

بررسی زبری سطح سوپر آلیاژ Inconel 625 در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی

معین طاهری^{۱*}، حامد فرجی^۲، زهرا سادات اقدامی^۳

۱- دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

چکیده

اینکونل ۶۲۵ یک سوپر آلیاژ پایه نیکل با مقاومت بالا در برابر خوردگی و دمای زیاد است که به طور گسترده‌ای در صنایع هوافضا و دفاعی کاربرد دارد. به دلیل مقاومت بالای این آلیاژ به خوردگی، از فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی برای ماشین کاری آن استفاده می‌شود. ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی به دلیل پرداخت سطحی ظریف و دقت بالای آن از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو امروزه نیاز صنعت به یافتن پارامترهای بهینه فرآیند احساس می‌شود تا بتوان به کیفیت سطح مورد نظر دست یافت. به طور کلی، انتخاب پارامترهای اثرگذار در هر فرآیند ماشین کاری به طور قابل توجهی بر کیفیت یک قطعه تمام شده تأثیر می‌گذارد. در این پژوهش با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست به بررسی کمی میزان اثرگذاری پارامترهای ورودی شامل، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ سروو و نرخ تغذیه سیم به طور همزمان بر روی پارامتر خروجی زبری سطح برای سوپر آلیاژ اینکونل ۶۲۵ پرداخته شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که پارامتر زمان خاموشی پالس با ۳۶ درصد تأثیر به‌عنوان تأثیرگذارترین پارامتر بر روی زبری سطح شناخته شده است. همچنین مشاهده شد که پارامتر ولتاژ سروو با ۲۴ درصد تأثیر به‌عنوان دومین پارامتر اثرگذار و پارامتر نرخ تغذیه سیم و زمان روشنی پالس به ترتیب با ۲۱ و ۱۹ درصد تأثیر به‌عنوان سومین و چهارمین پارامترهای اثرگذار بر زبری سطح شناخته شده‌اند.

واژه‌های کلیدی

ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی- زبری سطح- آنالیز حساسیت- ای فست

۱- مقدمه

ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی^۱ به یک فرآیند مهم ماشین کاری غیر سنتی تبدیل شده است. ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی به طور گسترده در ماشین کاری مواد رسانا استفاده می‌شود که در آن ایجاد اشکال پیچیده با دقت ابعادی و پرداخت سطح بالاتر ضروری می‌باشد. از جمله کاربردهای مهم فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی در صنایع مختلف می‌توان به صنایع هوافضا، خودروسازی، قالب‌سازی و صنایع پزشکی اشاره کرد [۱]. در این فرآیند سیم با استفاده از یک دستگاه کشش مکانیکی در حالت کشش نگه‌داشته می‌شود که این امر موجب کاهش تولید قطعات نادرست می‌شود [۲]. مکانیسم حذف مواد در فرآیند

ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی، شامل یک اثر فرسایشی پیچیده توسط تخلیه جرقه سریع، تکراری و گسسته بین ابزار (سیم) و قطعه کار غوطه‌ور در یک محیط دی‌الکتریک مایع (نفت سفید/آب دی‌یونیزه) است [۲].

با توجه به توسعه صنعت مکانیک، تقاضا برای سوپر آلیاژهای مبتنی بر نیکل که خواص مکانیکی، حرارتی و مقاومت در برابر خوردگی مفیدی دارند در حال افزایش است [۳].

انتخاب پارامترهای بهینه در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی یک مسئله مهم است. از این رو پژوهش‌های مختلفی توسط پژوهشگران در این زمینه انجام شده است که به‌مرور ادبیاتی از آن‌ها می‌پردازیم.

دباده و کاریدکار به بررسی پارامترهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی بر زبری سطح^۲، نرخ براده برداری^۳ و عرض برش برای ماشین کاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداختند. پارامترهای ورودی شامل زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، کشش سیم، تغذیه سیم، ولتاژ سروو و جریان اوج بوده و طراحی آزمایش‌ها بر اساس روش تاگوچی صورت گرفته است. طبق نتایج، پارامتر زمان روشنی پالس به‌عنوان تأثیرگذارترین عامل برای هر سه پارامتر خروجی زبری سطح، نرخ براده برداری و عرض برش به ترتیب با درصد مشارکت ۵۸/۴۲ درصد، ۸۱/۲۱ درصد و ۳۶/۱۱ درصد شناخته شده است. همچنین پارامتر جریان اوج به‌عنوان پارامتر مهم بعدی برای عرض برش مشاهده شده است [۲].

گود و همکارانش پنج پارامتر فرآیند، یعنی زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، کشش سیم و فشار آب را به منظور یافتن پارامترهای بهینه در نظر گرفتند. همچنین اثرات پارامترهای ورودی فرآیند بر نرخ براده برداری و زبری سطح ترسیم و مورد مطالعه قرار گرفت. جنس انتخابی فولاد ضد زنگ SS304 بود و از روش سطح پاسخ^۴ برای توسعه روابط کمی بین ورودی‌ها و پاسخ‌های خروجی برای داده‌های تجربی جمع‌آوری شده طبق طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است. طبق نتایج بدست آمده گزارش داده شد که زمان روشنی و خاموشی پالس مهمترین پارامترها بودند [۴].

متیو و همکاران در مطالعات خود با استفاده از روش بهینه‌سازی تاگوچی^۵ به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی ماشین کاری تخلیه الکتریکی شامل، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ سروو و فشار آب بر نرخ براده برداری پرداخته‌اند. طبق تحقیقات آن‌ها مشاهده شد که افزایش زمان روشنی پالس موجب افزایش نرخ براده برداری می‌شود. این افزایش به

² surface roughness

³ Material removal rate

⁴ Response surface method

⁵ Taguchi

¹ Wire electrical discharge machining (WEDM)

سپنا و همکارانش به بهینه‌سازی چندگانه پارامترهای ورودی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی با استفاده از آلیاژ تیتانیوم سطح پنج پرداخته‌اند. آنها دریافته‌اند که ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی بیشتر اوقات برای تولید پروفیل‌های پیچیده مورد نیاز برای کاربردهای صنایع مکانیکی استفاده می‌شود. نکته اصلی این پژوهش یافتن برهمکنش زمان روشنی پالس، جریان پیک همراه با نرخ تغذیه سیم است که منجر به سرعت بالای حذف مواد با عرض برش کم و حداقل زبری برای ماشین‌کاری تیتانیوم است. بررسی نتایج نشان داد که پارامترهای ماشین‌کاری تأثیر قابل توجهی بر واکنش‌ها دارند [۱۱].

کند و همکارانش از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) به عنوان تکنیک بهینه‌سازی به منظور مطالعه تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی استفاده کردند و دریافته‌اند که ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی یک استراتژی ماشین‌کاری غیر معمولی پیشرفته است که معمولاً در ایجاد قطعات دقیق در مواد سخت استفاده می‌شود. رویکردی برای پیش‌بینی دقت فرآیند در تولید قطعات با استفاده از یک شبکه عصبی ترکیبی پیشنهاد شد. با ادغام پیش‌بینی‌های LRNN ایجاد شده و استراتژی افزایش بازپخت شبیه‌سازی شده (SA)، محدوده ورودی متغیر را می‌توان برنامه‌ریزی کرد، بنابراین انحرافات شعاعی به دلیل اعوجاج سیم محدود شد. نتایج نشان داد که رویکرد جدید پیش‌بینی شده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی ترکیبی در شرایطی که در آن تغییر شکل سیم بسیار قابل توجه باشد، فوق‌العاده سازنده است [۱۲].

شارما و همکارانش در یک کار تجربی بر روی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی تأثیر پارامترهای فرآیند را مشخص می‌کنند. آن‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ سروو و جریان پیک به‌عنوان پارامترهای ورودی به بهینه‌سازی میزان نرخ برش، انحراف ابعادی و زبری سطح آلیاژ نیکل-تیتانیوم متخلخل (Ni40Ti60) که به روش متالورژی پودر ساخته شده پرداخته‌اند. برای طراحی آزمایش‌ها بر روی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی از روش سطح پاسخ استفاده شده است. برای بهینه‌سازی همزمان سه متغیر پاسخ از رویکرد مطلوبیت استفاده شده است. همچنین آزمایش‌ها در محیط‌های بهینه انجام شد و تطابق نزدیکی بین مقادیر پیش‌بینی شده و تجربی نشان داد [۱۳].

نوری داده‌های لازم با انجام آزمایش تجربی، طرح‌ریزی شده با تکنیک طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی را در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی جمع‌آوری کرده است. سپس انواع توابع رگرسیونی شامل خطی و مرتبه دوم برای این داده‌ها برازش داده شده است. در مرحله بعد، اعتبار این مدل‌ها به کمک آزمون‌های فرض آماری و تحلیل واریانس مورد سنجش قرار گرفته است. بعد از تعیین مدل‌های مناسب، با استفاده از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب بهینه‌سازی فرآیند انجام شده است. در نهایت یک آزمایش تأیید با یکی از ترکیبات جدول بهینه‌های بدست آمده، انجام شده و نتایج حاصل از این آزمایش با نتایج به دست آمده از طریق بهینه‌سازی مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهند که شدت جریان و زمان روشنی پالس پارامترهای تأثیر گذار در نرخ براده برداری و زبری سطح هستند و ولتاژ گپ و کشش سیم پارامترهای بی‌اثر بر این خروجی‌ها به حساب می‌آیند [۱۴].

این دلیل است که انرژی تخلیه با پالس به موقع افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش زمان خاموشی پالس، تعداد تخلیه‌ها در یک دوره معین افزایش می‌یابد، بنابراین میزان نرخ براده نیز افزایش می‌یابد [۱۵].

گوپتا و جین به تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی انحراف میکرو هندسه و انحراف گام انباشته چرخ‌دنده‌های خار مینیاتوری ساخته شده از برنج پرداخته و هر چهار پارامتر ورودی یعنی ولتاژ، زمان روشنی پالس، زمان خاموش پالس و نرخ تغذیه سیم را گزارش کردند. انحرافات بزرگتر در هندسه پروفیل و گام با مقادیر بالاتر ولتاژ و زمان روشنی پالس و با مقادیر کمتر نرخ تغذیه سیم و زمان خاموشی پالس گزارش شد. دلایل اصلی انحراف در هندسه پروفیل و گام چرخ‌دنده‌های مینیاتوری به عنوان دهانه‌های نامنظم ایجاد شده به دلیل جرقه‌های شدید با انرژی تخلیه بالا و تأخیر سیم به دلیل نیروهای مختلف ایجاد شده در حین ماشین‌کاری گزارش شده است [۱۶].

دوراجایا و موتوماری با اجرای طرح آزمایش‌های L16 تاگوچی در برش بهینه برای تیتانیوم Ti-6Al-4V با استفاده از فرآیند ماشین‌کاری الکتریکی سیمی، اثر پارامترهای مختلف شامل، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، جریان اعمالی و سرعت سیم را بر روی نرخ براده برداری و مصرف برق بررسی نموده‌اند. همچنین تغییرات پارامتری سطح پاسخ نرخ براده برداری و مصرف برق با استفاده از نمودارهای سطحی بررسی شد و تصاویر SEM از سطح ماشین‌کاری شده در شرایط برش مربوط به حداکثر نرخ براده برداری و حداقل مصرف برق نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی تجربی نشان داد که پارامترهای جریان اعمالی و زمان خاموشی پالس مهم‌ترین عوامل تأثیر گذار بر نرخ براده برداری و مصرف برق می‌باشند [۱۷].

قدسیه و همکارانش با استفاده از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ به بررسی تأثیر پارامترهای زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، جریان و ولتاژ سروو در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی زبری سطح (SR)، شکاف جرقه (SG)، تأخیر سیم (LAG)، نسبت سایش سیم (WWR) و ضخامت لایه سفید پرداخته‌اند. پارامترهای فرآیند قابل توجهی که بر پاسخ‌ها تأثیر می‌گذارند به صورت، زمان روشنی پالس با ۵۷ درصد تأثیر بر زبری سطح، ولتاژ سروو با ۳۸ درصد تأثیر بر شکاف جرقه و جریان با ۴۳ درصد تأثیر بر نسبت سایش سیم گزارش شده‌اند [۱۸].

نوری و همکارانش به بررسی تجربی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی با استفاده از آلیاژ تیتانیوم (Ti6Al4V) پرداخته‌اند. چهار پارامتر مختلف برش شامل ولتاژ سروو، جریان پیک، کشش سیم و عرض پالس طبق طرح آزمایشی تاگوچی L18 تغییر کردند. سرعت برش، یکپارچگی سطح و پارگی سیم به عنوان معیارهای عملکرد در نظر گرفته شد. طبق نتایج بدست آمده مشخص شد که سرعت برش با افزایش جریان پیک افزایش می‌یابد [۱۹].

اونون و همکارانش دریافته‌اند که برای فولاد سوپر آلیاژ Nimonic 80A به عنوان قطعه کار، کاهش سرعت دورانی در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی منجر به کاهش نرخ براده برداری می‌شود. در حالی که با افزایش غلظت پودر و جریان به ترتیب تا ۴ g/l و ۱۰ A، میزان نرخ براده برداری ابتدا افزایش و سپس کاهش خواهد یافت. همچنین مشاهده شد که نرخ براده برداری عمدتاً تحت تأثیر پارامتر سرعت دورانی و به دنبال آن غلظت پودر و جریان است [۱۰].

۵۶	۵۱	۴۶	μs	T_{off}	زمان خاموشی پالس
۵۰	۴۵	۴۰	V	SV	ولتاژ سروو
۸	۶	۴	mm/min	WF	نرخ تغذیه سیم

$$SR = -3.32 + 0.2804T_{on} - 0.056T_{off} - 0.277SV - 0.133WF - 0.003378T_{on} \times T_{off} - 0.001346T_{on} \times SV - 0.00579T_{on} \times WF + 0.00684T_{off} \times SV + 0.00974T_{off} \times WF + 0.00346SV \times WF \quad (2)$$

۲-۲- آنالیز حساسیت و روش‌های آن

آنالیز حساسیت به منظور ساده‌سازی مدل و افزایش قابلیت اعتماد به مدل و ارائه ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی مدل استفاده می‌شود. همچنین آنالیز حساسیت پیش‌بینی می‌کند که مدل چگونه پاسخی به متغیرهای ورودی و تغییرات آن‌ها می‌دهد. آنالیز حساسیت چگونگی وابستگی خروجی یک مدل به پارامترهای ورودی آن را بررسی می‌کند. از نتایج آنالیز حساسیت می‌توان به منظور یافتن متغیرهای ورودی که تأثیر چندانی بر روی خروجی ندارند و حذف آنها از معادلات سیستم جهت ساده‌سازی معادلات و همچنین به منظور یافتن متغیرهای موثر و حساس برای دقت در انتخاب آن‌ها استفاده نمود.

آنالیز حساسیت دارای روش‌ها و مدل‌های مختلفی می‌باشد. از جمله مهمترین و پرکاربردترین روش‌های آنالیز حساسیت، روش‌های گرافیکی، دیفرانسیلی و آماری می‌باشند. روش‌های آماری به دلیل بررسی همزمان اثر پارامترهای ورودی و نیز مشخص نمودن اثرات کیفی و کمی پارامترها، به طور همزمان، موارد کاربرد گسترده‌ای دارند [۱۸].

دو گروه تحلیل حساسیت تعریف شده است:

- آنالیز حساسیت محلی
- آنالیز حساسیت عمومی

یکی از مشکل‌های روش آنالیز حساسیت محلی این است که تعیین کمیت اثرات ناشی از برهم‌کنش بین پارامترهای ورودی ناشناخته امکان‌پذیر نیست [۱۹]؛ بنابراین روش آنالیز حساسیت عمومی نسبت به روش محلی کاربرد بیشتری دارد.

از دو روش آنالیز حساسیت عمومی مبتنی بر واریانس می‌توان به روش‌های سوپل و ای-فست اشاره کرد. روش سوپل دارای دقت بالا و روش ای-فست دارای سرعت بالاتری می‌باشد که بنا بر نوع مسئله می‌توان یکی از این دو روش را انتخاب نمود. در این پژوهش به دلیل اهمیت سرعت حل مسئله از روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست استفاده شده است. در این روش اندیس‌های حساسیت به‌طور کلی به‌وسیله آنالیز فوری برای خروجی مدل بدست می‌آید. باتوجه به شکل ۱ مکانیزم روش آنالیز حساسیت ای-فست نشان داده شده است.

آنالیز حساسیت^۶ چگونگی وابستگی خروجی یک مدل به پارامترهای ورودی آن را بررسی می‌کند. از نتایج آنالیز حساسیت می‌توان به منظور یافتن متغیرهای ورودی که تأثیر چندانی بر روی خروجی ندارند و حذف آنها از معادلات سیستم جهت ساده‌سازی معادلات و همچنین به منظور یافتن متغیرهای موثر و حساس برای دقت در انتخاب آن‌ها استفاده نمود.

۲- بیان مسئله و مدل‌سازی

از آنجایی که Inconel 625 (سوپر آلیاژ مبتنی بر نیکل) یک ماده با مقاومت بالا در برابر خوردگی و دمای زیاد است به طور گسترده در کاربردهای هوافضا، دفاعی، خودروسازی و سکوی نفتی استفاده می‌شود؛ بنابراین تجزیه و تحلیل اثر پارامترهای مختلف فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی بر Inconel 625 بسیار ضروری است. بدین منظور در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر کمی و دقیق پارامترهای ورودی شامل، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ سروو و نرخ تغذیه سیم به طور همزمان بر روی پارامتر خروجی زبری سطح برای سوپر آلیاژ Inconel 625 با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست^۷ پرداخته شده است. هدف از این پژوهش شناخت اثرگذارترین پارامترها به منظور کاهش زبری سطح طی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی می‌باشد.

۲-۱- تعیین معادله رگرسیون زبری سطح در فرآیند ماشین‌کاری

تخلیه الکتریکی سیمی با روش تاگوچی

روش تاگوچی کیفیت را بر اساس انحراف از مقدار مطلوب بیان کرده و دو روش را برای آنالیز داده‌ها پیشنهاد می‌دهد. در روش اول آزمایش‌ها یک‌بار انجام شده و نتایج حاصل از آن‌ها با استفاده از آنالیز میانگین^۸ بهینه‌سازی می‌شوند. روش دوم، روش آنالیز نسبت سیگنال به نویز^۹ است که در آن انحراف‌های ممکن بین داده آزمایشگاهی و مقدار مطلوب را به کمک یک تابع ضرر مدل‌سازی می‌کند [۱۵]. تابع ضرر برای حالت هرچه کمتر بهتر بر اساس فرمول (۱) به نسبت سیگنال به نویز تبدیل می‌شود [۱۶]:

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{SR}^2 \right) \quad (1)$$

که در این فرمول n تعداد آزمایش‌ها و y داده‌های آزمایشگاهی برای داده‌های پاسخ می‌باشد [۱۵].

باتوجه به مرجع [۱۷] متغیرهای ورودی مورد بررسی در سه سطح به همراه سطح‌های آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. همچنین معادله رگرسیون زبری سطح برحسب پارامترهای ورودی به صورت فرمول (۲) به شرح زیر می‌باشد:

جدول ۱- مقادیر سطح‌های مختلف پارامترهای ورودی

متغیر	نماد	واحد	۱	۰	-۱
زمان روشنی پالس	T_{on}	μs	۱۲۶	۱۱۱	۹۶

⁶ Sensitivity analysis

⁷ E-fast

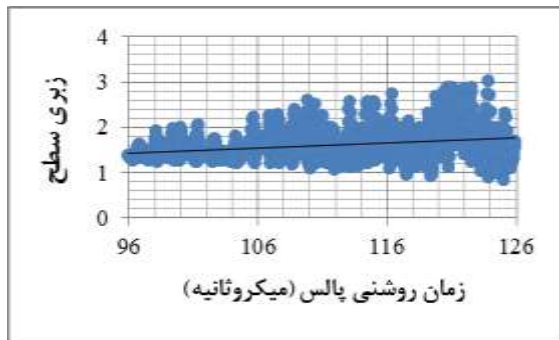
⁸ ANOM

⁹ ANOVA

۳- آنالیز حساسیت پارامترها و تحلیل نتایج

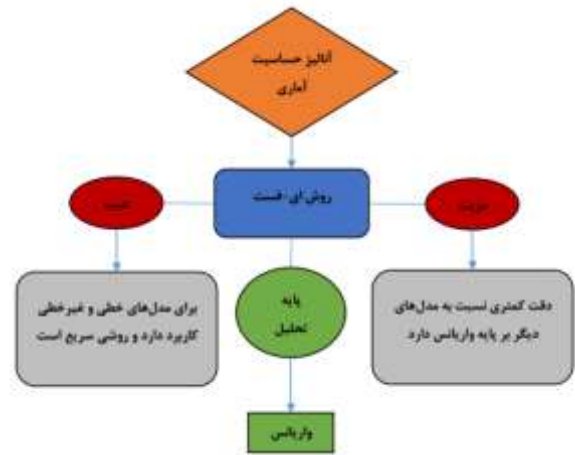
کیفیت سطح مناسب در قطعه ماشین کاری شده با فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی از خصوصیات مهم قطعه است که تحت تاثیر پارامترهای متعددی می‌باشد. یکی از عوامل شکست‌های ناشی از خستگی، زبری سطح می‌باشد به همین دلیل پارامتر زبری سطح یکی از پارامترهای مهم در این فرآیند می‌باشد. لذا در این بخش به آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی شامل، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ سروو و نرخ تغذیه سیم به طور همزمان بر روی پارامتر خروجی زبری سطح پرداخته شده است. شکل‌های ۲ تا ۵ پراکندگی نقاط زبری سطح با تغییرات هم‌زمان چهار پارامتر ورودی را نشان می‌دهد. نقاط پراکنده موجود در این شکل‌ها به روش ای-فست و با استفاده از نرم‌افزار سیملب استخراج شده‌اند.

اولین پارامتری که مورد بررسی قرار گرفته است تأثیر زمان روشنی پالس بر زبری سطح می‌باشد. از نتایج به دست آمده توسط نمودارهای آنالیز حساسیت تأثیر زمان روشنی پالس بر زبری سطح در شکل ۲ بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان روشنی پالس، میزان زبری سطح افزایش می‌یابد زیرا افزایش زمان روشنی پالس موجب افزایش در انرژی تخلیه تولید شده توسط جرقه‌ها می‌شود، بنابراین با ذوب قطعه کار مقدار بیشتری از مواد فرسایش می‌یابد. اگر مواد ذوب شده به خوبی شسته نشوند، دوباره به حالت جامد در می‌آیند و باعث افزایش زبری سطح می‌شوند.



شکل ۲- تأثیر زمان روشنی پالس بر میزان زبری سطح

پارامتر تأثیرگذار بعدی زمان خاموشی پالس است. شکل ۳ نشان‌دهنده نحوه تغییر زبری سطح با تغییر زمان خاموشی پالس می‌باشد. با توجه به شیب نمودار، مشاهده می‌شود که افزایش زمان خاموشی پالس سبب کاهش فراوان میزان زبری سطح می‌شود؛ زیرا زمان خاموشی پالس زیاد، باعث حذف بهتر آلیاژ ذوب شده و بنابراین موجب کاهش میزان زبری سطح می‌شود.



شکل ۱- مکانیزم روش آنالیز حساسیت ای-فست

به منظور استفاده از روش ای-فست ورودی X_i در فرمول (۳) به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$x_i = G_i(\sin(\omega_i s + \phi_i)) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1}(\sin(\omega_i s + \phi_i)) \quad (3)$$

که فرکانس مرتبط با X_i به صورت ω_i و ϕ_i نقطه شروع منحنی تعریف شده‌اند. S نیز متغیری در بازه $-\pi$ تا π است.

$$V(Y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2(s) ds - \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) ds \right]^2 \approx \sum_{j=-\infty}^{\infty} (A_j^2 + B_j^2) - (A_0^2 + B_0^2) \approx 2 \sum_{j=1}^N (A_j^2 + B_j^2) \quad (4)$$

G ها توابع انتقال، A_j و B_j ضرایب فوریه می‌باشند که در فرمول‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است.

$$A_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \cos(js) ds \quad (5)$$

$$B_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \sin(js) ds \quad (6)$$

با محاسب ضرایب فوریه برای فرکانس پایه ω_i و هارمونیک‌های بالاتر آن $p\omega_i$ می‌توان واریانس جزئی مرتب اول ورودی X_i را به دست آورد.

$$V_i = \sum_{p \in \mathbb{Z}^+} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) = 2 \sum_{p=1}^{\infty} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) \quad (7)$$

برای محاسبه شاخص حساسیت اصلی مانند روش سوئل از نسبت واریانس جزئی مرتبه اول به واریانس کلی استفاده می‌کنیم. شاخص حساسیت کلی نیز از فرمول (۸) به دست می‌آید [۲۰]:

$$ST_i = 1 - \frac{F_{-i}}{F} \quad (8)$$

۴- مقایسه کمی اثر پارامترهای ورودی مختلف بر زبری سطح با استفاده از روش آنالیز حساسیت ای-فست

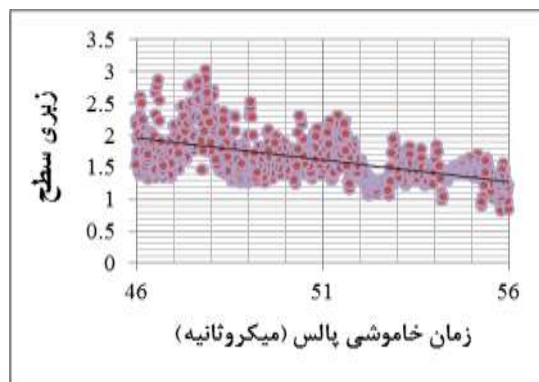
در این بخش به مقایسه کمی بین درصد تأثیر فاکتورهای مختلف ورودی بر زبری سطح فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی پرداخته شده است. این نتایج از آنالیز حساسیت ای-فست به دست آمده‌اند. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود از میان چهار پارامتر مورد بررسی در این فرآیند، پارامتر زمان خاموشی پالس با ۳۶ درصد تأثیر بر روی زبری سطح به‌عنوان تأثیرگذارترین پارامتر در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی شناخته شده است. همچنین در شکل ۶ مشاهده می‌شود که پارامتر ولتاژ سروو با ۲۴ درصد تأثیر به‌عنوان پارامتر اثرگذار بعدی بر زبری سطح شناخته شده است. پارامترهای نرخ تغذیه سیم و زمان روشنی پالس به ترتیب با ۲۱ و ۱۹ درصد تأثیر به‌عنوان سومین و چهارمین پارامتر اثرگذار شناخته شده‌اند، همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف تأثیر آن‌ها باهم بسیار اندک است.



شکل ۶- مقایسه کمی پارامترهای ورودی بر زبری سطح

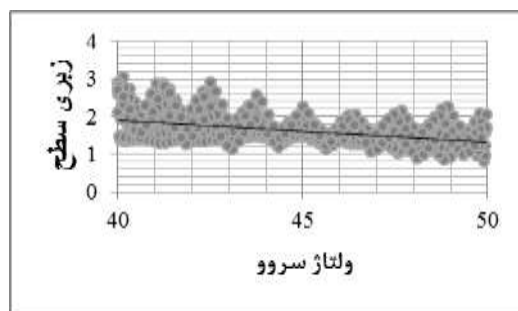
۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

آنالیز حساسیت چگونگی وابستگی خروجی یک مدل به پارامترهای ورودی آن را بررسی می‌کند. از نتایج آنالیز حساسیت می‌توان به‌منظور یافتن متغیرهای ورودی که تأثیر چندانی بر روی خروجی ندارند و حذف آنها از معادلات سیستم جهت ساده‌سازی معادلات و همچنین به‌منظور یافتن متغیرهای موثر و حساس برای دقت در انتخاب آن‌ها استفاده نمود. در این پژوهش با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست که از سرعت بالایی نسبت به سایر روش‌های آماری آنالیز حساسیت برخوردار می‌باشد، به بررسی تأثیر ۴ پارامتر ورودی شامل، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ سروو و نرخ تغذیه سیم بر روی زبری سطح در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی پرداخته شده است. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهند که از بین چهار پارامتر مورد بررسی، پارامتر زمان خاموشی پالس با ۳۶ درصد تأثیر بر روی زبری سطح به‌عنوان تأثیرگذارترین پارامتر شناخته شده است که افزایش زمان خاموشی پالس سبب کاهش زبری سطح می‌شود. دلیل این امر آن است که زمان خاموشی پالس زیاد موجب حذف بهتر آلیاژ ذوب شده و بنابراین موجب کاهش



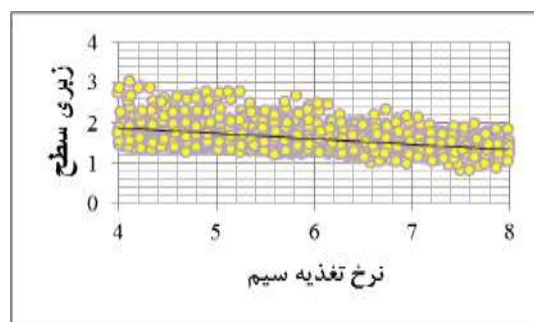
شکل ۳- تأثیر زمان خاموشی پالس بر میزان زبری سطح

افزایش پارامتر ولتاژ سروو نیز سبب کاهش میزان زبری سطح می‌شود ولی تأثیر آن نسبت به زمان خاموشی پالس کمتر است؛ که در شکل ۴ قابل‌مشاهده است. افزایش ولتاژ سروو باعث افزایش شکاف تخلیه و کاهش شدت جرقه می‌شود، زیرا حداکثر انرژی توسط سیال دی‌الکتریک جذب می‌شود. این امر منجر به کاهش اندازه دهانه شکاف می‌شود که نیاز اولیه برای زبری سطح است.



شکل ۴- تأثیر ولتاژ سروو بر میزان زبری سطح

آخرین پارامتری که تأثیر آن بر میزان زبری سطح بررسی خواهد شد، نرخ تغذیه سیم می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود افزایش نرخ تغذیه سیم منجر به کاهش زبری سطح خواهد شد؛ زیرا افزایش نرخ تغذیه سیم به این معنی است که یک سیم جدید با سرعت بالایی با قطعه کار برخورد می‌کند و در نتیجه زبری سطح را کاهش می‌دهد.



شکل ۵- تأثیر نرخ تغذیه سیم بر میزان زبری سطح

- Discharge Machining Parameters in Machining of Ti-6Al-4V Alloy," vol. 5, no. 2, pp. 6722-6727, 2018.
- [12] A. Conde *et al.*, "High-accuracy wire electrical discharge machining using artificial neural networks and optimization techniques," vol. 49, pp. 24-38, 2018.
- [13] N. Sharma, T. Raj, and K. K. J. P. o. t. I. o. M. E. Jangra, Part B: Journal of Engineering Manufacture, "Parameter optimization and experimental study on wire electrical discharge machining of porous Ni40Ti60 alloy," vol. 231, no. 6, pp. 956-970, 2017.
- [14] H. Nouri, "Statistical analysis and multi-objective optimization of tungsten carbide alloy wirecut process using Taguchi method and genetic algorithm %J Journal of Solid and Fluid Mechanics," vol. 12, no. 3, pp. 69-87, 2022.
- [15] A. Atarodi, H. Karami, A. Ardeshir, and K. J. J.-I. U. o. T. Hosseini, "Optimization of the Geometric Parameters of the Protective Spur Dike using Taguchi Method and GRA," vol. 24, no. 1, pp. 13-26, 2020.
- [16] B. K. Lodhi and S. J. P. C. Agarwal, "Optimization of machining parameters in WEDM of AISI D3 Steel using Taguchi Technique," vol. 14, pp. 194-199, 2014.
- [17] T. V. Sibalija, S. Kumar, G. J. N. C. Patel, and Applications, "A soft computing-based study on WEDM optimization in processing Inconel 625," vol. 33, no. 18, pp. 11985-12006, 2021.
- [18] F. Fereiduni, M. Taheri, and M. J. I. J. o. M. E. Modabberifar, "Investigation of the effect of different parameters on force in the second phase of two-dimensional nanomanipulation," vol. 8, no. 2, pp. 23-31, 2021.
- [19] A. Saltelli, M. Ratto, S. Tarantola, and F. J. C. r. Campolongo, "Sensitivity analysis for chemical models," vol. 105, no. 7, pp. 2811-2828, 2005.
- [20] T. Homma, A. J. R. E. Saltelli, and S. Safety, "Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models," vol. 52, no. 1, pp. 1-17, 1996.
- میزان زبری سطح می شود. همچنین مشاهده شده است که پارامتر ولتاژ سروو با ۲۴ درصد تأثیر به عنوان دومین پارامتر اثرگذار بر زبری سطح بوده که با افزایش ولتاژ سروو میزان زبری سطح با کاهش می یابد؛ زیرا افزایش ولتاژ سروو باعث افزایش شکاف تخلیه و کاهش شدت جرقه می شود (زیرا حداکثر انرژی توسط سیال دی الکتریک جذب می شود). این امر منجر به کاهش اندازه دهانه شکاف می شود که نیاز اولیه برای زبری سطح است. این نکته باید در نظر گرفته شود که تأثیر ولتاژ سروو نسبت به زمان خاموشی پالس کمتر است. پارامترهای نرخ تغذیه سیم و زمان روشنی پالس به ترتیب با ۲۱ و ۱۹ درصد تأثیر به عنوان سومین و چهارمین پارامتر اثرگذار شناخته شده اند، همانطور که مشاهده می شود اختلاف تأثیر آن ها باهم بسیار اندک است.
- ۶- مراجع
- [1] K. Ho, S. J. I. J. o. M. T. Newman, and Manufacture, "State of the art electrical discharge machining (EDM)," vol. 43, no. 13, pp. 1287-1300, 2003.
- [2] U. Dabade and S. J. P. C. Karidkar, "Analysis of response variables in WEDM of Inconel 718 using Taguchi technique," vol. 41, pp. 886-891, 2016.
- [3] V. Aggarwal, S. S. Khangura, and R. J. T. I. J. o. A. M. T. Garg, "Parametric modeling and optimization for wire electrical discharge machining of Inconel 718 using response surface methodology," vol. 79, no. 1, pp. 31-47, 2015.
- [4] G. H. Gowd, M. G. Reddy, B. Sreenivasulu, and M. J. P. M. S. Ravuri, "Multi objective optimization of process parameters in WEDM during machining of SS304," vol. 5, pp. 1408-1416, 2014.
- [5] B. Mathew, B. Benkim, and J. J. P. M. S. Babu, "Multiple process parameter optimization of WEDM on AISI304 using utility approach," vol. 5, pp. 1863-1872, 2014.
- [6] K. Gupta and N. K. J. P. E. Jain, "Analysis and optimization of micro-geometry of miniature spur gears manufactured by wire electric discharge machining," vol. 38, no. 4, pp. 728-737, 2014.
- [7] D. Devarajaiah, C. J. J. o. t. B. S. o. M. S. Muthumari, and Engineering, "Evaluation of power consumption and MRR in WEDM of Ti-6Al-4V alloy and its simultaneous optimization for sustainable production," vol. 40, no. 8, pp. 1-18, 2018.
- [8] D. Ghodsiyeh, A. Golshan, S. J. J. o. t. B. S. o. M. S. Izman, and Engineering, "Multi-objective process optimization of wire electrical discharge machining based on response surface methodology," vol. 36, no. 2, pp. 301-313, 2014.
- [9] F. Nourbakhsh, K. P. Rajurkar, A. P. Malshe, and J. J. P. C. Cao, "Wire electro-discharge machining of titanium alloy," vol. 5, pp. 13-18, 2013.
- [10] D. R. Unune, V. P. Singh, H. S. J. M. Mali, and M. Processes, "Experimental investigations of abrasive mixed electro discharge diamond grinding of Nimonic 80A," vol. 31, no. 13, pp. 1718-1723, 2016.
- [11] P. Sneha, A. Mahamani, and I. J. M. T. P. Kakaravada, "Optimization of Wire Electric