



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 Sokeran 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, 100µs 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

مدل سازی آماری پارامترهای موثر در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V با استفاده از مخلوط نانو ذرات اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم در دی الکتریک

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 حاجی علی محمدی PhD

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

چکیده

در این پژوهش، اثر استفاده از دو نانوذره اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم به صورت همزمان با دی الکتریک در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V بررسی شد. پس از بررسی پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک نانوذرات، ۴ پارامتر شدت جریان، غلظت، زمان روشنی پالس و ترکیب نسبی ذرات به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شدند. اثر هر یک از این پارامترها در سه سطح بر نرخ براده برداری، سایش نسبی ابزار و صافی سطح نهایی قطعه بررسی شد. با توجه به پیشرفت صنعت در زمینه مصرف دی الکتریک های زیست محیطی، در این مطالعه آب دیونیزه شده، دی الکتریک ماشین کاری تخلیه الکتریکی بود. همچنین برای طراحی آزمون ها، تحلیل نتایج و بهینه سازی پارامترها از نرم افزار Design Expert استفاده شد. نتایج نشان داد، بهترین کیفیت سطح ماشین کاری، با افزودن نانوذرات در ترکیب نسبی ۵۰٪ به دست می آید. در این درصد از ترکیب، سطح دارای کمترین ترک و لایه ذوب شده مجدد است. همچنین در شرایط شدت جریان ۱۲ آمپر، زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه و ترکیب ۷۵٪ از نانوذرات بیشترین میزان نرخ براده برداری و حداقل سایش ابزار حاصل می شود.

کلیدواژه ها: ماشین کاری 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

ماشین کاری تخلیه الکتریکی (Electrical Discharge Machining) یکی از روش های غیرسنتی ماشین کاری است، که در آن حفره هایی در سطح قطعه کار توسط فرسایش تخلیه الکتریکی ایجاد می شود. توانایی ماشین کاری تخلیه الکتریکی در تولید قطعات با سختی بالا، اشکال پیچیده و قطعات کوچک است. اما نرخ براده برداری کم، زبری سطح بالا، نرخ سایش ابزار بالا، شکل گیری لایه ذوب شده مجدد ضخیم بر روی سطح کار و مشکلات زیست محیطی از محدودیت های این فرآیند است [1]. به طور کلی هدف از بهبود فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی، بالا بردن قابلیت عملکرد ماشین کاری برای دستیابی به پارامترهای خروجی برتر و تکنیک ماشین کاری مواد جدید در شرایط کاری بهتر است.

اضافه کردن پودر مخلوط شده به دی الکتریک یکی از روش های توسعه یافته در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی محسوب می شود [2]. بهبود کیفیت سطح با افزودن پودر در دی الکتریک که به آن ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر (Powder Mixed Electrical Discharge Machining) گفته می شود، امکان پذیر شده است. با اضافه کردن پودر، اندازه گپ ماشین کاری افزایش پیدا می کند و عمل شستشو راحت تر انجام می شود. استحکام دی الکتریک با این روش کاهش یافته و با افزایش عرض کانال تخلیه الکتریکی، حفره های ایجاد شده قطر بزرگ تر و عمق کمتر دارند. علاوه بر این، افزایش فاصله بین الکترودها کاهش شدید اثر خازنی را به علت قدرت بیشتر کانال تخلیه به همراه دارد و کیفیت سطح قطعات ماشین کاری شده با این روش به نسبت روش معمولی بالاتر است [3]. ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر با انتخاب پارامترهای مناسب تر، مانند افزایش شدت جریان و کاهش زمان خاموشی پالس زبری سطح بهتری را به نسبت ماشین کاری تخلیه الکتریکی متعارف ایجاد می کند [4]. مطالعات انجام شده در زمینه ترکیب پودر در ماشین کاری تخلیه الکتریکی نشان می دهد که بهبود قابل توجهی در خواص سطوح ماشین کاری به وجود می آید. بررسی رابطه پیچیده بین پارامترهای ورودی فرآیند و بهینه سازی آنها یک موضوع تحقیقاتی مناسب است [5].

باصری و صادقیان تأثیر افزودن پودر اکسید تیتانیوم (TiO_2) به دی الکتریک را بر روی خروجی های فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد گرم کار H13 مطالعه کردند. پودرهای اکسید تیتانیوم در اندازه های ۲۰ نانومتر و در غلظت های ۱ تا ۳ گرم بر لیتر به دی الکتریک پایه نفتی افزوده شده است. آنها گزارش دادند که با افزودن پودر اکسید تیتانیوم به دی الکتریک تا غلظت ۱ گرم در لیتر به علت افزایش فاصله بین دو الکترود و تسهیل در خروج مواد حذف شده، باعث افزایش نرخ براده برداری می شود. با افزایش غلظت پودر بیش از ۱ گرم در لیتر پالس های غیرطبیعی افزایش یافته و نرخ براده برداری کاهش می یابد. طبق گزارش آنها افزودن پودر به دی الکتریک گپ ماشین کاری را افزایش می دهد. تمرکز مناسب پودر با تنظیم تخلیه الکتریکی، زمان ماشین کاری را کاهش داده و کیفیت سطح بهتری را ایجاد می کند [6]. عصارزاده و قریشی [7]، اثر اضافه کردن پودر اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) به دی الکتریک را بر روی خروجی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد ابزار CK45 مطالعه کردند. پودر اکسید آلومینیوم مورد آزمایش آنها در غلظت های ۲/۵ و ۲/۸ گرم بر لیتر و در اندازه های ۴۵ و ۵۰ میکرومتر به دی الکتریک هیدروکربنی افزوده شد. نتایج تحقیقات آنها نشان می دهد که افزودن پودر اکسید آلومینیوم به دی الکتریک در شرایط جریان و زمان روشنی پالس کم، باعث تولید سطوح بسیار صافی می شود. همچنین وجود این ذرات باعث عریض تر شدن گپ ماشین کاری شده که این امر موجب شستشوی بهتر می شود. در حالی که افزایش فاصله گپ با افزایش ولتاژ ماشین کاری باعث

نانولوله کربنی به دی الکتریک طول و اندازه میکروترک های سطحی را کاهش می دهد. کانسل و همکاران [13]، اثر پودر سیلیسیوم با اندازه دانه ۲۰ تا ۳۰ میکرومتر و غلظت ۰، ۱ و ۲ گرم بر لیتر را در دی الکتریک ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد EN-31 بررسی کردند. آنها با استفاده از مدل سازی تجربی دست یافتند که نرخ براده برداری با افزایش غلظت پودر بیشتر می شود و همچنین با اضافه کردن پودر به سیال دی الکتریک، زبری سطح بهبود قابل توجهی پیدا می کند و طبق نتایج آنها حداکثر جریان و غلظت ذرات افزودنی تاثیرگذارترین پارامتر در زبری سطح و نرخ براده برداری است. کومار و همکاران [14]، از نانوذره اکسید آلومینیوم جهت اصلاح خواص دی الکتریک استفاده کردند. آنها اثر پارامترهای جریان، ولتاژ شکست و زمان روشنی پالس را بر روی نرخ براده برداری، 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 براده برداری بیشتر می شود. آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V به طور گسترده در صنایع هوافضا، موتورهای جت و به ویژه در فن های تیغه کمپرسور استفاده می شود. 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، ماشین کاری آلیاژ تیتانیوم را سخت و دشوار می کند [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 به علت محدودیت های ماشین کاری این آلیاژ با روش های غیر سنتی، از قبیل ماشین کاری لیزر، تخلیه الکتریکی و ماشین کاری الکتروشیمیایی از آن استفاده می شود [15].

با بررسی تحقیقات گذشته مشخص شد، اگر چه مطالعات مناسبی بر روی تاثیر نانوذره های مختلف به دی الکتریک انجام شده است، ولی هنوز مطالعه مشخصی بر روی افزودن دو یا چند نانوذره به طور همزمان به دی الکتریک صورت نگرفته است. به عبارتی ترکیب همزمان دو نانوذره با توجه به خصوصیات متفاوت هر یک، می تواند سبب بهبود کیفیت شرایط ماشین کاری شود. در این تحقیق، اثر افزودن همزمان دو نانوذره اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V بررسی شده است.

مواد و روش ها

به منظور انجام آزمایش های ماشین کاری تخلیه الکتریکی از نمونه های آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V استفاده شد. نمونه ها به صورت ورق و در ابعاد ۵×۳×۳ میلی متر به وسیله دستگاه واتر جت بریده شدند. ابزار مسی به قطر ۱۶ و ارتفاع ۷۰ میلی متر با عملیات تراش کاری تهیه و پولیش داده شد. ترکیب درصد عناصر آلیاژی قطعه کار و مشخصات فیزیکی و مکانیکی قطعه کار و ابزار به ترتیب در جدول ۱ و ۲ ارایه شده است.

ناپایداری فرآیند می شود. 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 میکروماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V با دو قطبیت بررسی کردند. نتایج آنها نشان می دهد که افزودن پودر کاربید سیلیسیم به آب خالص انرژی تخلیه را افزایش می دهد و زبری سطح را بهبود می بخشد. نرخ براده برداری با استفاده از پودر کاربید سیلیسیم در آب خالص بیشتر از حالت بدون پودر بوده است. همچنین عمق سوراخ ایجاد شده با قطبیت منفی تقریباً ۱۰ برابر بیشتر از حالت مثبت است. یی- فانگ و فو- چن [9] زبری سطح فولاد SKD11 را در ماشین کاری تخلیه الکتریکی با پودرهای آلومینیوم، مس، کروم و کاربید سیلیسیم بررسی نمودند. طبق نتایج آنها مهم ترین ویژگی های پودرهای افزودنی که بر روی زبری سطح و لایه ذوب شده مجدد تاثیر می گذارد اندازه ذرات، غلظت، چگالی، مقاومت الکتریکی و هدایت الکتریکی پودر است که در میان پودرهای اضافه شده به دی الکتریک، ذرات آلومینیوم بهترین سطح و بعد از آن به ترتیب ذرات کروم و کاربید سیلیسیم تاثیر داشته اند و ذرات مس در خروجی آزمایش ها تاثیری نداشتند. همچنین پودر آلومینیوم در بین پودرهای افزودنی بیشترین کاهش ضخامت لایه ذوب شده مجدد را داشته است. تلا و همکاران [10]، اثر اضافه کردن پودر گرافیت با غلظت ۰ تا ۸ گرم بر لیتر را در ماشین کاری تخلیه الکتریکی اینکونل ۶۲۵ بررسی کردند. براساس نتایج آنها، با افزودن پودر گرافیت به دی الکتریک، دهانه های بزرگ و کم عمق تشکیل شده و بهترین زبری سطح در غلظت ۶ گرم بر لیتر به دست آمد. ضخامت لایه ذوب شده مجدد با افزودن پودر به دی الکتریک به علت کاهش تراکم انرژی تخلیه کاهش می یابد. همچنین افزودن پودر گرافیت به دی الکتریک باعث کاهش استحکام کششی و افزایش مقاومت خستگی شد. سید و پالانیدی [11] پودر آلومینیوم را در دی الکتریک آب مقطر با غلظت ۰، ۱ و ۲ گرم بر لیتر در ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد W300 استفاده کردند. براساس نتایج آنها زبری سطح خوب و ضخامت لایه ذوب شده مجدد کم و نرخ براده برداری بیشتری نسبت به آب مقطر خالص به دست آمد. آنها گزارش دادند قطبیت نقش مهمی در ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر دارد. طبق نتایج آنها بهره وری بالاتر در قطبیت مثبت به دلیل نرخ براده برداری بیشتر در حداکثر جریان ۱۲ آمپر و در غلظت ۸ گرم بر لیتر به دست آمد در حالی که زبری سطح و لایه ذوب شده مجدد در قطبیت منفی بهبود یافته است. شبگرد و خسروزاده [12] نحوه تاثیر نانولوله کربنی به دی الکتریک را بر روی خصوصیات ماشین کاری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بررسی نمودند. افزودن نانولوله کربنی در دی الکتریک ثبات ماشین کاری را به دلیل کاهش جرقه های مناسب به ویژه در زمان روشنی پالس های طولانی حفظ می کند. نتایج آنها نشان می دهد نرخ براده برداری در طول پالس های کوتاه کاهش و در پالس های طولانی افزایش می یابد و کاهش نرخ سایش ابزار در پالس های کوتاه در زمان، بسیار برجسته بوده است. همچنین افزودن

جدول (۱) ترکیب درصد عناصر تشکیل دهنده آلیاژ Ti-6Al-4V

عناصر تشکیل دهنده 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

خاصیت	Ti-6Al-4V	Cu
هدایت حرارتی	۶/۷۷/MK	۴۰۱۷/MK
مدول الاستیک	۱۱۳Gpa	۱۱۰Gpa
نقطه ذوب	۱۶۶۰°C	۱۰۸۴°C
مقاومت الکتریکی	۱۷۸μΩ.cm	۱۶/۷۸μΩ.cm
چگالی	۴/۴۳g/cm ³	۸/۹g/cm ³

آزمایش میزان سایش ابزار برحسب میلی متر 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 می آید. برای اندازه گیری کیفیت سطح از دستگاه زبری سنج 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

نانوذرات	رسانایی حرارتی (W/cmK)	مقاومت الکتریکی (μΩcm)	چگالی (gr/cm ³)
آلومینیوم اکسید	۲-۱/۵	۱۰ ^{-۲}	۳/۸۹
سیلیسیم اکسید	۱/۳	۱۰ ^{-۱۲-۱۰^{-۸}}	۲/۴

طراحی آزمایش و شرایط ماشین کاری

در یک طرح مکعب مرکزی سطح پاسخ، محل نقاط محوری با توجه به نقطه مرکز با مقدار آلفا تعیین می شوند. سه سطح ۰، ۱ و ۱ که به ترتیب، نشان دهنده 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 آزمایش ها در جدول ۴ آورده شده است. همچنین در ادامه تصویر تجهیزات استفاده شده برای انجام آزمایش های ماشین کاری در شکل ۱ نشان داده شده است. جدول ۵ پارامترهای ورودی را در دو فرمت کد شده و واقعی نشان می دهد.

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 ماشین کاری (ولت)	۴۰
قطبیت	ابزار (+)، قطعه کار (-)
نوع دی الکتریک	آب دیونیزه شده
نانوذرات (۲۰ نانومتر)	آلومینیوم اکسید سیلیسیم اکسید
دبی دی الکتریک	۵ لیتر بر دقیقه



شکل (۱) تجهیزات استفاده شده برای انجام آزمایش های ماشین کاری

جهت انجام آزمایش های ماشین کاری تخلیه الکتریکی از دستگاه اسپارک پیشرا نه مدل ۵۱۱ با ژنراتور ایزوپالس استفاده شد. آزمایش های ماشین کاری طبق اصول طراحی آزمون ها با استفاده از نرم افزار 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 آزمایش ها، برای تعیین مقدار درصد ترکیب ذرات و سهولت در انجام تحلیل ها، پودر اکسید آلومینیوم به عنوان مبنا انتخاب شده است. برخی از مشخصات مهم دو نانوذر شرح داده شده در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی، در جدول ۳ نشان داده شده است. کلیه آزمایش های 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 اندازه گیری نرخ براده برداری 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 براده برداری و سایش ابزار محاسبه شده است [6].

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

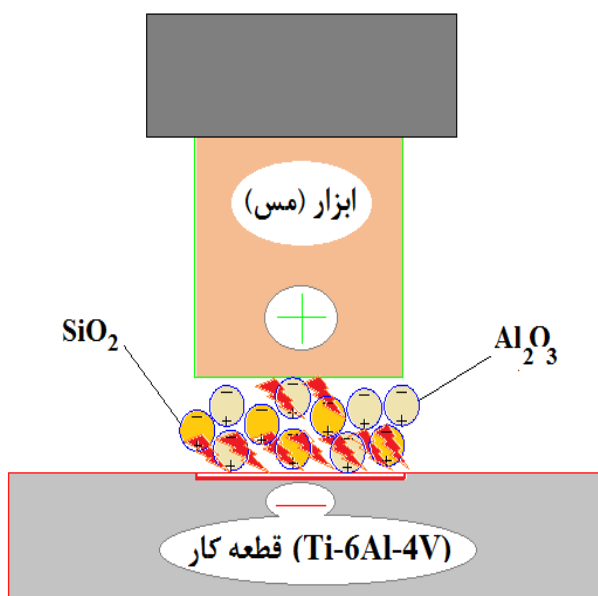
$$TRR = \frac{(M_1 - M_2)}{\rho_{Cu} T} \times 10^3 \quad (2)$$

$$TWR = \frac{TRR}{MRR} \times 100 \quad (3)$$

در رابطه ۱ و ۲ مقدار نرخ براده برداری و سایش ابزار به میلی متر مکعب بر دقیقه است. M_1 و M_2 جرم قطعه کار و ابزار به ترتیب قبل و بعد از ماشین کاری به گرم و T مدت زمان ماشین کاری به دقیقه و ρ_{Cu} و ρ_{Ti} به ترتیب چگالی قطعه کار و ابزار گرم بر سانتی متر 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 می دهد. با وزن کردن جرم ابزار قبل و بعد از انجام هر

شاخص آماری دیگر که به طور عمده برای ارزیابی مدل سازی مناسب مورد استفاده قرار می گیرند اندازه گیری میانگین مقدار تغییرات نقاط در مدل است. نتایجی که از نرخ براده برداری در نرم افزار طراحی آزمایش ها وارد شده بود عدد ۰/۹۶۶۶ را نشان می دهد. همچنین در نمودارهای ۱ و ۲ که به ترتیب نمودار توزیع احتمال داده و نمودار پراکندگی مقدار باقیمانده ها 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 می دهد فرض نرمال بودن باقیمانده ها و فرض استقلال باقیمانده ها معتبر و برقرار است. همچنین بررسی این نمودارها نشان می دهد که فرضیات رگرسیون معتبر و حاکی از مدل مناسب برای پاسخ نرخ براده برداری است.

با توجه به جدول ۷ می توان نتیجه گرفت چه فاکتورهایی تاثیر بیشتری در بالا رفتن نرخ براده برداری ماشین کاری تخلیه الکتریکی دارند. این فاکتورها به ترتیب $(A > C > D > B)$ است. بنابراین در نمودار ۳، اثر ترکیب نانوذرات را در چهار فاکتور ورودی طراحی آزمایش ها برای تغییرات پاسخ نرخ براده برداری در شدت جریان آمپر نشان می دهد. وجود دو نانوذره به طور همزمان اثر یکدیگر را تقویت کرده و باعث افزایش انرژی تخلیه می شود و یونیزاسیون کانال پلاسما سریع تر رخ می دهد. حرف شماره B از نمودار ۴ نشان می دهد که غلظت ترکیبی اثر چندانی بر روی نرخ براده برداری نداشته و بیشترین تاثیر با A شدت جریان تخلیه در پاسخ آزمایش ها گرفته بوده است. تاثیرات روشنی پالس به صورت خطی رو به افزایش بوده است به طوری که با افزایش زمان روشنی پالس نرخ براده برداری هم افزایش می یابد. افزودن ترکیب نسبی نانوذرات به دی الکتریک تا درصد مشخصی به نرخ براده برداری افزوده می شود، بعد از آن با بیشتر شدن از یک نسبت مشخص از حجم براده برداری آن می کاهد.



شکل ۲) نمایش شماتیک مکانیزم مخلوط پودر در ماشین کاری تخلیه الکتریکی

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

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

نتایج و بحث

مدل سازی ریاضی نرخ براده برداری

روش پاسخ سطح برای یافتن رابطه بین پاسخ مورد نظر آزمایش ها و متغیرهای ورودی مستقل با استفاده از شیوه های آماری و ریاضی است. در این تحقیق برای تعیین ارتباط بین ذرات و خروجی های ماشین کاری تخلیه الکتریکی از آن استفاده شده است. نانوذرات معلق شده در دی الکتریک ماشین کاری تخلیه الکتریکی با جذب انرژی، یون ها و الکترون های زیادی تولید کرده که به سمت الکترودها (قطعه کار و ابزار) حرکت می کنند که شکل الگویی این نوع ماشین کاری در شکل ۲ نشان داده شده است. این اتفاق موجب افزایش تعداد جرقه ها در واحد زمان (فرکانس جرقه ها) می شود.

استحکام دی الکتریک در مورد آب دیونیزه شده تقریباً ۱/۸۷ برابر استحکام دی الکتریک نفت سفید است. بالاتر بودن استحکام آب دیونیزه شده باعث می شود که در هنگام ماشین کاری زمان تاخیر جرقه نسبت به زمانی که ماشین کاری در نفت سفید انجام می شود بیشتر باشد. به بیان ساده تر، تخلیه الکتریکی در نفت سفید راحت تر از آب دیونیزه شده انجام می شود. به همین دلیل، از نانوذرات در سیال مورد آزمایش استفاده شده است تا استحکام شکست دی الکتریک آب دیونیزه شده پایین آورده شود و نرخ براده برداری افزایش یابد.

نتایج حاصل آزمایش های ماشین کاری تخلیه الکتریکی به همراه ذرات ترکیب شده به صورت 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 مشخصه های خروجی فرآیند است. تعداد آزمایش ها ۲۷ مورد است که همراه با پاسخ آن در جدول ۶ آورده شده است. جزییات آنالیز واریانس برای پاسخ نرخ براده برداری در جدول ۷ نشان داده شده است. در صورتی که مقدار معیار P کمتر از ۰/۰۵ باشد مدل معنی دار است. با توجه به جدول ۷ مقدار P-value برای مدل طراحی شده کمتر از ۰/۰۰۰۱ بوده، در نتیجه مدل معنی دار است. همچنین با توجه به جدول ۷، پارامترهای ورودی که اثر متقابل معناداری بر هم ندارند از مدل حذف شدند.

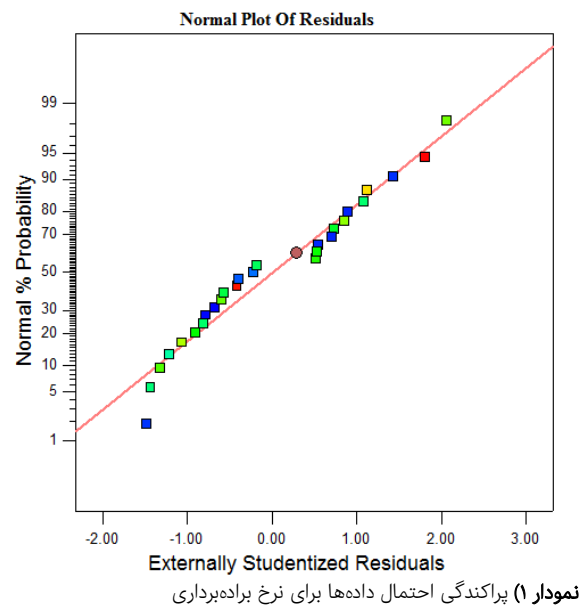
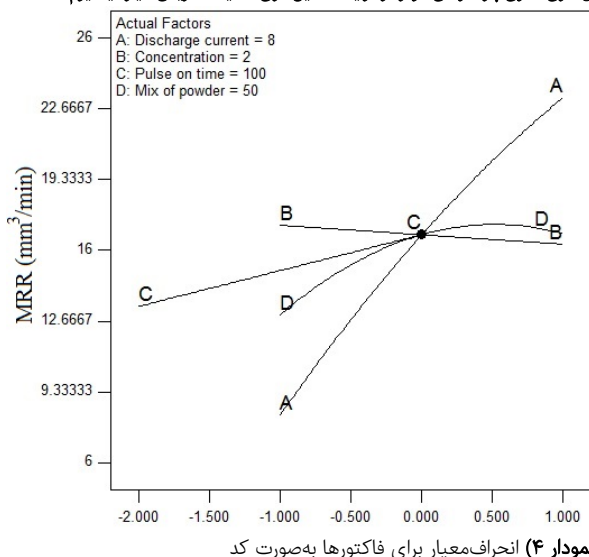
جدول آنالیز واریانس پس از حذف پارامترهای غیر موثر، اصلاح و مدل مورد نظر ایجاد شد. رابطه نرخ براده برداری برای مدل اصلاح شده به صورت رابطه ۴ و به ترتیب عوامل کد شده نشان داده شده است.

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

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	-	-	-	



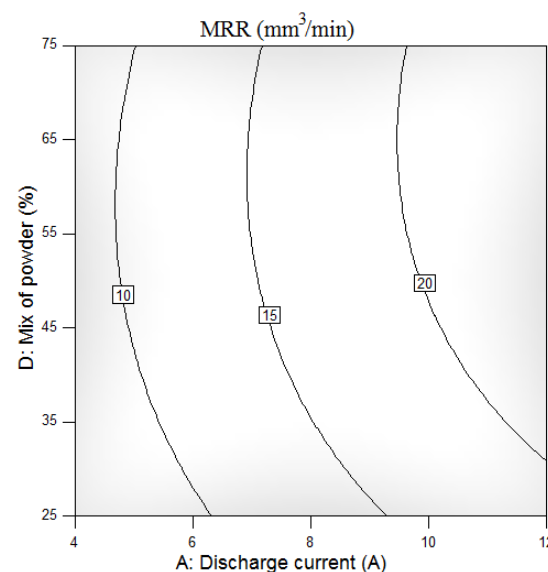
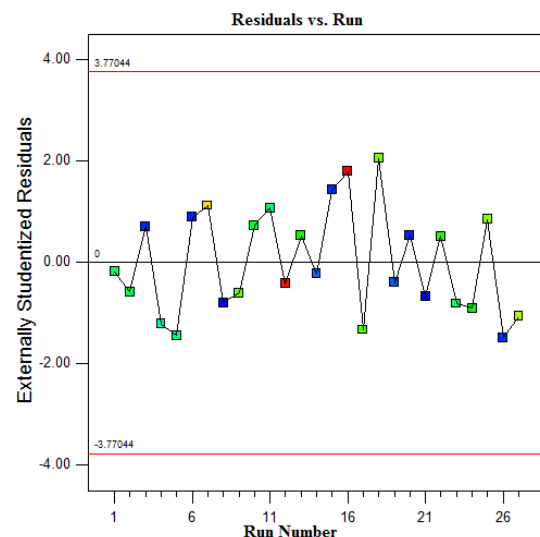
تصویر کانتوری ترکیب دو نانوذره اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم را در غلظت ۲ گرم بر لیتر و زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه، در شدت جریان های مختلف در نمودار ۳ نشان داده می شود. منحنی کانتوری نشان می دهد با افزایش نسبت ترکیب اکسید آلومینیوم نرخ براده برداری افزایش می یابد.

همچنین وجود نانوذرات از طریق کاهش استحکام شکست دی الکتریک و کاهش زمان تاخیر جرقه باعث افزایش نرخ براده برداری می شود. با افزایش جریان ماشین کاری، تاثیر افزودن نانوذرات بر روی نرخ براده برداری بیشتر می شود. این به علت افزایش انرژی ستون پلاسما و یونیزه شدن دی الکتریک در فاصله گپ بیشتر است که باعث ادامه داشتن بیشتر جرقه های مفید می شود. بنابراین ماشین کاری به علت پالس های مزاحم ناشی از آلودگی گپ در زمان های روشنی پالس طولانی تر دچار وقفه نمی شود.

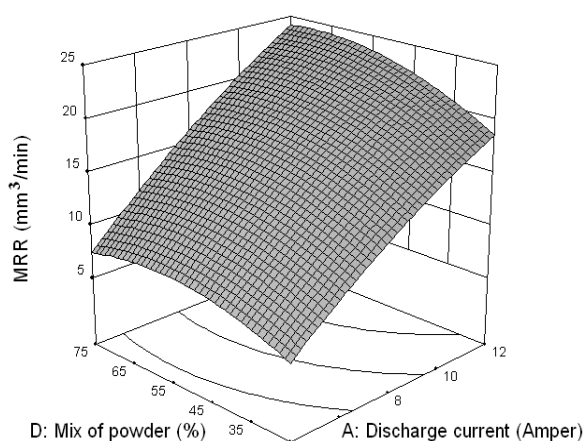
روند افزایش شدت جریان که باعث نرخ براده برداری بیشتر می شود در نمودار ۵ نشان داده می شود که از جریان تخلیه پایین تا بالاترین جریان شکل منحنی تغییر نمی کرده است، اما با ترکیب ذرات در یک جریان تخلیه مشخص، نرخ براده برداری متفاوت ایجاد می شود. به این ترتیب هر چقدر ترکیب نانوذرات دی اکسید آلومینیوم بیشتر شود به همان نسبت نرخ براده برداری هم بالاتر می رود. بنابراین حداکثر نرخ براده برداری تقریباً در ترکیب ۷۰٪ مشاهده می شود. هر چقدر ترکیب ذرات اکسید آلومینیوم بالاتر رود مقدار نرخ براده برداری به اندازه محدودی به نسبت نانوذرات اکسید سیلیسیم افزایش می یابد 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 جرقه های آرک و حذف اتصال کوتاه می شود.

مدل سازی ریاضی نرخ سایش ابزار

مدل نرخ سایش حجمی ابزار هم مانند نرخ براده برداری آن باید قابلیت پیش بینی داشته باشد. براساس جدول آنالیز واریانس ارایه شده برای پاسخ سایش نسبی ابزار، نتیجه گیری می شود که مدل درجه دوم از لحاظ آماری معنی دار است. جدول آنالیز واریانس و



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) سه‌بعدی 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 به‌صورت کد شده برای نرخ سایش ابزار به‌صورت 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 اصلاح‌شده به‌صورت رابطه ۵ و به‌ترتیب عوامل کد شده داده شده است.

(۵)

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

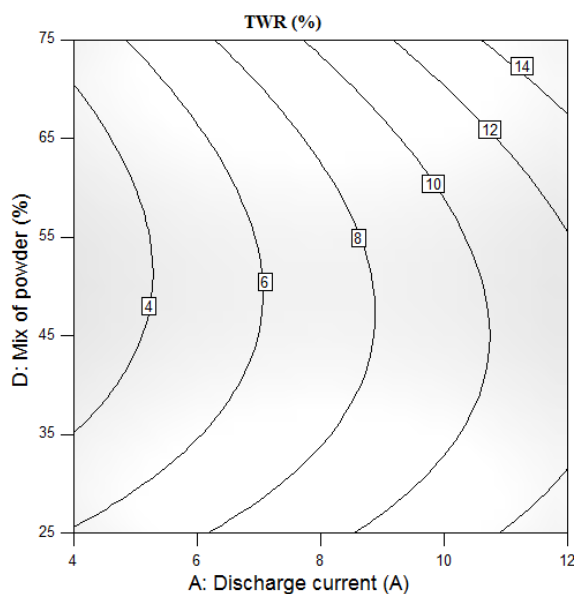
برای ارزیابی مدل‌سازی مناسب، اندازه‌گیری میانگین مقدار تغییرات نقاط در مدل بررسی شده است. نتایجی که از سایش نسبی ابزار در نرم‌افزار طراحی آزمایش‌ها وارد شده بود عدد ۸۳۷۱ را نشان می‌دهد. همچنین در نمودارهای ۶ و ۷ که به‌ترتیب نمودار توزیع احتمال نرمال داده و نمودار ترتیب زمانی مقدار باقی‌مانده برای سایش 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 به‌ترتیب 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

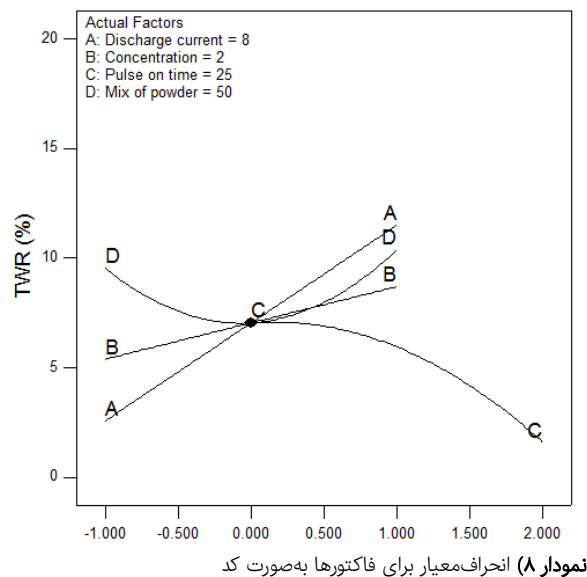
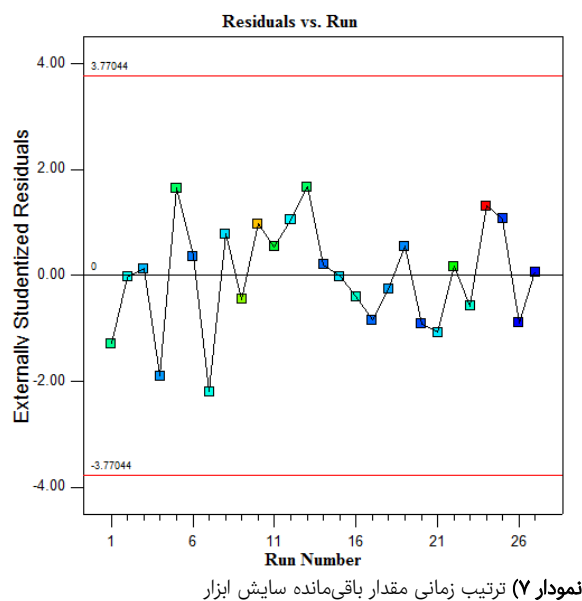
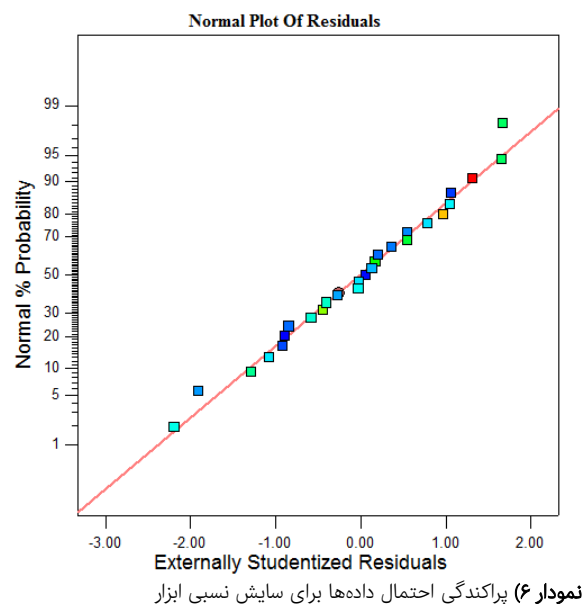
عوامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار p	اهمیت
مدل	۴۰۱/۸۲	۱۰	۴۰/۱۸	۱۴/۳۶	> ۰/۰۰۰۱	معنی‌دار
شدت جریان (A)	۱۰۸/۶۰	۱	۱۰۸/۶۰	۳۸/۸۱	> ۰/۰۰۰۱	
غلظت (B)	۲۸/۵۰	۱	۲۸/۵۰	۱۰/۱۹	۰/۰۰۵۷	
زمان روشنی پالس (C)	۱۳۳/۱۹	۱	۱۳۳/۱۹	۴۷/۸۸	> ۰/۰۰۰۱	
ترکیب نسبی (D)	۳/۱۹	۱	۳/۱۹	۱/۱۴	۰/۳۰۱۲	
AB	۴/۰۹	۱	۴/۰۹	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 براده برداری در دی الکتریک آب دیونیزه شده افزایش می یابد. به همان نسبت سایش نسبی ابزار هم به علت حرارت ایجاد شده در منطقه ماشین کاری رو به افزایش می رود که نمودار ۹ منحنی کانتوری آن را نشان می دهد. بالابودن استحکام دی الکتریک آب دیونیزه شده باعث می شود که هنگام ماشین کاری در این سیال، زمان تاخیر جرقه بیشتر باشد. بنابراین تخلیه الکتریکی هنگامی که نانو ذرات به آب دیونیزه شده اضافه می شود راحت تر انجام می شود که دلیل آن کاهش استحکام شکست دی الکتریک به واسطه ذرات معلق که هدایت الکتریکی بالایی دارند، است. آب دیونیزه شده به علت هدایت حرارتی بالای آن تقریباً $3/86$ برابر به نسبت نفت سفید، مصرف کمتری در صنایع ماشین کاری تخلیه الکتریکی دارد. زیرا هدایت حرارتی بالا در منطقه تخلیه الکتریکی باعث خوردگی بیشتر ابزار می شود که با افزودن پودر به سیال درصد زیادی از حرارت منتقل شده توسط نانو ذرات ترکیب شده جذب و با یک مکانیزم جرقه قوی تر و پایدارتر انرژی را به سطح ماشین کاری شده انتقال می دهد. همان طور که از نمودار ۹ مشخص است شکل منحنی تاثیرات ترکیب نسبی ذرات را تا بالاترین شدت جریان تقریباً ثابت نشان می دهد و در نقطه بهینه و در ترکیب ۵۰٪ حداقل می شود.



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

ترکیب ۵۰٪ از نانو ذرات با غلظت ۲ گرم بر لیتر به دی الکتریک در نمودار ۱۰ نشان داده شده است که با افزایش زمان روشنی پالس این انرژی باعث تبخیر بیشتری از دی الکتریک شده و حباب گاز اطراف کانال پلاسما را بزرگ تر می نماید که در نهایت به افزایش شعاع کانال پلاسما و کاهش تمرکز انرژی حرارتی در منطقه ماشین کاری منجر می شود. با افزودن ترکیب ۵۰٪ از نانو ذرات انرژی

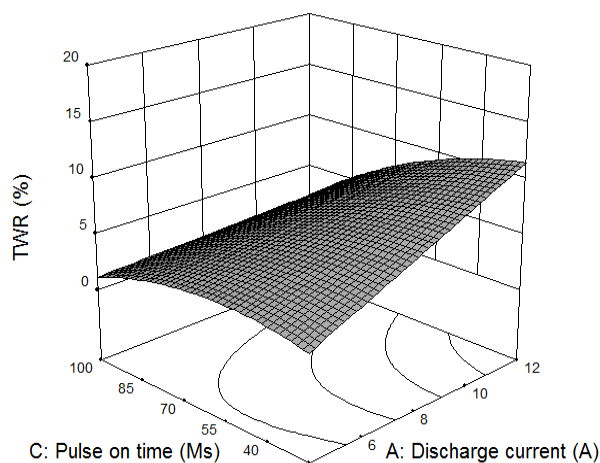


۱۱ و ۱۲ که به ترتیب نمودار توزیع احتمال نرمال داده و نمودار ترتیب زمانی مقدار باقی مانده نمایش داده شده که با توجه به نزدیکی نقاط به خط مورب در نمودار ۱۱ و پراکندگی نقاط در بازه ۳/۷۲ تا ۳/۷۲+ در نمودار ۱۲ دلیلی بر پاسخ مناسب برای مدل زبری سطح است.

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. همان طور 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. همان طور 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.

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

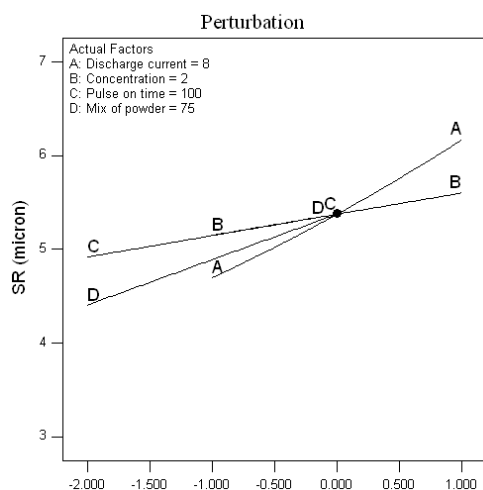
شاخص آماری زبری سطح که برای اندازه‌گیری میانگین مقدار تغییرات نقاط در مدل، برای نتایجی که به نرم‌افزار طراحی آزمایش‌ها وارد شده بود عدد ۸۷۰۱٪ را نشان می‌دهد. همچنین در نمودارهای

و چاله های بزرگ تری در سطح نمونه ایجاد می شود که باعث افزایش اندازه زبری سطح می شود.

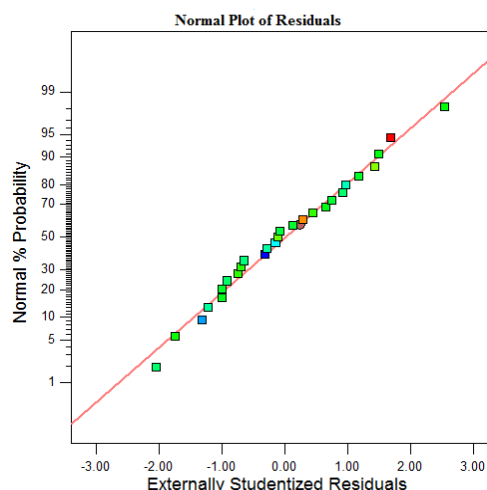
پالس، طول زمان ماشین کاری و انرژی جرقه ها بیشتر شده و شعاع کانال پلاسما افزایش می یابد. با افزایش انرژی جرقه ها و شعاع کانال پلاسما عمق و قطر چاله های به دست آمده در قطعه کار افزایش یافته

جدول ۹) آنالیز واریانس برای زبری سطح

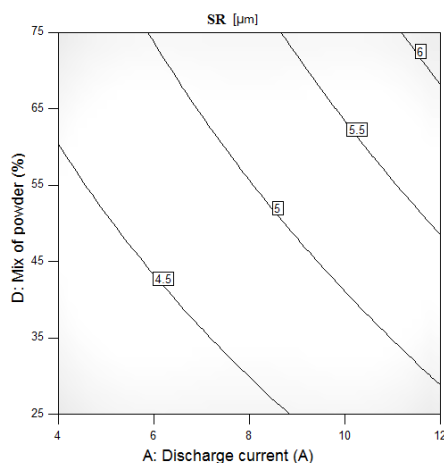
عوامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار p	اهمیت
مدل	۸/۱۱	۹	۰/۹۰	۱۲/۶۶	۰/۰۰۰۱ >	معنی دار
شدت جریان (A)	۱/۸۱	۱	۱/۸۱	۲۵/۴۲	۰/۰۰۰۱	
غلظت (B)	۰/۹۲	۱	۰/۹۲	۱۲/۸۷	۰/۰۰۲۳	
زمان روشنی پالس (C)	۰/۰۶۴	۱	۰/۰۶۴	۰/۹۰	۰/۳۵۵۰	
ترکیب نسبی (D)	۱/۷۹	۱	۱/۷۹	۲۵/۱۰	۰/۰۰۰۱	
AB	۱/۶۷	۱	۱/۶۷	۲۳/۴۴	۰/۰۰۰۲	
AC	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	غیرمعنی دار
عدم انطباق	۰/۰۴۶	۲	۰/۰۳۲	-	-	
خطای خالص	۹/۳۲	۲۶	-	-	-	



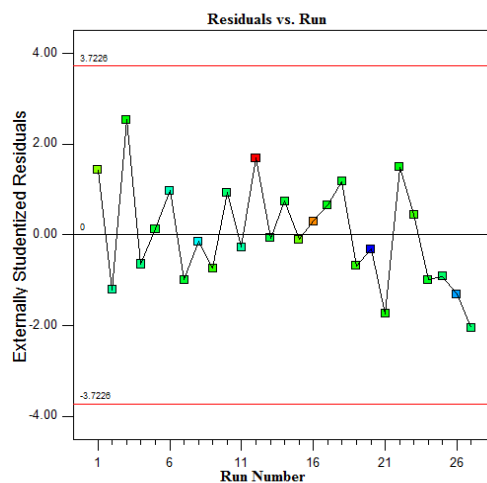
نمودار ۱۳) انحراف معیار برای فاکتورها به صورت کد



نمودار ۱۱) پراکندگی احتمال داده ها برای زبری سطح



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



نمودار ۱۲) ترتیب زمانی مقدار باقی مانده زبری سطح

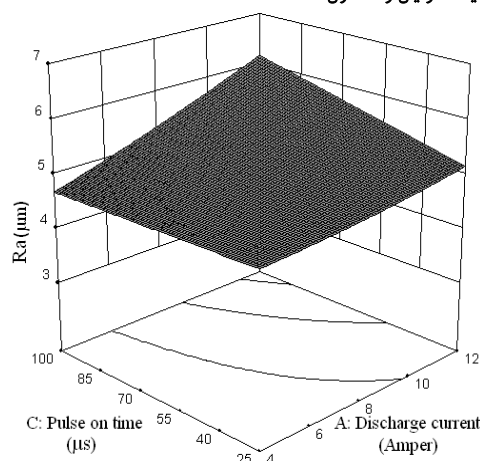
در این نمودار نقطه مناسب برای بهینه‌کردن نرخ براده‌برداری و سایش ابزار نمایش داده شده است. با توجه به داده‌های ورودی به نرم‌افزار، نرخ براده‌برداری در بالاترین حد و سایش ابزار و همچنین زبری سطح، در پایین‌ترین مقدار خود تنظیم شده است تا نتایج بهینه‌سازی، استخراج و با نتایج تجربی مقایسه شود. آزمایش‌های 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

به‌منظور 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 دی‌الکترون بدون نانوذر 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 نانوذر است.

با افزودن نانوذر 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 نانوذر 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.

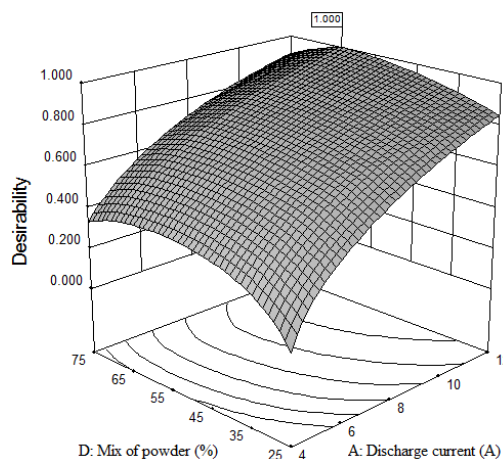
آنچه که از شکل ۳-D، ۳-E و ۳-F به‌ترتیب مشاهده می‌شود برگشت دوباره ترک‌ها و بقایای به‌جامانده از ماشین‌کاری با افزودن ذرات در ترکیب‌های بیشتر است. ترک‌ها در ترکیب نسبی ۷۵٪ کمتر از ترکیب ۱۰۰٪ از اکسید آلومینیوم و سیلیسیم بوده است و همچنین لایه ذوب‌شده مجدد کمتری به نسبت ترکیب واحد از یک نانوذر داشته است 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 به‌دست‌آوردن رابطه خروجی مورد نظر برحسب ترکیب مواد اولیه وجود ندارد و بهترین راه‌حل، استفاده از روش‌های طراحی آزمایش‌ها جهت بهینه‌سازی فرآیند است. به‌منظور 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.



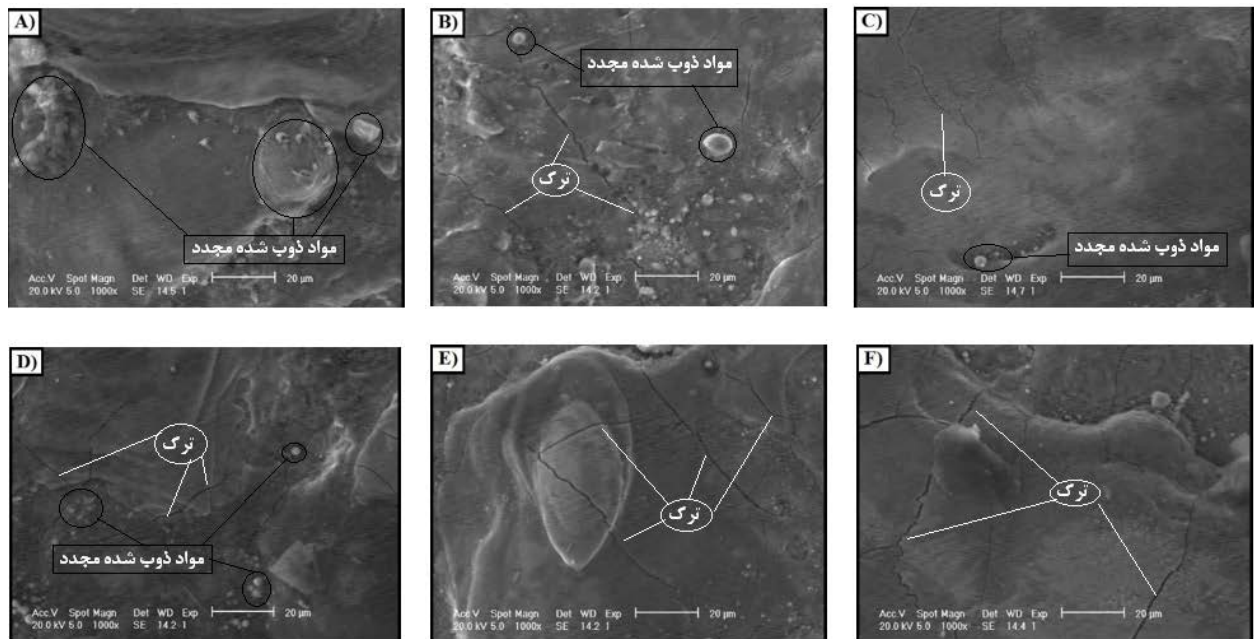
نمودار ۱۶) سطح پاسخ عملکرد مطلوبیت کلی نسبت به جریان تخلیه و ترکیب ذرات، غلظت ۲ گرم بر لیتر و زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه

بقایای ماشین کاری به همراه ترک های سطحی در آن مشاهده می شود.

آن تمرکز بیشتر کانال پلاسما با ترکیب همزمان دو نانوذره است. همان طور که مشاهده می شود ذرات اکسید آلومینیوم و سیلیسیم به تنهایی سطح ماشین کاری ایده آل را تولید نمی کنند و درصدی از

جدول ۱۰) نتایج نهایی بهینه سازی فرآیند مخلوط پودر در دسته بندی های مختلف ماشین کاری

نوع ماشین کاری	تنظیمات				MRR (mm ³ /min)		TWR (%)		Ra (μm)		خطا (درصد)	
	A	B	C	D	آزمون عملی	مدل سازی	آزمون عملی	مدل سازی	آزمون عملی	مدل سازی	TWR	SR
خشن کاری	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 ماشین کاری: (A) تخلیه الکتریکی معمولی، (B) ترکیب ۲۵٪، (C) ترکیب ۵۰٪، (D) ترکیب ۷۵٪، (E) ترکیب ۱۰۰٪ اکسید آلومینیوم، (F) ترکیب ۱۰۰٪ اکسید سیلیسیم

نتیجه گیری

افزایش سایش ابزار با ترکیب نسبی ۷۵٪ از نانوذرات نداشته است و می توان به نرخ براده برداری بالا و حداقل سایش ابزار در ماشین کاری 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 ذوب شده مجدد را ایجاد می کند. 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 راهنمایی های خود این جانب را یاری نمودند.

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

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

در تعیین رفتار شدت جریان تخلیه و تاثیر آن، هر چقدر ترکیب نانوذرات اکسید آلومینیوم تا یک اندازه مشخص بیشتر شود به همان نسبت نرخ براده برداری هم در جریان بالاتر افزایش می یابد 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 براده برداری افزایش یافته است.

با افزایش ترکیب نسبی ذرات اکسید آلومینیوم در ترکیب ۷۰٪ نرخ براده برداری ۲۵/۲٪ بهبود پیدا می کند.

با افزایش شدت جریان تا ۱۲ آمپر در زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه، انرژی زیاد تخلیه الکتریکی تاثیر 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 NPMEDM 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 پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد جناب آقای سعید اسکوییان با موضوع "مطالعه تجربی استفاده از مخلوط نانو ذرات اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی الیاز 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٪); علی‌رضا حاجی علی محمدی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۲۰٪).

منابع مالی: هزینه‌های پژوهش بر عهده دانشگاه سمنان بوده است.

فهرست علائم

Adj MS	میانگین مربع تصحیح‌شده
Adj SS	مجموع مربعات تعدیل‌شده
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.