



## Applying Taguchi Method to Optimize EDM Parameters on Inconel 718 Super Alloy

Karim Aliakbari<sup>1\*</sup> , Mohammad Reza Saberi<sup>2</sup>, Morteza Andalib<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Montazeri, Khorasan Razavi Branch, Technical and Vocational University (TVU), Mashhad, Iran.

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Montazeri, Khorasan Razavi Branch, Technical and Vocational University (TVU), Mashhad, Iran.

### ARTICLE INFO

**Received:** 02.09.2020

**Revised:** 07.29.2020

**Accepted:** 09.02.2020

**Keyword:**

EDM

Inconel 718 super alloy

Experiment design

Taguchi method

Regression analysis

**\*Corresponding Author:**

Karim Aliakbari

**Email:**

[karim.aliakbari@gmail.com](mailto:karim.aliakbari@gmail.com)

### ABSTRACT

The purpose of this study was to optimize the operational parameters of the electrical discharge machining (EDM) process in the Inconel 718 super alloy using the Taguchi method and analysis of variance (ANOVA). First, using Taguchi method, the optimal order of experiments was determined, and then by performing experiments and analysis of variance, the effects of the contribution of each input parameter on the process output were determined, and finally the optimal input parameters were determined. Input parameters in this study included pulse duration, work factor, gap voltage and discharge current. Furthermore, process output parameters, electrode wear ratio, material removal rate and topography of the sample surface were taken into consideration. From the surface topography point of view, items such as surface roughness, recast layer thickness and crack density of machined samples were studied in detail. In addition, modeling and regression analysis was performed to predict the behavior and values of process output parameters. The results of optimizing the operational parameters of the process indicated less electrode wear, better surface roughness and homogeneous and crack-free microstructure compared with the behavior of the Ti-6Al-4V alloy.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

## بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی ماشین کاری تخلیه الکتریکی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با استفاده از روش تاگوچی

کریم علی اکبری<sup>۱\*</sup>، محمدرضا صابری<sup>۲</sup>، مرتضی عنذلیب<sup>۲</sup>

- ۱- استادیار، دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده منتظری، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان خراسان رضوی، مشهد، ایران.
- ۲- مدرس، دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده منتظری، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان خراسان رضوی، مشهد، ایران.

### چکیده

هدف از انجام این مطالعه، بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی فرایند ماشین کاری با تخلیه الکتریکی در سوپر آلیاژ Inconel 718 با استفاده از روش تاگوچی و تحلیل واریانس (ANOVA) است. ابتدا با استفاده از روش تاگوچی، چیدمان بهینه آزمایش‌ها تعیین گردید و سپس با انجام آزمایش‌ها و تحلیل واریانس، تأثیرات سهم هر پارامتر ورودی در خروجی فرایند تعیین شدند و در نهایت پارامترهای ورودی بهینه مشخص گردیدند. پارامترهای ورودی در این تحقیق شامل زمان روشنی پالس، فاکتور کار، ولتاژ گپ و جریان تخلیه می‌باشند. همچنین پارامترهای خروجی فرایند، نسبت سایش الکترود، نرخ براده‌برداری ماده و بررسی سطح نمونه (توپوگرافی) در نظر گرفته شدند. توپوگرافی، سطح مواردی از جمله زبری سطح، ضخامت لایه دیو شده و تراکم ترک نمونه‌های ماشین کاری شده با جزئیات را بررسی می‌کند. به‌علاوه مدل‌سازی و تحلیل رگرسیون برای پیش‌بینی رفتار و مقادیر پارامترهای خروجی فرایند انجام گردید. نتیجه بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی فرایند شامل میزان سایش الکترود کمتر، زبری سطح بهتر و ریزساختار همگن و عاری از ترک است که با رفتار آلیاژ Ti-6Al-4V مقایسه گردیده است.

### اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۰۸

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱

### کلید واژگان:

ماشین کاری تخلیه الکتریکی  
سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸  
طراحی آزمایش‌ها  
روش تاگوچی  
تحلیل رگرسیون

\*نویسنده مسئول: کریم علی اکبری

پست الکترونیکی:

[karim.aliakbari@gmail.com](mailto:karim.aliakbari@gmail.com)



## مقدمه

کاربرد آلیاژ Inconel 718 با توجه به ویژگی‌هایی مانند مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی در دماهای بالا، خصوصیات مکانیکی عالی در دماهای گرم و سرد، مقاومت در برابر خستگی و خزش، در صنایع خودروسازی، صنایع دفاعی، پتروشیمی و تجهیزات هسته‌ای، رو به افزایش است. از طرفی با توجه به هزینه‌های بالای ماشین‌کاری آلیاژهای اینکونل به روش سنتی و کیفیت سطح نسبتاً پایین آنها موجب شده است که برای شکل‌دهی این آلیاژها روش‌های ماشین‌کاری مدرن بیشتر مورد توجه قرار گیرند. روش ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (EDM) یک فرایند ترموالکتریکی است که در آن از انرژی حرارتی یک جرقه، برای براده‌برداری از مواد رسانای الکتریسیته استفاده می‌شود. در این روش بین الکترود و قطعه کار تماس وجود ندارد و انرژی فرسایشی جرقه ایجادشده بین این دو موجب ذوب و تبخیر ماده می‌شود. این روش به طور گسترده‌ای در ماشین‌کاری مواد سخت و مقاوم در برابر حرارت استفاده می‌شود [۱؛ ۲].

هاسکالیک<sup>۱</sup> و همکاران [۳] به منظور بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای فرایند (EDM) روی آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) از الکترودهای مختلف یعنی گرافیت، مس و آلومینیوم استفاده کردند. نتایج تجربی آنها نشان داد که با افزایش شدت جریان و مدت زمان پالس، میزان حذف مواد، زبری سطح، سایش الکترود افزایش می‌یابد. با این حال، مدت زمان بسیار طولانی پالس مانند ۲۰۰ میلی ثانیه باعث کاهش MRR و زبری سطح می‌شود. علاوه بر این، سختی سطح با توجه به کاربدهای Ti24C15 تشکیل شده در سطح، افزایش می‌یابد. جباری‌پور و همکاران [۴] به بررسی تأثیرات انواع مختلف الکترود بر کیفیت ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی برای آلیاژ آلومینیوم-تیتانیوم پرداختند. آنها با بررسی سه جنس الکترود آلومینیومی، گرافیتی و مسی به این نتیجه رسیدند که تغییر جنس الکترود ابزار تأثیر خاصی بر ترکیب شیمیایی سطح قطعه کار ندارد اما جنس الکترود در نرخ براده‌برداری، سایش ابزار و زبری سطح، تأثیر زیادی دارد. احمد و همکاران [۵] با در نظر گرفتن پیک جریان بالا و مدت پالس دریافتند که بالاترین میزان حذف مواد (MRR) در بالاترین میزان پیک مصرفی (40 A) و کمترین زمان پالس (200µs) به دست می‌آید. این در حالی است که در جریان کم (۲۰ A) و مدت زمان پالس زیاد (400µs)، پایین‌ترین نرخ سایش الکترود (EWR) به دست می‌آید. همچنین کمترین زبری سطح (Ra) نیز در پایین‌ترین جریان پیک و زمان پالس اتفاق می‌افتد. حداد و همکاران [۶] تأثیر زبری سطح اولیه الکترود بر عملکرد فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که طی فرایند نهایی، نیمه‌خشن و خشن، برای افزایش زبری سطح الکترود، نسبت سایش الکترود افزایش می‌یابد و میزان حذف مواد، کاهش می‌یابد. جدام<sup>۲</sup> و همکاران [۷] تأثیر نانولوله کربنی چند جداره پراکنده در نفت سفید به عنوان محیط دی‌الکتریک بر عملکرد فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ Inconel 718 را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از محیط دی‌الکتریک مخلوط (۵/۰ گرم در لیتر) در مقایسه با EDM معمولی به‌طور قابل توجهی عملکرد ماشین‌کاری را بهبود می‌بخشد.

ایستا<sup>۳</sup> و همکاران [۸] از روش طراحی آزمایش‌ها و مبحث آنالیز واریانس به بررسی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (جریان، ولتاژ و زمان روشنی پالس) در فرایند شمارزنی آلیاژ C1023 پرداختند. در این تحقیق مشخص شد افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس، موجب کاهش نرخ سایش ابزار می‌شود. همچنین جریان و ولتاژ کمتر، نرخ برداشت براده را کاهش می‌دهد. گوپالاکان<sup>۴</sup> و همکاران [۹] با استفاده از روش تاگوچی و تحلیل انحراف معیار، تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (ولتاژ، جریان، زمان روشنی و خاموشی پالس) را بر نرخ برداشت براده، نرخ سایش ابزار و کیفیت سطح بررسی کردند. در این مقاله با انجام آزمایش‌های متعدد مشخص شد شدت جریان و روشنی پالس، بیشترین تأثیر را بر خروجی‌ها دارند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش شدت جریان، نرخ

<sup>1</sup> Hascalik

<sup>2</sup> Rajmohan

<sup>3</sup> Ayestaa

<sup>4</sup> Gopakalannan

برداشت براده، افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش شدت جریان و افزایش زمان روشنی پالس، کیفیت سطح، افزایش می‌یابد. علی‌دوستی و همکاران [۱۰] به بررسی پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با طراحی فاکتوریل کامل بر آلیاژ نیکل - تیتانیوم پرداختند. نتایج تجزیه و تحلیل آنها نشان داد که میزان حذف مواد به‌طور قابل توجهی به انرژی تخلیه یعنی جریان و مدت پالس، مرتبط است. به‌طوری که با افزایش جریان تخلیه، نرخ براده‌برداری با مدت پالس ۲۵ میکروثانیه افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آنها نشان داد که اختلاف معنی‌داری در میزان حذف مواد بین الکترودهای مس (Cu) و تنگستن - مس (W-Cu) وجود ندارد. پایداری کار الکترودهای W-Cu طولانی‌تر بود از طرفی مقدار ناخالصی روی سطح الکترودهای Cu پایین‌تر بود. اولمن<sup>۱</sup> و همکاران [۱۱] با استفاده از تکنیک طراحی آزمایش‌ها به بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ پایه نیکل MAR-M247 پرداختند. در این بررسی مشخص شد که جریان و زمان روشنی پالس، تأثیرگذارترین فاکتورها هستند. راجمohan<sup>۲</sup> و همکاران [۱۲] با کمک روش تاگوچی و با در نظر گرفتن پارامترهای ولتاژ، شدت جریان و زمان روشنی و خاموشی پالس به‌عنوان پارامترهای اصلی، به بهینه‌سازی نرخ برداشت براده فولاد ضدزنگ ۳۰۴ پرداختند. لین<sup>۳</sup> و همکاران [۱۳] به بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری EDM با پایه نیروی مغناطیسی به کمک روش تاگوچی پرداختند و نتایج تجربی آنان نشان داد که نیروی مغناطیسی EDM دارای MRR بالاتر، نسبت سایش الکترودهای نسبی پایین (EWR) و SR کوچک‌تر نسبت به EDM استاندارد است. لین و همکاران [۱۴] برای بهینه‌سازی فرایند ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی با ویژگی‌های عملکرد چندگانه با استفاده از آرایه متعامد با تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری پرداختند. نتایج آنها نشان داد که پارامترهای ماشین‌کاری، از جمله: قطبیت قطعه کار، طول پالس، عامل کار، ولتاژ تخلیه باز، جریان تخلیه و سیال دی‌الکتریک با ملاحظات ویژگی‌های عملکرد چندگانه؛ از جمله: نرخ حذف مواد، زبری سطح و نسبت سایش الکترودها، بهینه می‌شوند.

مطالعات زیادی در مورد تأثیر انواع پارامترهای ورودی بر بهینه‌سازی پارامترهای خروجی فرایند (از جمله میزان سایش کمتر الکترودها، زبری سطح بهتر) در مورد آلیاژهای خواص مکانیکی بالا انجام شده است. همچنین، مطالعات کمتری به‌طور هم‌زمان در مورد انواع پارامتر ورودی بر بهینه‌سازی پارامترهای خروجی فرایند و مورفولوژی سطوح انجام شده است. با توجه به ادبیات بررسی‌شده و مطالعه نویسندگان، نیاز به تحقیقات هم‌زمان پارامترهای خروجی و مورفولوژی سطوح وجود دارد. به‌طور خلاصه، هدف از انجام این تحقیق، بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی است. ابزار بهینه‌سازی در این مطالعه، روش تاگوچی و تحلیل واریانس (ANOVA) است. همچنین پارامترهای ورودی فرایند شامل مدت‌زمان پالس، فاکتور کار، ولتاژ مدار باز و جریان تخلیه است. به‌طور خلاصه می‌توان موارد جدید و اهداف مطالعه فعلی را به صورت زیر بیان کرد:

- بهینه‌سازی پارامترهای خروجی فرایند، از جمله میزان سایش کمتر الکترودها، زبری سطح بهتر و ریزساختار همگن و عاری از ترک سطحی
- مقایسه رفتار دو آلیاژ Inconel 718 و آلیاژ Ti-6Al-4V در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (EDM)
- تحلیل رگرسیون برای پیش‌بینی پارامترهای خروجی فرایند.

<sup>1</sup> Uhlmann

<sup>2</sup> Rajmohan

<sup>3</sup> Lin

## روش شناسی

## آزمایش‌های تجربی

ترکیب شیمیایی عناصر تشکیل‌دهنده آلیاژ Inconel 718 براساس استاندارد ASTM E415-17 [۱۵] و ASTM E1086-14 [۱۶] توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر<sup>۱</sup> مدل SPECTROMAXx ساخت کشور آلمان تعیین گردید. این آزمایش‌ها سه بار در دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۲۳ درصد تکرار شد و میانگین نتایج از نظر درصد وزنی در جدول ۱ نوشته شده است. در جدول ۱ همچنین مقادیر ترکیب شیمیایی آلیاژ Inconel 718 استاندارد [۱۷] و تیتانیوم Ti-6Al-4V [۱۸] لیست گردیده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی ماده اینکونل، استاندارد و ماده تیتانیوم

نماد	اینکونل ۷۱۸	اینکونل ۷۱۸ استاندارد [۱۷]	تیتانیوم Ti-6Al-4V [۱۸]
نیکل (Ni)	۵۲/۴	۵۰-۵۵	-
آهن (Fe)	۱۸/۰۵	پایه	۰/۲۲
کروم (Cr)	۱۹/۲۳	۱۷-۲۱	-
مولیبدن (Mo)	۳/۱۲	۲/۸-۳/۳	-
نیوبیوم (Nb)	۴/۹۵	۴/۷۵-۵/۵۰	-
منگنز (Mn)	۰/۱۲	ماکزیمم ۰/۳۵	-
مس (Cu)	۰/۰۹	ماکزیمم ۰/۳۰	-
آلومینیوم (Al)	۰/۳۵	۰/۲-۰/۸	۶/۰۸
تیتانیوم (Ti)	۱/۰۱	۰/۶۵-۱/۱۵	۸۹/۴۶۴
سیلیسیوم (Si)	۰/۰۸	ماکزیمم ۰/۳۵	-
کربن (C)	۰/۰۴	ماکزیمم ۰/۰۸	۰/۰۲
گوگرد (S)	۰/۰۰۶	ماکزیمم ۰/۰۱۵	-
فسفر (P)	۰/۰۰۸	ماکزیمم ۰/۰۱۵	-
برم (Br)	۰/۰۰۵	ماکزیمم ۰/۰۰۶	-
وانادیوم (V)	-	-	۴/۰۲
اکسیژن (O)	-	-	۰/۱۸
نیترژن (N)	-	-	۰/۰۱
هیدروژن (H)	-	-	۰/۰۰۵۳

برای انجام آزمایش از الکتروُد مسی با قطر ۸ و ارتفاع ۴۵ میلی‌متر، نمونه استوانه‌ای با قطر ۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر از جنس آلیاژ Inconel 718، نفت سفید به‌عنوان مایع دی‌الکتریک و قطبیت مثبت استفاده گردید (شکل ۱). برای انجام فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (EDM) نمونه‌های آزمایش از دستگاه اسپارک مدل آذرخش 304H ساخت شرکت تهران اکرام استفاده شد.

خروجی‌های فرایند EDM (میزان حذف مواد، میزان سایش الکتروُد، زبری سطح و مورفولوژی سطح قطعه کار) به صورت زیر تجزیه و تحلیل گردید. میزان حذف مواد ( $MRR$ ) با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد [۱۹]:

$$MRR = (M_1 - M_2) / (P_w T_m) \quad (mm^3/min) \quad (1)$$

<sup>۱</sup> Spectrophotometer

که  $M_1$  و  $M_2$  وزن قطعه کار قبل و بعد از ماشین کاری هستند و  $P_w$  و  $T_m$  به ترتیب چگالی قطعه کار و زمان دقیق ماشین کاری هستند. سپس، میزان سایش الکتروود ( $EWR$ ) با توجه به کاهش وزن الکتروود پس از عملیات EDM محاسبه شد. از معادله (۲) برای تعیین مقادیر  $EWR$  برای آزمایش‌های EDM استفاده شد [۱۹]:

$$EWR = (E_1 - E_2)/(P_t T_m) \text{ (mm}^3/\text{min)} \quad (2)$$

که  $E_1$  و  $E_2$  وزن الکتروود قبل و بعد از ماشین کاری هستند، و  $P_t$  و  $T_m$  به ترتیب چگالی الکتروود و زمان دقیق ماشین کاری هستند. وزن ابزار و قطعه کار قبل و بعد از ماشین کاری با استفاده از ترازوی دقت بالا دیجیتال اندازه‌گیری شد. سطوح نهایی نیز با استفاده از زبری‌سنج متحرک مطابق استاندارد ISO 4287:1997 [۲۰] اندازه‌گیری شد. زبری نسبی  $R_a$  سطوح قطعه کار با استفاده از زبری‌سنج تیلور هابسون<sup>۱</sup> مدل سارترونیک ۳ مثبت ساخت کشور انگلستان در جهت مختلف و در پنج نقطه مختلف مطابق مرجع [۶] اندازه‌گیری شد و متوسط آنها در محاسبات اعمال گردید. در نهایت، مورفولوژی سطوح قطعه کار با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۲</sup> مدل LEO 1450VP ساخت کشور آلمان با وضوح بالا و بزرگ‌نمایی زیاد انجام گردید.



شکل ۱. (ب) تست زبری‌سنجی



شکل ۱. (الف) مجموعه آزمایش

### طراحی آزمایش‌ها

در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی، چندین پارامتر ورودی تأثیرگذار وجود دارد که توسط اپراتور با توجه به مدل ماشین تنظیم می‌شوند. پارامترهای ورودی مورد مطالعه در این تحقیق شامل جریان تخلیه، ولتاژ مدار باز، مدت‌زمان پالس و فاکتور کار است. مقادیر هر یک از این پارامترها در سه سطح مختلف در جدول ۲ و جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۲. پارامترهای ورودی کار حاضر

نماد	پارامتر ورودی	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
W	جریان تخلیه (A)	۵	۱۰	۲۰

<sup>۱</sup> TAYLOR HOBSON Model Surtronic 3+

<sup>۲</sup> Scanning Electron Microscope (SEM)

نماد	پارامتر ورودی	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
X	ولتاژ گپ (V)	۸۰	۱۵۰	۲۵۰
Y	زمان روشنی پالس (μs)	۱۰۰	۲۰۰	۴۵۰
Z	فاکتور کار (%)	۳۰	۵۰	۷۰

جدول ۳. پارامترهای ورودی آلیاژ تیتانیوم [۱۸]

نماد	پارامتر ورودی	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
W	جریان تخلیه (A)	۵	۱۰	۲۰
X	ولتاژ گپ (V)	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
Y	زمان روشنی پالس (μs)	۱۰۰	۲۰۰	۴۰۰
Z	فاکتور کار (%)	۳۰	۵۰	۷۰

## روش انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق، با در نظر گرفتن چهار پارامتر ورودی در سه سطح مختلف، اجرای کامل آزمایش‌ها به زمان و هزینه زیادی نیاز دارد. بنابراین، با استفاده از روش تاگوچی می‌توان با دستیابی به بهترین طرح آزمون و انجام تعداد محدودی آزمایش، به نتایج قابل قبولی دست یافت. با توجه به واقعیت فوق، ماتریس استاندارد L9 برای ترکیب ایده‌آل پارامترهای ورودی و درجه‌های مختلف آن در نظر گرفته شد (جدول ۴).

جدول ۴. ترکیب بهینه طراحی آزمایش‌ها

شماره آزمایش	پارامترهای ورودی			
	Z	Y	X	W
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۲	۲	۲
۳	۱	۳	۳	۳
۴	۲	۱	۲	۳
۵	۲	۲	۳	۱
۶	۲	۳	۱	۲
۷	۳	۱	۳	۲
۸	۳	۲	۱	۳
۹	۳	۳	۲	۱

آزمایش‌ها پس از تعیین ترکیب ایده‌آل پارامترهای ورودی انجام شد. به منظور تجزیه و تحلیل خروجی‌های فرایند (میزان حذف مواد، میزان سایش الکتروود، زبری سطح و ریزساختار قطعه کار)، هر ردیف آزمایش با توجه به ترکیب تاگوچی سه بار تکرار می‌شود. همچنین از تجزیه و تحلیل نسبت سیگنال به نویز ( $S/N$ ) برای یافتن حالت بهینه پارامترهای خروجی استفاده شد. در میزان سایش الکتروود و زبری سطح، سطوح بالای این پارامترها موجب کاهش راندمان و در میزان حذف مواد سطوح پایین این پارامترها موجب کاهش راندمان می‌شود. از این رو مشخصه «مقادیر پایین‌تر، بهتر است» برای سایش الکتروود و زبری سطح و همچنین «مقادیر بالاتر بهتر است» برای میزان حذف مواد انتخاب گردید. مقادیر نسبت سیگنال به نویز ( $S/N$ ) با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود [۲۱].

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3)$$

که  $y$  نشان‌دهنده خروجی اندازه‌گیری شده و  $n$  نشان‌دهنده تعداد اندازه‌گیری‌ها است.

### یافته‌ها

#### نرخ براده‌برداری (MRR)

میزان حذف مواد با مقدار ماده برداشت شده در طول زمان تعریف می‌شود و واحد آن بر حسب میلی‌گرم در دقیقه است. به طوری افزایش این پارامتر باعث افزایش راندمان باربرداری و سرعت تولید قطعات می‌گردد. جدول ۵ نشان‌دهنده نتایج میزان حذف مواد است که مقادیر نسبت سیگنال به نویز ( $S/N$ ) نیز قابل مشاهده است. با استفاده از تجزیه و تحلیل واریانس (جدول ۶)، درصد مشارکت هر یک از پارامترهای ورودی بر روی میزان حذف مواد محاسبه گردید. با توجه به جدول ۶ می‌توان نتیجه گرفت که جریان تخلیه و فاکتور کار به ترتیب حدود ۷۱ و ۲۱ درصد در میزان حذف مواد مؤثر هستند.

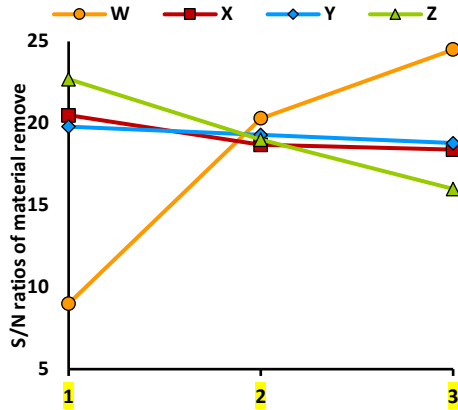
جدول ۵. نتایج خروجی‌های آزمایش برای نرخ براده‌برداری

شماره آزمایش	پارامترهای ورودی				نرخ سایش ابزار (mg/min)			سیگنال به نویز (dB)
	W	X	Y	Z	خروجی ۱	خروجی ۲	خروجی ۳	
۱	۱	۱	۱	۱	۴۹/۳۵	۴۸/۹۶	۴۹/۲۶	۳۳/۸
۲	۲	۲	۲	۱	۴۲/۳۵	۴۲/۴۱	۴۲/۳۹	۳۲/۵
۳	۳	۳	۳	۱	۲۹/۹۸	۳۰/۳۱	۳۰/۳۹	۲۹/۶
۴	۳	۲	۱	۲	۵۹/۸۵	۵۹/۹۷	۶۰/۰۸	۳۵/۶
۵	۱	۳	۲	۲	۱۲۰/۲	۱۲۰/۱	۱۲۰/۱	۴۱/۶
۶	۲	۱	۳	۲	۱۰۰/۱	۱۰۰/۱	۱۰۰/۰	۴۰/۰
۷	۲	۳	۱	۳	۲۷۹/۵۱	۲۷۹/۸۳	۲۷۹/۹۲	۴۸/۹
۸	۳	۱	۲	۳	۲۱۰/۰۹	۲۱۰/۱۵	۲۱۰/۱۹	۴۶/۶
۹	۱	۲	۳	۳	۱۶۳/۰۵	۱۶۳/۱۲	۱۶۳/۰۹	۴۲/۲

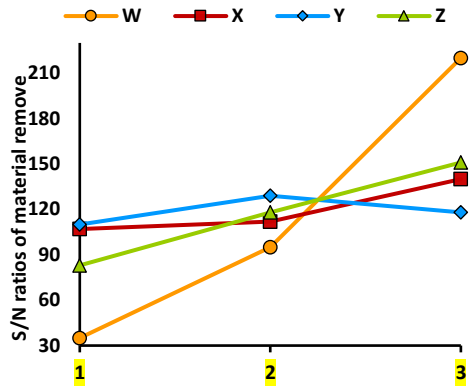
جدول ۶. نتایج تحلیل واریانس برای نرخ براده‌برداری

پارامتر ورودی	نرخ سیگنال به نویز (dB)			درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	درصد مشارکت
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳				
W	۴۶/۵	۳۹/۱	۳۲	۲	۳۱۸/۱	۹۱	۷۰/۵۴
X	۳۷/۹	۴۰/۲	۳۹/۴	۲	۷/۹۷	۶/۵	۶/۰۸
Y	۴۰	۳۷/۴۴	۴۰/۱	۲	۱۳/۸	۳/۹	۲/۰۴
Z	۳۷/۲	۴۰/۵	۳۹/۹	۲	۱۸/۸	۲۶	۲۱/۳
کل				۸	۳۵۶/۶		۱۰۰

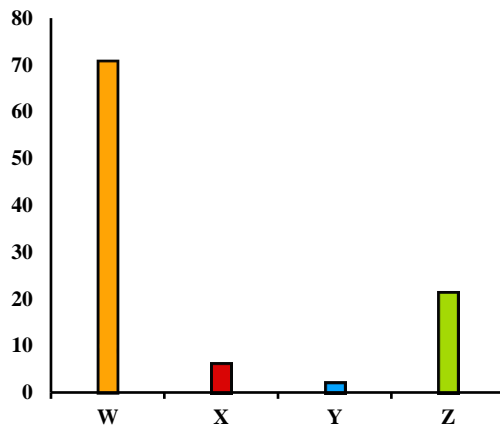




شکل ۲. ب) نمودار پاسخ سیگنال به نویز ماده تیتانیوم (نرخ براده برداری)



شکل ۲. الف) نمودار پاسخ سیگنال به نویز ماده اینکونل (نرخ براده برداری)



شکل ۲. ج) نمودار درصد مشارکت پارامترهای ورودی بر نرخ براده برداری

شکل ۲ نشان دهنده پاسخ نرخ براده برداری به ازای هر یک از پارامترهای ورودی است؛ به طوری که با افزایش جریان تخلیه میزان انرژی وارد بر واحد، سطح، افزایش و راندمان باربرداری نیز افزایش می یابد. همچنین زمان روشنی پالس، تأثیر قابل ملاحظه ای بر میزان و شدت باربرداری دارد؛ به طوری که با افزایش زمان روشنی پالس ها نرخ براده برداری تا نقطه ای افزایش می یابد و پس از آن وارد روند کاهشی می شود. بدین ترتیب میزان زمان روشنی بین پالس ها نیاز به مقدار معین و بهینه ای دارد. ولتاژ گپ و همچنین فاکتور کار نیز بر نرخ براده برداری مؤثرند؛ به طوری که با افزایش این دو فاکتور، میزان توزیع و پخش انرژی جرقه زنی بر واحد سطح افزایش می یابد و بدین ترتیب منجر به افزایش نسبی باربرداری به همراه فاکتورهای مناسبی از سطح خواهد شد.

### نرخ سایش الکتروود (EWR)

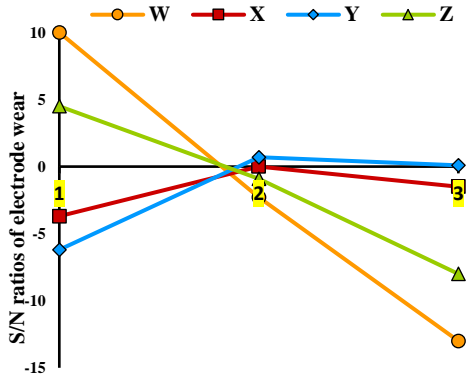
میزان سایش الکتروود با توجه به میزان الکتروود مورد استفاده در واحد زمان تعریف می‌شود و دارای واحد (میلی گرم در دقیقه) است. این پارامتر، تأثیر مستقیمی بر میزان مصرف الکتروود دارد؛ به طوری که افزایش نرخ سایش ابزار منجر به افزایش هزینه‌های تولید و همچنین افزایش زمان تولید قطعات خواهد شد. جدول ۷ نتایج آزمایش‌های مربوط به نسبت سایش الکتروود را نشان می‌دهد. نسبت سیگنال به نویز ( $S/N$ ) نیز قابل مشاهده است. با استفاده از تجزیه و تحلیل واریانس (جدول ۸)، درصد مشارکت هر یک از پارامترهای ورودی بر میزان سایش الکتروود محاسبه گردید. با توجه به جدول ۸ می‌توان نتیجه گرفت که جریان تخلیه و فاکتور کار به ترتیب با میزان ۶۸/۲۵ و ۲۰/۷۶ درصد بر میزان سایش الکتروود تأثیر گذار هستند.

جدول ۷. نتایج خروجی‌های آزمایش برای نرخ سایش ابزار

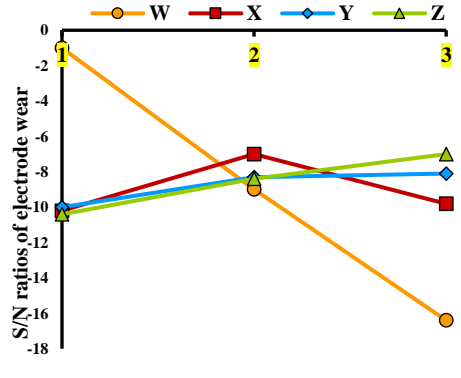
شماره آزمایش	پارامترهای ورودی				نرخ سایش ابزار (mg/min)			سیگنال به نویز (dB)
	W	X	Y	Z	خروجی ۱	خروجی ۲	خروجی ۳	
۱	۱	۱	۱	۱	۱/۸۵	۱/۸۱	۱/۷۹	-۵/۱۸
۲	۲	۲	۲	۱	-۰/۸۳	-۰/۸۹	-۰/۸۵	۱/۳۴
۳	۳	۳	۳	۱	-۰/۹۶	-۰/۹۳	-۰/۹۸	۰/۳۸
۴	۳	۲	۱	۲	۲/۵۴	۲/۴۶	۲/۴۹	-۷/۹۴
۵	۱	۳	۲	۲	۲/۸۱	۲/۷۳	۲/۷۹	-۸/۷۱
۶	۲	۱	۳	۲	۳/۳۳	۳/۴۸	۳/۳۹	-۱۰/۶۲
۷	۲	۳	۱	۳	۷/۲۱	۷/۲۷	۷/۳۲	-۱۷/۲۲
۸	۳	۱	۲	۳	۵/۳۶	۵/۳۱	۵/۲۸	-۱۴/۵۱
۹	۱	۲	۳	۳	۹/۲۲	۹/۱۹	۹/۲۳	-۱۹/۲۸

جدول ۸. نتایج تحلیل واریانس برای نرخ سایش ابزار

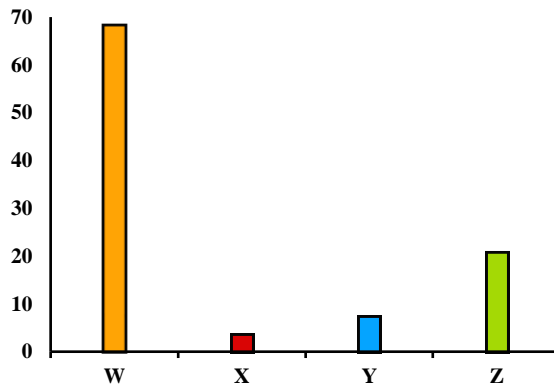
پارامتر ورودی	نرخ سیگنال به نویز (dB)			درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	درصد مشارکت
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳				
W	-۱/۱	-۹/۲	-۱۷	۲	۵۸/۵	۳۶۶/۶	۶۸/۳
X	-۱۰/۲	-۷/۳	-۹/۸	۲	۳/۴۱	۲۵/۰	۳/۷
Y	-۱۰/۱	-۸/۶	-۸/۶	۲	۰/۷۷	۳۴/۱	۷/۳
Z	-۱۱/۲	-۸/۷	-۷/۴	۲	۴/۲	۱۱۱/۵	۲۰/۸
کل				۸	۶۶/۹	۱۰۰	



شکل ۳. ب) نمودار پاسخ سیگنال به نویز ماده تیتانیوم (نرخ سایش ابزار)



شکل ۳- الف) نمودار پاسخ سیگنال به نویز ماده اینکونل (نرخ سایش ابزار)



شکل ۳. ج) نمودار درصد مشارکت پارامترهای ورودی بر نرخ سایش ابزار

شکل ۳ نشان‌دهنده پاسخ نرخ سایش ابزار به ازای هر یک از پارامترهای ورودی است؛ به طوری که با افزایش جریان تخلیه میزان انرژی هدایت‌شده توسط الکتروود افزایش می‌یابد و موجب افزایش فرسایش در ابعاد و هندسه الکتروود می‌گردد. همچنین ولتاژ گپ نیز بر نرخ سایش ابزار مؤثر است. به طوری که با افزایش این فاکتور، میزان فرکانس جرقه‌زنی افزایش می‌یابد و موجب توزیع تنش حرارتی و شکل‌نگرفتن موضعی آن می‌گردد. بدین ترتیب نرخ سایش ابزار کاهش می‌یابد.

### میزان زبری سطح (SR)

زبری سطح به میزان پستی و بلندی‌های موجود در سطح قطعه کار اشاره دارد و دارای واحد (میکرومتر) است. این پارامتر تأثیر مستقیمی بر کیفیت سطح قطعه ماشین‌کاری شده نهایی دارد؛ به طوری که با اصلاح این پارامتر، شاهد بهبود ریزساختار و مورفولوژی سطح و عدم‌شکل‌گیری عیوب مختلف سطحی از جمله ترک خواهد گردید. تأثیر تغییر پارامترها بر بهبود مورفولوژی سطح برخی از نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده در مرجع [۲۲] نشان داده شده است. جدول ۹ نتایج

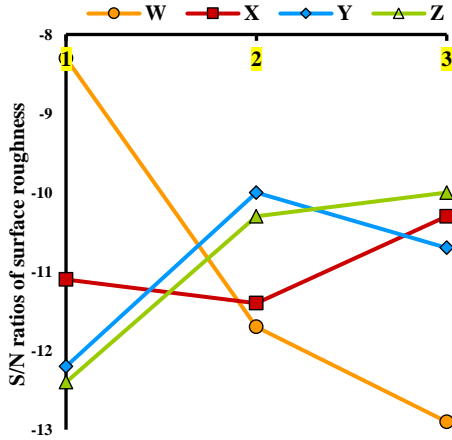
آزمایش‌های مربوط به میزان زبری سطح را نشان می‌دهد که البته نسبت سیگنال به نویز نیز قابل مشاهده است. با استفاده از تجزیه و تحلیل واریانس (جدول ۱۰)، درصد مشارکت هر یک از پارامترهای ورودی بر زبری سطح محاسبه گردید. با توجه به جدول ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که جریان تخلیه، فاکتور کار و زمان روشنی پالس به ترتیب با مقادیر ۶۳، ۲۰ و ۱۴ درصد، بر میزان زبری سطح، تأثیرگذار است.

جدول ۹. نتایج خروجی‌های آزمایش برای میزان زبری سطح

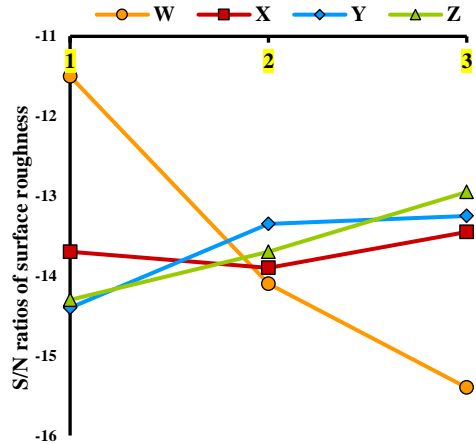
سیگنال شماره آزمایش	نرخ سایش ابزار (mg/min)				پارامترهای ورودی			
	خروجی ۳	خروجی ۲	خروجی ۱	Z	Y	X	W	
-۱۳/۲	۴/۵۸	۴/۵۴	۴/۶۱	۱	۱	۱	۱	
-۱۱/۶	۳/۸۴	۳/۸۳	۳/۷۸	۱	۲	۲	۲	
-۱۰/۳	۳/۲۵	۳/۴۲	۳/۲۱	۱	۳	۳	۳	
-۱۳/۰	۴/۵۲	۴/۴۸	۴/۴۱	۲	۱	۲	۳	
-۱۴/۵	۵/۳۶	۵/۳۱	۵/۳۲	۲	۲	۳	۱	
-۱۴/۵	۵/۳۳	۵/۴۲	۵/۲۱	۲	۳	۱	۲	
-۱۴/۹	۵/۶۱	۵/۶۸	۵/۵۲	۳	۱	۳	۲	
-۱۵/۶	۶/۰۳	۶/۰۸	۶/۱	۳	۲	۱	۳	
-۱۵/۴	۵/۹۱	۵/۸۹	۵/۸۵	۳	۳	۲	۱	

جدول ۱۰. نتایج تحلیل واریانس برای میزان زبری سطح

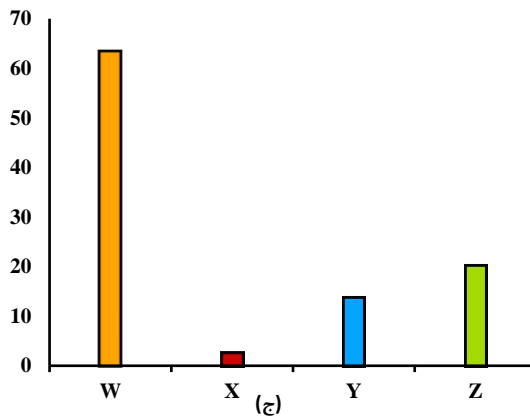
پارامتر ورودی	نرخ سیگنال به نویز (dB)			درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	درصد مشارکت
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳				
W	۱۱/۶	۱۳/۹	۱۵/۳	۲	۲۰/۳۱	۱۶/۴۹	۶۳/۳
X	۱۳/۷	۱۳/۹	۱۳/۳	۲	۰/۶۵	۰/۶۷۴	۲/۶
Y	۱۴/۴	۱۳/۳	۱۳/۲	۲	۳/۰۲	۳/۵۸۲	۱۳/۸
Z	۱۴/۴	۱۳/۶	۱۲/۹	۲	۳/۲۵	۵/۲۸۷	۲۰/۳
کل				۸	۲۷/۲۳		۱۰۰



شکل ۴. ب) نمودار پاسخ سیگنال به نویز ماده تیتانیوم (میزان زبری سطح)



شکل ۴. الف) نمودار پاسخ سیگنال به نویز ینکونل (میزان زبری سطح)

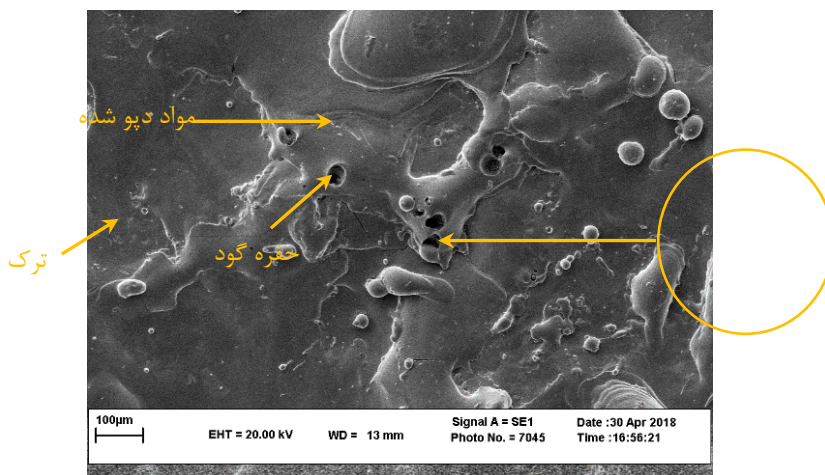


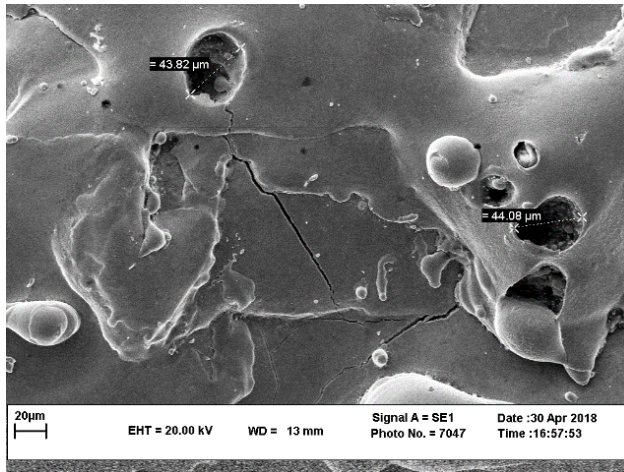
شکل ۴. ج) نمودار درصد مشارکت پارامترهای ورودی بر میزان زبری سطح

شکل ۴ نشان‌دهنده پاسخ میزان زبری سطح به ازای هر یک از پارامترهای ورودی است؛ به طوری که جریان تخلیه بر میزان این پارامتر خروجی تأثیر به‌سزایی دارد. از این رو با افزایش جریان تخلیه، میزان انرژی و تنش حرارتی وارد بر واحد سطح افزایش می‌یابد و موجب تشکیل عیوب سطحی و همچنین شکل‌گیری لایه سفید می‌گردد؛ بدین ترتیب، موفقولوژی سطح قطعه کار نهایی دچار انواع عیوب سطحی و زیرسطحی می‌گردد. همچنین زمان روشنی پالس نیز بر میزان زبری سطح، تأثیر گذار است؛ به طوری که افزایش زمان روشنی پالس‌ها موجب ماندگاری و تشدید تنش‌های حرارتی وارد بر سطح می‌شود و میزان زبری سطح نیز افزایش خواهد یافت.

### مورفولوژی سطح

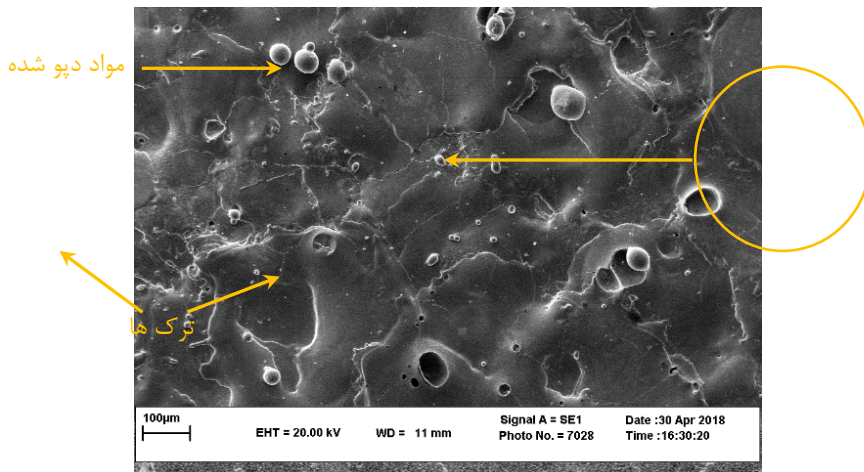
در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی، هر یک از پارامترهای ورودی ماشین ابزار، تأثیرات متفاوتی بر کیفیت سطح و ریزساختار سطحی نمونه ماشین کاری شده دارند؛ به طوری که افزایش یا کاهش یک پارامتر تنظیمی، منجر به بروز عیوب مختلف سطحی و زیرسطحی در قطعه می‌شود. از این رو به بررسی تأثیر هر یک از این پارامترها پرداخته شده است. جریان تخلیه، تأثیر متوسط ۶۰ درصدی را بر کیفیت سطح نهایی قطعه دارد؛ به طوری که افزایش این پارامتر منجر به بروز عیوبی مانند ترک و حفره‌های گازی می‌گردد. از طرفی با کاهش میزان این پارامتر، راندمان براده‌برداری فرایند کاهش می‌یابد و در نتیجه، مدت‌زمان ماشین کاری یک قطعه، طولانی‌تر خواهد شد. بدین ترتیب، تعیین یک میزان بهینه از مقادیر پارامترهای ورودی، الزامی است. مورفولوژی سطح برخی از نمونه‌های ماشین کاری شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مطابق مراجع [۲۳-۲۵] در شکل ۵، شکل ۶ و شکل ۷ نشان داده شده است. معیارهای انتخاب این تصاویر، مقادیر پاسخ سیگنال به نویز در قسمت زبری سطح است. از این رو، ریزساختار سه سطح با زبری سطح بالا، متوسط و کم بررسی شد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است سطح شماره ۸ با مشخصات  $(W_3X_2Y_1Z_3)$  دارای عیوب سطحی زیادی از جمله ترک و حفرات گازی است. دلیل ایجاد چنین سطحی، افزایش جریان تخلیه و کاهش ولتاژ است. با اعمال این مقادیر، سطح فوق، بالاترین میزان زبری را دارد.

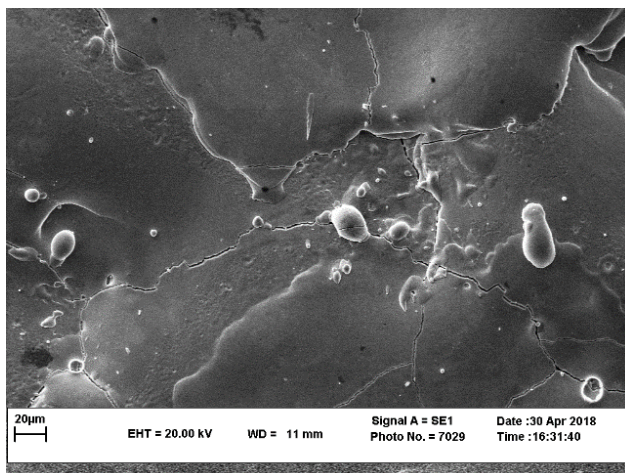




شکل ۵. نمونه میکروسکوپ الکترونی روبشی آزمایش شماره ۸

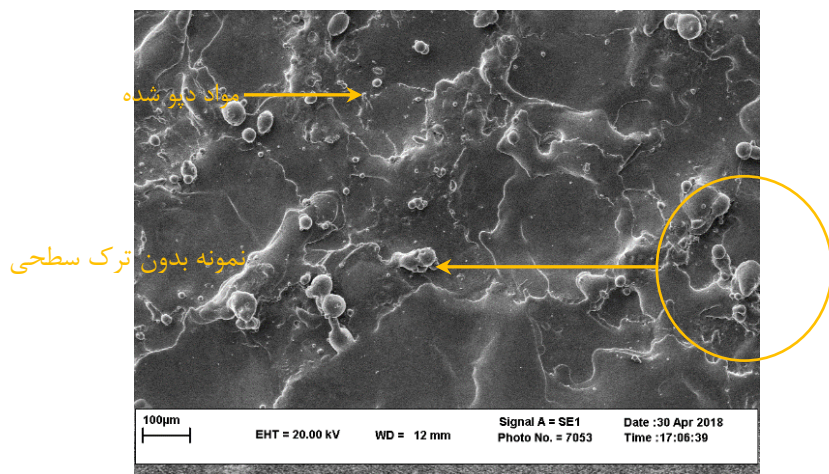
سطح دوم سطح شماره ۶ با مشخصات  $(W_2X_3Y_1Z_2)$  است. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است این سطح دارای ترک کوچک‌تر است که در مقایسه با سطح شماره ۸ بهبود یافته است. این بهبود به دلیل کاهش جریان تخلیه از ۲۰ به ۱۰ آمپر و افزایش ولتاژ از ۱۵۰ به ۲۵۰ ولت است اما به دلیل جریان تخلیه نسبتاً زیاد، هنوز نقایصی در سطح وجود دارد.



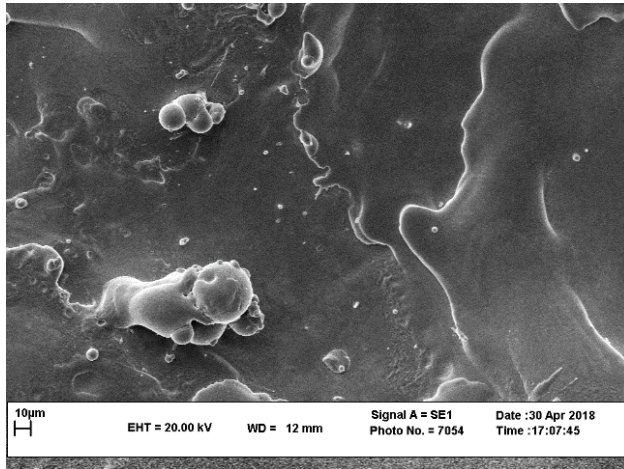


شکل ۶. نمونه میکروسکوپ الکترونی روبشی آزمایش شماره ۶

سطح سوم با مشخصات  $(W_1X_3Y_3Z_3)$  سطح شماره ۳ است. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است این سطح، فاقد هرگونه عیب سطحی است و در مقایسه با سطح شماره ۶ بهبود یافته است. دلیل این بهبود، کاهش جریان تخلیه از ۱۰ به ۵ آمپر و افزایش طول پالس از ۱۰۰ به ۴۵۰ میکروثانیه است.







شکل ۷. نمونه میکروسکوپ الکترونی روشی آزمایش شماره ۳

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش جریان تخلیه و کاهش ولتاژ، زبری سطح افزایش می‌یابد و در نتیجه عیوب سطحی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش جریان تخلیه انرژی حرارتی بیشتری به قطعه کار وارد می‌شود و باعث افزایش تنش‌های حرارتی در سطح قطعه کار می‌شود. از اینرو با افزایش جریان تخلیه میزان عیوب سطحی در قطعات ماشین‌کاری شده افزایش می‌یابد.

### تحلیل رگرسیون

در این بخش، با استفاده از مدل‌سازی رگرسیونی و نرم‌افزار MINITAB 17 به محاسبه پارامترهای خروجی فرایند پرداخته شده است. با استفاده از این روابط می‌توان پارامترهای خروجی فرایند؛ شامل نرخ برده‌برداری، میزان سایش الکتروود و زبری سطح را به‌ازای هر میزان از پارامترهای ورودی پیش‌بینی کرد. برخی از پارامترهای ورودی مانند جریان تخلیه، تأثیر زیادی در این محاسبه دارند. معادلات به شرح زیر است:

$$MRR = -40.5 + 88.5 W - 15.9 X + 11.7 Y - 5.4 Z \quad (۴)$$

$$EWR = -1.37 + 3.025 W + 0.318 X + 0.073 Y - 0.837 Z \quad (۵)$$

$$SR = 4.333 + 0.978 W - 0.045 X - 0.312 Y - 0.343 Z \quad (۶)$$

### بحث و نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، با انجام آزمایش‌های طراحی شده به روش تاگوچی، تأثیر چهار پارامتر ورودی بر میزان چهار پارامتر خروجی فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بررسی شد. میزان تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی در خروجی‌های فرایند

متفاوت است. جریان تخلیه با میانگین ۶۸ درصد، بیشترین تأثیر را بر مقادیر پارامترهای خروجی فرایند دارد؛ به طوری که با افزایش جریان تخلیه، میزان انرژی حرارتی روی سطح قطعه، افزایش و در نتیجه، میزان سایش الکتروود و زبری سطح، افزایش می‌یابد که منجر به ظهور عیوبی مانند ترک و حفره‌های گازی می‌شود. از طرف دیگر، راندمان براده‌برداری، در حال افزایش است. از این رو، با ارزیابی پاسخ‌های سیگنال به نویز (S/N) و تصاویر مورفولوژی سطوح، آزمایش شماره ۳ با مشخصات  $(W_3X_3Y_3Z_1)$  به‌عنوان آزمایش بهینه انتخاب گردید. پارامترهای ورودی در این سطح شامل جریان تخلیه ۵ آمپر، ولتاژ گپ ۲۵۰ ولت، زمان روشنی پالس ۴۵۰ میکروثانیه و فاکتور کار ۷۰ است که نسبت به حالت عادی منجر به افزایش ۴۵ درصدی راندمان براده‌برداری، کاهش ۳۰ درصدی فرسایش الکتروود و بهبود ۶۵ درصدی زبری سطح قطعه می‌شود. همچنین توپوگرافی سطح بهینه عاری از عیوب سطحی مانند ترک و حفره‌های گازی است. در پایان، با استفاده از مدل‌سازی رگرسیونی، مقادیر پارامترهای خروجی فرایند براساس هر میزان از پارامترهای ورودی، پیش‌بینی گردید. همچنین پس از مقایسه رفتار دو ماده اینکونل ۷۱۸ و آلیاژ Ti-6Al-4V در شرایط یکسان، قابل ذکر است که راندمان براده‌برداری در ماده اینکونل ۷۱۸ بیشتر از تیتانیوم است و در مقابل ماده تیتانیوم دارای پتانسیل بهتری از دیدگاه مورفولوژی و توپوگرافی سطح است.

## References

- [1] Rahul, Srivastava, A., Kumar Mishra, D., Chatterjee, S., Datta, S., Bhusan Biswal, B., & Sankar Mahapatra, S. (2018). Multi-Response Optimization during Electro-Discharge Machining of Super Alloy Inconel 718: Application of PCA-TOPSIS. *Materials Today :Proceedings*, 5(2, Part 1), 4269-4276. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.691>
- [2] Sahu, B. K., Datta, S., & Mahapatra, S. S. (2018). On Electro-Discharge Machining of Inconel 718 Super Alloys: An Experimental Investigation. *Materials Today: Proceedings*, 5(2, Part 1), 4861-4869. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.062>
- [3] Hasçalık, A., & Çaydaş, U. (2007). Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Applied Surface Science*, 253(22), 9007-9016. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.05.031>
- [4] Jabbaripour, B., Sadeghi, M., Shabgard, M. R., & Faridvand, S. (2011). Investigating the Effects of Tool Materials on the Properties of Electrical Discharge Machining of  $\gamma$ -TiAl Intermetallic. *Modares Mechanical Engineering*, 11(2), 135-146. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-6162-en.html>
- [5] Ahmad, S., & Lajis, M. A. (2013, July 1-4). *Electrical discharge machining (EDM) of Inconel 718 by using copper electrode at higher peak current and pulse duration* 2nd International Conference on Mechanical Engineering Research (ICMER 2013), Kuantan, Pahang, Malaysia. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/50/1/012062/pdf>
- [6] Hadad, M., Bui, L., & Nguyen, C. (2018). Experimental investigation of the effects of tool initial surface roughness on the electrical discharge machining (EDM) performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1), 2093-2104. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1399-2>
- [7] Jadam, T., Sahu, S., Datta, S., & Masanta, M. (2019). (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*, 41(8), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1813-9>

- [8] Ayesta, I., Izquierdo, B., Sanchez, J., Ramos, J. M., Plaza, S., Pombo, I., Ortega, N., Bravo, H., Fradejas, R., & Zamakona, I. (2013). Influence of EDM Parameters on Slot Machining in C1023 Aeronautical Alloy. *Procedia CIRP*, 6, 129-134. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.059>
- [9] Gopalakannan, S., Senthilvelan, T., & Ranganathan, S. (2012). Modeling and Optimization of EDM Process Parameters on Machining of Al 7075-B4C MMC Using RSM. *Procedia Engineering*, 38, 685-690. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.086>
- [10] Alidoosti, A., Ghafari-Nazari, A., Moztarzadeh, F., Jalali, N., Moztarzadeh, S., & Mozafari, M. (2013). Electrical discharge machining characteristics of nickel-titanium shape memory alloy based on full factorial design. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24(13), 1546-1556. <https://doi.org/10.1177/1045389X13476147>
- [11] Uhlmann, E., & Domingos, D. C. (2013). Development and Optimization of the Die-Sinking EDM-Technology for Machining the Nickel-based Alloy MAR-M24  $\gamma$  for Turbine Components. *Procedia CIRP*, 6, 180-185. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.102>
- [12] Rajmohan, T., Prabhu, R., Rao, G. S., & Palanikumar, K. (2012). Optimization of Machining Parameters in Electrical Discharge Machining (EDM) of 304 Stainless Steel. *Procedia Engineering*, 38, 1030-1036. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.129>
- [13] Lin, Y.-C., Chen, Y.-F., Wang, D.-A., & Lee, H.-S. (2009). Optimization of machining parameters in magnetic force assisted EDM based on Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(7), 3374-3383. <https://doi.org/10.1016/j.jmatsproc.2008.07.052>
- [14] Lin, J. L., & Lin, C. L. (2002). The use of the orthogonal array with grey relational analysis to optimize the electrical discharge machining process with multiple performance characteristics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(2), 237-244. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00107-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00107-9)
- [15] ASTM International. (2017, Jun 22). *ASTM E415-15- Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*. ASTM International. <https://www.astm.org/e0415-15.html>
- [16] Document Center Inc. (2014). *ASTM-E1086-14, Standard Test Method for Analysis of Austenitic Stainless Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*, Document Center, Inc. Document Center Inc, ASTM International. <https://www.document-center.com/standards/show/ASTM-E1086>
- [17] ASTM International. (2018, November 15). *ASTM B670-07, Standard Specification for Precipitation-Hardening Nickel Alloy (UNS N07718) Plate, Sheet, and Strip for High-Temperature Service*. ASTM International. <https://www.astm.org/b0670-07r18.html>
- [18] Kao, J., Tsao, C., Wang, S., & Hsu, C. (2010). Optimization of the EDM Parameters on Machining Ti-6Al-4V with Multiple Quality Characteristics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(1), 395-402. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2208-3>
- [19] Rahul, Datta, S., Biswal, B., & Mahapatra, S. (2017). A Novel Satisfaction Function and Distance-Based Approach for Machining Performance Optimization During Electro-

- Discharge Machining on Super Alloy Inconel 718. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42, 1999-2020. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2422-5>
- [20] ISO. (2009, June). ISO 4287:1997, Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters. In: ISO.
- [21] Srinivasa Rao, P., Ramji, K., & Satyanarayana, B. (2016). Effect of wire EDM conditions on generation of residual stresses in machining of aluminum 2014 T6 alloy. *Alexandria Engineering Journal*, 55(2), 1077-1084. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.03.014>
- [22] Asadi Borojeni, B., & Mozafari Vanani, L. (2020). The effect of tool geometry on the tensile strength of polypropylene Components Welded by Friction Stir Welding Method. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(1), 143-155. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112761>
- [23] Aliakbari, K. (2018). Failure analysis of four-cylinder diesel engine crankshaft. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(1), 30. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1536-3>
- [24] Aliakbari, K., & Mamaghani, T. (2020). Analysis of fatigue crack growth in cylinder head bolts of gasoline engine based on experimental data. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(5), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02326-1>
- [25] Mohammad Khani Haji KhajeLu, B., & Maleki, M. (2020). Experimental Investigation of Dynamic Density of Aluminum Powder under High Speed Loading. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(1), 157-175. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112762>