The 1st National Conference Of Applied Mechanics

October 2014
Tabriz, Iran

واحد تبریز
دانشکده مهندسی مکانیک

اولین کنفرانس ملی مکانیک کاربردی

۳۰ - ۲۹ مهرماه ۱۳۹۳

گواهی ارائه مقاله

بدینوسیله گواهی می شود مقاله مولفین

مسعود آزادی مقدم، فرهاد کلاهان، فرید ایلچی و رحیم نریمانی

با عنوان

به کارگیری رویکرد تاگوچی و روشهای آماری در بهینه سازی فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸

در **اولین کنفرانس ملی مکانیک کاربردی** پذیرفته و ارائه شده است.

کمیته علمی کنفرانس از شرکت و ارائه مقاله توسط نویسندگان قدردانی نموده و آرزومند توفیق روز افزون ایشان در پیشبرد علم و فناوری کشور عزیزمان ایران می باشد.

دکتر علی رضایی	دکتر رقیه مطلب زاده	دکتر کامیار زمزمیان
رئیس دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز	رئیس کنفرانس	دبیر علمی کنفرانس

طرح: عمارت طرح و نقش / ۰۴۱ ۳۳۳۱ ۷۴۶۲

اولین همایش ملی مکانیک کاربردی

۲۹ و ۳۰ مهر ۱۳۹۳، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز

بکارگیری رویکرد تاگوچی و روش‌های آماری در بهینه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سوپرآلیاژ اینکونل۷۱۸

مسعود آزادی مقدم[۱*] ، فرهادکلاهان [۲]، فرید ایلچی[۳]، رحیم نریمانی[۳]

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد[۱]

دانشیار گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد [۲]

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری[۳]

چکیده :

فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی یکی از پرکاربردترین روش‌های ماشین‌کاری قطعات هادی جریان الکتریسیته است. در این روش سختی قطعه‌کار بر سرعت ماشین‌کاری تاثیری ندارد، بنابراین از این روش می‌توان در ساخت انواع قالب‌ها و ماشین‌کاری مواد سخت نظیر سوپرآلیاژها استفاده نمود. نرخ برداشت ماده و کیفیت سطح قطعات تولیدی از جمله خروجی‌های مهم در این فرآیند هستند. هدف اصلی در این مقاله، بررسی نوع و میزان تاثیر پارامترهای تنظیمی و تعیین سطوح بهینه آنها در ماشین‌کاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ می‌باشد. پارامترهای تنظیمی شامل ولتاژ گپ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و فاکتور کار هستند. به منظور گردآوری داده‌های تجربی از طرح تاگوچی در رویکرد طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است. پس از انجام آزمایشات و اندازه‌گیری خروجی‌ها، با استناد به تحلیل‌های آماری میزان تاثیر پارامترهای تنظیمی بر هریک از مشخصه‌های خروجی تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که شدت جریان بیشترین تاثیر را بر کیفیت سطح و نرخ برداشت ماده دارد. در همین راستا، با استفاده از روش نسبت سیگنال به نویز، سطوح بهینه پارامترها به منظور بیشینه کردن نرخ برداشت براده و کمینه کردن زبری سطح تعیین شده‌اند. نتایج بهینه سازی این تحقیق با آزمایشات تجربی مقایسه شده و تطابق خوبی را نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی : ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، بهینه‌سازی، روش تاگوچی، نسبت سیگنال به نویز، سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸.

۱- مقدمه

امروزه در صنایع تولیدی معرفی آلیاژهای جدید و همچنین نیاز به تولید اشکال پیچیده، محدودیت‌های استفاده از روش‌های سنتی ماشین‌کاری را بیشتر کرده است. بنابراین استفاده از روش‌های ماشین‌کاری مخصوص همچون ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی[1] روز به روز در حال گسترش است [۱]. فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی یک فرآیند پیشرفته ماشین‌کاری ترموالکتریکی است که در آن بر اثر جرقه‌های تولید شده تخلیه الکتریکی بین قطعه کار و ابزار عمل براده برداری صورت می‌گیرد. در این روش قطعه کار و ابزار در سیال دی الکتریک غوطه‌ور بوده و تخلیه الکتریکی باعث ذوب و تبخیر قسمتی کوچک از قطعه کار شده که بوسیله سیال دی الکتریک از محدوده ماشین‌کاری دور می‌شود. امکان ایجاد اشکال پیچیده و دقیق، امکان ماشین‌کاری قطعات نازک و شکننده به دلیل عدم تماس مکانیکی بین قطعه کار و عدم نیاز به حضور مداوم اپراتور حین براده برداری و عدم تاثیر سختی قطعه کار بر روی سرعت ماشین‌کاری، از جمله مزایای این روش است [۲-۵]. بنابراین این روش گزینه مناسبی جهت تولید قطعات دقیق و پیچیده مانند قالب‌ها و همچنین ماشین‌کاری آلیاژهای سخت و مقاوم از جمله سوپرآلیاژ اینکونل است.

بااین‌حال ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی روشی زمان‌بر بوده و نرخ براده‌برداری در آن بسیار پایین است. از طرفی دقت ابعادی و صافی سطح در قطعات تولیدی با این روش معولا از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین، نرخ براده برداری[2] و صافی سطح[3] قطعه کار از جمله مهم‌ترین مشخصه‌های خروجی در این روش است. این خروجی‌ها بنوبه خود تحت تاثیر مقادیر پارامترهای تنظیمی فرآیند، از جمله ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و فاکتور روی کار، قرار دارند [۱].

در این رابطه، مطالعات گسترده‌ای در زمینه بررسی تاثیر متغییرهای ماشین‌کاری و تعیین مقادیر بهینه آنها در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی انجام یافته است.

گوپالاکان[4] و همکاران [۶] با استفاده از روش تاگوچی و تحلیل انحراف از معیار، تاثیر هر یک از پارامترهای ورودی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (ولتاژ، جریان،زمان روشنی و خاموشی پالس) را بر روی نرخ برداشت براده، نرخ خوردگی ابزار و کیفیت سطح بررسی کرده اند. همچنین مشخص شد که شدت جریان و روشنی پالس بیشترین تاثیر را بر خروجی‌ها دارند، بدین ترتیب که با افزایش شدت جریان، نرخ برداشت براده ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. همچنین با افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس، کیفیت سطح افزایش می یابد.

1. Electro Discharge Machining (EDM)
2. Material Removal Rate (MRR)
3. Surface Roughness (SR)
4 S. Gopalakannan

همان‌طور که ذکر شد، یکی از کاربردهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی شکل‌دهی مواد سخت با قابلیت براده‌برداری پایین است. در این راستا، بررسی مولفین نشان می‌دهد که تاکنون در مورد چگونگی تاثیر پارامترهای تنظیمی در ماشین‌کاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به روش تخلیه الکتریکی و تعیین مقادیر بهینه آن-ها، تحقیقی صورت نگرفته است. بنابراین هدف اصلی این پژوهش، بررسی میزان تاثیر پارامترهای تنظیمی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح و تعیین سطوح بهینه آنها برای سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ می‌باشد. در این راستا، از رویکرد طراحی آزمایشات و تحلیل تاگوچی بر روی داده‌های تجربی استفاده شده است.

آلیاژ اینکونل ۷۱۸، از خانواده سوپر آلیاژهای پایه نیکل با چگالی ۸/۱۹ گرم بر سانتیمترمکعب، تنش کششی ۱۲۴۰ مگاپاسکال و سختی معادل۴۳ راکول سی است. ترکیب شیمیایی این آلیاژ بر حسب درصد وزنی عناصر مهم آن در جدول ۱ آورده شده است [۵]. قابلیت‌های منحصر بفرد این آلیاژ از جمله حفظ خواص مکانیکی خود در دماهای بالا، باعث فزایش روزافزون کاربردهای این آلیاژ را در صنایعی همچون نیروگاهی، نفت و گاز و هوا- فضا شده است. از طرفی به دلیل سختی و استحکام بالای این آلیاژ، ماشین‌کاری آن به روش‌های سنتی دارای محدودیت‌هایی است، بنابراین ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی می‌تواند به‌عنوان یک روش کارآمد در شکل‌دهی قطعات از جنس این آلیاژ باشد.

جدول۱: ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ بر حسب درصد وزنی

درصد وزنی	عنصر آلیاژی
۵۴/۴۸	Ni
۱۷/۵	Cr
۴/۹	Nb
۰/۶۶	Al
۰/۹۶	Ti
متعادل	Fe و سایر عناصر

تحقیقات نشان می‌دهد که زمان روشنی پالس، زمان یا فاکتور روی کار[۵]، ولتاژ مدار باز و شدت جریان تخلیه موثرترین یارامترهای ماشین‌کاری در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی می‌باشند [۷-۳]. بنابراین در تحقیق حاضر نیز این پارامترها به عنوان متغیرهای ورودی انتخاب شده‌اند.

در این تحقیق، برای به دست آوردن بازه (حدود بالا و پایین) مناسب تغییرات پارامترهای تنظیمی تعدادی آزمایشات اولیه انجام گرفت. با توجه به آزمایشات انجام شده و ویژگی‌های دستگاه مورد استفاده، نهایتاً مقادیر گزارش شده در جدول ۲ به عنوان سطوح هر فاکتور در نظر گرفته شدند. ترکیب‌های مختلف این مقادیر براساس رویکرد طراحی آزمایشات در انجام تست‌های عملی مورد استفاده قرار گرفت.

5. Duty Factor

جدول۲: فاکتورها و سطوح مورد ارزیابی

علامت مشخصه	پارامترهای ورودی	واحد	سطوح		
			۱	۲	۳
I	جریان	آمپر	۱	۳	۵
T_{on}	زمان روشنی پالس	میکروثانیه	۳۵	۱۰۰	۲۰۰
η	فاکتور کار	ثانیه	۰/۴	۱	۱/۸
V	ولتاژ	ولت	۸۰	۲۰۰	---

۲- روش تاگوچی و طرح آزمایشات

روش‌های مهم در طراحی آزمایشات را می‌توان در دو گروه اصلی طرح‌های کامل[۶] و طرح‌های کسری مورد بررسی قرار داد. طرح عاملی کسری، مانند طرح تاگوچی، فقط بخشی از مجموع ترکیب‌های ممکن برای آزمایشات را استفاده می‌کنند. بدین ترتیب با انجام تعداد محدودی آزمایش، اطلاعات وسیعی از فرآیند مورد بررسی و اثرات متقابل پارامترهای اصلی آن را می‌توان بدست آورد. رویکرد تاگوچی از جمله روش‌های کارآمد عاملی کسری است که امکان ارزیابی تاثیر پارامترهای فرآیند و تعیین سطوح بهینه آنها را فراهم می‌کند [۷-۱۰]. بنابراین در پژوهش حاضر از این روش جهت طراحی آزمایشات عملی استفاده شده است.

همان‌طور که در قسمت قبل مطرح شد، در این تحقیق ۳ عامل سه سطحی و یک عامل دو سطحی وجود دارد. بدین ترتیب برای آزمایش کلیه حالات ممکن به انجام ۵۴ ($۲^{۱}\times۳^{۳}$) آزمایش احتیاج است. برای کاهش هزینه و زمان آزمایشات از طرح تاگوچی L_{18} استفاده گردید که تعداد آزمایشات مورد نیاز را به ۱۸ عدد کاهش می‌دهد.

۳- انجام آزمایشات و اخذ نتایج

برای انجام آزمایشات، از دستگاه اسپارک مدل آذرخش 304H ساخت شرکت تهران اکرام استفاده شد (شکل ۱). در تمام آزمایشات از نفت سفید به‌عنوان سیال دی الکتریک استفاده گردید.

نمونه‌ها از جنس آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به شکل استوانه با ضخامت ۴ و قطر ۵۰ میلیمتر توسط وایرکات برش خورده و دو سمت آنها پرداخت و کد گذاری شدند. همچنین الکترود ابزار از جنس مس با خلوص ۹۹/۹٪ و قطر ۱۴ میلیمتر انتخاب شدند (شکل ۱).

برای افزایش دقت، ترتیب انجام آزمایشات به صورت اتفاقی صورت گرفت. همچنین برای کاهش اثر شرایط الکترود در مقدار زبری سطح، پس از هر آزمایش سطح الکترودها مجددا پرداخت و ماشین‌کاری گردید. با این‌همه بعد از هر ۶ آزمایش الکترود تعویض گردید. زمان انجام هر آزمایش به طور متوسط ۵۰ دقیقه در نظر

6. Full Factorial

گرفته شده است. در تمام آزمایشات، به جز پارامترهای تحت کنترل، سایر پارامترهای قابل تنظیم دستگاه مانند زمان خاموشی پالس، فشار پاشش دی‌الکتریک و ... در مقادیر ثابتی تنظیم شده بودند.

شکل ۱: تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایشات

۳-۱- زبری سطح و اندازه‌گیری آن

یکی از مهم‌ترین معیار اندازه‌گیری کیفیت سطح، زبری سطح و به عبارت دیگر پروفیل و میزان پستی و بلندی‌های سطح می‌باشد. کیفیت سطح در فرآیندهای براده‌برداری، متاثر از پارامترهای ماشین‌کاری، نوع و پروفیل ابزار و سایر شرایط دستگاه می‌باشد[۹]. در اندازه‌گیری زبری سطح در این تحقیق، معیار متوسط ارتفاع پروفیل‌های سطح (Ra) انتخاب شده است. بدین منظور بعد از انجام هر آزمایش میزان زبری سطح توسط دستگاه زبری‌سنج مدل سورترونیک[۷] با دقت ۰/۰۱ میکرومتر در جهات مختلف سه بار اندازه‌گیری شده و میانگین آنها به عنوان عدد زبری مربوطه ثبت شد (شکل۱).

نرخ برداشت ماده مقدار ماده برداشته شده از قطعه کار در واحد زمان است. نرخ برداشت ماده، معیاری از سرعت ماشین‌کاری است که افزایش آن موجب کاهش زمان انجام کار می‌شود. بدین منظور ، از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم، ساخت شرکت A&D ژاپن استفاده گردید. نرخ برداشت ماده مطابق فرمول ۱ با تقسیم حجم ماده برداشته شده از قطعه کار بر مدت زمان ماشین‌کاری قابل محاسبه است [۲].

$$MRR = \frac{\text{wear weight of workpiece}}{\text{time of machining}} \qquad (۱)$$

جدول ۳، مقادیر سطوح پارامترهای ورودی و نتایج آزمایشات را، براساس معیارهای فوق نشان می‌دهد. در این جدول، بعد از ستون اول که معرف ترتیب انجام آزمایشات است، چهار ستون بعد نشان دهنده سطوح تنظیمی هر فاکتور در هر آزمایش (تیمار) است. دو ستون آخر نیز خروجی‌های اندازه‌گیری شده هستند. به عنوان مثال در این جدول مشخص می‌شود سطوح تنظیم شده در آزمایش شماره ۱۸، بیشترین نرخ برداشت

7. Surtronic

براده (۲۴/۵۶ میلی‌گرم بر دقیقه) را حاصل می‌کند. همچنین کمترین زبری سطح (معادل ۲/۷ میکرومتر) با تنظیم سطوح مطابق آزمایش ۱۲ بدست خواهد آمد.

جدول ۳: ماتریس آزمایشات و خروجی های اندازه‌گیری شده

ردیف	پارامترهای ورودی				خروجی ها	
	فاکتور کار	زمان روشنی پالس	آمپر	ولتاژ	نرخ براده برداری(mg/min)	زبری سطح (µm)
۱	۰/۴	۳۵	۱	۸۰	۰/۰۵	۲/۹۲
۲	۱	۱۰۰	۱	۸۰	۰/۳۵	۲/۹۲
۳	۱/۸	۲۰۰	۱	۸۰	۰/۵۸	۲/۸۶
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
۱۶	۱/۸	۳۵	۳	۲۰۰	۴/۴۳	۶/۰۳
۱۷	۰/۴	۱۰۰	۳	۲۰۰	۲/۷۵	۷/۶۷
۱۸	۱	۲۰۰	۳	۲۰۰	۲۴/۵۶	۱۲/۶۸

۴- تحلیل نتایج و تعیین سطوح بهینه پارامترها

هدف از این بخش، بررسی میزان و نحوه تاثیر پارامترهای ورودی یر خروجی‌های مدنظر و تعیین سطوح بهینه هر پارامتر به منظور اخذ خروجی‌های مطلوب است. در روش تاگوچی برای تعیین سطوح بهینه پارامترهای کنترلی از یک تابع زیان[8] استفاده می‌شود. این تابع با توجه به شرایط مسئله دارای حالت‌های مختلف است [۹].

در حالت اول، مقدار کوچک‌تر بهترین است. از آنجاکه در زبری سطح (SR) هر چه عدد مقدار زبری کوچک‌تر باشد، بهتر است بنابراین برای محاسبه تابع زیان از فرمول ۲ استفاده می‌شود.

$$SB = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i)^2 \qquad (۲)$$

اما در حالت دوم، مقدار بزرگتر بهترین است. در مورد نرخ براده برداری هر چه عدد مربوط به این خروجی بزرگ‌تر باشد، بهتر است، بنابراین مقدار تابع زیان توسط رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$LB = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{y_i}\right)^2 \qquad (۳)$$

8. Loss function

در روابط فوق، n تعداد تکرارهای هر آزمایش و y_i خروجی‌های اندازه گیری شده در هر آزمایش است. به دلیل اینکه در این تحقیق هر آزمایش فقط یک بار انجام شده است، مقدار n معادل یک است.

نسبت سیگنال به نویز[9] نشان‌دهنده‌ی حساسیت مشخصه‌ی کیفی مورد بررسی به فاکتورهای خارجی اثرگذار و غیر قابل کنترل (فاکتورهای اغتشاشی) در یک فرآیند کنترل شده می‌باشد. در هر آزمایش، با توجه به شکل توابع زیان، برای ایجاد بهترین شرایط همواره بزرگترین مقدار عددی نسبت سیگنال به نویز مطلوب است [۹]. مقدار سیگنال به نویز بالا نشان دهنده‌ی این است که اثر پارامترهای قابل کنترل بیشتر از اثر پارامترهای غیر قابل کنترل و یا پارامترهای اغتشاشی است. بنابراین، پس از محاسبه مقدار تابع زیان برای هر خروجی با استفاده از رابطه ۴ مقدار سیگنال به نویز کل محاسبه می‌شود:

$$S/N = -10 \times Log(L_i) \qquad (۴)$$

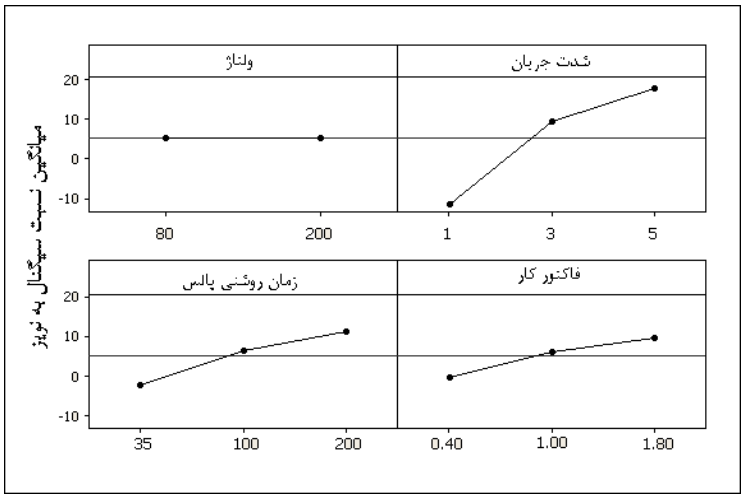
در این فرمول L_i مقدار تابع زیان محاسبه شده توسط فرمول‌های ۲ و ۳ برای هر آزمایش یا تیمار (i) است.

۴-۱- تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر نرخ براده‌برداری و زبری سطح

یکی از مزیت‌های روش سیگنال به نویز، امکان تعیین سطوح بهینه و میزان تاثیرگذاری هر پارامتر است. در نمودار تحلیل سیگنال به نویز، سطح دارای بالاترین مقدار متوسط سیگنال به نویز معادل بهترین سطح برای فاکتور مربوطه است. به عنوان نمونه، در نرخ براده‌برداری مطابق شکل ۲، سطوح بهینه هر فاکتور مشخص می-شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، برای افزایش نرخ براده‌برداری، سه پارامتر شدت جریان، زمان روشنی پالس و فاکتور کار باید در سطح بالای خود تنظیم شوند. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، تغییر مقدار ولتاژ تاثیر چندانی در نرخ براده‌برداری ندارد، اما بهتر است این پارامتر در سطح اول خود تنظیم شود.

یکی دیگر از مزایای روش سیگنال به نویز، محاسبه میزان تاثیر گذاری هر فاکتور در خروجی موردنظر است. بدین منظور از نتایج حاصل از تحلیل واریانس[10] داده‌های نرخ براده‌برداری (جدول ۴) استفاده می‌شود. در این جدول، درجه آزادی[11] برای هر یک از پارامترهای ورودی به صورت مجزا تعریف می شود که برابر تعداد سطوح آن منهای یک است. همچنین درجه آزادی کل، برابر تعداد آزمایش‌ها منهای یک و درجه آزادی خطا نیز برابر تفاضل درجه آزادی کل و مجموع درجات آزادی ورودی ها است. ستون آخر این جدول، نشان دهنده موثر بودن یا عدم تاثیر پارامترهای مورد آزمایش در سطح اطمینان مورد نظر (٪۹۵ $<$) می باشد. با توجه به مقدار آماره F در جدول ۴ نتیجه می‌شود که شدت جریان، زمان روشنی پالس و فاکتور کار به ترتیب بیشترین تاثیر را بر نرخ براده‌برداری دارند. مقدار آماره F برای ولتاژ مبین آنست که این پارامتر عملا بر نرخ براده‌برداری بی تاثیر است.

9. Signal to Noise Ratio (S/N)
10. Analysis of Variance (ANOVA)
11 .Degree of Freedom (DOF)



شکل ۲: نمودارهای تحلیل S/N برای نرخ براده برداری

جدول ۴: نتایج حاصل از تحلیل واریانس برای نرخ براده‌برداری

فاکتور	درجه آزادی	مجموع مربعات S/N	میانگین مربعات S/N	مقدار F
ولتاژ	۱	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۰۱
شدت جریان	۲	۲۷۰۸/۸۷	۱۳۵۴/۴۴	۹۹/۱۹
روشنی پالس	۲	۵۸۳/۲۳	۲۹۱/۶۱	۲۱/۳۶
فاکتور کار	۲	۳۰۶/۷۰	۱۵۳/۳۵	۱۱/۲۳
خطا	۱۰	۱۳۶/۵۵	۱۳/۶۵	----
مجموع	۱۷	۳۷۳۵/۵۰	----	----

ستون سوم این جدول معادل مجموع مربعات[12] نسبت سیگنال به نویز برای هر فاکتور است. مجموع این مقادیر نیز معادل مجموع مربعات کل[13] است. از تقسیم مجموع مربعات بر درجه آزادی فاکتور مورد نظر، میانگین مربعات[14] آن فاکتور قابل محاسبه است. حال می‌توان با استفاده از این مقادیر و رابطه ۵، درصد تاثیر هر فاکتور بر خروجی را محاسبه نمود [۸].

$$E(\%)=\frac{SS_i-(DoF_i\times MS_{error})}{SST} \qquad (۵)$$

شکل ۳ درصد تاثیر پارامترهای تنظیمی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی نرخ براده‌برداری برای سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ را نشان می‌دهد. پارامتر آماری درصد توزیع به درک بهتر تاثیر هر پارامتر نسبت به پارامترهای دیگر و نیز تاثیر بر روی خروجی کمک می کند. برای پارامترهای با درصد توزیع بالا تغییراتی هرچند کوچک باعث تاثیر زیادی بر خروجی می شود. در نرخ براده برداری شدت جریان با حدود ۷۳٪ و ولتاژ گپ با

12. Sum of Square
13. Total Sum of Square
14. Mean Square

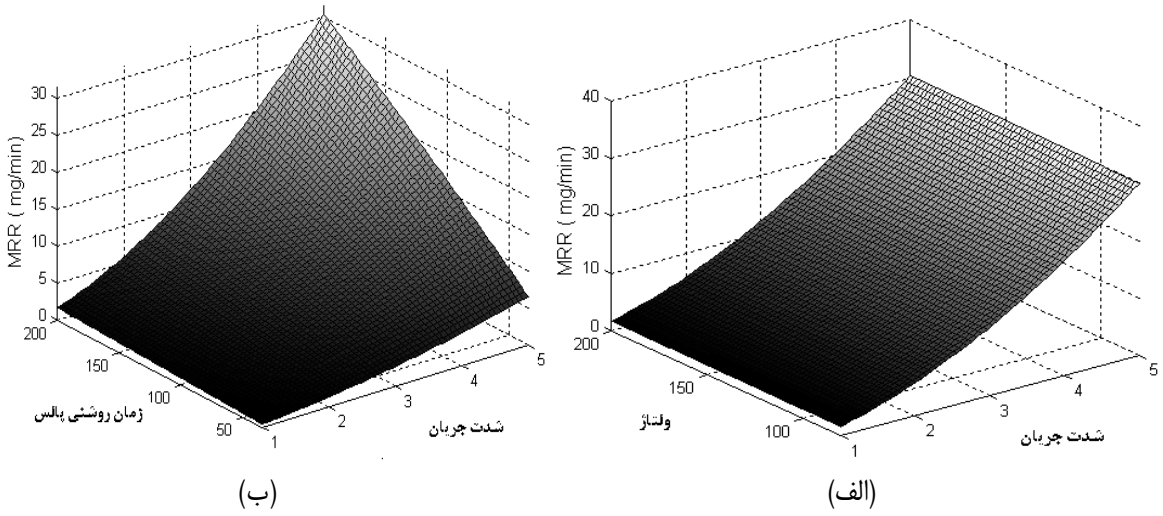
۰/۲٪، به ترتیب بیشترین و کمترین میزان تاثیر را دارا می‌باشند. در این میان سهم پارامترهای غیر قابل کنترل و خطاهای اندازه‌گیری حدود ۴٪ است.

دلیل تاثیر بالای شدت جریان و زمان روشنی پالس را می‌توان اینگونه توجیه کرد که با افزایش این دو پارامتر، میزان انرژی و تمرکز تخلیه در واحد زمان نیز بیشتر شده و احجام بزرگتری از قطعه‌کار ذوب و تبخیر می‌شوند، در نتیجه نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد.

در اکثر موارد، پارامترهای ورودی بصورت متقابل و هم‌زمان بر روی خروجی فرآیند تاثیر دارند. نمونه‌هایی از این تاثیرات در شکل ۴ نشان داده شده است. بعنوان مثال، شکل ۴ الف (تاثیر متقابل شدت جریان و ولتاژ) نشان می‌دهد که فاکتور ولتاژ تاثیری در نرخ براده برداری ندارد، اما با افزایش شدت جریان نرخ براده برداری بیشتر می‌شود. شکل ۴ ب نیز مبیین آن‌است که تاثیر شدت جریان بر نرخ براده برداری در زمان روشنی پالس بالا، بیشتر است. دلیل این امر می‌تواند افزایش زمان جرقه‌زنی برای ذوب و تبخیر سطح تحت ماشین‌کاری قطعه کار باشد.

سطوحی که توسط روش سیگنال به نویز به عنوان سطوح بهینه تعیین شده‌اند، در هیچ‌کدام از آزمایشات انجام شده قرار ندارند. بنابراین برای تائید این مقادیر آزمایش صحه‌گذاری انجام گردید. بدین منظور این سطوح بر روی دستگاه تنظیم و مقدار نرخ براده‌برداری برای این آزمایش بعد از ماشین‌کاری محاسبه شد. این مقدار واقعی باید با مقدار پیش‌بینی شده توسط تحلیل آماری مقایسه شود. در جدول ۵ نتیجه آزمایش صحه‌گذاری برای نرخ براده‌برداری آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بین دو مقدار واقعی و پیش‌بینی شده ۹٪ خطا وجود دارد. وجود این خطا به دلیل پارامترهای غیر قابل کنترل، دقت دستگاه و دقت وسایل اندازه‌گیری است. بااینحال با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی این مقدار خطا در حد قابل قبولی بنظر می‌رسد.

شکل ۳: نمودار درصد تاثیر هر فاکتور بر نرخ براده برداری



(الف) (ب)

شکل ۴: الف) نمودار تاثیر متقابل ولتاژ و شدت جریان بر روی نرخ برداشت براده (در η=1.8 و T=200)
ب) نمودار تاثیر متقابل زمان روشنی پالس و شدت جریان بر روی نرخ برداشت براده (در η=1.8 و V=200)

جدول ۵ : نتایج صحه گذاری برای نرخ براده برداری

خطا	پیش بینی تحلیل تاگوچی	مقدار آزمایش	سطوح بهینه
٪۹	۲۸/ ۲	۳۱/ ۱	$V_1 I_3 T_3 \eta_3$

به‌طور مشابه نتایج تحلیل داده‌های مربوط به زبری سطح نشان می‌دهد که برای افزایش کیفیت سطح، شدت جریان و زمان روشنی پالس باید در سطح اول خود و فاکتور کار در سطح دوم خود تنظیم شوند. ولتاژ نیز تاثیر چندانی بر این خروجی ندارد، اما سطح اول آن بهتر است. همچنین شدت جریان بیشترین تاثیر را بر صافی سطح دارد در حالیکه ولتاژ و فاکتور روی کار کمترین تاثیرات را بر روی این خروجی دارند. شدت جریان با بیش از ۸۲٪ و ولتاژ با ۲٪ به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را بر روی کیفیت سطح دارند. دلیل تاثیر بالای شدت جریان بر کیفیت سطح به این خاطر است که با کاهش شدت جریان، میزان انرژی جرقه تا حد زیادی کاهش یافته و قدرت براده برداری آن کم می‌شود. درنتیجه در هر پالس، مقدار کمتری از سطح قطعه‌کار ذوب و تبخیر می‌شود. بنابراین عمق حفره‌های سطحی کاهش می‌یابد و این به معنی کاهش زبری سطح است. تاثیر متقابل فاکتورها بر روی کیفیت سطح نشان داده شده. نتایج مربوط به تاثیر متقابل اثرات نشان می‌دهد که ولتاژ تاثیر چندانی در کیفیت سطح ندارد. اما با کاهش شدت جریان، کیفیت سطح بهبود می‌یابد. همچنین ملاحظه می-شود که کاهش همزمان شدت جریان و زمان روشنی پالس، زبری سطح را به شدت کاهش می‌هد.

سطوح بهینه‌ی و نتایج حاصل از انجام آزمایش صحه‌گذاری مربوط به زبری سطح در جدول ۶ آورده شده است.

جدول۶: نتایج صحه گذاری برای کیفیت سطح

خطا	پیش بینی تحلیل تاگوچی	مقدار آزمایش	سطوح پیش بینی شده
٪۶	۲/۳۳	۲/۴۸	$V_1\ I_1\ T_1\ \eta_2$

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تاثیر پارامترهای تنظیمی و تعیین سطوح بهینه آنها در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ مورد بررسی قرار گرفته است. آلیاژ مزبور دارای کاربردهای مختلف در قطعات حساس صنایع نیروگاهی، دفاعی و نفت و گاز است. سختی و استحکام بالای این آلیاژ، شکل‌دهی آن را چالش برانگیز نموده و بنابراین تعیین سطوح مناسب پارامترهای ماشین‌کاری آن دارای اهمیت خاصی است. در این راستا، چهار فاکتور ولتاژ مدار باز، شدت جریان، زمان روشنی پالس و فاکتور کار به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شدند. با توجه به شرایط دستگاه مورد استفاده و جنس قطعه کار، برای پارامتر ولتاژ دو سطح و برای سایر پارامترها سه سطح درنظر گرفته شد. نرخ برداشت ماده و زبری سطح به عنوان معیارهای سنجش کیفیت مد نظر قرار گرفتند. آزمایشات عملی بر اساس ماتریس L_{18} از طرح تاگوچی انجام یافت.

در مرحله بعد، با به کارگیری نتایج حاصل از آزمایشات عملی و براساس تحلیل سیگنال به نویز، میزان تاثیر هر یک از پارمترهای تنظیمی و همچنین سطوح بهینه پارامترهای فرآیند بمنظور بیشینه کرده نرخ برداشت ماده و کمینه کردن زبری سطح تعیین گردید. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که شدت جریان دارای بیشرین تاثیر بر هر دو مشخصه خروجی فرآیند می‌باشد در حالیکه پارامتر ولتاژ تاثیر چندانی در خروجی‌ها ندارد. دلیل تاثیر بالای شدت جریان و در مرحله بعد زمان روشنی پالس را می‌توان اینگونه توجیه کرد که با افزایش این دو پارامتر، تمرکز انرژی تخلیه در واحد زمان نیز بیشتر شده و احجام بزرگتری از قطعه‌کار ذوب و تبخیر می‌شود و در نتیجه نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد. همچنین برای داشتن بیشترین نرخ برداشت براده باید شدت جریان، زمان روشنی پالس و فاکتور کار می‌بایست در بالاترین سطوح خود تنظیم شوند. برای داشتن بهترین کیفیت سطح نیز باید شدت جریان و زمان روشنی پالس در سطوح پایین و فاکتور کار در سطح دوم خود تنظیم شوند. نتایج بهینه سازی با انجام آزمایشات مجدد صحه‌گذاری گردید. در این آزمایشات، خطای

پیش بینی نرخ برداشت براده حدود ۹٪ و اختلاف پیش بینی کیفیت سطح معادل ۶٪ بدست آمد. با توجه به وجود عدم قطعیت‌ها و پارامترهای غیرقابل کنترل در ماشینکاری تخلیه الکتریکی، این مقدار خطای پیش‌بینی در حد قابل قبولی به نظر می‌رسد.

لازم به ذکر است بهینه‌سازی چند هدفه این فرآیند توسط روش‌هایی مانند مدل‌سازی رگرسیونی و وزن-دهی پارامترهای خروجی، می‌تواند به عنوان یکی از موضوعات مفید در تحقیقات آینده مدنظر قرار گیرد. همچنین با ایجاد تغییرات جزئی، از رویکرد ارائه شده در این تحقیق می‌توان برای تحلیل و بهینه سازی سایر فرآیندهای تولیدی نیز استفاده نمود.

۶- منابع

[1] Y. Tzeng, F. Chen, "Multi-objective optimization of high-speed electrical discharge machining process using a Taguchi fuzzy-based approach", Materials and Design,Vol 28, pp. 1159–1168, (2007).

[2] N. Bani Mostafa Arab, Advanced Machining Process, pp. 151-167, Tehran: Azadeh, (2006).

[3] B. Jabbaripoor, M. H. Sadeghi, M. Shabgard, S. Fereidoonvand, Investigating the Effects of Tool Materials on the Properties of Electrical Discharge Machining of Ti-Al Intermetallic, Modares Mechanical Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 135-146, (2011).

[4] E. Uhlmann, D. C. Domingosb-Development and optimization of the die-sinking EDM-technology for machining the nickel-based alloy MAR-M247 for turbine components, Procedia CIRP, Vol. 6,180 – 185, (2013).

[5] L. Lia, Y.B. Guob, X.T. Weia, W. Lib-Surface integrity characteristics in wire-EDM of inconel 718 at different discharge energy, Procedia CIRP, Vol. 6, 220 – 225, (2013).

[6] S. Gopakalannan, T. Sinthelevan, Modeling and Optimization of EDM Process parameter on Machining of AL 7075-B4 MMC using RSM, Procedia Engineering, Vol. 38, pp. 685 – 690, (2012).

[7] F. Ayestaa, B. Izquierdob, J. A. Sáncheza,J.M. Ramosc,S. Plazaa, I. Pombod, Influence of EDM parameters on slot machining in C1023 aeronautical alloy, Procedia CIRP, Vol. 6 ,129 – 134,(2013).

[8] D. Antoniou, Design of Analysis of Experiment, 5th edition, pp. 230-235, John wiley and sons, United States of America, (2001).

[9] F. Kolahan, M. Azadi Moghadam, M. Andalib, Application of Grey Relational Analysis and Simulated Annealing Algorithm for Modeling and Optimization of EDM Parameters on 40CrMnMoS86 Hot Worked Steel, in The 20th Annual International Conference on Mechanical Engineering-ISME2012, Shiraz, Iran, (2012).

[10] M. Roodi, H. Amirabadi, Magnetic abrasive finishing of AISI 4140 steel, Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 9, pp. 38-46, (2013).