶) پراکندگی احتمال داده‌ها برای سایش نسبی ابزار



نمودار ۷) ترتیب زمانی مقدار باقی‌مانده سایش ابزار



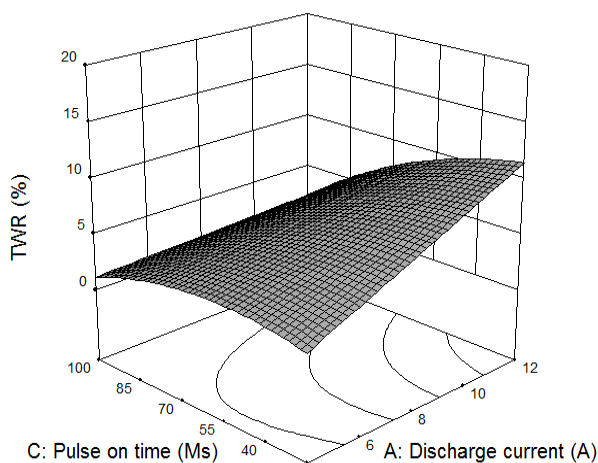
نمودار ۸) انحراف معیار برای فاکتورها به صورت کد

۱۱ و ۱۲ که به ترتیب نمودار توزیع احتمال نرمال داده و نمودار ترتیب زمانی مقدار باقی مانده نمایش داده شده که با توجه به نزدیکی نقاط به خط مورب در نمودار ۱۱ و پراکندگی نقاط در بازه ۳/۷۲ تا ۳/۷۲+ در نمودار ۱۲ دلیلی بر پاسخ مناسب برای مدل زبری سطح است.

با توجه به داده‌ها که در نمودار ۱۳ نشان داده شده است شاخص‌های شدت جریان و ترکیب نسبی نانوذرات دو پارامتر موثر برای زبری سطح قطعه ماشین‌کاری شده هستند. در زبری سطح برخلاف داده‌های نرخ براده‌برداری و سایش ابزار، شدت جریان و ترکیب نسبی نانوذرات اثری مساوی را بر روی زبری سطح داشته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود A و D به ترتیب شدت جریان تخلیه الکتریکی و نسبت غلظت ترکیبی در دی‌الکترونیک، بیشترین اثر را بر روی زبری سطح دارند و با بالا رفتن آن زبری سطح قطعه ماشین‌کاری شده هم افزایش می‌یابد. بعد از آن اثرات B و C که به ترتیب غلظت ترکیبی و زمان روشنی پالس در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بوده است که به نسبت دو پارامتر قبلی کمتر است و با کاهش زمان روشنی پالس زبری سطح بهتر و با افزایش غلظت ترکیبی زبری سطح بدتر می‌شود. در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بدون افزودن پودر پالس‌ها نامنظم بوده و پالس‌های مدار باز زیادی در آن شکل می‌گیرد. با توجه به یکسان نبودن شکل پالس‌ها انرژی آزاد شده از آنها مشابه هم نبوده و این امر موجب از بین رفتن کیفیت سطح تولید شده و عدم یکنواختی آن می‌شود. با توجه به اینکه پالس‌های غیرمفید و مزاحم در این فرآیند زیاد تشکیل می‌شود زمان اتلاف شده در ماشین‌کاری نیز زیاد شده و از نرخ براده‌برداری آن کاسته می‌شود [16].

اثرات تغییرات شدت جریان پالس و نسبت ترکیب ذرات را بر روی زبری سطح قطعه ماشین‌کاری شده در نمودار ۱۴ نشان داده می‌شود. همان‌طور که از منحنی مشخص است، با افزایش نسبت ترکیب ذرات که پودر اکسید آلومینیوم بیشتری در آن استفاده شده است زبری سطح افزایش یافته است. لذا انرژی جرقه‌های حاصل از تخلیه الکتریکی و شار حرارتی متمرکز شده بر روی سطح قطعه با نوع ذرات و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوت آن تغییر می‌کند. نانوذرات اکسید سیلیسیم به دلیل چگالی پایین آنها به نسبت ذرات اکسید آلومینیوم می‌تواند زبری سطح بهتری داشته باشند. با افزایش جریان پالس، انرژی تخلیه الکتریکی بیشتر می‌شود و نیروهای ضربه‌ای روی سطح ماشین‌کاری شده افزایش می‌یابد و سبب می‌شود مواد مذاب بیشتری خارج شود که منجر به تولید حفره‌های عمیق و بزرگ‌تر و به تبع آن افزایش زبری سطح شود. اثرات تغییرات شدت جریان و زمان روشنی پالس را بر روی زبری سطح ماشین‌کاری شده در نمودار ۱۵ نشان داده می‌شود. طبق این نمودار مشاهده می‌شود که در جریان تخلیه پایین تاثیر زمان روشنی پالس بر روی زبری سطح قطعه ماشین‌کاری شده بسیار پایین است که دلیل آن آلودگی پایین در منطقه گپ است. سطوح انرژی تخلیه بالا، آلودگی گپ ماشین‌کاری شده را افزایش می‌دهد و احتمال تولید پالس آرک بیشتر می‌شود. بنابراین در سطوح انرژی تخلیه بالا زبری سطح به دست آمده بیشتر است. همچنین با افزایش زمان روشنی

حرارتی که سبب گسترش منطقه حرارت دیده می‌شود را کاهش می‌دهد که علت آن ترکیب مناسب نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم به سیال است. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی هر دو نانوذر تقریباً از یک خانواده هستند و با این تفاوت که ذرات اکسید آلومینیوم جذب انرژی حرارتی بیشتری به نسبت نانوذرات اکسید سیلیسیم دارند. با توجه به نمودار ۱۰ مشخص است با افزایش شدت جریان ۱۲ آمپر در زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه، تاثیر محسوسی بر افزایش سایش نسبی ابزار با ترکیب ۵۰٪ از نانوذرات نداشته است و می‌توان به نرخ براده‌برداری بالا و حداقل سایش ابزار در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی دست یافت.



نمودار ۱۰) سطح پاسخ نرخ سایش ابزار نسبت به جریان تخلیه و زمان روشنی جرقه، غلظت ۲ گرم بر لیتر و ترکیب نسبی ذرات ۵۰٪

مدل‌سازی ریاضی زبری سطح

براساس جدول آنالیز واریانس ارائه شده برای پاسخ زبری سطح، نتیجه‌گیری حاصل می‌شود که مدل درجه دوم از لحاظ آماری معنی‌دار است و قابلیت پیش‌بینی دارد. جدول آنالیز واریانس و ضرایب معادله رگرسیون مساله به صورت کد شده برای زبری سطح در جدول ۹ آمده است. پارامتر غیرموثر از مدل زبری سطح همانند دو مدل نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار حذف شده و جدول آنالیز واریانس براساس شرایط موجود قابل استفاده است و مدل مورد نظر ایجاد می‌شود. رابطه زبری سطح برای مدل اصلاح شده به دست آمده به صورت رابطه ۶ و به ترتیب عوامل کد شده براساس نتایج آماری از مدل رگرسیون داده شده است.

$$SR = 4.83168 + 0.317297A + 0.225611B + 0.0591935C + 0.3153D - 0.322938AB + 0.270526AC + 0.149187AD + 0.170108CD + 0.058457A^2 \quad (6)$$

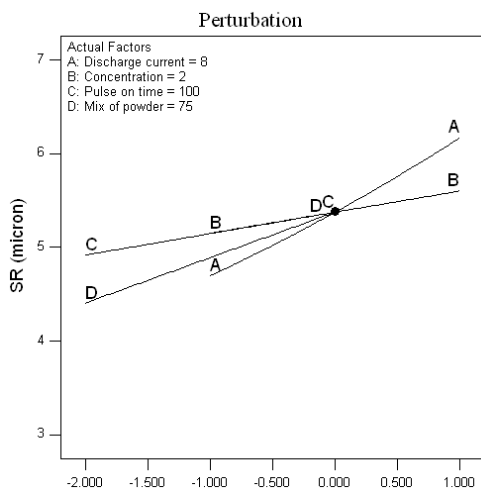
شاخص آماری زبری سطح که برای اندازه‌گیری میانگین مقدار تغییرات نقاط در مدل، برای نتایجی که به نرم‌افزار طراحی آزمایش‌ها وارد شده بود عدد ۰/۸۷۰۱ را نشان می‌دهد. همچنین در نمودارهای

و چاله‌های بزرگ‌تری در سطح نمونه ایجاد می‌شود که باعث افزایش اندازه زبری سطح می‌شود.

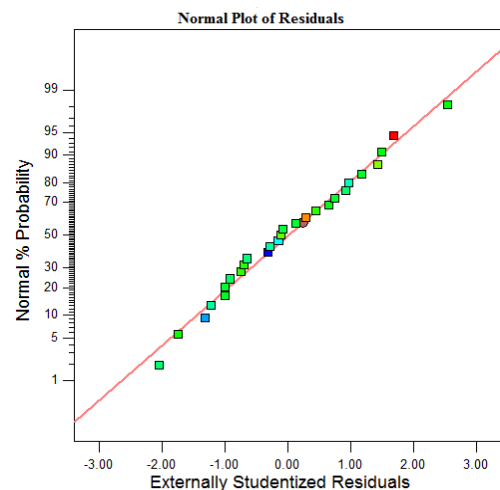
پالس، طول زمان ماشین‌کاری و انرژی جرقه‌ها بیشتر شده و شعاع کانال پلاسما افزایش می‌یابد. با افزایش انرژی جرقه‌ها و شعاع کانال پلاسما عمق و قطر چاله‌های به‌دست‌آمده در قطعه‌کار افزایش یافته

جدول ۹) آنالیز واریانس برای زبری سطح

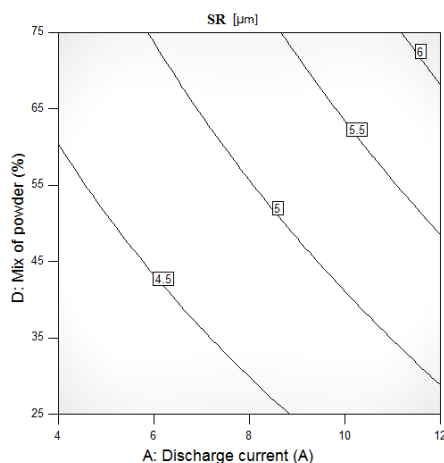
عوامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار p	اهمیت
مدل	۸/۱۱	۹	۰/۹۰	۱۲/۶۶	۰/۰۰۰۱ >	معنی‌دار
شدت جریان (A)	۱/۸۱	۱	۱/۸۱	۲۵/۴۲	۰/۰۰۰۱	
غلظت (B)	۰/۹۲	۱	۰/۹۲	۱۲/۸۷	۰/۰۰۲۳	
زمان روشنی پالس (C)	۰/۰۶۴	۱	۰/۰۶۴	۰/۹۰	۰/۳۵۵۰	
ترکیب نسبی (D)	۱/۷۹	۱	۱/۷۹	۲۵/۱۰	۰/۰۰۰۱	
AB	۱/۶۷	۱	۱/۶۷	۲۳/۴۴	۰/۰۰۰۲	
AC	۱/۱۹	۱	۱/۱۹	۱۶/۶۵	۰/۰۰۰۸	
AD	۰/۳۶	۱	۰/۳۶	۵/۰۰	۰/۰۳۹۰	
CD	۰/۴۷	۱	۰/۴۷	۶/۵۸	۰/۰۲۰۰	
A ²	۰/۰۲۰	۱	۰/۰۲۰	۰/۲۸	۰/۶۰۱۳	
D ²	۱/۲۱	۱۷	۰/۰۷۱	-	-	
باقیمانده	۱/۱۵	۱۵	۰/۰۷۶	۲/۳۷	۰/۳۳۶۸	غیرمعنی‌دار
عدم انطباق	۰/۰۴۶	۲	۰/۰۳۲	-	-	
خطای خالص	۹/۳۲	۲۶	-	-	-	



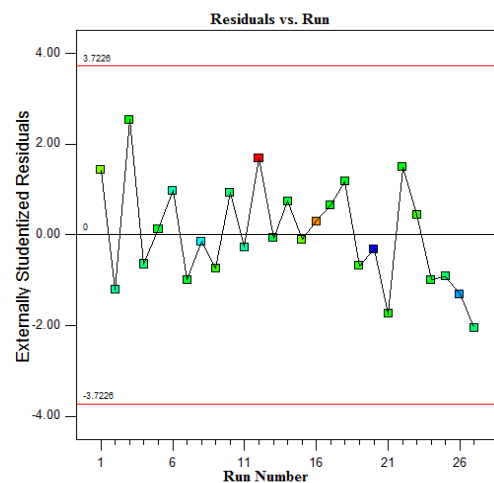
نمودار ۱۳) انحراف معیار برای فاکتورها به صورت کد



نمودار ۱۱) پراکندگی احتمال داده‌ها برای زبری سطح



نمودار ۱۴) کانتوری برای زبری سطح، غلظت ۲ گرم بر لیتر و زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه



نمودار ۱۲) ترتیب زمانی مقدار باقی‌مانده زبری سطح

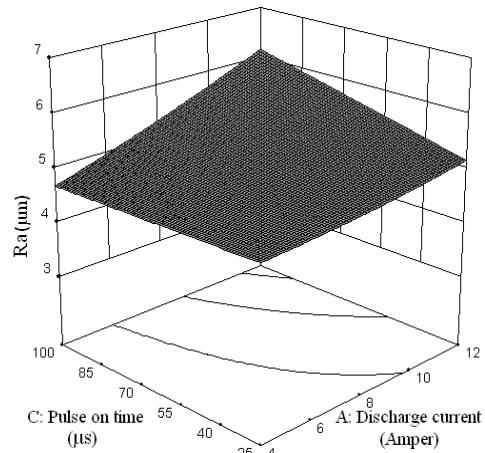
در این نمودار نقطه مناسب برای بهینه‌کردن نرخ براده‌برداری و سایش ابزار نمایش داده شده است. با توجه به داده‌های ورودی به نرم‌افزار، نرخ براده‌برداری در بالاترین حد و سایش ابزار و همچنین زبری سطح، در پایین‌ترین مقدار خود تنظیم شده است تا نتایج بهینه‌سازی، استخراج و با نتایج تجربی مقایسه شود. آزمایش‌های بهینه‌سازی در دو مرحله انجام شده است که در مرحله اول نرخ براده‌برداری و سایش ابزار مبنای بهینه‌سازی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بوده است. همان طور که از جدول ۱۰ مشاهده می‌شود، نتایج تجربی و پیش‌بینی برای نرخ براده‌برداری ۱٪ خطا و برای سایش ابزار ۲/۸۱٪ خطا دارد. که میزان خطا کمتر از ۵٪ قابل قبول است. در مرحله دوم زبری سطح معیار بهینه‌سازی بوده و خطا ۴/۶۶٪ است.

بررسی بافت سطح

به منظور ارزیابی بهتر کیفیت سطح از میکروسکوپ‌های الکترونی برای آنالیز و بررسی سطح قطعات ماشین‌کاری شده آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V استفاده شده است. تمامی عکس‌های SEM در شدت جریان تخلیه ۸ آمپر و زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه و با دقت تصویر ۲۰ میکرومتر گرفته شده است. همان طور که از شکل ۳-A مشاهده می‌شود، افزایش زمان روشنی پالس در دی‌الکتریک بدون نانوذرات باعث می‌شود که انرژی حرارتی بیشتری به قطعه کار و همچنین ابزار اعمال شود. بنابراین در EDM بدون ذرات افزودنی انرژی مستقیماً به قطعه کار وارد می‌شود و به واسطه این انرژی زیاد سطح قطعه کار دارای لایه ذوب‌شده مجدد با ضخامت زیاد و زبری سطح بالاتری به نسبت ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با حضور نانوذرات دارد.

با افزودن نانوذرات به اندازه ۲ گرم بر لیتر و ترکیب نسبی ۲۵٪ (۲۵٪ اکسید آلومینیوم و ۷۵٪ اکسید سیلیسیم) مواد به‌جامانده از مذاب در سطح ماشین‌کاری کاهش می‌یابد. ذرات افزودنی انرژی تخلیه را در سطح پخش کرده که منجر به زبری سطح بهتر و لایه ذوب‌شده مجدد با ضخامت کمتر می‌شود که در قسمت B از شکل نشان داده شده است. بقایای به‌جامانده از ماشین‌کاری با افزودن ذرات به‌صورت ترکیب نسبی در حجم و اندازه مورد نظر به حداقل مقدار ممکن رسیده است و از شکل ۳-C مشاهده می‌شود که در ترکیب نسبی ۵۰٪ بهترین کیفیت سطح به‌دست می‌آید. دلیل آن تمرکز مناسب انتقال حرارت و کانال پلاسما در حضور نانوذرات در ترکیب نسبی مناسب است. همان طور که از تصویر قابل مشاهده است سطح دارای کمترین ترک و لایه ذوب‌شده مجدد به نسبت ترکیبات نسبی کمتر بوده است.

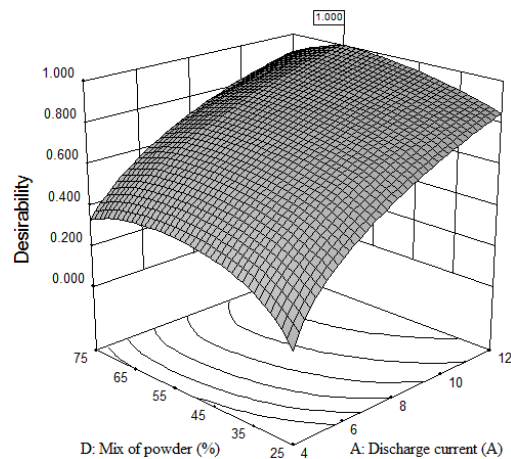
آنچه که از شکل ۳-D، ۳-E و ۳-F به ترتیب مشاهده می‌شود برگشت دوباره ترک‌ها و بقایای به‌جامانده از ماشین‌کاری با افزودن ذرات در ترکیب‌های بیشتر است. ترک‌ها در ترکیب نسبی ۷۵٪ کمتر از ترکیب ۱۰۰٪ از اکسید آلومینیوم و سیلیسیم بوده است و همچنین لایه ذوب‌شده مجدد کمتری به نسبت ترکیب واحد از یک نانوذرده داشته است که در ۳-E و ۳-F آن را نشان می‌دهد. دلیل



نمودار ۱۵) سطح پاسخ از زبری سطح، نسبت به جریان تخلیه و زمان روشنی جرقه، غلظت ۲ گرم بر لیتر و ترکیب نسبی ذرات ۷۵٪

بهینه‌سازی فرآیند

در آزمایش‌های بهینه‌سازی، هر یک از عوامل تاثیرگذار بر فرآیند به نحوی تعیین می‌شود تا یک یا چند پارامتر خروجی بهینه شوند. در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بهترین پارامترهای ورودی به نحوی تعیین می‌شود تا بیشترین نرخ براده‌برداری با بهترین سطح ممکن حاصل شود. در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی شدت جریان تخلیه الکتریکی، غلظت ذرات افزودنی، زمان روشنی پالس و درصد ترکیب مناسب ذرات جهت حصول خروجی مورد نظر، برای بیشترین نرخ براده‌برداری و حداقل زبری سطح قطعه ماشین‌کاری مد نظر است. در این گونه موارد قانون مشخصی برای به‌دست آوردن رابطه خروجی مورد نظر برحسب ترکیب مواد اولیه وجود ندارد و بهترین راه‌حل، استفاده از روش‌های طراحی آزمایش‌ها جهت بهینه‌سازی فرآیند است. به منظور بررسی اثر چهار فاکتور ورودی، طراحی آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار Design Expert انجام شده است. نموداری سه‌بعدی از نتایج آزمایش‌های بهینه‌سازی در نمودار ۱۶ نشان داده می‌شود که بعد پایان مدل‌سازی از نتایج آزمایشگاهی اولیه به‌دست می‌آید و پس از آن نتایج تجربی و تخمین زده‌شده مقایسه می‌شوند.



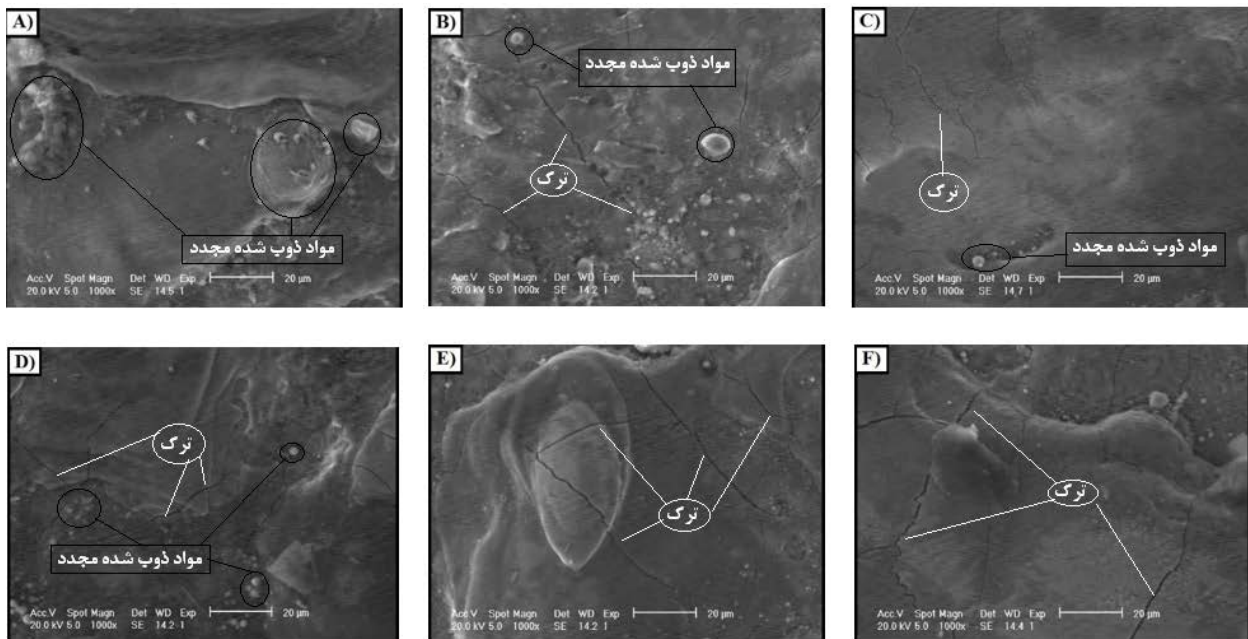
نمودار ۱۶) سطح پاسخ عملکرد مطلوبیت کلی نسبت به جریان تخلیه و ترکیب ذرات، غلظت ۲ گرم بر لیتر و زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه

بقایای ماشین‌کاری به همراه ترک‌های سطحی در آن مشاهده می‌شود.

آن تمرکز بیشتر کانال پلاسما با ترکیب همزمان دو نانوذره است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ذرات اکسید آلومینیوم و سیلیسیم به تنهایی سطح ماشین‌کاری ایده‌آل را تولید نمی‌کنند و درصدی از

جدول ۱۰) نتایج نهایی بهینه‌سازی فرآیند مخلوط پودر در دسته‌بندی‌های مختلف ماشین‌کاری

نوع ماشین‌کاری	تنظیمات				MRR (mm ³ /min)		TWR (%)		Ra (μm)		خطا (درصد)		
	A	B	C	D	آزمون عملی	مدل‌سازی	آزمون عملی	مدل‌سازی	آزمون عملی	مدل‌سازی	MRR	TWR	SR
خشن‌کاری	۱۲	۱	۱۰۰	۶۲	۲۴/۸۷	۲۵/۱۲	۲/۰۲۷	۱/۹۷	-	-	-	۲/۸۱	-
پرداخت	۴	۱	۱۰۰	۲۵	-	-	-	-	۳/۵۳۸	۳/۷۱۱	-	-	۴/۶



شکل ۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح حاصل از فرآیندهای ماشین‌کاری: (A) تخلیه الکتریکی معمولی، (B) ترکیب ۲۵٪، (C) ترکیب ۵۰٪، (D) ترکیب ۷۵٪، (E) ترکیب ۱۰۰٪ اکسید آلومینیوم، (F) ترکیب ۱۰۰٪ اکسید سیلیسیم

افزایش سایش ابزار با ترکیب نسبی ۷۵٪ از نانوذرات نداشته است و می‌توان به نرخ براده‌برداری بالا و حداقل سایش ابزار در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی دست یافت. بهبود سایش نسبی ابزار در ترکیب نسبی ۵۰٪ از ذرات و با شدت جریان ۱۲ آمپر، ۵/۴۶ برابر بوده است. با توجه به تصاویر SEM، نقطه بهینه ۵۰٪ از ترکیب نسبی ذرات، سطحی با کمترین ترک و لایه ذوب‌شده مجدد را ایجاد می‌کند. دلیل این تغییر، تمرکز مناسب کانال پلاسما و انتقال حرارت خوب نانوذرات در ترکیب مناسب است.

تشکر و قدردانی: با سپاس و تشکر فراوان از استادان گرامی جناب آقایان دکتر وحید عابدینی و دکتر علیرضا حاجی علی محمدی، استادیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان که در این راه با راهنمایی‌های خود این جانب را یاری نمودند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان، تأیید می‌نمایند که نتایج تماماً حاصل دستاوردهای تحقیقی این گروه است و در صورت استفاده از دستاوردهای دیگران مرجع استفاده از آن ذکر شده است و همین‌طور مقاله فقط برای مجله مهندسی مکانیک مدرس ارسال شده است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر ترکیب نسبی دو نانوذره اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم بر دی‌الکتریک ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی پرداخته شده است. اثر همزمان دو نانوذره با درصدهای مختلف بر روی خروجی عملکرد فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V مورد مطالعه قرار گرفته، نتایج حاصل را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

در تعیین رفتار شدت جریان تخلیه و تأثیر آن، هر چقدر ترکیب نانوذرات اکسید آلومینیوم تا یک اندازه مشخص بیشتر شود به همان نسبت نرخ براده‌برداری هم در جریان بالاتر افزایش می‌یابد و نیاز به پودر اکسید آلومینیوم بیشتر است. با افزایش شدت جریان تخلیه از ۴ تا ۱۲ آمپر به ترتیب از ترکیب نسبی ۵۵ به ۷۰٪، نرخ براده‌برداری افزایش یافته است.

با افزایش ترکیب نسبی ذرات اکسید آلومینیوم در ترکیب ۷۰٪ نرخ براده‌برداری ۲۵/۲٪ بهبود پیدا می‌کند.

با افزایش شدت جریان تا ۱۲ آمپر در زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه، انرژی زیاد تخلیه الکتریکی تأثیر محسوسی بر

- 6- Baseri H, Sadeghian S. Effects of nanopowder TiO 2-mixed dielectric and rotary tool on EDM. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016;83(1-4):519-528.
- 7- Assarzadeh S, Ghoreishi M. A dual response surface-desirability approach to process modeling and optimization of Al₂O₃ powder-mixed electrical discharge machining (PMEDM) parameters. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013;64(9-12):1459-1477.
- 8- Chow HM, Yang LD, Lin CT, Chen YF. The use of SiC powder in water as dielectric for micro-slit EDM machining. Journal of Materials Processing Technology. 2008;195(1-3):160-170.
- 9- Yih-Fong T, Fu-Chen C. Investigation into some surface characteristics of electrical discharge machined SKD-11 using powder-suspension dielectric oil. Journal of Materials Processing Technology. 2005;170(1-2):385-391.
- 10- Talla G, Gangopadhyay S, Biswas CK. Influence of graphite powder mixed EDM on the surface integrity characteristics of Inconel 625. Particulate Science and Technology. 2017;35(2):219-226.
- 11- Syed KH, Palaniyandi K. Performance of electrical discharge machining using aluminium powder suspended distilled water. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. 2012;36(3):195-207.
- 12- Shabgard MR, Khosrozadeh B. Investigation of carbon nanotube added dielectric on the surface characteristics and machining performance of Ti-6Al-4V alloy in EDM process. Journal of Manufacturing Processes. 2017;25:212-219.
- 13- Kansal HK, Singh S, Kumar P. Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology. Journal of Materials Processing Technology. 2005;169(3):427-436.
- 14- Kumar A, Mandal A, Dixit AR, Kumar Das A, Kumar S, Ranjan R. Comparison in the performance of EDM and NPEDM using Al₂O₃ nanopowder as an impurity in DI water dielectric. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019;100(5-8):1327-1339.
- 15- Kibria G, Sarkar BR, Pradhan BB, Bhattacharyya B. Comparative study of different dielectrics for micro-EDM performance during microhole machining of Ti-6Al-4V alloy. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010;48(5-8):557-570.
- 16- Shabgard MR, Khosrozadeh B. 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. 2016;16(2):41-50. [Persian]

تعارض منافع: این مقاله حاصل استخراج از پایان نامه کارشناسی ارشد جناب آقای سعید اسکوییان با موضوع "مطالعه تجربی استفاده از مخلوط نانو ذرات اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم در ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ Ti-6Al-4V" است.

سهم نویسندگان: سعید اسکوییان (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰٪); وحید عابدینی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۴۰٪); علی رضا حاجی علی محمدی (نویسنده سوم)، روش شناس/پژوهشگر کمکی (۲۰٪).
منابع مالی: هزینه های پژوهش بر عهده دانشگاه سمنان بوده است.

فهرست علائم

Adj MS	میانگین مربع تصحیح شده
Adj SS	مجموع مربعات تعدیل شده
R-Sq	دقت انطباق مناسب مدل
DF	درجه آزادی
n _a	تعداد نقاط محوری
n _c	تعداد نقاط مرکزی
n _f	تعداد نقاط فاکتوریل
K	تعداد متغیرهای مستقل فرآیند

منابع

- 1- Shabgard MR, Gholipour A, Baseri H. A review on recent developments in machining methods based on electrical discharge phenomena. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016;87:2081-2097.
- 2- Unses E, Can Ç. Improvement of electric discharge machining (EDM) performance of Ti-6Al-4V alloy with added graphite powder to dielectric. Journal of Mechanical Engineering. 2015;61(6):409-418.
- 3- Zhang Y, Liu Y, Shen Y, Ji R, Cai B, Li H, et al. A review of the current understanding and technology of powder mixed electrical discharge machining (PMEDM). IEEE International Conference on Mechatronics and Automation; 2012 Aug 5-8; Chengdu, China: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE); 2012.
- 4- Zhao WS, Meng QG, Wang ZL. The application of research on powder mixed EDM in rough machining. Journal of Materials Processing Technology. 2002;129(1-3):30-33.
- 5- Kumar Anil, Maheshwari S, Sharma C, Beri N. Research developments in additives mixed electrical discharge machining (AEDM): A state of art review. Materials and Manufacturing Processes. 2010;25(10):1166-1180.