

# بررسی تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی به دی‌الکتریک در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ Ti-6Al-4V

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۲

بهنام خسروزاده<sup>۱</sup>

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ملکان، ملکان، ایران. behnam\_kh@tabrizu.ac.ir

## چکیده

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی یکی از فرایندهای ماشین‌کاری غیرسنتی است که کاربرد بسیار گسترده‌ای در ماشین‌کاری فلزات و آلیاژهای با استحکام بالا با قابلیت ماشین‌کاری پایین دارد. با توجه به ماهیت ترموالکتریکی این فرایند، سلامت سطح پایین قطعات تولیدی با این روش، یکی از نقاط ضعف آن است. در این تحقیق برای ماشین‌کاری آلیاژ Ti-6Al-4V از روش ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با استفاده از نانولوله‌های کربنی افزوده شده به دی‌الکتریک استفاده شده است. متغیرهای ورودی شامل شدت جریان تخلیه، زمان روشنی پالس، دی‌الکتریک است که تأثیر تغییرات آن‌ها روی شکل پالس‌های خروجی، نرخ براده برداری، سایش نسبی ابزار، صافی سطح و لایه متأثر از حرارت بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانولوله‌های کربنی به دی‌الکتریک باعث کاهش پالس‌های غیرمفید و افزایش پالس‌های مؤثر در ماشین‌کاری و کاهش نرخ براده برداری می‌شود و نرخ سایش نسبی ابزار را کم می‌کند. وجود نانولوله‌های کربنی صافی سطح را به‌طور قابل‌توجهی بهبود داده و باعث کاهش لایه متأثر از حرارت می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، نانولوله‌های کربنی، Ti-6Al-4V، لایه متأثر از حرارت

## Investigation of the effect of adding carbon nanotubes into the dielectric in the electrical discharge machining process of Ti-6Al-4V alloy

Behnam Khosrozadeh<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of engineering, Islamic Azad University Malekan Branch, Malekan, Iran.

\*Malekan, Iran, behnam\_kh@tabrizu.ac.ir

### Abstract

Electrical discharge machining is a non-traditional machining process, which is widely used for machining high-strength metals and alloys with low machinability. Due to the thermoelectric nature of this process, the poor surface integrity of the parts produced by this method is one of its weaknesses. In this research, the electric discharge machining method has been used for the machining of Ti-6Al-4V alloy using carbon nanotubes added to the dielectric. In this study, input variables include discharge current intensity, pulse duration, and dielectric; the effect of their changes on the shape of the output pulses, material removal rate, tool wear ratio, surface roughness and heat affected layer has been investigated. The results show that the addition of carbon nanotubes to the dielectric reduces the harmful pulses and increases the effective pulses in machining, reduces the material removal rate and decrease the tool wear rate. The presence of carbon nano tubes significantly improves the surface quality and reduces the heat-affected layer.

**Keywords:** Electrical discharge machining, carbon nano tube, Ti-6Al-4V, heat-affected layer.

۲۲۱

سال ۱۱- شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۱

نشریه علمی دانش و

فناوری هوا فضا



## ۱. مقدمه

در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (EDM<sup>۱</sup>) قطعه کار و الکتروود (ابزار) تماس مستقیمی ندارند، اما ماشین‌کاری با کنترل جرقه بین قطعه کار و الکتروود در حضور محیط سیال دی‌الکتریک انجام می‌شود. EDM یک فرایند ترموالکتریک است که در آن اجزای ماشین‌کاری شده با این فرایند تحت تأثیر خواص حرارتی مواد به‌ویژه هدایت حرارتی و نقطه ذوب قرار می‌گیرند [۱]. فرایندهای EDM به دلیل توانایی آن در ماشین‌کاری اشکال پیچیده، دقیق و نامنظم سطوح برای ماشین‌کاری انواع مواد رسانا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. بسیاری از آلیاژها و فلزات مورد استفاده در صنایع هوا-فضا به علت ویژگی‌های خاصی که دارند با فرایند EDM ماشین‌کاری می‌شوند. اما انتخاب شرایط ماشین‌کاری مناسب برای به دست آوردن یکپارچگی سطح خوب ضروری است زیرا تأثیر زیادی بر عملکرد قطعات دارد. یکپارچگی سطح با شرایط توپولوژیکی، مکانیکی، متالورژیکی و شیمیایی آن توصیف می‌شود [۳]. مؤلفه‌های سلامت سطح با اندازه‌گیری تنش‌های پسماند، ترکیب تغییر یافته سطح، زبری سطح، ضخامت لایه سفید، منطقه تحت تأثیر حرارت، مورفولوژی سطح، سختی و تعیین رفتار خوردگی، مشخص می‌شود. شکل ۱ پارامترهای مختلف سلامت سطح را نشان می‌دهد. کیفیت سطح ماشین‌کاری شده نقش مهمی در عملکرد و تعیین عمر قطعات ماشین‌کاری شده دارد. اجزا یا قطعات ماشین‌کاری شده با فرایند غیر سنتی EDM باید از دیدگاه سلامت سطح شناسایی شوند زیرا سلامت سطح بر کیفیت سطح ماشین‌کاری شده تأثیر می‌گذارد که به نوبه خود بهره‌وری هر

شرکتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ویژگی سلامت سطح ماشین‌کاری شده با EDM و شرایط ماشین‌کاری، مانند زمان پالس، شدت جریان، مواد الکتروود ابزار و مایع دی‌الکتریک اعمال شده تغییر می‌کند [۴]. عوامل اصلی که بر یکپارچگی سطح عنصر ماشین‌کاری شده تأثیر می‌گذارد، شدت جریان و زمان پالس است، در حالی که سایر پارامترهای ماشین‌کاری شده مشخص و ثابت است [۵ و ۶]. همچنین نوع سیال دی‌الکتریک عامل مهم دیگری است که سلامت سطح ماشین‌کاری شده را تعیین می‌کند [۴]. گردش دی‌الکتریک مناسب در شکاف ماشین‌کاری برای حفظ حداکثر عملکرد مورد نیاز و کنترل جرقه الکتریکی مورد نیاز است [۷].

یکی از روش‌های بهبود شرایط و خروجی‌های ماشین‌کاری استفاده از دی‌الکتریک مناسب یا تغییر خواص آن است؛ که با افزودن برخی از پودرها می‌توان به اهداف گفته شده دست یافت. نتایج مطالعات مختلف تحقیقاتی نشان داده که <sup>۲</sup>PMEDM می‌تواند زبری سطح را هم‌زمان با سرعت بالای ماشین‌کاری بهبود بخشد [۸ و ۹]. پودر اضافه شده در سیال دی‌الکتریک ویژگی‌های شکست آن را بهبود می‌بخشد و در پی آن فاصله بین ابزار و قطعه کار افزایش می‌یابد [۹ و ۱۰]. فاصله زیاد بین الکتروودها به شستشوی بهتر براده‌های ماشین‌کاری منجر می‌شود. در نتیجه، فرایند پایدارتر شده و از این‌رو، سرعت ماشین‌کاری و پرداخت سطح بهبود می‌یابد [۱۱]. امروزه پیشرفت‌ها به‌سوی بهبود فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و اصلاح خصوصیات سطح، از جمله با افزودن پودر به سیال دی‌الکتریک است. در حال حاضر، فرایند انجام‌شده به همراه پودرهای افزوده‌شده به

۲۲۲

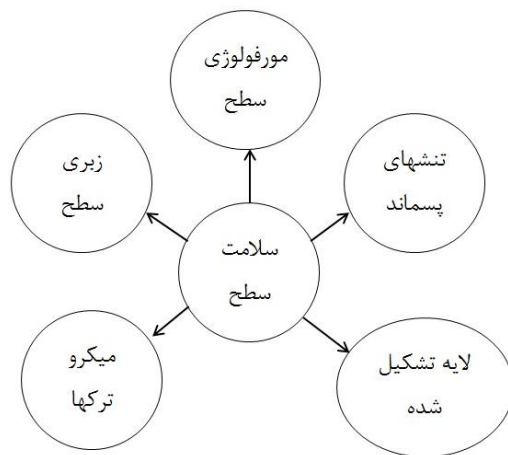
سال ۱۱ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۱

نشریه علمی دانش و فناوری هوا فضا



دی‌الکتريک موضوع بسياری از پروژه‌های تحقیقاتی است.



شکل ۱. مؤلفه‌های سلامت سطح

EDM مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که ریزسختی سطح ماشین‌کاری شده تحت تأثیر نوع و نسبت پودر قرار می‌گیرد. میکروسختی بالاتر با ابزار W-Cu و پودر تنگستن به دست آمد.

اکمچی [۱۵] از سوسپانسیون پودر هیدروکسی آپاتیت در آب یونیزه شده در ماشین‌کاری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V استفاده کرده است. نتیجه مطالعه آن‌ها کاربرد عملی فرایند بالا را برای توسعه ایمپلنت‌ها یا پوشش‌های سازگار با زیست برای کاربردهای پزشکی پیشنهاد می‌کند. پارابو و وینایاگام از نانولوله‌های کربنی تک جداره (SWCNT<sup>۴</sup>) اضافه شده به دی‌الکتريک در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی فولاد ابزار AISI D2 استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نمونه‌هایی که با استفاده از این روش ماشین‌کاری شده‌اند، در مقایسه با نمونه‌هایی که بدون این ذرات ماشین‌کاری شده‌اند، مورفولوژی سطح بهبود یافته و ترک‌های ریز کاهش یافته و پرداخت سطح بالاتری دارند [۱۶].

ساری و همکاران گزارش دادند که افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره به دی‌الکتريک در EDM فولاد ابزار AISI H13، فرایند ماشین‌کاری را کارآمدتر می‌کند، سطح ایجاد شده بهتر، لایه ریکست نازک‌تر شده،  $MRR^5$  و  $TWR^5$  بهبود یافته به‌خصوص اگر متغیرهای ماشین‌کاری برای ایجاد تخلیه‌های الکتریکی کم انرژی تنظیم شدند [۱۷].

جادام و همکاران در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به‌منظور بهبود سلامت سطح، نانولوله‌های کربنی به دی‌الکتريک اضافه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که پرداخت

وو و همکاران [۱۲] پودر Al را در نفت سفید اضافه کردند و در حین ماشین‌کاری SKD ۶۱ با استفاده از ابزار مس به صافی سطح بالایی دست یافتند. پودر Al به نسبت معینی با فعال‌ساز سطح مخلوط و به نفت سفید اضافه شد. افزودن فعال‌ساز سطح، پودر Al را به‌طور یکنواخت در محیط دی‌الکتريک توزیع می‌کند که صافی سطح را تا حدود ۶۰ درصد در مقایسه با EDM با دی‌الکتريک نفت سفید بهبود بخشید.

عصارزاده [۱۳] متغیرهای ورودی را در PMEDM فولاد قالب عملیات حرارتی شده CK ۴۵ با استفاده از ابزار مس بهینه‌سازی کرد. پودر اکسید آلومینیوم در نفت سفید به‌عنوان دی‌الکتريک استفاده شد. نتایج مطالعات آن‌ها مشخص کرد که حداکثر  $MRR^3$  با شرایط جریان بالا و ولتاژ پایین و زمان پالس بهینه به دست آمد.

باتاچاریا و همکاران [۱۴] خواص سطحی فولادهای قالب را با پودرهای سیلیکون، تنگستن و گرافیت افزوده‌شده به دی‌الکتريک در عملیات



سطحی نمونه ماشین‌کاری شده در EDM مخلوط شده با نانولوله‌های کربنی نسبت به EDM معمولی افزایش می‌یابد و چگالی ترک‌های سطحی کاهش می‌یابد، ضخامت لایه ذوب مجدد کاهش یافته که بیشترین کاهش در حدود ۱۶/۲۸ درصد در شدت جریان ۲ آمپر مشاهده شد. همچنین در فرآیند PMEDM به علت نفوذ کربن در لایه سطحی سختی افزایش می‌یابد [۱۸].

دانش و همکارانش برای بهبود ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی فولاد 316L از روش PMEDM با نانولوله‌های کربنی استفاده کردند. بررسی سطوح ماشین‌کاری شده آشکار می‌کند که حفره‌های سطحی کم‌عمق‌تری تشکیل می‌شود و حتی در انرژی‌های تخلیه بزرگ‌تر با افزایش غلظت نانولوله‌ها، ترک‌های سطحی خیلی کاهش می‌یابد. در این شرایط درصد عناصر کربن و تیتانیوم در سطح افزایش یافته که با جایگزین شدن به جای عناصر نیکل و کروم به تشکیل کاربردهای سخت منجر می‌شوند [۱۹].

جادم و همکاران در مطالعه دیگر به بررسی تأثیر غلظت نانولوله‌های کربنی بر روی خروجی‌های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که به علت خواص ترموفیزیکی عالی نانولوله‌های کربنی، نرخ براده برداری افزایش می‌یابد و این افزایش در غلظت ۰.۵ گرم بر لیتر بیشتر از غلظت ۱ گرم بر لیتر بود. آن‌ها بهبود صافی سطح و کاهش ترک‌های سطحی، خلل و فرج موجود در سطح را در غلظت ۰.۵ گرم بر لیتر بیشتر از غلظت ۱ گرم بر لیتر اعلام کردند و در شرایط گفته شده بهترین صافی سطح مربوط به شدت جریان ۲ آمپر گزارش شد [۲۹].

در این مطالعه نانولوله‌های کربنی به سیال

دی‌الکتريک افزوده شده است تا با تغییر خواص دی‌الکتريک، تأثیر آن در مؤلفه‌های خروجی ماشین‌کاری مطالعه شود. فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی روی آلیاژ پرکاربرد تیتانیوم Ti-6Al-4V انجام شده است. آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق از پرکاربردترین مواد مورد مصرف در حوزه هوا-فضا و پزشکی است که خصوصیات سطح ماشین‌کاری شده اهمیت خاصی در این صنایع دارد. آلیاژ Ti-6Al-4V در صنایع هوا-فضا در ساخت قطعات بدنه و اجزای موتور هواپیما کاربرد گسترده‌ای دارد. استفاده از فرآیند PMEDM با نانولوله‌های کربنی افزوده شده به دی‌الکتريک و مطالعه خروجی‌های مربوط با سلامت سطح از ویژگی‌های این تحقیق بوده و نوآوری تحقیق در خصوص آلیاژ گفته شده است که در مطالعات قبلی مورد توجه قرار نگرفته است. خروجی‌های مورد نظر در این مطالعه شامل نرخ براده برداری، سایش نسبی ابزار، صافی سطح و لایه متأثر از حرارت است.

## ۲. مواد و روش‌ها

نمونه‌های لازم برای انجام عملیات ماشین‌کاری از میلگردهای آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V به قطر ۲۰mm تهیه شدند. این نمونه‌ها در ارتفاع ۱۰mm با دستگاه برش سیمی بریده شده و با استفاده از دستگاه سنگ‌زنی سطح قطعات پولیش شدند. ابزار استفاده شده از جنس فلز مس بود که از میلگردهای مسی به قطر ۱۰mm با عملیات تراشکاری تهیه شدند. ترکیب درصد عناصر آلیاژی قطعه کار و مشخصات فیزیکی، مکانیکی قطعه کار و ابزار به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. آزمایش‌های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با دستگاه اسپارک شارمیلز

روبوفرم ۲۰۰ با مولد ایزوپالس انجام شد. به منظور کنترل فرایند و مقایسه شکل پالس‌ها مدار الکترونیکی به کار گرفته شد تا ولتاژ گپ و تغییرات جریان در مقابل زمان، در یک رایانه ضبط و ذخیره شود. تصاویر شماتیک از انجام آزمایش‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. ترکیب درصد عناصر تشکیل‌دهنده آلیاژ

[۲۱] Ti-6Al-4V

Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
۸۹/۴۶۴	۶/۰۸	۴/۰۲	۰/۲۲	۰/۱۸	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۵۳

جدول ۲. خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه کار و ابزار

[۲۱]

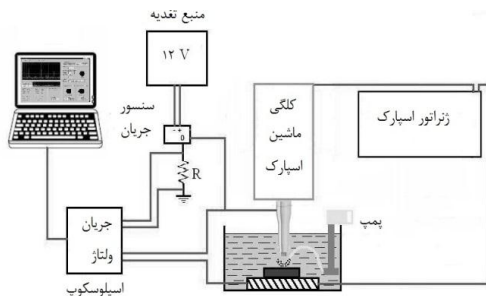
خواص مکانیکی	Cu	Ti-6Al-4V
هدایت حرارتی	۴۰۱ W/mK	۶۷ W/mK
مدول الاستیک	۱۱۰ Gpa	۱۱۳ GPa
نقطه ذوب	۱۰۸۴°C	۱۶۶۰°C
مقاومت الکتریکی	۱۶/۷۸ μΩ.cm	۱۷۸ μΩ.cm
چگالی	۸/۹ g/cm <sup>3</sup>	۴/۴۳ g/cm <sup>3</sup>

میانگین خروجی آن‌ها در نظر گرفته شد. برخی از مشخصات مهم و تأثیرگذار نانولوله‌های کربنی در فرایند EDM در جدول ۳ نشان داده شده است. سایر متغیرهای ورودی و پارامترهای تنظیمی آزمایش‌ها و دستگاه اسپارک در جدول ۴ آورده شده است.

وزن قطعات قبل و بعد از هر آزمایش به وسیله ترازوی دیجیتالی (با دقت ۰/۰۰۰۱g) اندازه‌گیری شده و با استفاده از رابطه (۱) نرخ براده برداری محاسبه شد.

$$MRR = \left( \frac{M_1 - M_2}{\rho t} \right) \times 10^6 \quad (1)$$

در این رابطه MRR مقدار نرخ براده برداری در (mm<sup>3</sup>/min)، M1 جرم قطعه کار قبل از ماشین‌کاری (gr)، M2 جرم قطعه کار بعد از ماشین‌کاری (gr)، t مدت زمان ماشین‌کاری (min) و ρ چگالی قطعه کار (gr/cm<sup>3</sup>) است.



شکل ۲. تجهیزات و تنظیمات مربوط به انجام

آزمایش‌ها

جدول ۳. برخی از مشخصات فیزیکی مؤثر

نانولوله‌ها در فرایند EDM [۲۲]

ویژگی	مقاومت (μΩcm)	رسانایی (W/cmK)	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )
	الکتریکی	حرارتی	
نانولوله	۱۰ <sup>۳</sup>	۱/۵-۲	۲/۹

فرسایش نسبی ابزار TWR شاخصی است که درصد حجم جدا شده از ابزار را نسبت به حجم

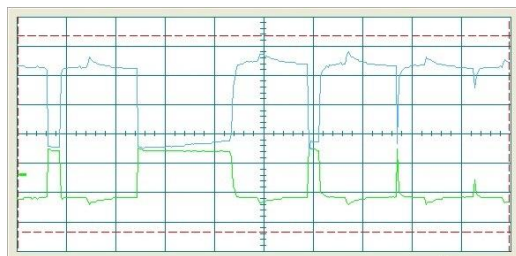
آزمایش‌های ماشین‌کاری طبق اصول طراحی آزمایش‌ها و بر اساس مدل طرح عاملی کامل، ۴ سطح جریان پالس، ۴ سطح زمان روشنی پالس، ۲ سطح سیال (دی‌الکتریک با ۲ گرم بر لیتر نانولوله‌های کربنی و بدون آن) انجام شدند. نانولوله‌های کربنی در یک مخزن جداگانه به دی-الکتریک افزوده شد و در داخل مخزن پمپ جداگانه‌ای گذاشته شد تا ذرات به صورت یکنواخت در کل دی‌الکتریک داخل مخزن توزیع شود. هر آزمایش حداقل دو بار انجام شد و

اچ شدند [۲۱].

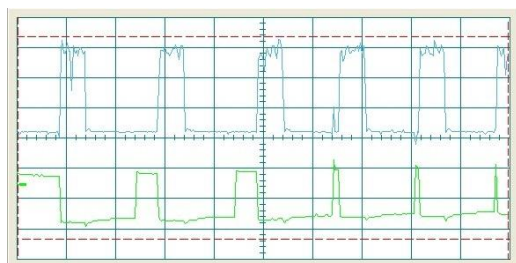
### ۳. نتایج، بحث و بررسی

#### ۳-۱. شکل پالس‌های خروجی

شکل پالس‌های تولیدی در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی در شکل ۳-الف نمایش داده شده است؛ در قسمت پایین این شکل پالس‌ها در مدت‌زمان طولانی‌تری نشان داده شده و یک قسمت از پالس‌ها به صورت بزرگنمایی شده در بالای تصویر آورده شده است همان‌طوری که از قسمت پایین شکل ۳-الف معلوم می‌شود پالس‌ها نامنظم بوده و پالس‌های مدارباز زیادی در آن مشاهده می‌شود، با توجه به یکسان نبودن شکل پالس‌ها انرژی آزادشده از آن‌ها هم مشابه هم نبوده و این امر موجب از بین رفتن کیفیت سطح تولیدشده و عدم یکنواختی آن می‌شود.



الف



ب

شکل ۳. پالس‌های تولیدشده در فرایندهای الف)

EDM، ب) PMEDM با پودر نانولوله کربنی

جداشده از قطعه کار را در هر آزمایش نشان می‌دهد، با توزین جرم ابزار قبل و بعد از هر آزمایش میزان فرسایش حجمی ابزار برحسب میلی‌متر مکعب مشخص شده و از تقسیم این مقدار بر حجم مواد برداشته شده از قطعه کار، میزان فرسایش نسبی ابزار از طریق رابطه (۲) به دست می‌آید.

جدول ۴. متغیرهای ورودی و پارامترهای تنظیمی

#### دستگاه اسپارک

متغیر	سطح آزمایش
زمان روشنی پالس (μS)	۲۰۰، ۱۰۰، ۲۵، ۶/۴
شدت جریان (A)	۴۸، ۲۴، ۱۲، ۶
زمان خاموشی پالس (μS)	۶/۴
ولتاژ مدارباز (V)	۲۰۰
فاصله گپ (μm)	۵۰
نوع دی‌الکتریک	روغن فلاکس‌الف

در این رابطه  $TRR^6$  نرخ سایش حجمی ابزار و  $MRR$  نرخ براده برداری از قطعه کار است.

$$TWR = \frac{TRR}{MRR} \times 100 \quad (2)$$

برای اندازه‌گیری صافی سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده از دستگاه اندازه‌گیری صافی سطح استفاده شد؛ عدد اندازه‌گیری شده میانگین ۳ داده اندازه گرفته‌شده از سطح نمونه‌ها بود که در راستاهای مختلف از سطح اندازه‌گیری شده بود.

برای مطالعه لایه متاثر از حرارت تصاویر میکروسکوپ الکترونی<sup>۷</sup> از سطح مقاطع برش خورده نمونه‌های ماشین‌کاری شده تهیه شد. به این منظور بعد از برش نمونه‌ها با دستگاه برش سیمی<sup>۸</sup> و پولیش‌کاری سطوح، با محلول کرول<sup>۹</sup>،







در نتیجه اندازه چاله‌ها کمتر می‌شود که به کاهش نرخ براده برداری منجر می‌شود. همان طوری که از شکل ۴-الف مشخص است، در ابتدای نمودار نرخ براده برداری فرایند PMEDM بیشتر از فرایند معمولی است، در این شرایط به علت کم بودن زمان روشنی پالس فرایند به شدت ناپایدار است، ولی با افزودن نانولوله‌های کربنی به علت کاهش استحکام شکست دی‌الکتریک، زمان تأخیر جرقه کمتر شده و با افزایش فاصله گپ و شستشوی بهتر آن جرقه‌های آرک و اتصال کوتاه کاهش می‌یابند، فرایند پایدار شده و نرخ براده برداری بهبود می‌یابد. در ادامه مشاهده می‌شود که نرخ براده برداری فرایند معمولی با فاصله تقریباً مشخصی بیشتر از فرایند PMEDM است، که این روند مغایر با رفتار اکثر پودرهای افزودنی به دی‌الکتریک است [۲۵]، کاهش نرخ براده برداری به علت ضریب انتقال حرارت بالای نانولوله کربنی است که باعث اتلاف انرژی حرارتی جرقه‌ها به دی‌الکتریک می‌شود. از این رو، بخش بیشتری از انرژی حرارتی به دی‌الکتریک منتقل می‌شود و مقدار انرژی حرارتی ارسال شده به قطعه کار کاهش می‌یابد، بنابراین نرخ براده برداری کاهش می‌یابد. نرخ براده برداری در مقابل جریان پالس در مدت زمان پالس ۶/۴ میکروتانیه در شکل ۴-ب نشان داده شده است. در این شکل مشهود است که در پالس‌هایی با شدت جریان کم، نرخ براده برداری فرایند PMEDM با نانولوله کربنی در دی‌الکتریک بیشتر از فرایند EDM است. اما با افزایش جریان پالس، نرخ براده برداری فرایند EDM بیشتر از فرایند PMEDM می‌شود. این پدیده به این دلیل است که در پالس‌های جریان کم، برای یونیزاسیون کانال پلاسما، گپ جرقه بسیار کوچک خواهد بود. بنابراین، گرادیان میدان

الکتریکی افزایش می‌یابد. این شرایط باعث تجمع زباله‌های ماشین‌کاری، افزایش تعداد قوس‌ها و پالس‌های اتصال کوتاه می‌شود. در حالی که اگر ذرات نانولوله کربنی در این شرایط به دی‌الکتریک اضافه شوند، شکاف جرقه افزایش یافته و فرایند پایدارتر خواهد بود. باین حال، در جریان‌های پالس بالاتر، فاصله گپ به اندازه کافی بزرگ‌تر است که فاصله ماشین‌کاری به راحتی تمیز می‌شود و از تجمع براده‌ها در کانال پلاسما جلوگیری می‌کند. در این حالت افزودن پودر نانولوله کربنی برای افزایش فاصله گپ تأثیر قابل توجهی در فرایند ندارد.

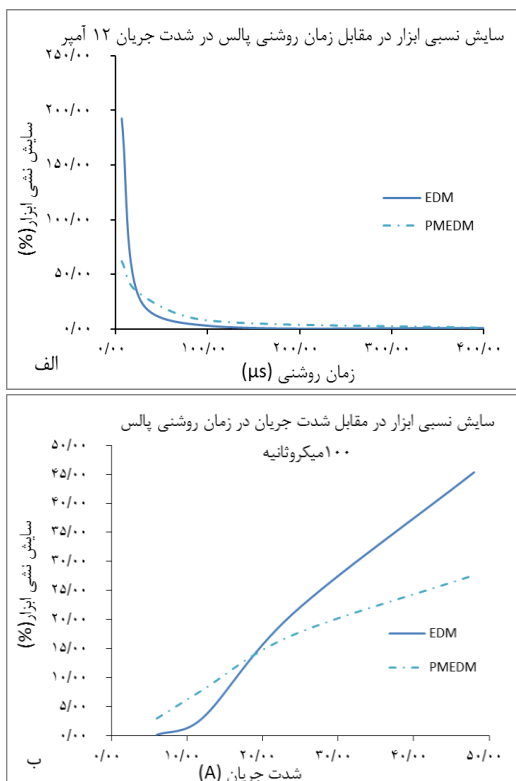
همچنین در ماشین‌کاری با پودرهای نانولوله کربنی از موقعیت‌های متعدد جرقه ایجاد می‌شود. یک جرقه باعث ایجاد چندین تخلیه می‌شود. این پدیده انرژی تخلیه را در یک منطقه بزرگ‌تر پراکنده می‌کند [۲۶]. انرژی پالس ورودی تکی بین تخلیه‌های متعدد توزیع می‌شود، اگرچه جرقه‌های بین قطعه کار و ابزار توزیع یکنواخت‌تری دارند، بنابراین شدت انرژی کاهش می‌یابد. افزودن نانولوله کربنی‌ها در فرایند PMEDM باعث افزایش همگنی انرژی تخلیه در یک سطح بزرگ‌تر می‌شود. این پدیده باعث ایجاد گپ بزرگ‌تر می‌شود که به چگالی توان تخلیه الکتریکی کم و در نتیجه کاهش نیروی انفجار منجر می‌شود. در نتیجه گرمای بیشتری پراکنده شده و به دنبال آن شار حرارتی کمتری به قطعه کار وارد می‌شود. از این رو مقدار کمی از مواد مذاب از حفره‌های مذاب کوچک‌تر به بیرون پرتاب می‌شود و نرخ براده برداری کاهش می‌یابد [۲۷].

### ۳-۳. سایش نسبی ابزار

شکل ۵- الف و ب به ترتیب اثر افزودن



کنند. و این امر هم به کاهش گرمای تولیدشده در طول فرایند EDM می‌انجامد و در نتیجه نرخ سایش الکتروود کاهش می‌یابد [۱۷ و ۲۸].



شکل ۵. الف) سایش نسبی ابزار در مقابل زمان روشنایی پالس در شدت جریان ۱۲ آمپر، ب) سایش نسبی ابزار در مقابل شدت جریان تخلیه در زمان روشنایی پالس ۱۰۰ میکروثانیه

در شکل ۵-ب که در زمان روشنایی پالس ۱۰۰ میکروثانیه رسم شده است، با افزایش شدت جریان پالس فاصله بین نرخ سایش نسبی ابزار در فرایند PMEDM و فرایند EDM بیشتر می‌شود، علت این امر را این‌گونه می‌توان بیان کرد که در شدت جریان‌های پایین افزودن نانولوله‌های کربنی باعث پایدارتر شدن فرایند می‌شود، به همین دلیل با بیشتر شدن نرخ ماشین‌کاری نرخ سایش ابزار هم بیشتر می‌شود، اما در ادامه، با افزایش جریان وجود نانولوله‌های کربنی باعث افزایش فاصله گپ شده در این شرایط براده‌های بزرگ‌تر

نانولوله کربنی در دی‌الکترونیک را بر روی سایش نسبی ابزار در مقابل مدت‌زمان روشنایی پالس و جریان پالس نشان می‌دهد. در شکل ۵-الف که در شدت جریان ۱۲ آمپر رسم شده، فرایند EDM ناپایدار است در این شرایط در مدت‌زمان‌های روشنایی پالس پایین ماشین‌کاری رخ داده و تأثیر افزودن نانولوله‌ها هم در کاهش سایش نسبی ابزار در ابتدای نمودار قابل‌رویت است. در این شرایط با افزایش زمان روشنایی پالس شرایط ناپایدار شده و به علت تجمع محصولات ماشین‌کاری در گپ کوتاه تعداد پالس‌های مزاحم در ماشین‌کاری بیشتر می‌شود و در عمل در فرایند EDM ماشین‌کاری متوقف می‌شود، اما در این شرایط در فرایند PMEDM به علت وجود نانولوله کربنی تا حدودی با افزایش فاصله گپ شرایط فرایند بهبود می‌یابد، به همین علت سایش نسبی ابزار هم تا حدودی بیشتر از فرایند EDM می‌شود.

با توجه به تصاویر، نشان داده شده است که در فرایند PMEDM، سایش نسبی ابزار در شدت‌جریان‌های بیشتر، کمتر از فرایند EDM معمولی است. کاهش سایش نسبی ابزار بدین‌صورت تشریح می‌شود: نخست به دلیل ضریب انتقال حرارت بالای پودر نانولوله کربنی بخشی از گرمای کانال پلاسما به دی‌الکترونیک منتقل می‌شود و از جریان آن با الکتروود ابزار جلوگیری می‌کند در نتیجه مقدار سایش نسبی ابزار کاهش می‌یابد. دوم، در فرایند PMEDM، پودرهای نانولوله کربنی گرمای تولیدشده در کانال پلاسما را جذب کرده و در نتیجه جریان الکترونیکی بهبود یافته و از گرم شدن شدید الکتروود ابزار جلوگیری می‌کند. همچنین به خاصیت جذب گرما توسط نانولوله‌ها منجر می‌شود که جریان الکترونیکی با مقاومت کمی عبور





تولید شده در شدت جریان‌های بالاتر بهتر از گپ تخلیه الکتریکی زدوده شده، در نتیجه با بهبود شرایط ماشین‌کاری نرخ براده برداری افزایش می‌یابد که آن هم با در نظر گرفتن رابطه سایش نسبی ابزار، موجب کاهش آن می‌شود، در شدت جریان‌های بالاتر تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی بر افزایش نرخ براده برداری پارامتر غالب بوده و تأثیر آن کاهش سایش نسبی ابزار است.

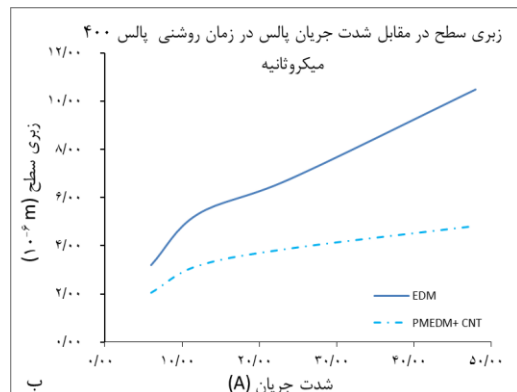
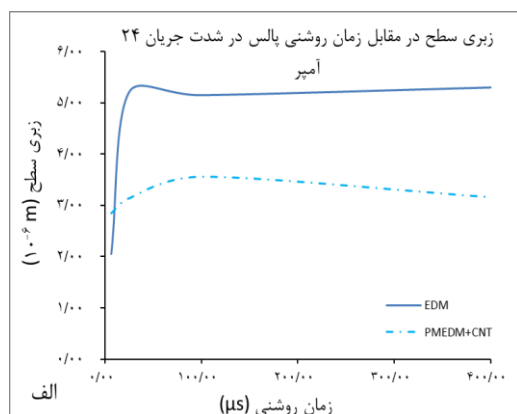
### ۳-۴. صافی سطح

شکل ۶-الف و ب نتایج مربوط به زبری سطح را نشان می‌دهد. همان‌طور که در هر دو شکل ملاحظه می‌شود، افزودن نانولوله‌های کربنی به دی‌الکتریک باعث کاهش زبری سطح شده است، از جمله دلایل آن را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

وجود نانو پودرها در سیال دی‌الکتریک باعث بازتر و عریض‌تر شدن کانال پلاسما می‌شود، همراه با این موضوع فرکانس جرقه‌ها هم بیشتر می‌شود، که در این حالت انرژی جرقه‌ها و شدت میدان الکتریکی توزیع یکنواخت‌تری خواهد داشت. با این شرایط جرقه‌هایی با انرژی‌های زیاد کاهش یافته، با کاهش ظرفیت الکترواستاتیکی و با افزایش فاصله گپ جریان‌های خیلی کم با هر پتانسیلی منجر به ایجاد جرقه شده و حفره‌هایی کوچک‌تر و کم‌عمق‌تر ایجاد می‌شود؛ در نتیجه سطوح صاف‌تری ایجاد می‌گردد [۲۹ و ۳۰].

با افزودن نانو ذرات به دی‌الکتریک استحکام شکست دی‌الکتریک کمتر شده و در یک ولتاژ مدارباز ثابت شروع تخلیه‌های الکتریکی در فواصل گپ بزرگ‌تری رخ می‌دهد، این پدیده باعث شستشو و تمیزی بهتر گپ ماشین‌کاری شده و احتمال رخداد پالس‌های مضر مانند اتصال کوتاه

و آرک کمتر می‌شود، با توجه به تأثیر منفی این پالس‌ها بر صافی سطح، با کاهش آن‌ها بر کیفیت و صافی سطح افزوده می‌شود. در برخی از مطالعات با افزودن نانو ذرات به دی‌الکتریک سطوح صافی در حد آینه نیز حاصل شده است [۳۱ و ۳۰].



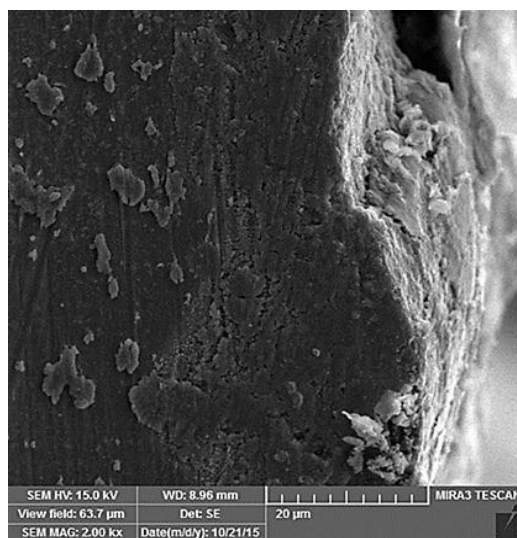
شکل ۶. زبری سطوح حاصله در فرایندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه نانولوله‌های کربنی (الف) در مقابل زمان روشنی پالس در جریان تخلیه ۲۴ آمپر، (ب) در مقابل جریان پالس در زمان روشنی پالس ۴۰۰ میکروثانیه

### ۳-۵. لایه متأثر از حرارت

پس از فرایند EDM، یک منطقه فلزی تغییر یافته بر روی سطح تخلیه شده تشکیل می‌گردد که از لایه ذوب مجدد و منطقه متأثر از حرارت تشکیل شده است. فرایند EDM ساختار

متالورژیکی و ویژگی‌های این منطقه را تغییر می‌دهد. در این لایه بسیار سخت و شکننده به دلیل افزایش ناهمگنی فازهای متالورژیکی درون آن، ترک‌های ریز ایجاد می‌گردد. لایه ذوب مجدد لایه بیرونی بوده و نتیجه انجماد مجدد مواد مذابی است که از چاله مذاب به بیرون پرتاب نشده است. این لایه سختی بالا، چسبندگی خوب به فلز پایه و مقاومت خوب در برابر خوردگی دارد. با این حال لایه ذوب مجدد، زبری سطح را افزایش داده و سطح را سخت و شکننده کرده و به دلیل وجود ریزترک‌ها و ریزحفره‌ها، استحکام خستگی را کاهش می‌دهد. تصاویر SEM ناحیه متأثر از حرارت در فرایندهای EDM و PMEDM در شکل ۷ نشان داده شده است.

همان‌طوری که در تصویر ۷ معلوم است ضخامت منطقه متأثر از حرارت در فرایند سنتی EDM بیشتر از فرایند PMEDM با نانولوله‌های کربنی است، که علت این موضوع ناشی از موارد زیر است: قطر و طول کانال تخلیه در دی‌الکتریک مخلوط با نانولوله کربنی بیشتر از فرایند EDM سنتی است. در این شرایط، سیال دی‌الکتریک مخلوط با پودر، تخلیه الکتریکی بیشتری تولید می‌کند که منجر به افزایش تعداد جرقه‌های ایجادشده در یک پالس می‌شود و انرژی تخلیه به منطقه بزرگ‌تری پراکنده می‌شود، بنابراین عمق ناحیه ذوب‌شده و ضخامت لایه ذوب مجدد کاهش می‌یابد. با افزودن نانولوله‌های کربنی به دی‌الکتریک، سرعت تشکیل کانال پلاسما و شکست دی‌الکتریک سریع‌تر از EDM سنتی خواهد شد، بنابراین انرژی انباشته‌شده کمتری قبل از تخلیه وجود داشته و در نتیجه، منطقه متأثر از حرارت باریک‌تری در این فرایند تشکیل می‌شود [۳۲].



شکل ۷. تصاویر SEM از سطح مقطع نمونه‌های ماشین‌کاری شده در الف) فرایند PMEDM+CNT، ب) فرایند EDM در شدت‌جریان ۲۴ آمپر و زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه

همچنین افزایش رسانایی حرارتی سیال دی‌الکتریک با افزودن نانولوله‌ها دلیل دیگری است که منجر به کاهش ضخامت لایه تغییر یافته در اثر حرارت می‌گردد، در این حالت کسر بیشتری از حرارت کانال پلاسما به سیال دی‌الکتریک منتقل شده و سهم انرژی انتقال‌یافته به قطعه ماشین‌کاری کم می‌شود بنابراین ضخامت لایه متأثر از حرارت کاهش می‌یابد. همچنین افزایش رسانایی حرارتی سیال

حاوی نانو پودر ایجاد می‌شود. ضخامت منطقه متأثر از حرارت در فرایند PMEDM با نانولوله‌های کربنی کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در مقایسه با فرایند سنتی EDM دارد.

## ۵. مراجع

- [1] A.A. Khan, Electrode wear and material removal rate during EDM of aluminum and mild steel using copper and brass electrodes, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 39, pp. 482–487, 2008.
- [2] S.S. Baraskar, S.S. Banwait, S.C. Laroiya, Multiobjective optimization of electrical discharge machining process using a hybrid method, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol.28, pp. 348–354, 2013.
- [3] A. Mohammadi, A.F. Tehrani, E. Emanian, D. Karimi, A new approach to surface roughness and roundness improvement in wire electrical discharge turning based on statistical analysis. The roundness improvement in wire electrical discharge turning based on statistical analysis, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 39, pp. 64–73, 2008.
- [4] S. Tripathy, D.K. Tripathy, Optimization of process parameters and investigation on surface characteristics during EDM and powder mixed EDM, *Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering*, Vol. pp.385–391, 2017.
- [5] L. Dąbrowski, R. Świercz, J. Zawora, Struktura geometryczna powierzchni po obróbce elektroerozyjnej elektrodą grafitową i miedzianą – porównanie, *Inżynieria Maszyn*, Vol.16, pp.32–39, 2011.
- [6] D. Oniszczuk, R. Świercz, An investigation into the impact of electrical pulse character on surface texture in the EDM and WEDM process, *The International Journal of*

دی‌الکتريک با افزودن نانولوله‌ها دليل ديگري است که به کاهش ضخامت لایه تغییر یافته در اثر حرارت منجر می‌شود، در این حالت کسر بیشتری از حرارت کانال پلاسما به سیال دی‌الکتريک منتقل شده و سهم انرژی انتقال یافته به قطعه ماشین‌کاری کم می‌شود؛ بنابراین ضخامت لایه متأثر از حرارت کاهش می‌یابد.

## ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق نانولوله‌های کربنی به دی‌الکتريک، فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتريکی آلیاژ تیتانیوم V۴Al-۶Ti اضافه شده تا تأثیر تغییر خواص سیال بر خروجی‌های فرایند مطالعه شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که وجود ذرات افزودنی شده به دی‌الکتريک باعث کاهش پالس‌های آرک و اتصال کوتاه شده و باعث افزایش پالس‌های مؤثر در فرایند است، همچنین اثرات چندین جرقه در یک پالس تخلیه الکتريکی به وضوح در شکل پالس‌ها قابل‌رؤیت است. در صورتی که فرایند ناپایدار باشد، افزودن نانولوله‌های کربنی به دی‌الکتريک، باعث افزایش پایداری آن شده و نرخ براده برداری بهبود می‌یابد، اما در صورت پایداری بودن ماشین‌کاری مشاهده می‌شود که افزودن نانولوله‌ها نرخ براده برداری فرایند را کاهش می‌دهد. در فرایند PMEDM، سایش نسبی ابزار در مدت‌زمان‌های پالس کوتاه، کمتر از فرایند EDM معمولی است. همچنین در زمان روشنی پالس پایین با افزایش شدت جریان نرخ سایش نسبی ابزار، کاهش بیشتری دارد. افزودن نانولوله‌های کربنی به دی‌الکتريک در تمامی شرایط ماشین‌کاری باعث کاهش زبری سطح می‌شود و با کنترل شرایط ماشین‌کاری سطوح بسیار صافی با دی‌الکتريک



Surface characterization and material migration during surface modification of die steels with silicon, graphite and tungsten powder in EDM process, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27 (1), pp. 133–140, 2013.

- [15] N. Ekmekci, B. Ekmekci, Electrical Discharge Machining of Ti6Al4V in Hydroxyapatite Powder Mixed Dielectric Liquid, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 31 (13), pp. 1663–1670, 2016.
- [16] S. Prabhu, B.K. Vinayagam, Analysis of surface characteristics of AISI D2 tool steel material using electric discharge machining process with single wall carbon nano tubes, *IACSIT international journal of engineering and technology*, Vol. 2(1), pp. 35–41, 2010.
- [17] M.M. Sari, M.Y. Noordin, E. Brusa, Role of multi-wall carbon nanotubes on the main parameters of the electrical discharge machining (EDM) process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 68, pp.1095–1102, 2013.
- [18] T. Jadam, S.K. Sahu, S. Datta, M. Masanta, EDM performance of Inconel 718 superalloy: application of multi-walled carbon nanotube (MWCNT) added dielectric media, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol 41, pp.1-20, 2019.
- [19] M. Danish, M.A. Amin, S. Rubaiee, A. Majdi, A. Rani, F.T. Zohura, A. Ahmed, R. Ahmed, M.B. Yildirim, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.120, pp. 6125–6141, 2022
- [20] T. Jadam, S. K. Sahu, S. Datta, M. Masanta, Powder-mixed electro-discharge machining performance of Inconel 718: effect of concentration of multi-walled carbon nanotube added to the dielectric media, *Indian Academy of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 36(3), pp.43–53, 2012
- [7] S. Chakraborty, V. Dey, S.K. Ghosh, A review on the use of dielectric fluids and their effects in electrical discharge machining characteristics, *Precision Engineering*, Vol. 40, pp.1–6, 2015.
- [8] N. Mohri, N. Saito, M. Higashi, N. Kinoshita, A New Process of Finish Machining on Free Surface by EDM Methods, *CIRP Annual*, Vol. 40 (1), pp. 207–210, 1991.
- [9] Y.S. Wong, L.C. Lim, I. Rahuman, W.M. Tee, Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 79, pp. 30–40, 1998.
- [10] A.A. Abdu Aliyu, A.M. Abdul-Rani, T.L. Ginta, C. Prakash, E. Axinte, M.A. Razak, S. Ali, A Review of Additive Mixed-Electric Discharge Machining: Current Status and Future Perspectives for Surface Modification of Biomedical Implants, *Advances in Materials Science and Engineering*, pp.1–23, 2017.
- [11] H.K. Kansal, S. Singh, P. Kumar, Effect of Silicon Powder Mixed EDM on Machining Rate of AISI D2 Die Steel, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.9 (1), pp.13–22, 2007.
- [12] K.L. Wu, B.H. Yan, F.Y. Huang, S.C. Chen, Improvement of surface finish on SKD steel using electro-discharge machining with aluminium and surfactant added dielectric, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, pp.1195–1201, 2005.
- [13] S. Assarzadeh, M. Ghoreishi, A dual response surface-desirability approach to process modeling and optimization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder-mixed electrical discharge machining (PMEDM) parameters, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 64, pp. 1459–1477, 2013.
- [14] A. Bhattacharya, A. Batish, N. Kumar,

۲۳۳

سال ۱۱ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۱

نشریه علمی دانش و فناوری هوا فضا



- International conference on structural nano composites (NANOSTRUC 2012), *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2012, p. 40.
- [29] K. Y. Kung, J. T. Horng, K.T. Chiang, Material removal rate and electrode wear ratio study on the powder mixed electrical discharge machining of cobalt-bonded tungsten carbide, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 40, No. 1, pp.95–104, 2009.
- [30] H. Kumar, Development of mirror like surface characteristics using nanopowder mixed electric discharge machining (NPMEDM), *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76, No. 1-4, pp. 105-113, 2015.
- [31] P. Peças, E. Henriques, Effect of the powder concentration and dielectric flow in the surface morphology in electrical discharge machining with powder-mixed dielectric (PMD-EDM), *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 37, No. 11, pp. 1120–1132, 2008.
- [32] Y. Wang, F. Zhao, Y. Liu, Behaviors of suspended powder in powder mixed EDM, *Key Engineering Materials*, Vol. 375-376, PP.36–41, 2008.
- Sciences*, Vol. 45,135, pp.1-16, 2020.
- [21] Gerd Lütjering, James C. Williams, Titanium, 2nd edition, Springer, 2007.
- [22] A.K. Jagadeesan, K. Thangavelu, V. Dhananjeyan, *Carbon Nanotubes: Synthesis, Properties and Applications*, book chapter in 21st Century Surface Science - a Handbook, London: IntechOpen; 2020.
- [23] W. S. Zhao, Q. G. Meng, Z. L. Wang, The application of research on powder mixed EDM in rough machining, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, No. 1-3, pp. 30-33, 2002.
- [24] M. S. Han, B. K. Min, S. J. Lee, Improvement of surface integrity of electro-chemical discharge machining process using powder-mixed electrolyte, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, No. 1-3, pp. 224–227, 2007.
- [25] M. 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*, Vol. 16, No. 2, pp. 41-50, 2016 (in Persian).
- [26] Y. Zhang, Y. Liu, Y. Shen, R. Ji, B. Cai, H. Li, et al., A review of the current understanding and technology of powder mixed electrical discharge machining (PMEDM), In: *IEEE international conference on mechatronics and automation*, Chengdu, China 5–8 August, 2012, pp. 2240–2247.
- [27] M. Shabgard, B. Khosrozadeh, 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*, Vol. 25, pp. 212-219, 2017.
- [28] M.M. Sari, M.Y. Noordin, E. Brusa, Evaluating the electrical discharge machining (EDM) parameters with using carbon nanotubes, In:

## پی‌نوشت

- 1- Electrical Discharge Machining
- 2- Powder Mixed Electrical Discharge Machinig
- 3- Material Removal Rate
- 4- Single Walled Carbon Nano Tube
- 5- Tool Wear Ratio
- 6- Tool Removal Rate
- 7- Scanning Electron Microscopy (SEM)
- 8- Wire cut
- 9- Kroll's Reagent

۲۳۴

سال ۱۱ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۱

نشریه علمی دانش و فناوری هوا فضا



مایشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ Ti-6Al-4V  
 بررسی تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی به دی‌الکتریک در فرایند