

بررسی پارامترهای موثر بر کیفیت سطح سوپر آلیاژ پایه نیکل در ماشین کاری به روش وایرکات با استفاده از دی الکتریک آب صابون

نسیم نایب پاشایی

گروه پژوهشی مکانیک و فلزشناسی - پژوهشکده مهندسی و فناوری - پژوهشگاه استاندارد - کرج

نیما راسخ صالح، عبدالعلی فتحی سیاه بیدی

دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران شرق

(دریافت مقاله: ۹۷/۰۷/۰۶ - پذیرش مقاله: ۹۸/۱۲/۲۴)

چکیده

در این پژوهش، تأثیر پارامترهای فرآیند ماشین کاری وایرکات بر روی کیفیت سطح سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ بررسی شد و برای نخستین بار ماشین کاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به روش وایرکات با خنک کنندگی آب صابون به روش پاششی انجام شد. این روش ماشین کاری نسبت به روش های قبل که به صورت غوطه وری و با خنک کنندگی آب مقطر انجام می شد دارای مزایای زیادی می باشد از جمله اینکه این روش اقتصادی بوده و نواقص دستگاه های قبلی مرتفع گردیده است. پارامترهای تنظیمی مورد بررسی شدت جریان (توان دستگاه)، زمان روشنایی پالس، زمان خاموشی پالس، نرخ پیشروی و سرعت تغذیه سیم بود. نرخ برداشت براده، زبری و سلامت سطح مشخصه خروجی مهم این فرآیند بود. از دو روش طراحی عاملی تاگوچی و طراحی آزمایش (DOE) برای تعیین تأثیر پارامترها بر عملکرد خروجی وایرکات استفاده شد. با استفاده از طراحی آزمایش ها به روش تاگوچی حداقل زبری سطح مقدار $4.97 \mu\text{m}$ و حداکثر زبری سطح مقدار $9.65 \mu\text{m}$ بدست آمده است. نتایج نشان داد که پارامترهای زمان روشنایی، نرخ پیشروی و سرعت تغذیه سیم منجر به افزایش زبری سطح می گردد و با افزایش زمان خاموشی زبری سطح کاهش می یابد. با توجه به نتایج آنالیز پراکندگی غلظت عناصر آلیاژی بر روی سطح مشخص گردید که سطح با حداکثر زبری نسبت به تنش ها و عوامل مکانیکی حساس بوده و نسبت به عوامل شیمیایی از مقاومت کمتری برخوردار است.

واژه های کلیدی: تخلیه الکتریکی با سیم (وایرکات)، روشنایی پالس، خاموشی پالس، شدت جریان، زبری سطح، سوپر آلیاژ پایه نیکل.

Investigation of effective parameters on surface quality of nickel based superalloy in wire cut machining using suds (Emulsion liquid in water) as dielectric

Nasim Naye bshae

Faculty of Mechanical and Metallurgical Engineering-Research Center of Technology and Engineering
Research Institute, Karaj, Iran

Nima Rasekh Saleh, Abdolali Fathi Siahbidi

School of Engineering- Tehran East Branch- Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Received 28 September 2018, accepted 14 March 2020)

Abstract

In this study, the effect of the wire cut machining parameters on the surface quality of superalloy 718 was investigated. For the first time, the Inconel 718 superalloy machining was performed by wire cut method with spraying suds. This method of machining has had many advantages over the previous methods, which were immersed and cooled distilled water. The regulatory parameters were the intensity of the current, pulse lighting time, pulse power offset; forward speed and wire feed speed. Roughness and material removal rate were the Output characteristic of this process. Two methods of Taguchi design and experimental design (DOE) were used to determine the effect of the parameters on the performance of the wirecut output. Using the design of experiments in Taguchi method, the minimum roughness of the surface was $4.97 \mu\text{m}$ and the maximum roughness of the surface was $9.65 \mu\text{m}$. The results showed that the parameters of the lighting time, the forward speed and the feeding rate of the wire increased the surface roughness and it decreased with increasing roughness time. With the analysis of the dispersion of the concentration of alloying elements on the surface, it was determined that the surface with maximum surface roughness, in addition to being sensitive to stresses and mechanical factors, has less resistance to chemical agents.

Keywords: Electric discharge by wire (wire cut), pulse lighting time, pulse power offset, discharge current, surface roughness, nickel based super alloy.

E-mail of corresponding author: naye bshae@gmail.com.

مقدمه

تولید قطعات صنعتی و آزمایشگاهی تبدیل نموده است. وایرکات یکی از پرکاربردترین روش‌های ماشین‌کاری برای شکل‌دهی قطعات هادی جریان الکتریسیته است. در این روش ابزار با قطعه کار تماس نداشته و سختی قطعه کار نیز بر سرعت ماشین‌کاری تأثیری ندارد. بنابراین می‌توان این روش را در ماشین‌کاری مواد سخت نظیر سوپرآلیاژها بکار گرفت [۲، ۶-۸].

آنشومان کومار و همکاران [۹] بهینه‌سازی چند منظوره پارامترهای فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی در اینکونل ۷۱۸ را از طریق بررسی اثرات متغیرهای فرآیند بر روی پاسخ‌های فرآیند مانند نرخ براده‌برداری (MRR) و زبری سطح (Ra) مطالعه نمودند. پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، تنش سیم، سرعت سیم، جریان تخلیه و زمان روشنایی پالس است. پاسخ MRR و Ra نیز بر مربوط به اینکونل ۷۱۸ به عنوان قطعه کار و سیم برنج به عنوان ابزار می‌باشد. در این مطالعه سطح اهمیت پارامترهای ماشین‌کاری Ra و MRR در برش بوسیله تجزیه و تحلیل ANOVA تعیین شده و با استفاده از نسبت سیگنال به نویز (S/N)، حالت بهینه ترکیب پارامترهای ماشین‌کاری به دست آمده است.

لی و همکاران [۱۰] مطالعه جامعی پیرامون ویژگی‌های صافی سطوح اینکونل ۷۱۸ به روش ماشین‌کاری وایرکات، به ازای مقادیر مختلف انرژی تخلیه ارائه دادند. نتایج توپوگرافی سطحی نشان داد که ریزساختارها در انرژی تخلیه بالا دارای بیشترین خلل و فرج هستند. در انرژی تخلیه کم، زبری متوسط به طور قابل توجهی کاهش یافت. در انرژی تخلیه کمتر، لایه‌های سفید نازک بطور پیوسته و یکنواخت دارای حفره‌های ریزی هستند. علاوه بر این، گزارش نمودند که در انرژی تخلیه بالا، آلیاژ سیم الکتروود و دی‌الکتربک آب در برش اصلی و صافی سطوح موثر هستند.

ساری و همکاران [۳] تنظیم صافی سطح چرخ دنده‌ها با

صافی سطح یکی از مهمترین پارامترهای ماشین‌کاری است که نقش بسزایی در کیفیت محصولات مهندسی ایفا می‌کند. یک سطح با کیفیت خوب، باعث بهبود مقاومت خستگی، خوردگی و مقاومت به سایش قطعه کار می‌شود. از طرفی افزایش سرعت و در نتیجه کاهش زمان ماشین‌کاری از دیگر اهداف سازندگان می‌باشد که به منظور کاهش هزینه‌های اقتصادی و افزایش نرخ تولید به دنبال آن می‌باشند [۱۰].

سوپر آلیاژها به دلیل داشتن خواصی نظیر توانایی حفظ استحکام در دماهای بالا و مقاومت بالا به خوردگی و خستگی، در صنعت هوافضا، صنایع پتروشیمی، صنایع هسته‌ای و همچنین در ساخت توربین‌های گازی و بخار بطور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از سوی دیگر خواصی چون کارسختی سریع در حین ماشین‌کاری، وجود ذرات ساینده کاربیدی، هدایت حرارتی پایین و تمایل به ایجاد لبه انباشته بر سطح ابزار در ماشین‌کاری سوپر آلیاژها، باعث شده تا ماشین‌کاری سوپر آلیاژها دشوار باشد. انجام فرآیند ماشین‌کاری بر روی این مواد با روش‌های سنتی مشکل و گاهی غیر ممکن می‌باشد [۱]. روش‌های براده‌برداری مدرن نه فقط به خاطر غلبه بر استحکام و سختی مواد، بلکه به خاطر قابلیت در ایجاد شکل پیچیده مورد استقبال قرار گرفته‌اند. یکی از روش‌های جدید در شکل‌دهی و براده‌برداری از سطوح فلزات و موادی که دارای سختی زیاد بوده و انجام فرایندهای براده‌برداری بر روی آنها با روش سنتی و رایج غیر ممکن است، روش ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (وایرکات) است [۲-۵].

در میان روش‌های ماشین‌کاری غیرسنتی، وایرکات به عنوان یک روش موثر برای تولید گروه وسیعی از قطعات شناخته شده است. قابلیت تولید قطعات نازک و پیچیده با پروفیل‌های دقیق، این روش را به روشی ایده آل برای

می توان سطحی با کیفیت مناسب بدست آورد. در تمامی مطالعات انجام شده، وایرکات به روش غوطه‌وری داخل مایع دی الکتریک (آب مقطر) برش روی قطعه کار ایجاد می کند. در روش غوطه‌وری محدودیتهایی وجود دارد. بعنوان مثال در وایرکات به روش غوطه‌وری نیاز به وجود محفظه آب‌بند می باشد در نتیجه با محدودیت ابعاد قطعات برای ماشینکاری مواجه خواهیم بود. همچنین هنگام بوجود آمدن مشکل فنی و نیاز به تعمیر و راه اندازی مجدد نیاز به تخلیه و بارگیری مجدد محفظه سیال خواهد بود. در این پژوهش، برای نخستین بار ماشین کاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به روش وایرکات با خنک‌کنندگی آب صابون به روش پاششی انجام گردید. این روش ماشین کاری نسبت به روش های قبل که به صورت غوطه‌وری و با خنک‌کنندگی آب مقطر انجام می شد دارای مزایای زیادی می باشد از جمله اینکه این روش اقتصادی بوده و نواقص دستگاه‌های قبلی مرتفع گردیده است.

روش تحقیق

مواد

مواد مختلف، نقطه ذوب، تبخیر و ضریب هدایت حرارتی متفاوتی دارند و تحت شرایط یکسان ماشینکاری، کیفیت سطح و سرعت بار برداری های متفاوتی از خود نشان می دهند.

در این پژوهش، مطالعه بر روی قطعاتی از جنس سوپر آلیاژ پایه نیکل (اینکونل ۷۱۸) انجام شده است. ویژگی های اصلی سوپر آلیاژ پایه نیکل استحکام بالا، مقاومت بالا نسبت به وزن، چقرمگی بالا، مقاومت در برابر خوردگی و استحکام دمای بالا می باشند. ماشینکاری این آلیاژ به دلیل سختی بالایی روش سنتی بسیار مشکل می باشد. وایرکات یک پروسه حرارتی است و سختی ماده در آن تاثیر ندارد، بنابراین یکی از بهترین گزینه ها برای ماشینکاری

استفاده از ماشین تخلیه الکتریکی سیمی با هدف افزایش ظرفیت تحمل بارهای جانبی را مطالعه نمودند. این تحقیق به بررسی جایگزینی تکنولوژیکی وایرکات برای سنگ زنی از نقطه نظر عملکرد قطعات پرداخت. کیفیت هندسی دنده، صافی سطوح و ظرفیت تحمل بار چرخ دنده ها برای وایرکات و سنگ زنی مورد تجزیه و تحلیل و مقایسه قرار گرفتند. برای هر دو فرآیند هیچ تفاوتی در شکل دنده مشاهده نشد. تنش های باقی مانده و سخت کاری پروفیل ها تفاوت های قابل توجهی را نشان نمی دهد. فرایند وایرکات دنده ها سه برابر زمان سنگ زنی دنده ها به طول انجامید که دلیل این امر بهبود مناسب و پیوسته توپوگرافی با افزایش خصوصیت تریبولوژیکال می باشد.

ماهر و همکاران [۱۱] افزایش بهره‌وری ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی همراه با تولید پایدار را مطالعه نمودند. ماشین کاری برش الکتریکی سیمی، دارای نرخ برش بالا و دقت ماشین کاری لازم برای بهبود بهره‌وری و دستیابی به کیفیت بالای قطعات ماشین کاری است. در این مطالعه، تنظیم بهینه پارامترهای ماشین کاری برای رسیدن به بهره‌وری و پایداری بالاتر شناسایی شد. علاوه بر این، مدل سازی عصبی فازی با موفقیت مورد استفاده قرار گرفت. ساخت مدل تجربی برای انتخاب پارامترهای ماشین کاری برای دستیابی به بهره‌وری بالاتر همراه با بالاترین سطح کیفیت ممکن و حداقل هزینه برای تولید پایدار می باشد.

کلاهان و همکاران [۱۲] به بررسی شرایط بهینه ماشین کاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با رویکرد طراحی آزمایش تاگوچی پرداختند. کنترل دقیق سطح ماشین کاری شده برای رسیدن به قطعاتی با قابلیت اطمینان و طول عمر بالا، در صنایع هوافضا حیاتی است. بدین منظور صافی سطح و نیروی ماشین کاری در حین تراشکاری با تیغه پوشش دار کاربردی اندازه گیری شده است. مشاهده شد که با سرعت برشی متوسط و پیشروی کم و عمق برش متوسط

در نظر گرفته شده است. پارامترهایی همچون قطر سیم، کشش سیم، سرو و ولتاژ و فشار دی الکتریک پارامتر ثابت فرآیند می‌باشند [۱، ۲، ۷، ۸، ۱۳، ۱۴]. جدول (۲) و (۳) پارامترهای متغیر و ثابت فرآیند را نشان می‌دهند.

وایرکات

دستگاه مورد استفاده جهت انجام این مطالعه تحقیقاتی، وایرکات هان چاون مدل DK7740 از نوع پاششی با خنک‌کنندگی آب صابون می‌باشد.

سوپر آلیاژ پایه نیکل روش وایرکات می‌باشد. ماشین‌کاری سوپر آلیاژ پایه نیکل باید در حداقل زمان، با دقت ابعادی بالا و کیفیت سطح انجام شود. کاربرد سوپر آلیاژهای پایه نیکل با استفاده از روش‌های ماشین‌کاری غیر سنتی از جمله فرآیند وایرکات، در صنایع هوافضایی، نیروگاه‌های برق، پالایشگاه‌ها و صنایع هسته‌ای گسترش یافته است. در این تحقیق میلگرد به قطر ۱۷ میلیمتر و طول ۲۰۰ میلیمتر از جنس اینکونل ۷۱۸ تهیه گردید.

جدول ۱. درصد عناصر شیمیایی تشکیل دهنده نمونه آلیاژ

اینکونل ۷۱۸

عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
Ni	>۵۲	C	۰/۰۶۸۹
Cr	۲۵/۸	Si	۰/۱۸۰
Fe	۱۳/۳	Co	۰/۲۰۵
Nb	۳/۰	P	۰/۰۱۰۱
Mo	۳/۵۵	V	۰/۰۹۸۷
Ti	۱/۱۱	S	<۰/۰۰۵۰
Al	>۰/۴۰۰	W	۰/۰۷۵۹
Cu	۰/۰۳۸۰	Mn	۰/۱۴۶

جدول ۲. پارامترهای متغیر فرآیند و سطوح آن

متغیرهای فرآیند	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	واحد
شدت جریان	۰/۳۷	۰/۳۸۵	۰/۴۰۳	J
زمان روشنایی	۸	۱۰	۱۲	μs
زمان خاموشی	۸۰	۱۰۰	۱۳۰	μs
سرعت تغذیه سیم	۱۵	۲۰	۲۵	m/min
نرخ پیشروی	۰/۲	۰/۲۵	۰/۳	mm/min

ترکیب شیمیایی عناصر تشکیل دهنده سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به وسیله دستگاه اسپکترومتر نشر اتمی مشخص شد که نتایج آن در جدول ۱ گزارش داده شده است.

پس از تهیه میلگردهای سوپر آلیاژ پایه نیکل، با استفاده از فرآیند وایرکات نمونه‌ها به ضخامت ۳ میلیمتر برش داده شد و با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی ماشین‌کاری شد.

پارامترهای فرآیند آزمایش

وایرکات دارای پارامترهای مختلفی می‌باشد. با توجه به پژوهش‌های قبلی و شرایط دستگاه، متغیرهای آزمایش در این تحقیق شدت جریان (توان دستگاه)، زمان روشنایی، زمان خاموشی، سرعت تغذیه سیم و نرخ پیشروی در سه سطح

جدول ۳. پارامترهای ثابت فرآیند

پارامتر ثابت	مقدار	واحد
قطر سیم	۰/۱۸	Mm
کشش سیم	۶۰۰	N/m
سرو ولتاژ	۲۰	V
فشار دی الکتریک	۴	Bar

در این پژوهش، برای نخستین بار ماشین‌کاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به روش وایرکات با خنک‌کنندگی آب صابون به روش پاششی انجام گردید. این روش ماشین

افزایش دقت آزمایش‌ها تمامی نمونه‌ها توسط یک دستگاه و تحت شرایط یکسان برش داده شده‌اند.

کاری نسبت به روش‌های قبل که به صورت غوطه‌وری و با خنک‌کنندگی آب مقطر انجام می‌شد دارای مزایای زیادی می‌باشد از جمله اینکه این روش اقتصادی بوده و نواقص دستگاه‌های قبلی مرتفع گردیده است. به منظور

جدول ۴. طراحی آزمایشات و تعداد مراحل آزمایش بر اساس طرح تاگوچی (L27).

C5	C4	C3	C2	C1	آزمایش
سرعت پیشروی دستگاه	سرعت تغذیه سیم	زمان خاموشی پالس	زمان روشنایی پالس	توان دستگاه (انرژی تخلیه)	
۰/۲۰	۱۵	۸۰	۸	۰/۳۷۰	۱
۰/۲۵	۱۵	۸۰	۸	۰/۳۷۰	۲
۰/۳۰	۱۵	۸۰	۸	۰/۳۷۰	۳
۰/۲۰	۲۰	۱۰۰	۱۰	۰/۳۷۰	۴
۰/۲۵	۲۰	۱۰۰	۱۰	۰/۳۷۰	۵
۰/۳۰	۲۰	۱۰۰	۱۰	۰/۳۷۰	۶
۰/۲۰	۲۵	۱۳۰	۱۲	۰/۳۷۰	۷
۰/۲۵	۲۵	۱۳۰	۱۲	۰/۳۷۰	۸
۰/۳۰	۲۵	۱۳۰	۱۲	۰/۳۷۰	۹
۰/۲۰	۲۵	۱۰۰	۸	۰/۳۸۵	۱۰
۰/۲۵	۲۵	۱۰۰	۸	۰/۳۸۵	۱۱
۰/۳۰	۲۵	۱۰۰	۸	۰/۳۸۵	۱۲
۰/۲۰	۱۵	۱۳۰	۱۰	۰/۳۸۵	۱۳
۰/۲۵	۱۵	۱۳۰	۱۰	۰/۳۸۵	۱۴
۰/۳۰	۱۵	۱۳۰	۱۰	۰/۳۸۵	۱۵
۰/۲۰	۲۰	۸۰	۱۲	۰/۳۸۵	۱۶
۰/۲۵	۲۰	۸۰	۱۲	۰/۳۸۵	۱۷
۰/۳۰	۲۰	۸۰	۱۲	۰/۳۸۵	۱۸
۰/۲۰	۲۰	۱۳۰	۸	۰/۴۰۳	۱۹
۰/۲۵	۲۰	۱۳۰	۸	۰/۴۰۳	۲۰
۰/۳۰	۲۰	۱۳۰	۸	۰/۴۰۳	۲۱
۰/۲۰	۲۵	۸۰	۱۰	۰/۴۰۳	۲۲
۰/۲۵	۲۵	۸۰	۱۰	۰/۴۰۳	۲۳
۰/۳۰	۲۵	۸۰	۱۰	۰/۴۰۳	۲۴
۰/۲۰	۱۵	۱۰۰	۱۲	۰/۴۰۳	۲۵
۰/۲۵	۱۵	۱۰۰	۱۲	۰/۴۰۳	۲۶
۰/۳۰	۱۵	۱۰۰	۱۲	۰/۴۰۳	۲۷

زبری سطح

در فرآیند وایرکات خروجی ها می توانند زبری سطح، خواص متالورژیکی سطح، دقت ابعادی و غیره باشند که خروجی مورد نظر در این تحقیق زبری سطح است. زبری سطح، در واقع نشان دهنده خروجی تست است و معیاری از میزان دستیابی به نتیجه مطلوب می باشد. زبری سطح از مباحث توپوگرافی سطح است. توپوگرافی سطح مربوط به هندسه و بافت سطوح می باشد. در پژوهش حاضر از دستگاه زبری سنج مدل TR 100 استفاده شده است. در تجهیزات معمول برای اندازه گیری زبری که به زبری سنج یا Roughness tester معروف هستند، از روش تماسی استفاده می کنند و به دو روش R_a و R_z مطابق با استاندارد ISO و DIN اندازه گیری می کند. رنج اندازه گیری دستگاه در R_a در حدود ۰/۰۵ تا ۱۰ میکرومتر و در R_z در حدود ۰/۱ تا ۵۰ میکرومتر می باشد. بیشترین حرکت سوزن یا هد آن ۶ میلیمتر می باشد.

ب- روش طراحی آزمایش ها، یک ابزار مهندسی مهم در رسیدن به هدف است.

ج- عملکرد محصول و یا فرآیند و مطابقت آن با مشخصات فنی از اهمیت بالایی برخوردار می باشد.

مدل سازی فرآیند و آنالیز واریانس^۳

در این تحقیق از روش رگرسیون برای تعیین روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی فرآیند وایرکات سوپر آلیاژ پایه نیکل ۲۶۰۱ استفاده شده است. برای مدل سازی فرآیند انواع توابع ریاضی چند جمله ای درجه دوم و نمایی، بر ۱۴ مجموعه از داده هاس حاصل از آزمایش ها و با Minitab برازش داده شد. این مدلها سپس توسط روش آماری حذف گام به گام در محیط نرم افزار تا ۹۵٪ اصلاح گردید. در نهایت ضرایب معادلات برای نرخ براده برداری حجمی و صافی سطح استخراج شد.

نتایج

وایرکات به روش غوطه وری داخل مایع دی الکتریک (آب مقطر) محدودیت هایی دارد از قبیل عدم امکان مشاهده قطعه، نیاز به فیلترینگ آب، نیاز به مهارت اپراتوری، نیاز به وجود محفظه آب بند و در نتیجه محدودیت ابعادی قطعات قابل ماشینکاری با این روش و نیاز به تخلیه و بارگیری مجدد محفظه سیال هنگام بوجود آمدن مشکل فنی در دستگاه. در این پژوهش، برای نخستین بار ماشین کاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به روش وایرکات با خنک کنندگی آب صابون به روش پاششی انجام گردید. این روش ماشین کاری نسبت به روش های قبل که به صورت غوطه وری و با خنک کنندگی آب مقطر اقتصادی تر بوده و نواقص دستگاه های قبلی مرتفع گردیده است.

اثر پارامترها بر زبری سطح

در روش ماشینکاری تخلیه قوس الکتریکی، تاثیر سطوح

طراحی آزمایش ها و اخذ داده های اولیه

بمنظور گردآوری داده های مورد نیاز، تعدادی تست بر اساس روش تاگوچی^۱ در طراحی آزمایش ها^۲ در قالب ۵ پارامتر و ۳ سطح و به روش تاگوچی و در ۲۷ تست برش، مطابق جدول ۴ طراحی و انجام شده است. با توجه به اولویت بندی پارامترهای موثر بر برشکاری، در این روند پارامترهای برشکاری شامل توان دستگاه (انرژی تخلیه)، زمان روشنایی پالس، زمان خاموشی پالس، سرعت تغذیه سیم و سرعت پیشروی دستگاه مورد مطالعه قرار گرفته اند.

فلسفه روش تاگوچی شامل سه ایده اصلی زیر می باشد [۱۵]:

الف- باید محصول ها و فرآیندها به صورتی طراحی شوند که نسبت به عامل بی نظمی نیرومند باشند.

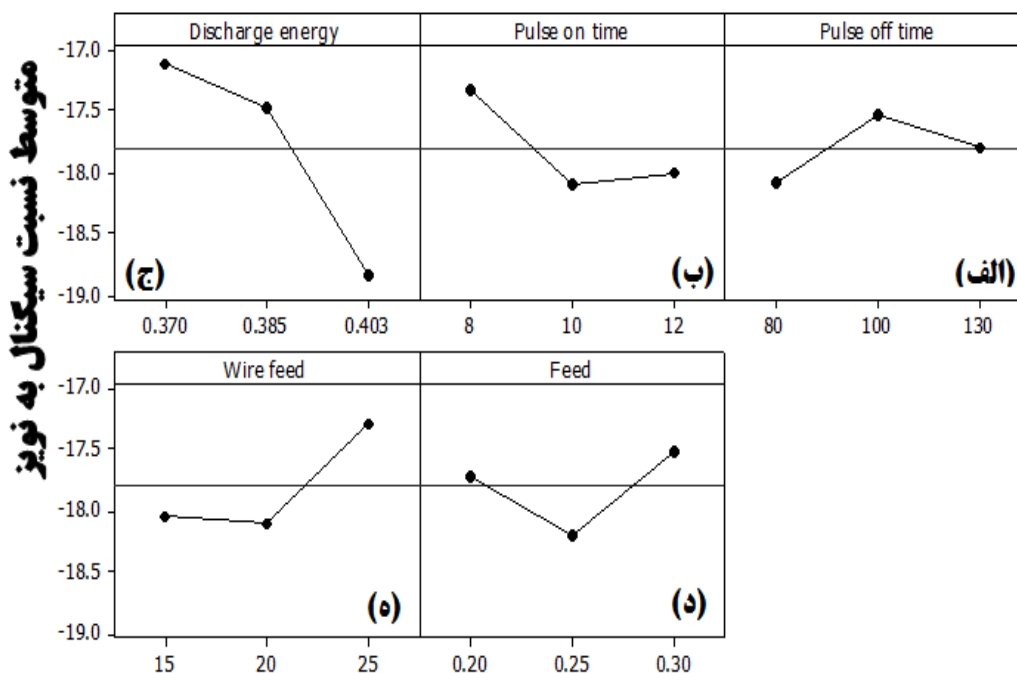
¹ Taguchi method

² Design of experiments

³ Analysis of Variance (ANOVA)

این آزمایش‌ها پارامتر مهم زبری سطح مورد بررسی قرار گرفت و اثر پارامترهای مختلف بر صافی سطح ارزیابی شد.

پارامترهای تنظیمی فرآیند بر مشخصه های خروجی آن بسیار مهم است. برای بیان نحوه عملکرد خوب یک محصول از بعضی مشخصه های قابل اندازه گیری استفاده می شود که بطور کلی بعنوان شاخص کیفیت هستند. در



شکل ۱. تاثیر فرآیندهای ماشین کاری بر زبری سطح (الف) زمان خاموشی پالس، (ب) زمان روشنایی پالس، (ج) توان دستگاه (انرژی تخلیه)، (د) سرعت پیشروی دستگاه، (ه) سرعت تغذیه سیم.

مقادیر شدت جریان (توان دستگاه)، باعث پارگی سیم خواهد شد. مقدار شدت جریان رابطه نزدیکی با زبری سطح دارد.

شکل ۱-ب اثر پارامتر زمان روشنایی بر زبری سطح را نشان می دهد. با افزایش زمان روشنایی زبری سطح هم افزایش می یابد که بدین جهت می باشد که با افزایش زمان روشنایی جرقه های تولیدی افزایش یافته و دهانه های آتش فشانی بر روی سطح کار افزایش می یابد. در اثر این جرقه های تولیدی حفره های بزرگتری از تبخیر و ذوب مواد ایجاد می گردد که منجر به زبری سطح می گردد. اگر زمان روشنایی پالس خیلی کم باشد براده به خوبی از سطح قطعه کار جدا نمی شود و کیفیت سطح خوبی حاصل نمی شود.

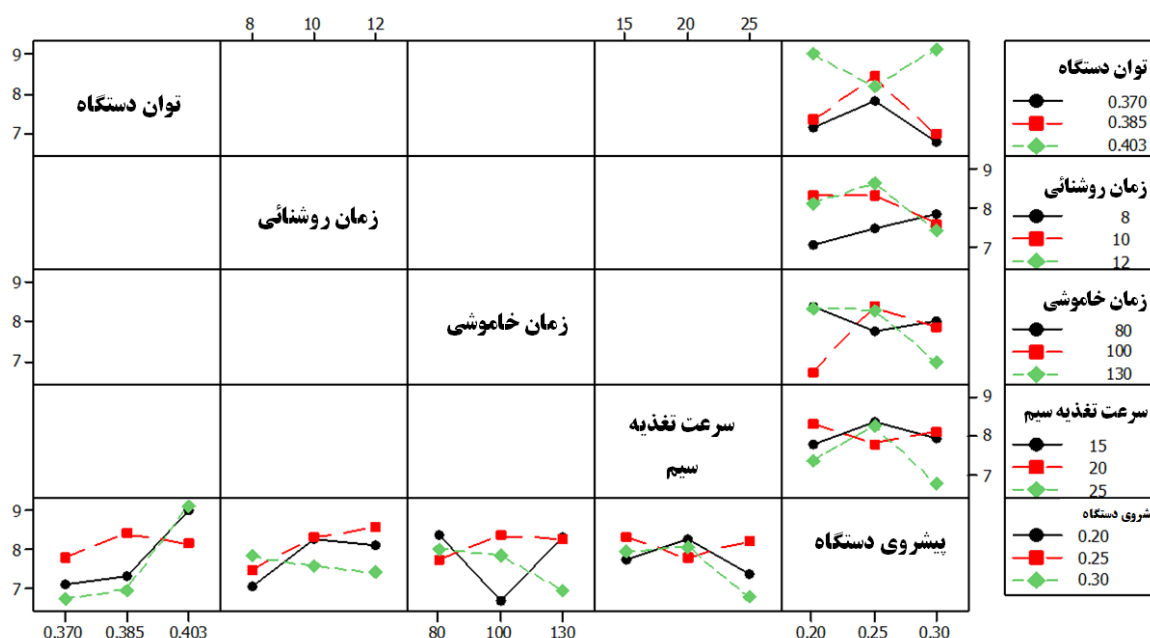
شکل (۱) تاثیر پارامترهای ماشین کاری بر روی زبری سطح را نشان می دهد. در آزمایش به روش تاگوچی هرچه نتایج بدست آمده برای زبری سطح کمتر باشد حالت بهینه می باشد. مطابق با شکل (۱) مشاهده می گردد که هر پنج پارامتر فرآیند تحقیق بر روی زبری تأثیر مهمی دارند که در تطابق با نتایج گزارش شده است [۱، ۲، ۷، ۸، ۱۲-۱۵]. شکل ۱-الف اثر پارامتر شدت جریان (توان دستگاه) بر زبری سطح را نشان می دهد. پارامتر شدت جریان مربوط به قدرت ژنراتور است که در ماشین و ایرکات قابل تنظیم می باشد. در مقادیر بالاتر جرقه هایی پر حرارت تر، بزرگتر و طولانی تر اتفاق می افتد. در نتیجه، براده برداری به طور مؤثرتری صورت می پذیرد و سرعت ماشین کاری بالاتر خواهد بود. اما افزایش بیش از اندازه

می‌بخشد و منجر به کاهش زبری سطح می‌شود. اگر زمان خاموشی پالس خیلی کوتاه باشد گپ موجود به اندازه کافی تمیز نخواهد شد. همچنین کوتاه بودن زمان خاموشی باعث ایجاد اتصال کوتاه بین قطعه کار و سیم و

شکل ۱- ج اثر پارامتر زمان خاموشی پالس را بر زبری سطح نشان می‌دهد. افزایش پارامتر زمان خاموشی پالس منجر به کاهش زبری سطح می‌گردد و این مورد هم بدان علت می‌باشد که افزایش زمان خاموشی منجر به افزایش شستشوی گپ تنظیمی می‌گردد که کاهش دما بر روی سطح قطعه کار را به دنبال دارد و صافی سطح را بهبود

جدول ۵. مقدار بهینه سیگنال به نویز در حالت زبری سطح

S/N	متوسط	توان دستگاه (انرژی تخلیه)	زمان روشنایی پالس	زمان خاموشی پالس	سرعت تغذیه سیم	سرعت پیشروی دستگاه
-۱۷/۲۹۶۱	۷/۳۲۵۶	۰/۳۷	۸	۸۰	۱۵	۰/۲



شکل ۲. اثر متقابل پارامترهای موثر در برشکاری بر میزان زبری سطح

در سیم و تولید جرقه‌های نامطلوب می‌گردد که باعث افزایش زبری سطح می‌شود. سرعت کم سیم نیز منجر به افزایش احتمال پارگی سیم و نیز مخروطی شکل شدن قطعه‌کار می‌شود.

جدول ۵ مقدار بهینه سیگنال به نویز در حالت زبری سطح را نشان می‌دهد. طبق جدول ۵ اعداد بهینه برای سیگنال به نویز (-۱۷/۲۹۶۱) و برای زبری سطح (۷/۳۲۵۶) می‌باشد که این اعداد در شدت جریان ۰/۳۷ ژول و زمان روشنایی پالس ۸ میکرو ثانیه، زمان خاموشی پالس ۸۰

عدم خنک‌کاری مناسب بین دو سیکل و نهایتاً افزایش احتمال پارگی سیم خواهد شد. شکل ۱- د اثر پارامتر نرخ پیشروی بر زبری سطح را نشان می‌دهد. افزایش نرخ پیشروی منجر به افزایش زبری سطح می‌گردد. در هر فرآیند ماشین‌کاری افزایش نرخ پیشروی منجر به سطح نامطلوب می‌شود و در این فرآیند هم‌صادق می‌باشد. شکل ۱- ه اثر پارامتر سرعت تغذیه سیم بر زبری سطح را نشان می‌دهد. افزایش سرعت تغذیه سیم، باعث زبری سطح می‌شود. سرعت تغذیه سیم بالاتر منجر به نوسانات

شکل ۲ نمودار اثر برهم‌کنش فاکتورهای فرآیند جهت زبری سطح را نشان می‌دهد. هرگاه خطوط مربوط به این فاکتورها به حالت موازی باشند، برهم‌کنش قابل ملاحظه‌ای بین فاکتورها وجود ندارد و هر چقدر زاویه بین این دو خطوط از هم بیشتر باشد.

میکرو ثانیه، سرعت تغذیه سیم ۱۵متر بر دقیقه و سرعت پیشروی ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه بدست آمده است.

اثرات برهم‌کنش فاکتورهای فرآیند بر روی زبری سطح

جدول ۶. تفسیر آنالیز واریانس و ضرایب تاثیر گذاری پارامترها بر روی زبری سطح

مدل	دامنه R	مجدور دامنه R	مجدور دامنه تعدیل شده	برآورد خطای انحراف معیار	تغییر آمار				دوربین واتسون	
					تغییرات مجدور دامنه R	تغییرات درجه آزادی F	درجه آزادی ۱	درجه آزادی ۲		
۱	۰/۶۲۴	۰/۳۸۹	۰/۲۴۳	۱/۰۴۲۱۹	۰/۳۸۹	۲/۶۷۳	۵	۲۱	۰/۵۱	۲/۳۱۶

جدول ۷. آنالیز واریانس یک طرفه

مدل	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	آزمون F	آزمون t
رگرسیون	۱۴/۵۱۶	۵	۲/۹۰۳	۲/۶۷۳	۰/۵۱
باقی مانده	۲۲/۸۰۹	۲۱	۱/۰۸۶		
جمع	۳۷/۳۲۶	۲۶			

۰/۰۵ معنادار است. (در سطح ۰/۱ کاملاً معنادار است) آزمون F معناداری مدل رگرسیون خطی را نشان می‌دهد ولی نمی‌توان از نتیجه این آزمون دریافت که کدام یک از متغیرهای مستقل با متغیر وابسته رابطه معنی داری دارند. به همین خاطر ضروری است آزمون t را انجام دهیم. آزمون t نشان می‌دهد کدامیک از متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته تاثیر (هم جهت یا غیرهم جهت) دارند.

جدول ۸ ضرائب آنالیز واریانس را نشان می‌دهد. در ستون آخر مشاهده می‌شود که فقط متغیر توان دستگاه (انرژی تخلیه) با متغیر وابسته رابطه معنی داری دارد. به عبارتی سایر متغیرهای مستقل تاثیر معناداری بر متغیر وابسته ندارند. عرض از مبدا مدل نیز معنادار نیست؛ به عبارتی معادله خط رگرسیونی از مبدا مختصات شروع می‌شود. در نهایت معادله رگرسیون به صورت رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$(1)$$

یعنی اینکه برهم‌کنش شدیدتر بین آن دو فاکتور وجود دارد. با بررسی شکل ۳ مشخص می‌شود که همه برهم‌کنش‌های پارامترهای فرآیند تأثیر مهمی بر زبری سطح دارند که برای بررسی دقیق‌تر از تجزیه و تحلیل واریانس استفاده می‌گردد.

تحلیل آنالیز واریانس

پس از آنکه آنالیز داده‌های زبری سطح در نرم افزار مینی تب (Minitab) انجام شد، در قسمت خروجی نرم‌افزار، تفاسیر مربوط به آنالیز واریانس و ضرایب تأثیر گذاری پارامترها را بر روی زبری سطح مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در جدول (۶) آنالیز واریانس مربوط به داده‌های فرآیند گزارش شده است. جدول ۷ نتایج آنالیز واریانس یک طرفه را نشان می‌دهد. چون سطح معنی داری حدود ۰/۰۵ است می‌توان گفت آزمون معنی داری مدل رگرسیونی در سطح

معنادار است (۴۷/۹۷۳) می‌توان نتیجه گرفت ارتباط توان دستگاه (انرژی تخلیه) و متغیر وابسته R_a معنادار و هم جهت است. به عبارتی افزایش توان دستگاه (انرژی تخلیه) منجر به افزایش R_a خواهد شد.

$$R_a = 47/973 A + 0/149 B - 0/003 C - 0/055 D - 1/956 E$$

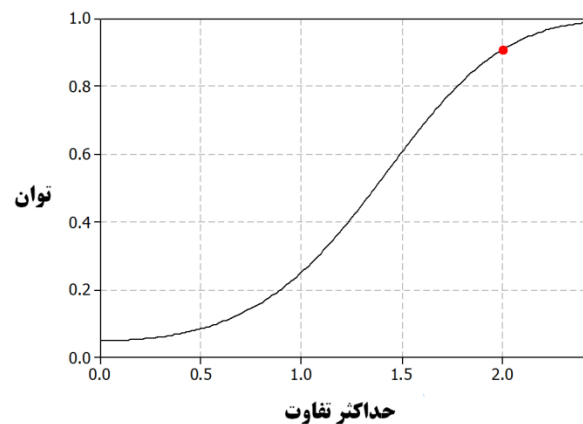
که در آن R_a متغیر وابسته، A توان دستگاه (انرژی تخلیه)، B زمان روشنایی پالس، C زمان خاموشی پالس، D سرعت تغذیه سیم و E سرعت پیشروی دستگاه است. با توجه به آنکه ضریب بتا در متغیر توان دستگاه مثبت و

جدول ۸. ضرائب آنالیز واریانس

مدل	ضرایب غیراستاندارد		ضرایب استاندارد	آزمون t	آزمون f
	ضریب بتا	انحراف معیار	ضریب بتا		
ثابت	-۱۰/۲۷۴	۶/۱۶۲		-۱/۶۶۷	۰/۱۱۰
توان دستگاه (انرژی تخلیه)	۴۷/۹۷۳	۱۴/۸۶۷	۰/۵۵۰	۳/۲۲۷	۰/۰۰۴
زمان روشنایی پالس	۰/۱۴۹	۰/۱۲۳	۰/۲۰۷	۱/۲۱۲	۰/۲۳۹
زمان خاموشی پالس	-۰/۰۰۳	۰/۰۱۰	-۰/۰۴۷	-۰/۲۷۷	۰/۷۸۵
سرعت تغذیه سیم	-۰/۰۵۵	۰/۰۴۹	-۰/۱۹۱	-۱/۱۱۷	۰/۲۷۷
سرعت پیشروی دستگاه	-۱/۹۵۶	۴/۹۱۳	-۰/۰۶۸	-۰/۳۹۸	۰/۶۹۵

یافته زبری سطح را نشان می‌دهد. شکل ۴- الف نمودار احتمال نرمال باقی مانده‌ها است این نمودارها دارای توزیع نرمال مقادیر در امتداد خط راست و پراکندگی کم هستند که مؤید کیفیت خوب مدل برازش شده می‌باشند. در نمودار normal probability plot هر چقدر نقاط مشخص شده حول خط قرمز رنگ نزدیک‌تر باشد و خارج از آن نباشد، اصطلاحاً نرمال بودن آن را نشان می‌دهد. این نمودار از حالت ایده آلی برخوردار است. شکل ۴- ب ثابت بودن واریانس‌ها را بررسی می‌کند و بیانگر این است که توزیع باقی مانده‌ها اتفاقی بوده و از روند خاصی پیروی نمی‌کند. شکل ۴- ج هیستوگرام باقی مانده‌ها را نشان می‌دهد که بیانگر این می‌باشد که داده‌های حاصل از داده‌های نرمال پیروی می‌کند و در حد قابل قبولی دارای پراکندگی نرمال است. شکل ۴- د نشان می‌دهد تمام باقی مانده‌ها استاندارد در بازه مناسبی قرار دارند.

نمودار بررسی ثابت بودن واریانس‌ها استقلال داده‌ها را نسبت به زمان بررسی می‌کند و از روند خاصی نباید



شکل ۳. نمودار تایید تحلیل آنالیز واریانس.

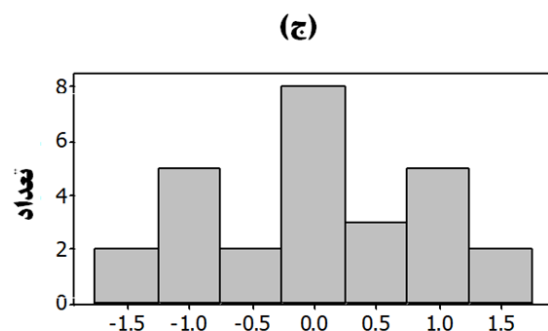
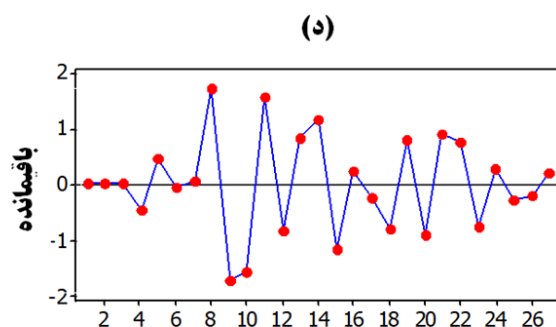
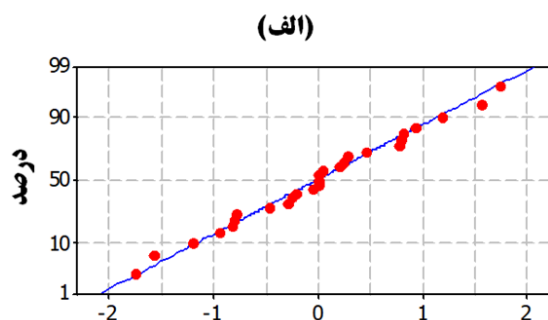
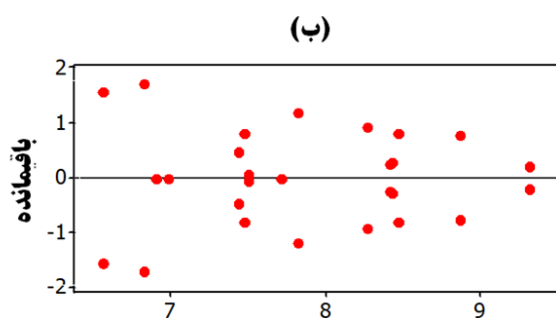
شکل ۳ نمودار تایید تحلیل آنالیز واریانس را نشان می‌دهد. با توجه به تحلیل آنالیز واریانس و مقدار آلفا که ۵ درصد می‌باشد، نقطه قرمز روی نمودار تایید می‌نماید که مدل از سطح قابل قبول ۹۵ درصدی برخوردار است.

نمودار باقی مانده‌ها

شکل ۴، نمودارهای باقی مانده برای مدل درجه ۲ تعدیل

فهمید که تمام پارامترها و متغیرها در کیفیت سطح تاثیر گذار می‌باشند و نقش مهمی را در کیفیت سطح ایفا می‌کنند.

پیروی کند. با بررسی نمودارهای شکل ۴ مشخص گردید که مدلی که انتخاب گردیده است از کفایت قابل قبولی برخوردار می‌باشد. همچنین از تحلیل نمودار می‌توان



شکل ۴. نمودار باقی مانده‌ها با هدف بررسی زیری سطح: (الف) نمودار احتمال نرمال باقی مانده‌ها، (ب) نمودار بررسی ثابت بودن واریانس‌ها، (ج) نمودار هیستوگرام باقی مانده‌ها، (د) نمودار بررسی بازه باقیمانده‌ها

پاسخ فرآیند زبری سطح دارند.

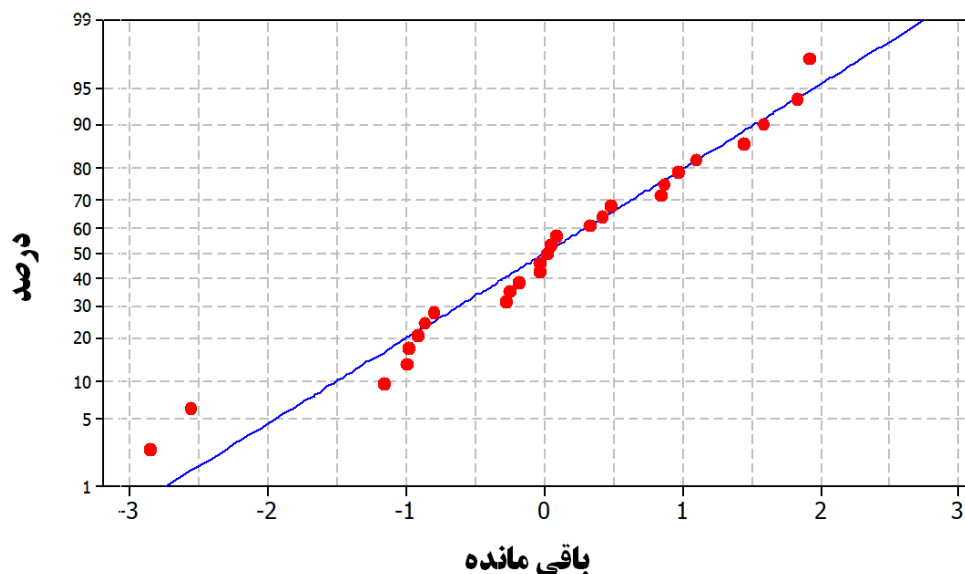
بررسی کفایت مدل

شکل ۶ نمودار هیستوگرام پاسخ سطح را نشان می‌دهد. با بررسی نمودارهای کفایت مدل جهت پاسخ فرآیند که همان زبری سطح می‌باشد مشخص گردید که در نمودار هیستوگرام هر پخش باقیمانده‌ها به گونه ای می‌باشد که حالت قوس بودن را حفظ کند. این امر بیانگر این است که داده‌های حاصل از داده‌های نرمال پیروی می‌کند. برای بررسی کفایت مدل از نمودارهای باقیمانده یا Residual استفاده می‌گردد که نرم افزار مینی تب قابلیت بررسی فرض‌های کفایت مدل را به صورت یکجا دارد. نمودارهای هیستوگرام، نمودارهای باقیمانده و تجزیه و تحلیل آنالیز واریانس نشان می‌دهند که مدل انتخابی

نمودار نرمال پلات (normal plot)

شکل ۵ نمودار نرمال پلات را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نرم‌افزار یک خط را به عنوان base line ترسیم نموده است که هر چقدر پارامترها و برهم کنش‌ها به این خط نزدیکتر باشند در واقع اثرات آن روی فرآیند کمتر و هرچقدر دورتر باشند اثرات آن روی فرآیند بیشتر می‌باشند. در این پژوهش بیشترین تأثیر به ترتیب پارامترهای نرخ پیشروی، برهم کنش (زمان روشنایی، زمان خاموشی و سرعت تغذیه سیم)، برهم کنش (زمان روشنایی و سرعت تغذیه سیم)، برهم کنش (زمان روشنایی و نرخ پیشروی) و برهم کنش (نرخ پیشروی و سرعت تغذیه سیم) را در

جهت زبری سطح از کفایت قابل قبولی برخوردار می باشد.



شکل ۵. نمودار نرمال پلات جهت زبری سطح.

نتیجه گیری

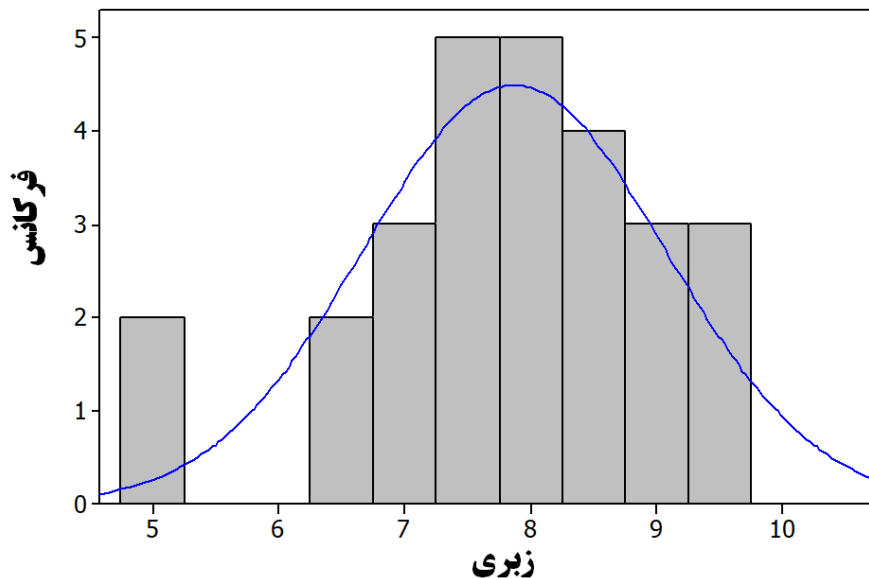
۱. با استفاده از طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی حداقل زبری سطح مقدار $4/97 \mu\text{m}$ و حداکثر زبری سطح مقدار $9/65 \mu\text{m}$ بدست آمده است
۲. پارامترهای زمان روشنایی، نرخ پیشروی و سرعت تغذیه سیم منجر به افزایش زبری سطح می‌گردد و با افزایش زمان خاموشی زبری سطح کاهش می‌یابد.
۳. با آنالیز پراکندگی غلظت عناصر آلیاژی بر روی سطح مشخص گردید که سطح با حداکثر زبری سطح علاوه بر اینکه نسبت به تنش‌ها و عوامل مکانیکی حساس می‌باشد، نسبت به عوامل شیمیایی هم از مقاومت کمتری برخوردار است.

۴. اعداد بهینه برای سیگنال به نویز (-17.2961) و برای زبری سطح (7.32556) می‌باشد که این اعداد در شدت جریان $0/37$ ژول، و زمان روشنایی پالس 8 میکرو ثانیه، زمان خاموشی پالس 80 میکرو ثانیه، سرعت تغذیه سیم 15 متر بر دقیقه و سرعت پیشروی $0/2$ میلیمتر بر دقیقه

در این پژوهش، تأثیر پارامترهای فرآیند ماشین‌کاری وایرکات بر روی کیفیت سطح سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ بررسی شد و برای نخستین بار ماشین‌کاری روش وایرکات با خنک‌کنندگی آب صابون به روش پاششی انجام شد. پارامترهای تنظیمی مورد بررسی شدت جریان، زمان روشنایی پالس، زمان خاموشی پالس، نرخ پیشروی و سرعت تغذیه سیم بود. نرخ برداشت براده، زبری و سلامت سطح مشخصه خروجی مهم این فرآیند بود. از دو روش طراحی عاملی تاگوچی و طراحی آزمایش (DOE) برای تعیین تأثیر پارامترها بر عملکرد خروجی وایرکات استفاده شد. با توجه به نتایج بدست آمده بر مبنای مطالعات انجام شده و آزمایش‌های تجربی، حالت بهینه برای زبری سطح حالتی است که اعداد بدست آمده کمترین مقدار ممکن باشد. حالت بهینه برای نرخ براده برداری حالتی است که اعداد بدست آمده بیشترین مقدار باشد. نتایج حاصل از این مطالعه عبارتند از:

بدست آمده است. اقتصادی تر بوده و نواقص دستگاه‌های قبلی مرتفع گردیده است.

۵. ماشین‌کاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به روش وایرکات با خنک‌کنندگی آب صابون به روش پاششی نسبت به روش غوطه‌وری داخل مایع دی‌الکتریک (آب مقطر)



شکل ۶. نمودار هیستوگرام جهت پاسخ سطح.

کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران *ICME 2010*، ۱۲-۱۰ اسفند ماه (۱۳۸۸).

۶. ح. آبیاری فیروزآبادی، ا. عبدالله، ج. پرویزیان، "تحلیل اثر متغیرهای خشن‌کاری وایرکات بر پهنای شیار و گپ ماشین‌کاری مسیر مستقیم و قوس گوشه"، ۳۲-۲۱ (۱۳۹۴) (۲) ۴۷.

7. A. Saha & S. C. Mondal, *Statistical Analysis and Optimization of Process Parameters in Wire Cut Machining of Welded Nanostructured Hardfacing Material*. Silicon, (2018) 1-14.

8. M. SreenivasaRao & N Venkaiah, *Experimental investigations on surface integrity issues of Inconel-690 during wire-cut electrical discharge machining process*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 232(4) (2018) 731-741.

9. A.Kumar, H.Mishra, K. Vivekananda & K. P. Maity, *Multi-Objective Optimization of Wire Electrical Discharge Machining Process*

نمودارهای هیستوگرام، نمودارهای باقیمانده و تجزیه و تحلیل آنالیز واریانس نشان می‌دهند که مدل انتخابی جهت زبری سطح از کفایت قابل قبولی برخوردار می‌باشد.

مراجع

1. W. Grzesik, *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*. Elsevier, (2008).

2. V. K Jain, *Advanced machining processes*. Allied publishers, (2009).

3. A. Goyal, *Study on Machining of Super Alloy Using Wire Cut Electrical Discharge Machining WEDM*, (2017).

4. D. Khan, H. Goswami & V. Somkuwar, *Process Parameter Optimization of Die Sinking EDM: A Review*, (2018).

۵. ف. کلاهان، م. صادقی اول شهر، ا. اسماعیل زاده، "مدل سازی و بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری وایرکات فولاد سردکار ۲۶۰۱ با استفاده از الگوریتم جستجوگر ممنوعه" دهمین

Parameter on Inconel 718. Materials Today: Proceedings, 4(2) (2017) 2137-2146.

10. L. Li, Y. B. Guo, X. T. Wei, & W. Li, *Surface integrity characteristics in wire-EDM of Inconel 718 at different discharge energy*. Procedia CirP, 6 (2013) 220-225.

11. D. Sari, D. Welling, C.Löpenhaus, F. Klocke, & A. Klink, *Adjusting surface integrity of gears using wire EDM to increase the flank load carrying capacity*. Procedia CIRP, 45(2016) 295-298.

12. I. Maher, A. A. Sarhan, M. M. Barzani, & M. Hamdi, *Increasing the productivity of the wire-cut electrical discharge machine associated with sustainable production*. Journal of Cleaner Production, 108 (2015) 247-255.

۱۳. ف. کلاهان، ع. نیکروان، م. بیرون رو، تعیین تاثیرات پارامترهای تنظیمی در نرخ پیشروی و زبری سطح ماشینکاری وایرکات آلیاژ *TI-6AL-4V* بکمک مدلسازی ریاضی، نهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، ۱۵-۱۳ اسفند (۱۳۸۷).

14. D. De, T. Nandi, & A. Bandyopadhyay, *Analysis of machining parameters for wire cut electrical discharge machining of pure titanium using response surface methodology*. Materials Today: Proceedings, 5(2) (2018) 5374-5383.

۱۵. ح. رمضی، ن. نهضت، ع. ف. تهرانی، بررسی تاثیر پارامترهای ماشینکاری وایرکات بر زبری سطح و نرخ براده برداری حجمی فولاد ابزار. سردکار ۲۶۰۱، چهاردهمین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک ایران. ۲۷-۲۵ اردیبهشت (۱۳۸۵).

16. G.Taguchi, S. Chowdhury, & Y. Wu, *Taguchi's quality engineering handbook*, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1736 (2005).