



بررسی فرآیند ماشین کاری تخلیهی الکتریکی به کمک امواج فراصوتی با استفاده از مخلوط نانوپودرهای اکسیدتیتانیوم، اکسیدروی و اکسیدآلومینیوم در دی الکتریک

هادی فتاحی^۱، عباس پاک^۲

^۱گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران
^۲دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۱ مرداد ۱۳۹۵
بازنگری: ۶ دی ۱۳۹۵
پذیرش: ۳ بهمن ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۹ بهمن ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

ماشین کاری تخلیهی الکتریکی
امواج فراصوتی
ذرات نانوپودر
مخلوط ذرات نانوپودر در دی الکتریک
روش آماری سطح پاسخ

چکیده: یکی از روش‌های نوین در ماشینکاری قطعات دقیق و پیچیده از جنس مواد سخت، ماشینکاری توسط تخلیهی الکتریکی می‌باشد که با توجه به کاربرد این روش در صنایع پیشرفته، همواره بهبود عملیات براده‌برداری در این فرآیند مورد توجه بوده است. یکی از روش‌های موثر در بهبود راندمان ماشینکاری با تخلیهی الکتریکی، افزودن پودر مواد به دی الکتریک و همچنین اعمال امواج فراصوتی به فرآیند می‌باشد. در این مقاله، اثرات افزودن نانوپودرهای اکسیدتیتانیوم، اکسیدروی و اکسیدآلومینیوم به دی الکتریک و اعمال نوسانات فراصوتی از طریق ابزار بطور همزمان در فرآیند ماشینکاری تخلیهی الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفته است و اثر پارامترهای ورودی شامل نوع و درصد اختلاط نانوپودر در دی الکتریک، زمان روشنی پالس و جریان جرقه بر روی نرخ براده‌برداری، زبری سطح و نرخ فرسایش ابزار بررسی گردیده است. استفاده همزمان از ذرات نانو پودر و اعمال امواج فراصوتی بطور میانگین نرخ براده‌برداری را تا ۳۰٪ افزایش می‌دهد. در حالت استفاده از نانوپودر اکسیدروی، نرخ براده‌برداری و زبری سطح بیشتر و نرخ فرسایش ابزار کمتری حاصل شده و برای نانوپودر اکسیدآلومینیوم که کمترین رسانایی الکتریکی و چگالی را دارد، زبری سطح کمتری ایجاد و همچنین برای تمام حالت‌ها در درصد اختلاط ۳ گرم بر لیتر، بیشترین نرخ براده‌برداری بدست آمده است.

۱- مقدمه

یکی از روش‌های مهم نوین در ماشین کاری قطعات دقیق و پیچیده از جنس مواد سخت، ماشین کاری با تخلیهی الکتریکی^۱ می‌باشد که با توجه به کاربرد این روش در صنایع پیشرفته، همواره بهبود عملیات براده‌برداری و کیفیت سطح حاصل از این فرآیند موردتوجه بوده است. از زمان ابداع ماشین کاری تخلیهی الکتریکی در دهه ۱۹۴۰، مطالعات زیادی برای بهبود کارایی و پایداری این فرآیند در جهت کنترل پذیری بیشتر آن انجام شده است. امروزه نیز بررسی‌ها برای ماشین کاری دقیق با زبری سطح کم در نرخ‌های براده‌برداری بالا در صنایع تولیدی مختلف، بیش از پیش افزایش یافته است.

اضافه کردن پودر مواد به سیال دی الکتریک و یا به کارگیری امواج فراصوتی از جمله روش‌های موردتوجه بوده و زمینه بسیاری از تحقیقات و پژوهش‌ها از سال ۱۹۸۰ میلادی تاکنون بوده است. اِردن و بیلگین در سال ۱۹۸۰ میلادی اثر پودرهای معلق شامل مس، آلومینیوم، آهن و کربن را بر نرخ براده‌برداری^۲ قطعه‌ی فولادی مطالعه نموده و نشان دادند که پودرهای اضافه‌شده شرایط شکست دی الکتریک را بهبود داده و نرخ براده‌برداری با

افزایش درصد اختلاط پودر افزایش می‌یابد [۱]. علاوه بر استفاده از انواع پودرها، اثرات درصد اختلاط، اندازه، چگالی، مقاومت الکتریکی و رسانایی حرارتی پودرهای مختلف بر روی نرخ براده‌برداری، نرخ فرسایش ابزار^۳ و زبری سطح در فرآیند تخلیهی الکتریکی بررسی و نتایج این تحقیقات نشان داده است که هرچقدر اندازه ذرات پودر کوچک‌تر و توزیع و تعلیق آن یکنواخت‌تر باشد، شرایط ماشین کاری بهتر و نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح افزایش می‌یابد [۸-۲]. همچنین مطالعاتی متعددی بر روی اثرات استفاده از امواج فراصوتی در فرآیند تخلیهی الکتریکی صورت گرفته و با توجه به نتایج به‌دست آمده افزایش نرخ براده‌برداری، بهبود سلامت سطحی و افزایش اندک زبری سطح گزارش شده است [۱۰-۷].

بررسی به‌کارگیری هم‌زمان امواج فراصوتی و ذرات پودر معلق در دی الکتریک در فرآیند ماشین کاری به روش تخلیهی الکتریکی برای نخستین بار در سال ۲۰۰۹ میلادی توسط پریهان‌دانا و همکاران انجام شد. آنها از طریق مطالعات انجام‌شده به بررسی تأثیر اعمال امواج فراصوتی به دی الکتریک از طریق کف تانک، درصد اختلاط پودر، جنس ابزار و قطعه‌کار پرداخته و نتایج حاصل نشان داد که استفاده از پودر سولفید مولیبدن در دی الکتریک و اعمال نوسان باعث افزایش تعداد جرقه و در نتیجه افزایش

- 1 Electro Discharge Machining (EDM)
- 2 Material Removal Rate (MRR)

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.pak@basu.ac.ir

استفاده و طراحی آزمایش و تحلیل آماری توسط نرم‌افزار مینی‌تب^۶ صورت گرفته است. با توجه به ثابت بودن فرکانس و دامنه نوسان، چهار متغیر نوع پودر، درصد اختلاط پودر، جریان و زمان روشنی پالس به‌عنوان متغیرهای ورودی آزمایش انتخاب شده و هر یک در سه سطح پایین (-۱)، میانه (۰) و بالا (+۱) کدگذاری و مورد بررسی قرار گرفته اند. محدوده مناسب برای انتخاب مقدار متغیرهای ورودی با استفاده از نتایج مطالعات و آزمایش‌های اولیه انجام شده، تعیین شده است [۱۴]. مقادیر متغیرهای ورودی و محدوده انتخابی آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مقادیر متغیرها و محدوده انتخابی آن‌ها

Table 1. Design scheme of process parameters and their levels

متغیر	نماد	واحد	محدوده		
			۱	۰	-۱
نانوپودر	P	-	اکسید روی	اکسید آلومینیوم	اکسید تیتانیوم
درصد اختلاط	C	-	۴/۵	۳	۱/۵
زمان روشنی	T_{on}	μs	۵۰	۴۰	۳۰
جریان	I	A	۱۳/۴	۹/۶	۵/۸

۲-۲- تنظیمات و شرایط آزمایش

در این تحقیق قطعه کار از جنس فولاد گرم کار H13 با قطر ۲۵ میلی‌متر و الکتروود از جنس مس با قطر ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است. مشخصات کامل نانوپودرهای مورد استفاده، در جدول ۲ آورده شده است. جهت گردش و هم‌زدن مخلوط نانوپودر و دی‌الکتريک، از یک پمپ و نازل در داخل مخزن استفاده و عملیات جداسازی ذرات براده از دی‌الکتريک توسط نوارهای مغناطیسی در اطراف قطعه کار انجام شد. کلگی اعمال امواج فراصوتی به‌گونه‌ای طراحی و ساخته شد که بتواند امواج را به‌طور کامل به پیشانی ابزار انتقال دهد. لذا ابزار مسی و دو قطعه انتقال‌دهنده^۷ با هندسه‌های مشخص پس از محاسبات اولیه و تحلیل نرم‌افزاری، ساخته و در کلگی دستگاه اسپارک، نصب گردید [۱۲]. نانوپودرهای مورد استفاده نیز

جدول ۲: مشخصات نانوپودرهای مورد استفاده [۱۵]

Table 2. Properties of Nano powders

نوع پودر	اندازه پودر، nm	چگالی واقعی، g/cm ³	مقاومت الکتریکی، Ohm.cm	رسانایی حرارتی، W/mK
اکسیدتیتانیوم	۲۰	۴	۱۰ ^{۱۲}	۱۱/۷
اکسیدآلومینیوم	۲۰	۳/۸۹	۱۰ ^{۱۴}	۲۹
اکسیدروی	۲۰	۵/۶	۱۰ ^۵	۶۰

نرخ براده‌برداری حاصل می‌شود [۱۱]. پریهاندانا و همکاران مجدداً در سال ۲۰۱۱ میلادی، به بررسی فرآیند تلفیقی تخلیه‌ی الکتریکی به کمک امواج فراصوتی و استفاده از نانوپودر گرافیت با ابعاد ۵۵ نانومتر و با درصد اختلاط ۲ گرم بر لیتر پرداخته و مشاهده گردید که به‌کارگیری ذرات نانوپودر توأم با اعمال نوسانات فراصوتی به سیال، سبب کاهش ۳۵ درصدی در زمان ماشین‌کاری، افزایش دقت و کاهش میکرو ترک‌های سطحی شده است [۱۲]. اثر اضافه‌شدن نانوپودر تیتانیوم بر روی فرآیند ماشین‌کاری فولاد D2 در سال ۲۰۱۵ میلادی توسط مرعشی و همکارانش بررسی شد که نتایج به‌دست آمده بهبود قابل‌توجه نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح را نشان داده است [۱۳]. شبرگرد و همکاران اثر اضافه‌شدن دو نوع نانوپودر اکسیدسیلیسیم و اکسیدآلومینیوم بر روی ماشین‌کاری آلیاژ Ti-6Al-4V را بررسی نموده و نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان داد که نانوپودر اکسیدسیلیسیم باعث افزایش نرخ براده‌برداری شده و تاثیر نانوذرات بر روی فرسایش نسبی ابزار به تنظیمات و شرایط ماشین‌کاری بستگی دارد. تاثیر نانوپودر اکسیدسیلیسیم بر روی افزایش صافی سطح بیشتر از نانوپودر اکسیدآلومینیوم می‌باشد همچنین سلامت سطح ماشین‌کاری شده از لحاظ وجود میکروتُرک‌ها و عمق لایه تغییریافته در اثر حرارت، با افزودن نانوذرات بهبود یافته است [۱۴]. نانوپودر اکسیدتیتانیوم توأم با حرکت دورانی ابزار در فرآیند ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی در سال ۲۰۱۶ میلادی توسط بصیری و همکاران انجام و بهبود فرآیند گزارش شده است [۱۵].

با توجه به نتایج مطالعات گذشته استفاده از پودرها با ابعاد کوچک‌تر و همچنین استفاده از امواج فراصوتی منجر به بهبود بیشتر شرایط ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی می‌گردد. لذا هدف از این مقاله، بررسی اثرات اضافه‌شدن پودر اکسیدتیتانیوم^۱، اکسیدروی^۲ و اکسیدآلومینیوم^۳ در اندازه‌های نانو به سیال دی‌الکتريک و اعمال هم‌زمان امواج فراصوتی از طریق ابزار بر عملکرد فرآیند ماشین‌کاری با تخلیه‌ی الکتریکی می‌باشد. در این تحقیق، علاوه بر بررسی اثر نوع نانوپودرها، اثر درصد اختلاط نانوپودر، زمان روشنی پالس و مقدار جریان الکتریکی بر روی نرخ براده‌برداری، زبری سطح و نرخ فرسایش ابزار در ماشین‌کاری قطعه فولادی H13 مورد بررسی قرار گرفته است و همچنین به منظور طراحی بهینه آزمون‌ها و شناخت اثرات ترکیبی پارامترهای مختلف ورودی و تعیین مقدار بهینه آن‌ها از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ استفاده گردیده است.

۲- روش تحقیق و آزمون‌ها

۲-۱- روش طراحی آزمایش و متغیرها

جهت بررسی ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی و شناخت اثرات ترکیبی آن‌ها از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ^۴ با طرح باکس بنکن^۵

- 1 TiO₂
- 2 ZnO
- 3 Al₂O₃
- 4 Response Surface Methodology (RSM)
- 5 Box Behnken

6 Minitab V.16
7 Booster



Fig. 1. Experimental setup and equipment

شکل ۱: دستگاه و تجهیزات آزمایش

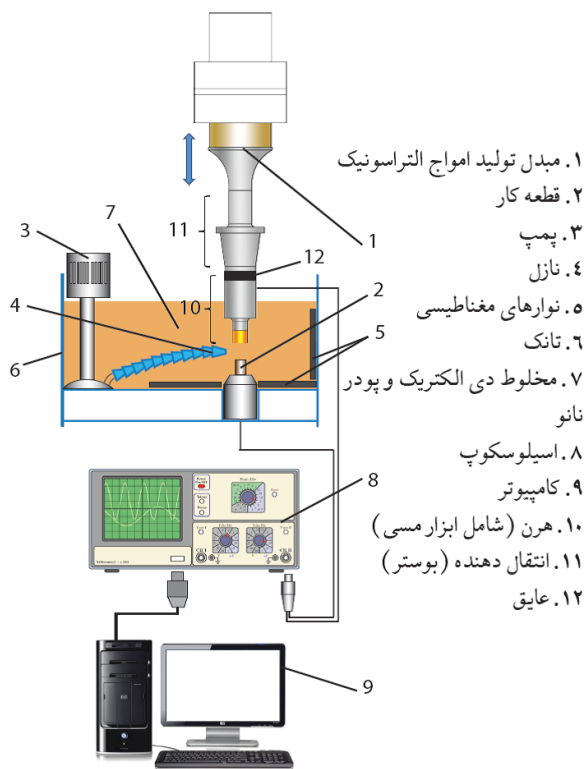


Fig. 2. Schematic of experimental setup

شکل ۲: نمای شماتیک تجهیزات آزمایش

صورت کد شده برای نرخ براده برداری به صورت زیر در جدول ۵ آمده است. در بررسی طراحی آزمایش یکی از مواردی که دقت مدل حاکم بر آزمایش را تعیین می کند مقدار R_{sq} مدل می باشد. هرچه مقدار این مؤلفه به عدد ۱ و یا ۱۰۰ درصد نزدیک باشد، دقت انطباق مدل بالاتر و پیش بینی مدل آماری

در هر مرحله با توجه به درصد اختلاط، وزن شده و به دی الکتریک اضافه شدند. نمونه ها قبل و بعد از هر آزمایش توسط ترازوی دقیق الکترونیکی با قابلیت تفکیک پذیری ۰/۰۰۱ گرم وزن شدند. بدین ترتیب با توجه به زمان ماشین کاری، نرخ براده برداری و فرسایش ابزار محاسبه گردید. زبری سطح توسط دستگاه اندازه گیری زبری از نوع سوزنی اندازه گیری شده است. شکل های ۱ و ۲ دستگاه و تجهیزات استفاده شده را نشان می دهد. همچنین شرایط کامل آزمایش و مقادیر پارامترهای ماشین کاری در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: شرایط آزمایش و پارامترهای ماشین کاری

Table 3. Experimental and machining parameters

مشخصات	پارامترهای ماشین کاری
H13 فولاد گرم کار	قطعه کار (قطب -)
۲۵	قطر قطعه کار، mm
مس	الکتروود (قطب +)
۲۰	قطر الکتروود، mm
۱۰	زمان ماشین کاری، min
ایزوپالس	نوع مولد قدرت
از سمت ابزار مسی	اعمال امواج فراصوتی
۲۰۰۰۰	فرکانس امواج فراصوتی، Hz
نفت سفید	دی الکتریک
۲/۵	حجم دی الکتریک، lit
اکسیدتیتانیوم، اکسیدروی و اکسیدآلومینیوم	نوع نانو پودر
۲۰	اندازه پودر، nm
۴/۵ ، ۳ ، ۱/۵	درصد اختلاط، g/lit
۸۰	ولتاژ مدارباز، V
۱۳/۴ ، ۹/۶ ، ۵/۸	جریان، A
۵۰ ، ۴۰ ، ۳۰	زمان روشنی جرقه، μs

براساس روش طراحی آزمایش با توجه به متغیرهای مستقل شامل نوع پودر، درصد اختلاط، زمان روشنی و جریان، تعداد و شرایط هر آزمایش معلوم و نتایج خروجی هر آزمایش شامل زبری سطح متوسط، نرخ براده برداری و فرسایش ابزار اندازه گیری و تعیین گردید. نتایج حاصل شده بصورت تک تکرار، در جدول ۴ به طور کامل آورده شده است.

۳- بحث و تحلیل نتایج آزمایش ها

۳-۱- بررسی نرخ براده برداری

جدول آنالیز واریانس و ضرایب معادله رگرسیون حاکم بر مسأله به

1 Roughness average (Ra)

جدول ۴: متغیرهای طراحی آزمایش و نتایج آن

Table 4. Design of experimental matrix and results

#	نوع نانوپودر	درصد اختلاط، g/lit	زمان روشنی، µs	جریان، A	نرخ براده‌برداری، gr/min	زبری سطح، µm	فرسایش ابزار، gr/min
۱	اکسیدتیتانیوم	۱/۵	۳۰	۵/۸	۰/۰۵۵۴	۵/۱	۰/۰۰۴۸
۲	اکسیدتیتانیوم	۱/۵	۳۰	۱۳/۴	۰/۲۲۷۹	۸/۱	۰/۰۴۷۵
۳	اکسیدتیتانیوم	۱/۵	۵۰	۵/۸	۰/۰۹۴۴	۶/۲	۰/۰۰۰۵
۴	اکسیدتیتانیوم	۱/۵	۵۰	۱۳/۴	۰/۲۳۷۶	۸/۵	۰/۰۴۳۷
۵	اکسیدتیتانیوم	۳	۴۰	۵/۸	۰/۰۸۲۲	۵/۱	۰/۰۰۵۹
۶	اکسیدتیتانیوم	۴/۵	۳۰	۱۳/۴	۰/۱۸۰۶	۷/۱	۰/۰۴۱۴
۷	اکسیدتیتانیوم	۴/۵	۳۰	۵/۸	۰/۰۶۳۷	۵/۷	۰/۰۰۲۷
۸	اکسیدتیتانیوم	۴/۵	۵۰	۱۳/۴	۰/۲۷۲۰	۸/۳	۰/۰۴۵۵
۹	اکسیدتیتانیوم	۴/۵	۵۰	۵/۸	۰/۰۸۱۵	۵/۱	۰/۰۰۵۹
۱۰	اکسیدآلومینیوم	۴/۵	۴۰	۱۳/۴	۰/۲۷۹۹	۷/۳	۰/۰۴۲۸
۱۱	اکسیدآلومینیوم	۳	۴۰	۵/۸	۰/۰۸۹۸	۵/۹	۰/۰۰۳۸
۱۲	اکسیدآلومینیوم	۳	۴۰	۱۳/۴	۰/۲۷۳۴	۹/۷	۰/۰۳۹۱
۱۳	اکسیدآلومینیوم	۳	۳۰	۵/۸	۰/۰۹۱۷	۵/۲	۰/۰۰۵۷
۱۴	اکسیدآلومینیوم	۳	۵۰	۱۳/۴	۰/۲۸۰۷	۷/۷	۰/۰۴۱۹
۱۵	اکسیدآلومینیوم	۳	۴۰	۵/۸	۰/۱۰۵۷	۵/۹	۰/۰۰۳۰
۱۶	اکسیدآلومینیوم	۴/۵	۴۰	۱۳/۴	۰/۳۱۵۶	۸/۳	۰/۰۳۸۵
۱۷	اکسیدروی	۱/۵	۳۰	۵/۸	۰/۰۹۵۵	۵/۵	۰/۰۰۳۸
۱۸	اکسیدروی	۱/۵	۳۰	۱۳/۴	۰/۲۱۱۷	۷/۴	۰/۰۳۵۱
۱۹	اکسیدروی	۱/۵	۵۰	۹/۶	۰/۱۳۹۱	۶/۲	۰/۰۲۲۵
۲۰	اکسیدروی	۱/۵	۵۰	۹/۶	۰/۱۴۴۱	۷/۶۷	۰/۲۲۷۰
۲۱	اکسیدروی	۳	۴۰	۹/۶	۰/۱۵۹۱	۷	۰/۰۲۶۳
۲۲	اکسیدروی	۴/۵	۳۰	۹/۶	۰/۱۵۰۶	۷/۶۷	۰/۰۲۴۴
۲۳	اکسیدروی	۴/۵	۳۰	۹/۶	۰/۱۶۱۸	۷/۱۳	۰/۰۲۶۵
۲۴	اکسیدروی	۴/۵	۵۰	۹/۶	۰/۱۶۱۲	۷/۶۷	۰/۰۲۳۱
۲۵	اکسیدروی	۴/۵	۵۰	۹/۶	۰/۱۳۹۴	۷/۸۶	۰/۰۲۶۶

نانوپودر (گرم بر لیتر) می‌باشند.

در نمودار شکل ۳ اثر تغییرات جریان و زمان روشنی پالس بر روی نرخ براده‌برداری در هنگام استفاده از نانوپودرهای اکسیدتیتانیوم، اکسیدروی و اکسیدآلومینیوم با درصد اختلاط ۳ گرم بر لیتر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای تمام حالت‌ها، با افزایش جریان و زمان روشنی، انرژی تخلیه افزایش یافته و در نتیجه باعث افزایش نرخ براده‌برداری گردیده است. به‌علاوه امواج فراصوتی باعث افزایش بر خورد‌ها و افزایش تعداد یون‌ها و الکترون‌ها شده و با افزایش زمان روشنی، زمان لازم برای تحرک بیشتر آنها سبب افزایش نرخ براده‌برداری می‌شود.

رگرسیون منطبق شده بر داده‌ها دقیق‌تر خواهد بود که با توجه به مقادیر به‌دست آمده، مقدار R_{sq} برابر با $97/88\%$ که بیان‌کننده دقت انطباق مناسب مدل می‌باشد. همچنین معادله رگرسیون منطبق شده با مدل به صورت غیر کد شده برای نرخ براده‌برداری در رابطه (۱) آورده شده است.

$$MRR = -0.0837466 + 0.0232398 I - 0.000977222 T_{on} + 0.00633743 P + 0.00260691 I \times P \quad (1)$$

در رابطه (۱)، MRR نرخ براده‌برداری (گرم بر دقیقه)، P نوع پودر، I جریان (آمپر)، T_{on} زمان روشنی پالس (میکروثانیه) و C درصد اختلاط

جدول ۵: آنالیز واریانس برای نرخ براده برداری

Table 5. Analysis of variance for material removal rate (MRR)

عبارت	ضریب معادله رگرسیون اولیه	مقدار P اولیه	ضریب معادله رگرسیون اصلاح شده	مقدار P نهایی
ثابت	۰/۱۹۸۴۹۷	۰/۰۰۰	۰/۱۷۸۴۴۴	۰/۰۰۰
I	۰/۰۸۸۳۱۱	۰/۰۰۰	۰/۰۸۸۳۱۱	۰/۰۰۰
T_{on}	۰/۰۰۹۷۷۲	۰/۰۴۷	۰/۰۰۹۷۷۲	۰/۰۵۲
C	۰/۰۰۳۰۰۶	۰/۵۰۲	-	-
P	۰/۰۱۸۱۸۹	۰/۰۰۲	۰/۰۱۸۱۸۹	۰/۰۰۱
II	-۰/۰۰۸۹۶۳	۰/۴۵۲	-	-
$T_{on} \cdot T_{on}$	۰/۰۰۲۲۸۷	۰/۸۴۶	-	-
C.C	-۰/۰۱۲۲۱۳	۰/۳۱۲	-	-
P.P	-۰/۰۰۸۹۶۳	۰/۴۵۲	-	-
$I \cdot T_{on}$	۰/۰۰۵۴۱۹	۰/۲۶۳	-	-
I.C	۰/۰۰۰۴۹۴	۰/۹۱۶	-	-
I.P	۰/۰۰۹۹۰۶	۰/۰۵	۰/۰۰۹۹۰۶	۰/۰۶۲
$T_{on} \cdot C$	۰/۰۰۴۴۵۶	۰/۳۵۳	-	-
$T_{on} \cdot P$	-۰/۰۰۴۴۳۱	۰/۳۵۵	-	-
C.P	۰/۰۰۵۳۶۹	۰/۲۶۸	-	-

$R_{Sq} = 97/88\%$ $R_{Sq} (pred) = 82/56\%$ $R_{Sq} (adj) = 94/91\%$

همچنین نانوپودر اکسیدروی، بیشترین نرخ براده برداری را داشته است. علت را می توان چنین بیان کرد که این نانوپودر کمترین مقاومت الکتریکی را نسبت به سایر نانوپودرها دارد که این موضوع سبب کاهش بیشتر مقاومت الکتریکی گپ ماشین کاری شده و در نتیجه کنترلر دستگاه نیز فاصله گپ ماشین کاری بزرگتری را نسبت به گپ ماشین کاری سایر نانوپودرها ایجاد می کند. این افزایش فاصله علاوه بر افزایش انرژی تخلیه سبب ایجاد فضای بیشتر برای تعلیق نانوپودر توسط امواج فراصوتی و همچنین شستشوی بهتر دی الکتریک شده و نرخ براده برداری را افزایش داده است. نانوپودر اکسیدآلومینیوم علی رغم مقاومت الکتریکی بالا، نرخ براده برداری بیشتری را ایجاد کرده است که این عامل به دلیل چگالی پایین این نانوپودر نسبت به سایر نانوپودرها است که سبب تعلیق بهتر و یکنواخت تر ذرات در فضای گپ ماشین کاری، افزایش تعداد جرقه های سالم و در نتیجه افزایش نرخ براده برداری شده است.

شکل ۴ مقادیر متوسط نرخ براده برداری را برای سه نانوپودر مورد استفاده را نشان می دهد. مشاهده می شود که با اعمال امواج فراصوتی و استفاده از نانوذرات در دی الکتریک، نرخ براده برداری برای هر سه نانوپودر نسبت به ماشین کاری معمول افزایش داشته است. به طوری که برای نانوپودر اکسیدروی میانگین نرخ براده برداری تا ۳۰ درصد افزایش یافته است. علت این موضوع را می توان چنین بیان نمود که در هنگام استفاده از نانوپودر در دی الکتریک، یون ها و الکترون ها که به سمت الکترودها (قطعه کار و ابزار) حرکت می کنند، با ذرات معلق نانوپودر برخورد می کنند. این ذرات با جذب انرژی، یون ها و الکترون های زیادی را تولید می کنند. این اتفاق موجب افزایش تعداد جرقه ها در واحد زمان (فرکانس جرقه ها) می شود.

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می گردد در یک ژنراتور ایزوپالس

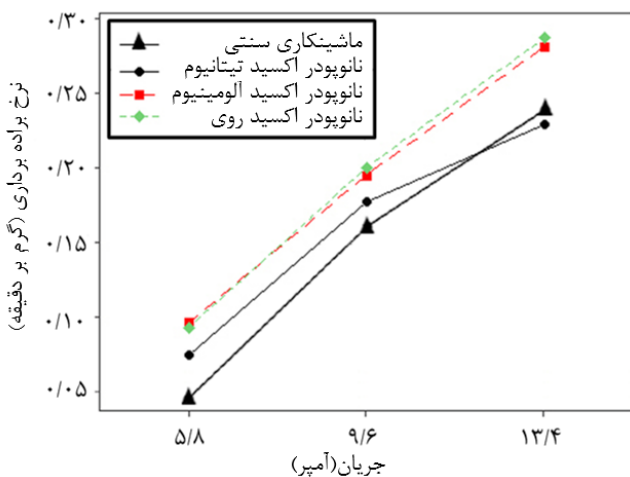


Fig. 4. The mean value of MRR in conventional EDM and ultrasonic assisted EDM and nano-powder

شکل ۴: مقادیر متوسط نرخ براده برداری در حالت ماشین کاری تخلیه ی الکتریکی معمولی و حالت اعمال امواج فراصوتی و استفاده از نانوذرات در دی الکتریک

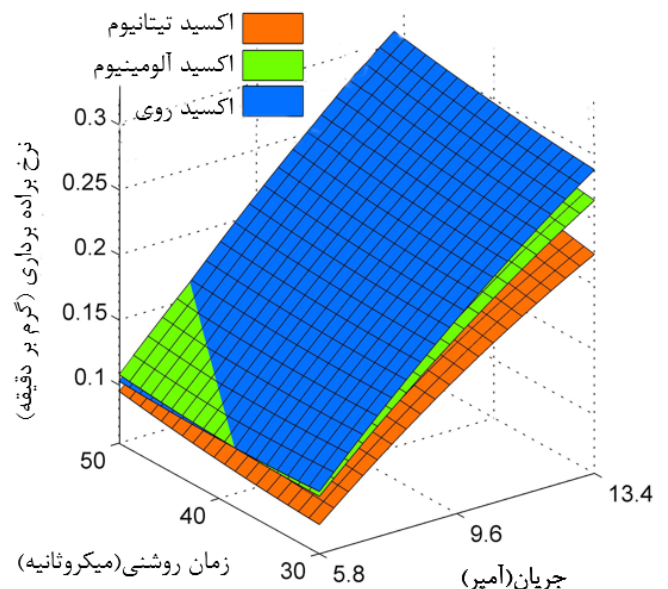


Fig. 3. Material removal rate vs current and pulse on time for three Nanopowders at concentration of 3 g / L

شکل ۳: نمودار نرخ براده برداری برحسب جریان و زمان روشنی جرقه برای سه نانوپودر در درصد اختلاط ۳ گرم بر لیتر

$$Ra = -0.746728 + 0.341131 I - 0.0462963 T_{on} + 1.81437 C - 0.037037 P - 0.318445 C^2 + 0.58498 P^2 \quad (2)$$

جدول ۶: آنالیز واریانس برای زبری سطح

Table 6. Analysis of variance for surface roughness

مقدار نهایی P	ضریب معادله رگرسیون اصلاح شده	مقدار اولیه P	ضریب معادله رگرسیون اولیه	عبارت
۰/۰۰۰	۶/۹۵۷۱۰	۰/۰۰۰	۶/۹۷۰۶۲	ثابت
۰/۰۰۰	۱/۲۹۶۳	۰/۰۰۰	۱/۲۹۶۳	I
۰/۰۰۰	۰/۴۶۲۹۶	۰/۰۰۱	۰/۴۶۲۹۶	T_{on}
۰/۱۲۲	-۰/۱۴۴۴۴	۰/۱۸۲	-۰/۱۴۴۴۴	C
۰/۶۸۲	۰/۰۳۷۰۴	۰/۷۲۱	۰/۰۳۷۰۴	P
-	-	۰/۴۹۹	-۰/۱۸۷۹۵	II
-	-	۰/۶۸۶	۰/۱۱۲۰۵	$T_{on} \cdot T_{on}$
۰/۰۰۳	۰/۰۳۷۰۴	۰/۰۲۸	-۰/۶۸۷۹۵	CC
۰/۰۱۳	۰/۵۸۳۵	۰/۰۴۵	۰/۶۱۲۰۵	PP
-	-	۰/۳۹۱	۰/۰۹۵۸۳	$I \cdot T_{on}$
-	-	۰/۳۱۷	-۰/۱۱۲۰۵	IC
-	-	۰/۵۷۱	۰/۰۶۲۵	IP
-	-	۰/۳۹۱	-۰/۰۹۵۸۳	$T_{on} \cdot C$
-	-	۰/۵۷۱	۰/۰۶۲۵	$T_{on} \cdot P$
-	-	۰/۷۳۳	۰/۰۳۷۵	CP
$R_{S_q} = ۹۳/۳۹ \% \quad R_{S_q} (pred) = ۸۷/۴۷ \% \quad R_{S_q} (adj) = ۹۱/۱۸ \%$				

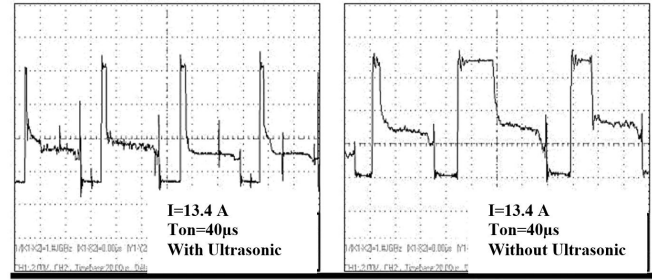


Fig. 5. Voltage vs time, $I = 13.4 \text{ A}$ and $T_{on} = 40 \mu\text{s}$
a) EDM b) Ultrasonic assisted EDM

شکل ۵: شکل پالس ولتاژ - زمان در جریان ۱۳/۴ آمپر و زمان روشنایی پالس ۴۰ میکروثانیه در حالت ماشین کاری تخلیه الکتریکی (الف معمولی و ب) با اعمال امواج فراصوتی

هرچه در یک تخلیه الکتریکی، جرقه زدن سریع تر اتفاق بیافتد (زمان تأخیر جرقه کوتاه تر)، براده برداری از سطح قطعه کار نیز سریع تر انجام می شود و بنابراین نرخ براده برداری افزایش می یابد. همچنین استفاده از امواج فراصوتی سبب معلق شدن و یکنواختی توزیع نانوذرات در داخل دی الکتریک گردیده و به توزیع یکنواخت تر جرقه ها و افزایش بیشتر جرقه های سالم منجر می شود [۱۰ و ۱۱].

از طرفی نوسانات فراصوتی علاوه بر دور کردن آلودگی ها از دهانه ماشین کاری [۱۰]، با ایجاد افت فشار باعث افزایش پدیده جوشش حجمی و در نتیجه افزایش نرخ براده برداری گردیده است. همچنین استفاده از امواج فراصوتی باعث افزایش تحرک و برخورد نانوذرات و در نتیجه افزایش بیشتر تعداد ذرات باردار می گردد. همچنین برخورد نانوذرات اکسیدی با سختی بالا می تواند بر نرخ براده برداری از قطعه کار مؤثر باشد. تعلیق بهتر ذرات نانوپودر در فضای گپ ماشین کاری، نتیجه دیگری است که از اثر امواج فراصوتی بر نانوپودر حاصل گردیده و با جلوگیری از ته نشین شدن ذرات نانوپودر سبب افزایش تعداد جرقه های سالم و توزیع بهتر و یکنواخت تر آن ها می گردند و در نتیجه فرآیند پایدارتر و نرخ براده برداری افزایش یافته است.

۳-۲- بررسی زبری سطح

جدول آنالیز واریانس و ضرایب معادله رگرسیون حاکم بر مسأله به صورت کد شده برای زبری سطح به صورت زیر در جدول ۶ آمده است. با توجه به داده ها، پارامترهای جریان و زمان روشنایی پالس پارامترهای مؤثر هستند و پارامترهای درصد اختلاط و نوع نانوپودر به دلیل آن که اثرات تداخلی آن ها مؤثر شناخته شده است، به عنوان فاکتور تداخلی مؤثر بر خروجی مورد مطالعه قرار گرفته اند. مقادیر به دست آمده برای R_{S_q} در جدول شماره ۶ آورده شده است، که بیان کننده دقت انطباق مناسب مدل می باشد. همچنین معادله رگرسیون منطبق شده با مدل به صورت غیر کد شده برای زبری سطح در رابطه (۲) آورده شده است. در رابطه (۲)، R_a زبری سطح (میکرومتر)، P نوع پودر، I جریان (آمپر)، T_{on} زمان روشنایی پالس (میکروثانیه) و C درصد اختلاط نانوپودر (گرم بر لیتر) می باشند.

در نمودار شکل ۶ زبری سطوح حاصل، هنگام استفاده از نانوپودرهای اکسیدتیتانیوم، اکسیدروی و اکسیدآلومینیوم نشان داده شده است. مشاهده می شود هرچه مقدار جریان تخلیه الکتریکی افزایش یافته است، به علت افزایش انرژی الکتریکی تخلیه، زبری سطح نیز افزایش می یابد. همچنین تأثیر بیشتر متغیر جریان نسبت به زمان روشنایی پالس مشاهده می گردد. شکل ۷ مقایسه مقادیر متوسط زبری سطح حاصل شده از ماشین کاری تخلیه الکتریکی معمولی و حالت اعمال امواج فراصوتی و استفاده از نانوذرات در دی الکتریک را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود اعمال امواج فراصوتی و استفاده از نانوپودر اکسیدآلومینیوم سبب کاهش جزئی در مقدار متوسط زبری سطح شده است. اما برای دو نانوپودر دیگر افزایش در زبری سطح ایجاد شده است. علت این موضوع را همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده است می توان چنین بیان کرد که امواج فراصوتی و حرکت رفت و برگشت پیشانی ابزار و در نتیجه افت فشار، باعث تشدید پدیده جوشش حجمی و برخورد نانوذرات به سطح شده و این پدیده باعث افزایش

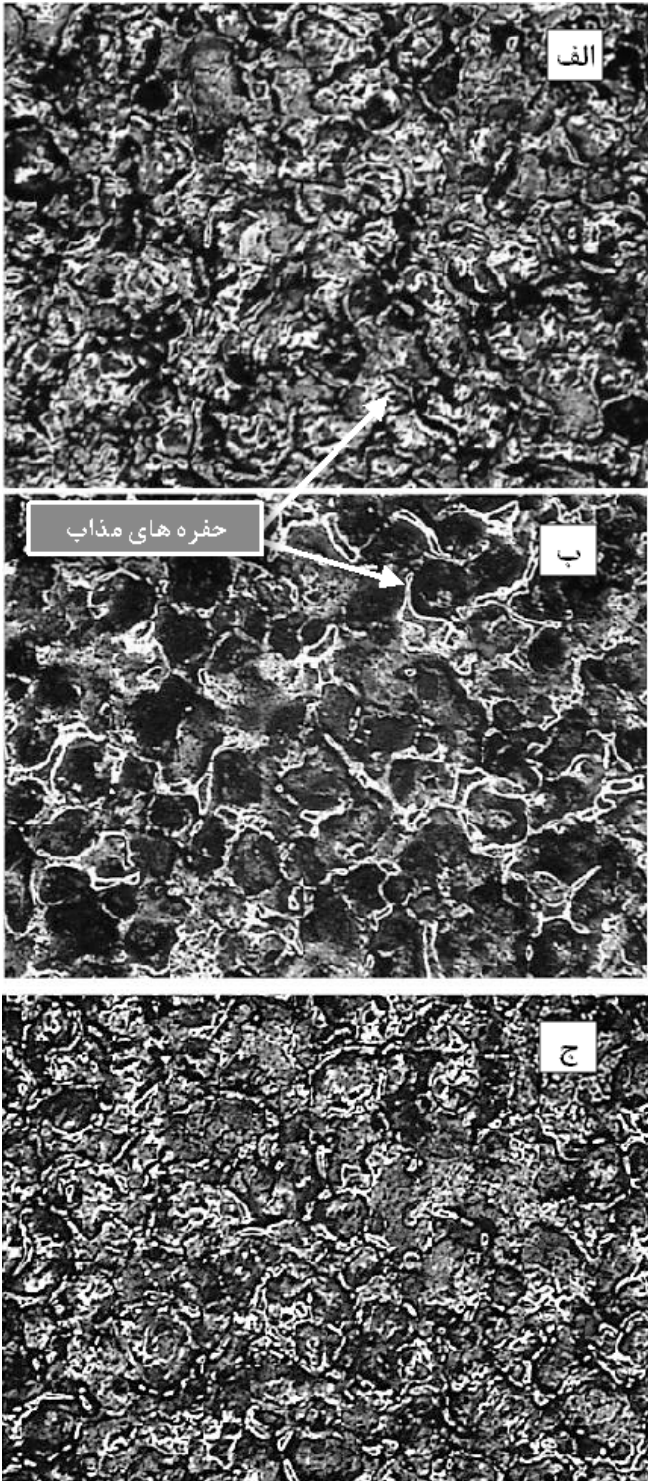


Fig. 8. Microscopic images with 160X of samples, and $T_{on} = 40 \mu\text{sec}$, $I = 5.6 \text{ A}$

a) EDM, b) Ultrasonic assisted EDM and c) Ultrasonic assisted EDM and the use of Al_2O_3 Nanopowder at concentration 3 g/L

شکل ۸: تصاویر میکروسکوپی با بزرگنمایی 160X نمونه‌ها در زمان روشنی پالس ۴۰ میکروثانیه، جریان ۵/۶ آمپر در حالت ماشین کاری تخلیه الکتریکی (الف) معمولی، (ب) در شرایط با اعمال فراصوتی و (ج) در شرایط با اعمال فراصوتی و استفاده از نانوپودر اکسید آلومینیوم با درصد اختلاط پودر ۳ گرم بر لیتر

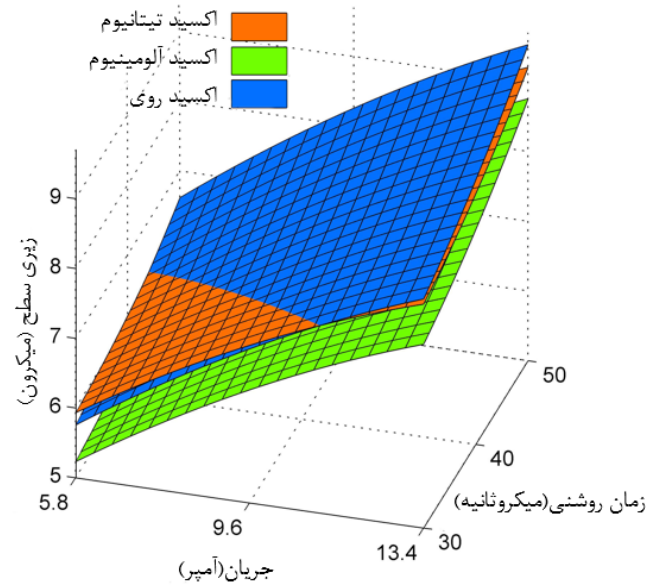


Fig. 6. Surface roughness vs current and pulse on time for three Nanopowders at concentration of 3 g/L

شکل ۶: نمودار زبری سطح بر حسب جریان و زمان روشنی جرقه برای سه نانوپودر در درصد اختلاط ۳ گرم بر لیتر

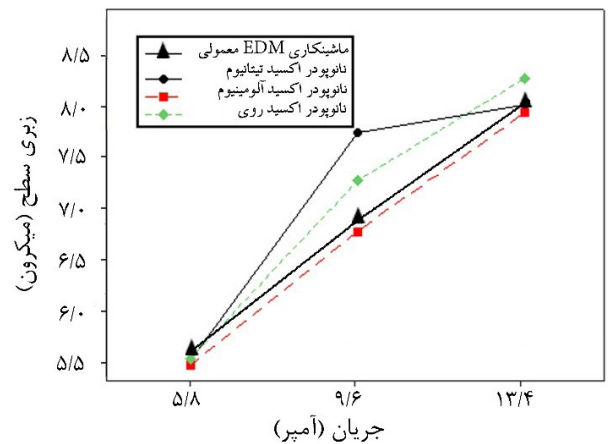


Fig. 7. The mean value of surface roughness in conventional EDM and with ultrasonic assisted EDM

شکل ۷: مقادیر متوسط زبری سطح در حالت ماشین کاری تخلیه الکتریکی معمولی و حالت اعمال امواج فراصوتی و استفاده از نانوذرات در دی الکتریک

نسبی عمق حفره‌های مذاب گردیده و در نتیجه زبری سطح نسبت به حالت عدم استفاده از امواج فراصوتی و نانوپودر، بیشتر شده است. اما در حالت استفاده از نانوپودر اکسید آلومینیوم، به دلیل چگالی کمتر این پودر، امواج فراصوتی باعث تعلیق بهتر نانوذرات گردیده، سبب افزایش تعداد و توزیع جرقه‌ها روی سطح می‌شود، به عبارتی تعداد جرقه‌ها افزایش اما انرژی‌های آن کمتر شده و در نتیجه باعث ایجاد حفره‌های کم عمق‌تری می‌گردد.

در نمودار شکل ۹ اثر تغییرات درصد اختلاط و زمان روشنی پالس بر روی زبری سطح نشان داده شده است. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود با افزایش زمان روشنی پالس، به دلیل افزایش انرژی تخلیه شده بین دو الکترود

هستند. و پارامتر نوع نانوپودر به دلیل آن که اثرات تداخلی آن با جریان مؤثر شناخته شده است، به عنوان فاکتور تداخلی مؤثر بر خروجی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مقدار R_{sq} برابر با ۹۹/۰۷٪ که بیان کننده دقت انطباق مناسب مدل می‌باشد. همچنین معادله رگرسیون منطبق شده با مدل به صورت غیر کد شده برای نرخ فرسایش ابزار در رابطه (۳) آورده شده است.

$$TWR = -0.019102 + 0.0050848 I - 0.00015 T_{on} + 0.00246637 P - 0.0003338 I \cdot P \quad (3)$$

در رابطه (۳)، TWR نرخ فرسایش ابزار (گرم بر دقیقه)، P نوع پودر، I جریان (آمپر)، T_{on} زمان روشنی پالس (میکروثانیه) و C درصد اختلاط نانوپودر (گرم بر لیتر) می‌باشند.

جدول ۷: آنالیز واریانس برای نرخ فرسایش ابزار

Table 7. Analysis of variance for tool wear

مقدار P نهایی	ضریب معادله رگرسیون اصلاح شده	مقدار P اولیه	ضریب معادله رگرسیون اولیه	عبارت
۰/۰۰۰	۰/۰۲۳۷۱۲	۰/۰۰۰	۰/۰۲۴۷۲۲	ثابت
۰/۰۰۰	۰/۰۱۹۳۳۲	۰/۰۰۰	۰/۰۱۹۳۳۲	I
۰/۰۰۲	-۰/۰۰۱۵	۰/۰۱۱	-۰/۰۰۱۵	T_{on}
-	-	۰/۹۵۵	-۰/۰۰۰۰۲۸	C
۰/۰۹۵	-۰/۰۰۰۷۳۹	۰/۱۵۸	-۰/۰۰۰۷۳۹	P
-	-	۰/۳۴۵	-۰/۰۰۱۲۷۶	$I.I$
-	-	۰/۹۸۵	۰/۰۰۰۰۲۴	$T_{on} \cdot T_{on}$
-	-	۰/۸۶۴	-۰/۰۰۰۲۲۶	$C.C$
-	-	۰/۹۵۵	۰/۰۰۰۰۷۴	$P.P$
-	-	۰/۵۱۸	۰/۰۰۰۳۴۴	$I \cdot T_{on}$
-	-	۰/۳۴۷	-۰/۰۰۰۵۰۶	$I.C$
۰/۰۱	-۰/۰۰۱۲۶۹	۰/۰۳۳	-۰/۰۰۱۲۶۹	$I.P$
-	-	۰/۳۱۵	۰/۰۰۰۵۴۴	$T_{on} \cdot C$
-	-	۰/۵۸۰	-۰/۰۰۰۲۹۳	$T_{on} \cdot P$
-	-	۰/۸۵۹	-۰/۰۰۰۰۹۴	$C.P$

$R_{S_q} = 99/07\% \quad R_{S_q}(pred) = 98/51\% \quad R_{S_q}(adj) = 98/88\%$

در نمودار شکل ۱۰ اثر تغییرات جریان و زمان روشنی پالس بر روی نرخ فرسایش ابزار آورده شده است. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش جریان مقدار فرسایش ابزار افزایش می‌یابد. همچنین اثر متغیر جریان نسبت به پارامتر زمان روشنی پالس بیشتر است. با افزایش جریان، انرژی تخلیه الکتریکی و در نتیجه درجه حرارت افزایش یافته و نرخ فرسایش ابزار افزایش یافته است.

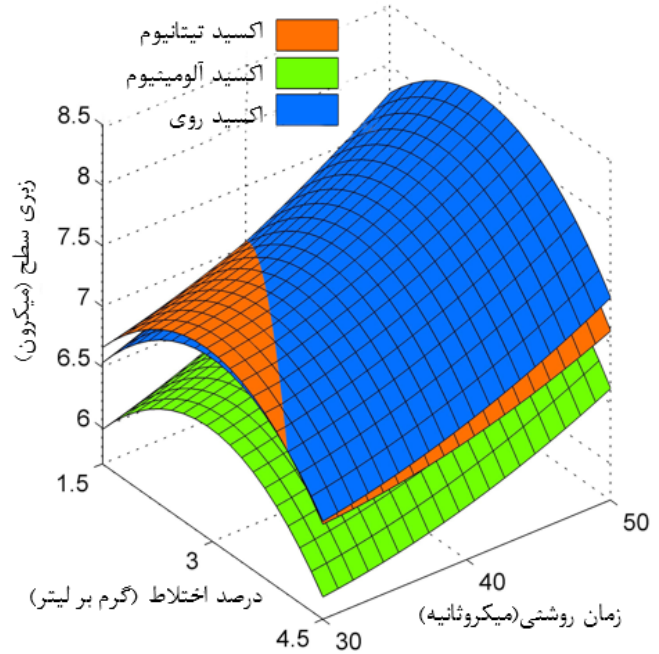


Fig. 9. Surface roughness vs concentration and pulse on time for three Nanopowders, $I=9.6 A$

شکل ۹: نمودار زبری سطح بر حسب درصد اختلاط پودر و زمان روشنی جرقه برای سه نانوپودر در جریان ۹/۶ آمپر

چاله‌های مذاب بزرگ‌تری ایجاد و موجب زبرتر شدن سطح گردیده است. همچنین مشاهده می‌گردد در ابتدا با افزایش درصد اختلاط نانوپودر، زبری سطح افزایش و سپس کاهش یافته است. دلیل افزایش اولیه با اضافه شدن ذرات نانوپودر، کاهش مقاومت ویژه گپ ماشین‌کاری و بزرگ‌تر شدن گپ و در نتیجه افزایش انرژی تخلیه الکتریکی است. اما با افزایش بیشتر مقدار نانوپودر در فضای گپ، احتمال پدیده‌ی پل‌زنی ذرات نانوپودر بین ابزار و قطعه کار و وقوع اتصال کوتاه افزایش یافته و لذا تعداد جرقه‌های سالم و عمق حفره‌های مذاب کاهش و در نتیجه زبری سطح کمتر شده است. کمترین مقدار زبری سطح برای نانوپودر اکسید آلومینیوم به دست آمده است. علت این نتیجه را می‌توان چنین بیان نمود که نانوپودر اکسید آلومینیوم دارای مقاومت الکتریکی بیشتری نسبت به سایر نانوپودرها می‌باشد. لذا مقاومت ویژه گپ ماشین‌کاری در حالت استفاده از این پودر، بیشتر و در نتیجه فاصله گپ به طور نسبی کمتر می‌شود. کاهش فاصله گپ ماشین‌کاری باعث کمتر شدن انرژی تخلیه الکتریکی گردیده و در نتیجه زبری سطح کاهش یافته است. علاوه بر دلیل ذکر شده، چگالی این نانوپودر کمتر از سایر نانوپودرها می‌باشد و تعلیق آن توسط امواج فراصوتی بهتر صورت گرفته و یکنواختی جرقه‌ها باعث بهبود زبری سطح گردیده است.

۳-۳- بررسی نرخ فرسایش ابزار

جدول آنالیز واریانس و ضرایب معادله رگرسیون حاکم بر مسأله به صورت کد شده برای نرخ فرسایش ابزار به صورت زیر در جدول ۷ آمده است با توجه به داده‌ها، پارامترهای جریان و زمان روشنی پالس پارامترهای مؤثر

می‌شود اعمال امواج فراصوتی و استفاده از نانوپودر اثر قابل ملاحظه‌ای بر نرخ فرسایش ابزار نداشته است. در جریان‌های بالا امواج فراصوتی با اعمال حرکت رفت و برگشتی سبب بهبود تجدید دی‌الکتريک در گپ ماشین‌کاری، بهبود شست‌وشو و بهبود انتقال حرارت در ناحیه گپ شده و باعث کاهش در نرخ فرسایش ابزار شده است. با افزایش زمان روشنی با توجه به قطبیت انتخاب شده (الکتروود مثبت) که برای حالت پرداخت کاری معمول است، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در نرخ فرسایش ابزار مشاهده نمی‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر امواج فراصوتی و اضافه‌شدن نانوپودرهای اکسیدتیتانیوم، اکسیدروی و اکسیدآلومینیوم به سیال دی‌الکتريک بر عملکرد فرآیند ماشین‌کاری با تخلیه‌ی الکتریکی پرداخته و علاوه بر بررسی اثر نوع نانوپودر، اثر هم‌زمان درصد اختلاط نانوپودر، زمان روشنی پالس و مقدار جریان بر روی نرخ براده‌برداری، زبری سطح و نرخ فرسایش ابزار به روش طراحی آزمایش سطح پاسخ، در ماشین‌کاری قطعه فولاد گرم کار H13 مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر بیان می‌شوند:

- برای نانوپودر اکسیدروی که بیشترین رسانایی الکتریکی و هدایت حرارتی را دارد، نرخ براده‌برداری و زبری سطح بیشتر و نرخ فرسایش ابزار کمتری حاصل شده است.
- اثر نوسانات فراصوتی در بهبود انتقال حرارت و همچنین هدایت حرارتی بالای نانوپودر اکسیدروی سبب شده است که این نانوپودر، کمترین نرخ فرسایش ابزار را داشته باشد.
- برای نانوپودر اکسیدآلومینیوم که کمترین رسانایی الکتریکی و چگالی را دارد، زبری سطح کمتری ایجاد شده است.
- اثر امواج فراصوتی بر نانوپودرها بصورت جلوگیری از تجمع نانوذرات، تعلیق بهتر در دی‌الکتريک، افزایش برخوردی نانوذرات با یون‌ها و الکترون‌ها و همچنین براده‌برداری نانوپودرهای اکسیدی عمل کرده که در نتیجه، شرایط بهتری برای براده‌برداری ایجاد شده است.
- با استفاده از ذرات نانوپودر و اعمال امواج فراصوتی، می‌توان به‌طور میانگین نرخ براده‌برداری را تا ۳۰٪ افزایش داد.
- متغیر درصد اختلاط نانوپودر برای پارامترهای نرخ فرسایش ابزار و نرخ براده‌برداری به‌صورت کم‌اثر نسبت به سایر متغیرهای ورودی شناخته شده است اما برای پارامتر زبری سطح، مؤثر تشخیص داده شد.

فهرست علائم

C	درصد اختلاط نانوپودر، gr/lit
P	نوع نانوپودر

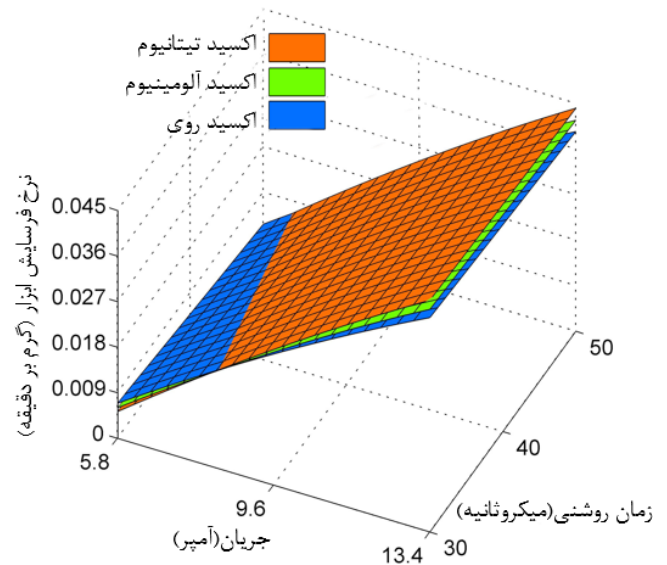


Fig. 10. Tool wear vs current and pulse on time for three Nanopowders at concentration of 3 g / L

شکل ۱۰: نمودار نرخ فرسایش ابزار بر حسب جریان و زمان روشنی جرقه برای سه نانوپودر در درصد اختلاط ۳ گرم بر لیتر

نانوپودر اکسیدروی کمترین نرخ فرسایش ابزار را ایجاد کرده است. علت آن را می‌توان چنین عنوان کرد که به دلیل رسانایی حرارتی بالای این نانوپودر نسبت به سایر پودرها تغییرات دمای منطقه گپ در حین ماشین‌کاری کمتر و نرخ فرسایش ابزار که وابسته به درجه حرارت است، کاهش یافته است.

شکل ۱۱ نمودار مقادیر متوسط نرخ فرسایش ابزار حاصل شده از ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی معمولی و حالت اعمال امواج فراصوتی و استفاده از نانوذرات در دی‌الکتريک را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده

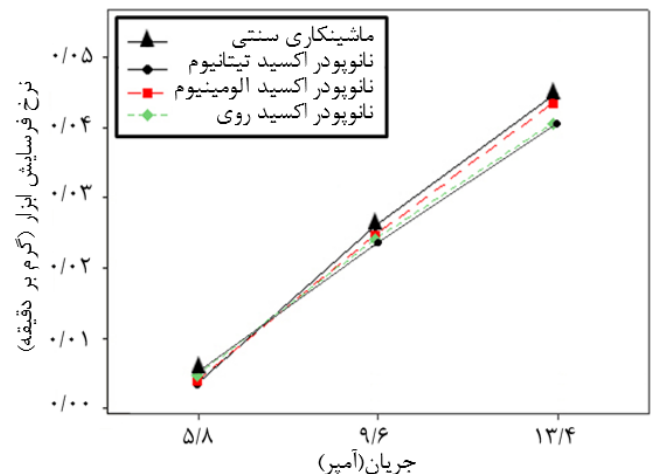


Fig. 11. The mean value of tool wear rate in conventional EDM and ultrasonic assisted EDM and Nanopowder

شکل ۱۱: مقادیر متوسط نرخ فرسایش ابزار در حالت ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی معمولی و حالت اعمال امواج فراصوتی و استفاده از نانوذرات در دی‌الکتريک

process of EDM with USM, *Journal of Materials Processing Technology*, 104(3) (2000) 171-177.

- [10] A. Abdullah, M.R. Shabgard, A. Ivanov, M.T. Shervany-Tabar, Effect of ultrasonic-assisted EDM on the surface integrity of cemented tungsten carbide (WC-Co), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(3) (2008) 268.
- [11] N.I. Marinescu, D. Ghiculescu, G. Jitianu, Solutions for technological performances increasing at ultrasonic aided electrodischarge machining, *International Journal of Material Forming*, 2(1) (2009) 681.
- [12] M. Shabgard, H. Kakolvand, M. Seyedzavvar, R.M. Shotorbani, Ultrasonic assisted EDM: Effect of the workpiece vibration in the machining characteristics of FW4 Welded Metal, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 6(4) (2011) 419-428.
- [13] G.S. Prihandana, M. Mahardika, M. Hamdi, Y.S. Wong, K. Mitsui, Effect of micro-powder suspension and ultrasonic vibration of dielectric fluid in micro-EDM processes—Taguchi approach, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(12) (2009) 1035-1041.
- [14] M.R. Shabgard, B. Khosrozadeh, Comparative study of adding nanopowders in dielectric effects on outputs and surface integrity of Ti-6Al-4V alloy in Electrical Discharge Machining, *Modares Mechanical Engineering*, 16(2) (2016) 41-50. (in Persian)
- [15] G.S. Prihandana, M. Mahardika, M. Hamdi, Y.S. Wong, K. Mitsui, Accuracy improvement in nanographite powder-suspended dielectric fluid for micro-electrical discharge machining processes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56(1) (2011) 143-149.
- [16] H. Marashi, A.A.D. Sarhan, M. Hamdi, Employing Ti nano-powder dielectric to enhance surface characteristics in electrical discharge machining of AISI D2 steel, *Applied Surface Science*, 357 (2015) 892-907.
- [17] H. Baseri, S. Sadeghian, Effects of nanopowder TiO₂-mixed dielectric and rotary tool on EDM, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1) (2016) 519-528.
- [18] H. Fattahi, *Effects of ultrasonic vibration and nano-Powders suspended dielectric in EDM process*, Master's thesis in Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, 2013.
- [19] N.P.L. Co, *Data sheet for Nano materials*, in: Lima Pars Nano (Ed.), 2014.

زمان روشنی پالس، μs	T_{on}
جریان، A	I
نرخ براده‌برداری، gr/min	MRR
زبری سطح متوسط، μm	R_a
نرخ فرسایش ابزار، gr/min	TWR

منابع

- [1] A. Erden, S. Bilgin, *Role of Impurities in Electric Discharge Machining*, in: J.M. Alexander (Ed.) Proceedings of the Twenty-First International Machine Tool Design and Research Conference, Macmillan Education UK, London, 1981, pp. 345-350.
- [2] Y. F. Tzeng, C. Y. Lee, Effects of Powder Characteristics on Electrodischarge Machining Efficiency, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17(8) (2001) 586-592.
- [3] M. Asadi, M. Ghoreishi, investigation of electrodischarge machining parameter using Aluminum powder suspended in dielectric, *Aerospace Mechanics Journal*, 1(1) (2005) 11-17. (in Persian)
- [4] M. Esmailian, A. Mehrvar, A.A. Meracy, Investigation of the effect of AL₂O₃ powder in Electro Discharge Machining for Titanium alloys, in: *8th Conf. of Iranian Aerospace Society*, Isfahan, 2009.
- [5] E. Sharifi Tashnizi, F. Nahrekhalaji, A.H. Hosseinloo, Investigation of Effects of the Silver (Ag) and P.V.C Powders on Electro Discharge Machining Parameters by Design of Experiments, in: *9th Iranian Conf. on Manufacturing Engineering*, Birjand, 2009.
- [6] B. Jabbaripour, Investigating Output Characteristics in Powder Mixed Electrical Discharge Machining of γ -TiAl Intermetallic, *Modares Mechanical Engineering*, 12(5) (2013) 74-86. (in Persian)
- [7] E. Sharifi Tashnizi, N. Fazeli Nahrekhalaji, A.H. Hosseinloo, Investigation of Effects of the Silver (Ag) and P.V.C Powders on Electro Discharge Machining Parameters by Design of Experiments, in: *10th Iranian Conf. on Manufacturing Engineering*, Babol, 2010.
- [8] S. Kumar, U. Batra, Surface modification of die steel materials by EDM method using tungsten powder-mixed dielectric, *Journal of Manufacturing Processes*, 14(1) (2012) 35-40.
- [9] Y.C. Lin, B.H. Yan, Y.S. Chang, Machining characteristics of titanium alloy (Ti-6Al-4V) using a combination

Please cite this article using:

A. Pak and H. Fattahi, Investigation of Ultrasonic Assisted Electro Discharge Machining with TiO₂, Al₂O₃ and ZnO Nano-Powder, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(3) (2018) 541-550.
DOI: 10.22060/mej.2017.11875.5205

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

