



مدل‌سازی و بهینه‌سازی چند هدفه فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی آلومینیوم ۷۰۷۵ T6 ابوالفضل فورگی نژاد^{۱*}، جعفر ثنائی مقدم^۲، حسین افشاری^۳، امیرحسین غضنفری حصار^۴، علی بذرافشان تنها^۲

^۱ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.

^۲ مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده شهید منتظری، دانشگاه ملی مهارت، مشهد، ایران.

^۳ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

^۴ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱/۳۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۴

چکیده

با توجه به افزایش رقابت صنعتی، محدودیت منابع و ضرورت دستیابی هم‌زمان به کیفیت بالا، بهره‌وری بیشتر و کاهش هزینه‌های تولید، بهینه‌سازی فرآیندهای ماشینکاری به یکی از ارکان اساسی توسعه فناوری‌های پیشرفته ساخت تبدیل شده است. در این پژوهش، مدل‌سازی و بهینه‌سازی چندهدفه فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی آلومینیوم ۷۰۷۵ T6 مورد بررسی قرار گرفت. چهار پارامتر کنترلی شامل ولتاژ، شدت جریان، زمان روشن بودن پالس و زمان خاموشی پالس در قالب طرح پاسخ سطح یکس-بنکن مطالعه شدند و اثر آن‌ها بر زبری سطح، نرخ براده‌برداری و پهنای شکاف برش ارزیابی گردید. به منظور مدل‌سازی رفتار غیرخطی فرایند، از روش رگرسیون فرایند گاوسی با تابع همبستگی ماترن استفاده شد و عملکرد مدل‌ها با اعتبارسنجی متقاطع پنج‌بخشی سنجیده شد که نتایج بیانگر دقت مناسب پیش‌بینی، به‌ویژه برای زبری سطح، بود. سپس مسئله به صورت بهینه‌سازی چندهدفه با اهداف کمینه‌سازی زبری سطح و پهنای شکاف و بیشینه‌سازی نرخ براده‌برداری تعریف شد و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب برای استخراج جبهه پارتو به کار گرفته شد. نتایج وجود مبادله میان کیفیت سطح و بهره‌وری ماشینکاری را نشان داد و آزمایش اعتبارسنجی تجربی نقطه بهینه منتخب، خطای نسبی کمتر از هفت درصد را تأیید کرد.

کلمات کلیدی: ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی؛ رگرسیون فرایند گاوسی؛ بهینه‌سازی چندهدفه؛ الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب؛ آلومینیوم ۷۰۷۵.

Modeling and Multi-objective Optimization of the Wire Electrical Discharge Machining Process of 7075 T6 Aluminum

A. Foorginejad^{1,*}, J. Sanaei Moghadam², H. Afshari³, A. Ghazanfari Hesari⁴, A. Bazrafshan Tanha³

¹ Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

² Instructor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Montazeri Faculty, Technical and Vocational University, Mashhad, Iran.

³ PhD Student, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

⁴ B.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

Abstract

With increasing industrial competition, limited resources, and the need to simultaneously achieve high quality, higher productivity, and reduced manufacturing costs, process optimization has become a key pillar in the development of advanced manufacturing technologies. In this study, multi-objective modeling and optimization of the wire electrical discharge machining (WEDM) process for 7075 aluminum alloy were investigated. Four control parameters, including voltage, current, pulse-on time, and pulse-off time, were examined using a Box-Behnken response surface design, and their effects on surface roughness, material removal rate, and kerf width were evaluated. To model the nonlinear behavior of the process, Gaussian process regression with a Matérn covariance function was employed, and model performance was assessed using five-fold cross-validation. The results indicated satisfactory predictive accuracy, particularly for surface roughness. Subsequently, the problem was formulated as a multi-objective optimization task with the objectives of minimizing surface roughness and kerf width while maximizing material removal rate, and the non-dominated sorting genetic algorithm was used to obtain the Pareto front. The findings revealed an inherent trade-off between surface quality and machining productivity, and an experimental validation test at the selected optimal point confirmed a relative error of less than 7%.

Keywords: Wire electrical discharge machining (WEDM); Gaussian process regression (GPR); Multi-objective optimization; Non-dominated sorting genetic algorithm; Aluminum 7075.

۱- مقدمه

فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی، نخستین بار در اواخر دهه ۱۹۶۰ به صنعت تولید معرفی شد و نتیجه‌ی تلاش برای یافتن جایگزینی مناسب برای الکترودهای ماشینکاری شده در فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی بود. این فرایند به عنوان یکی از روش‌های غیرسنتی حذف ماده، به طور گسترده برای ساخت قطعات با اشکال و پروفیل‌های پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد و نسخه‌ای تکامل یافته از فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی کلاسیک محسوب می‌شود. در این روش، از یک سیم نازک از جنس مس یا برنج به عنوان الکترو استفاده می‌شود. این سیم به صورت پیوسته حرکت کرده و تحت کشش مکانیکی قرار دارد تا از انحراف یا تولید قطعات معیوب جلوگیری شود. در طول فرایند، تخلیه الکتریکی بین سیم و قطعه‌کار در سیال آب دیونیزه (به عنوان سیال دی‌الکتریک) انجام می‌شود، بدون آن‌که تماس مکانیکی بین آن‌ها برقرار باشد [۱]. این امر منجر به حذف تنش‌های مکانیکی در حین ماشینکاری می‌شود. جرقه‌های الکتریکی حاصل، موجب ذوب و تبخیر ماده در نقطه تماس می‌شوند و محصولات فرایند توسط سیال دی‌الکتریک شسته می‌شوند. فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های ماشینکاری غیرمتعارف، به‌ویژه برای تولید اشکال پیچیده در مواد رسانا، شناخته شده است [۲-۴]. این فرایند در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هوافضا و قالب‌سازی به کار می‌رود [۵ و ۶]. طی سال‌های اخیر، مواد رسانای مختلفی با استفاده از این روش ماشینکاری شده‌اند. تنظیم دقیق پارامترهای ماشینکاری نظیر ولتاژ، سرعت سیم، کشش سیم، قطبیت، زمان روشن بودن پالس، زمان خاموش بودن پالس و جریان پیک، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهینه‌سازی عملکرد این فرایند دارد [۷]. این پارامترها مستقیماً بر شاخص‌هایی نظیر نرخ براده‌برداری، زبری سطح، عرض شیار، سرعت برش، دقت ابعادی و کیفیت سطح اثر می‌گذارند [۸].

برشکاری تخلیه الکتریکی فرایند پیچیده‌ای است که تنظیم پارامترهای ورودی در نواحی مختلف، خروجی‌های متغیر و متفاوتی را ایجاد خواهد کرد. بنابراین تعیین پارامترهای بهینه برای ماشینکاری دقیق، کارا و با قابلیت تولید بالا کار بسیار مشکلی می‌باشد. تاکنون کارهای تحقیقاتی

زیادی برای بهینه‌سازی فرایند انجام گرفته است. هدف از این تحقیقات انتخاب صحیح مجموعه پارامترهای ورودی فرایند شامل ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، جنس دی‌الکتریک، جنس ابزار و نوع ژنراتور برای رسیدن به نرخ براده‌برداری بالاتر، فرسایش ابزار کمتر، کیفیت سطح بهتر، بهبود دقت ابعادی و در نهایت کاهش هزینه‌ها بوده است. طبیعت پیچیده فرایند باعث می‌شود که انتخاب مناسب پارامترهای ماشینکاری برای رسیدن به بهترین کارایی فرایند در هر کدام از مراحل هنوز نیاز به تحقیقات گسترده تری داشته باشد. در ادامه به برخی تحقیقات انجام شده در زمینه بهینه‌سازی این فرایند اشاره می‌گردد.

بابو و همکاران [۹]، در مطالعه‌ای تأثیر سیم برنجی و پارامترهای فرایند بر عملکرد آن با انجام آزمایش‌هایی تحت شرایط مختلف ماشینکاری بررسی کردند. نتایج تجربی و تجزیه و تحلیل آزمایش‌های فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی آلومینیوم ۶۰۶۱ نشان می‌دهد که جریان پیک و پالس روشن تأثیر قابل توجهی بر نرخ براده‌برداری مواد و زبری سطح دارند. تجزیه و تحلیل واریانس نشان می‌دهد که تأثیرگذارترین پارامتر، برای نرخ براده‌برداری و زبری سطح، جریان است. تغییر این پارامتر فرایند باعث تغییر زیادی در نرخ براده‌برداری و زبری سطح می‌شود. تأثیر بهینه پارامترهای مهم برای آلومینیوم ۶۰۶۱ با استفاده از فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی، برای نرخ براده‌برداری حداکثر و برای زبری سطح حداقل است. سیف و راوات [۱۰]، به بررسی فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی بر روی آلومینیوم ۶۰۶۱ پرداختند تا متغیرهای مختلف فرایند را برای دستیابی به معیارهای عملکرد از نظر حداکثر نرخ براده‌برداری و حداقل زبری سطح بهینه کنند. ماتریس L18 تاگوچی، نسبت سیگنال به نویز، آنالیز واریانس و تحلیل رابطه‌ای خاکستری برای بهینه‌سازی زبری سطح و نرخ براده‌برداری به کار گرفته شدند. از آنالیز واریانس مشخص شد که زمان روشن بودن پالس و جریان اوج با سهم به ترتیب ۱۳/۳۳٪ و ۱۶/۲۵٪، تأثیرگذارترین جنبه‌ها برای نرخ براده‌برداری و زبری سطح هستند. علاوه بر این، بهترین تنظیمات پارامترهای مورد نظر با اعمال تحلیل رابطه‌ای خاکستری برای نرخ براده‌برداری و زبری سطح، زمان روشن بودن پالس ۵۰ میکروثانیه، زمان خاموش بودن پالس ۱۳ میکروثانیه و جریان پیک ۴ آمپر

طور موثر شسته شدند و منجر به قطعات ماشینکاری شده با کیفیت خوب شدند. در این مطالعه تلاش شد تا مهمترین عوامل ماشینکاری برای آزمایش شناسایی شوند و استراتژی روش سطح پاسخ بهترین ترتیب مرزها را برای افزایش نرخ براده برداری ردیابی می‌کند. نتایج تایید کرد که افزایش نرخ براده برداری به میزان ۰/۰۶۹۳۸ گرم بر دقیقه در سطح بهینه زمان روشن بودن پالس ۱۰ میکروثانیه، زمان خاموشی ۲ میکروثانیه و نرخ تغذیه سیم ۴ متر بر دقیقه حاصل می‌شود. سوپرامانیام و همکاران [۱۴]، از روش تاگوچی برای تجزیه و تحلیل تأثیر پارامترهای فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی بر نرخ براده برداری و زبری سطح روی آلیاژ اینکونل ۶۲۵ استفاده کردند. پارامترهای مختلفی مانند زمان خاموشی پالس، زمان روشن بودن پالس و ولتاژ سروو برای بهینه‌سازی نرخ براده برداری و زبری سطح با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب ۱۷ مورد استفاده قرار گرفتند. آرایه متعامد تاگوچی L9 به همراه آنالیز واریانس برای بهینه‌سازی سه پارامتر مختلف به گونه‌ای استفاده شد که حداکثر نرخ براده برداری و حداقل زبری سطح حاصل شود. آیسین و همکاران [۱۵]، به بررسی قابلیت ماشینکاری آلیاژ تنگستن-مس با استفاده از ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی پرداختند. پارامترهای فرآیند شامل جریان، ولتاژ سروو، تغذیه سیم و کشش سیم، برای ارزیابی تأثیر آنها بر نرخ براده برداری مواد و زبری سطح بهینه شدند. آزمایش‌ها بر روی یک دستگاه ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی دقیق انجام شد و پس از آن آنالیز میکروسکوپی برای ارزیابی یکپارچگی سطح و عیوب ماشینکاری انجام شد. پارامترهای بهینه برای حداکثر نرخ براده برداری، جریان ۵ آمپر، ولتاژ سروو ۶۰ ولت، کشش سیم ۹ نیوتن و تغذیه سیم ۱۲ میلی‌متر در دقیقه بودند. برای حداقل زبری سطح، بهترین تنظیمات جریان ۳،۵ آمپر، ولتاژ سروو ۴۰ ولت، کشش سیم ۶ نیوتن و سرعت تغذیه سیم ۶ میلی‌متر در دقیقه بود. بررسی نرخ سایش ابزار در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی کامپوزیت‌های زمینه فلزی نظیر AZ91 تقویت‌شده با کاربید سیلیسیوم [۱۶] و همچنین بهینه‌سازی چندهدفه برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی آلیاژ کاربید تنگستن با استفاده از روش تاگوچی و الگوریتم ژنتیک [۱۷] از جمله مطالعات مرتبطی هستند که بر اهمیت مدل‌سازی و بهینه‌سازی در این فرآیند تأکید دارند.

تعیین شده است. همچنین او در تحقیق دیگری [۱۱]، تأثیر مشخصات ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی در مورد زبری سطح و نرخ براده برداری مواد بر روی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ بررسی کردند و از روش تک هدفه برای بهینه‌سازی پارامتری استفاده کردند. در این مطالعه از روش طراحی تاگوچی با در نظر گرفتن ماتریس متعامد L9، نسبت سیگنال به نویز و آنالیز واریانس استفاده شد. برای آزمایش، زمان روشن بودن پالس، زمان خاموش بودن پالس و همچنین جریان پیک به عنوان متغیرهای عددی اولیه مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که عناصر مهم و اصلی که بر زبری سطح در مورد ۶۰۶۱ تأثیر می‌گذارند، زمان روشن بودن پالس به همراه زمان خاموش بودن پالس هستند. به همین ترتیب عناصر مهم و اصلی که بر زبری سطح در مورد ۵۰۸۳ تأثیر می‌گذارند، زمان خاموش بودن پالس با جریان پیک هستند. دجاسری و همکارش [۱۲]، در تلاشی به تجزیه و تحلیل ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ با کمک رویکرد تاگوچی پرداختند. این مطالعه متغیرهای مختلف فرآیندی را که بر فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی تأثیر می‌گذارند، تجزیه و تحلیل کرد. سپس نتایج برای تعیین عملکرد کلی فرآیند تجزیه و تحلیل شدند. معیارهای مختلف عملکرد مانند نرخ براده برداری مواد، زبری سطح و خطاهای تلرانس در این تحقیق در نظر گرفته شدند. آنالیز واریانس تجزیه و تحلیل آماری است که برای تعیین اهمیت متغیرهای فرآیند انجام می‌شود. یک مدل هوش مصنوعی ترکیبی مبتنی بر خاکستری نروفازی برای پیش‌بینی شاخص عملکرد چندگانه مورد نظر استفاده شد. نتایج تجزیه و تحلیل ثابت کرد که این مدل پیش‌بینی مؤثر و دقیقی ارائه می‌دهد که برای تولیدکننده جهت پیش‌بینی معیارهای عملکرد مورد نظر بسیار مفید خواهد بود. سلوام و همکاران [۱۳]، در مطالعه‌ای به تخمین اهمیت پارامترهای ماشینکاری برای اندازه‌گیری عملکرد نرخ براده برداری مواد در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی MONEL 400 K پرداختند. نتایج نشان دادند که تغذیه سیم، زمان روشن بودن و زمان خاموش در تعیین معیار نرخ براده برداری به طور قابل توجهی تأثیرگذارتر هستند. اثر زمان خاموشی معکوس زمان روشن بودن پالس است و با افزایش زمان خاموشی منجر به افزایش نرخ براده برداری می‌شود، اما زبری سطح کاهش می‌یابد. مواد در زمان خاموشی بالاتر به

۰/۵	Fe
باقیمانده	Al

جدول ۲- خواص مکانیکی و فیزیکی آلومینیوم T6 ۷۰۷۵	
خواص مکانیکی آلومینیوم T6 ۷۰۷۵	خواص حرارتی آلومینیوم T6 ۷۰۷۵
سختی برینل = ۱۵۰	دمای سالیدوس = ۴۸۰ درجه سانتی گراد
مدول الاستیسیته (کششی) = ۷۰ گیگاپاسکال	ظرفیت حرارتی ویژه = ۸۷۰ ژول بر کیلوگرم-کلوین
استحکام کششی نهایی (UTS) = ۵۶۰ مگاپاسکال	رسانایی حرارتی = ۱۳۰ وات بر متر-کلوین
استحکام تسلیم کششی = ۴۸۰ مگاپاسکال	انبساط حرارتی = ۲۳ میکرومتر بر متر-کلوین
ازدیاد طول تا شکست = ۷/۹٪	استحکام برشی = ۳۳۰ مگاپاسکال
استحکام خستگی = ۱۶۰ مگاپاسکال	مدول برشی = ۲۶ گیگاپاسکال
نسبت پواسون = ۰/۳۲	چگالی = ۳ گرم بر سانتی متر مکعب

ابتدا قطعات آلومینیومی با ابعاد $۱۲ \times ۴۰ \times ۶۰$ میلی متر بریده و شیارها بر اساس پارامترهای جدول طراحی آزمایش، بر روی آن ها ایجاد گردید. برای ایجاد شیارهایی روی قطعات آلومینیومی از فرایند تخلیه الکتریکی سیمی سرعت بالا استفاده شد. ماشین مورد استفاده برای ایجاد شیارها، دستگاه ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی مدل PW500a با قابلیت سیم رفت و برگشتی می باشد. از سیم تنگستن با روکش مولیبدن برای ایجاد شیارها استفاده شد. قطر سیم مورد استفاده در ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی برابر با $۰/۱۸$ میلی متر است. در این پژوهش، با توجه به نیاز به پایداری فرآیند در طول آزمایش های متعدد، از سیم تنگستن با روکش مولیبدن به جای سیم برنجی یا مسی مرسوم استفاده گردید. دلایل اصلی این انتخاب عبارتند از: استحکام کششی بسیار بالاتر سیم تنگستن در برابر پارگی، مقاومت حرارتی فوق العاده (نقطه ذوب ۳۴۲۲ درجه سانتی گراد) که منجر به کاهش سایش سیم و افزایش پایداری فرآیند می گردد، و همچنین مدول الاستیسیته بالاتر که افتادگی سیم در برش های ضخیم را کاهش داده و دقت ابعادی را بهبود می بخشد. شکل ۱ مراحل انجام آزمایش های تجربی را نشان می دهد.

با توجه به ماهیت غیرخطی، پیچیده و وابسته به تعامل پارامترهای فرآیندی در ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی، انتخاب شرایط کاری بهینه بدون بهره گیری از روش های مدل سازی پیشرفته با دشواری همراه است. در این پژوهش، تأثیر چهار پارامتر کنترلی شامل ولتاژ، شدت جریان، زمان روشن بودن پالس و زمان خاموشی پالس در بازه های عملیاتی مشخص بر سه شاخص عملکردی زبری سطح، نرخ براده برداری و پهنای شکاف برش به صورت نظام مند بررسی شد. ابتدا طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح انجام گرفت و سپس به منظور مدل سازی دقیق رفتار غیرخطی فرآیند، از رگرسیون فرآیند گاوسی به عنوان مدل جانشین استفاده گردید. در ادامه، با تعریف مسئله به صورت بهینه سازی چندهدفه و بهره گیری از الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب، جبهه پارتو استخراج و نقطه کاری بهینه با در نظر گرفتن بیشینه سازی نرخ براده برداری و کمینه سازی زبری سطح و پهنای شکاف برش تعیین شد. ساختار مقاله بدین ترتیب است که در بخش دوم مواد و روش های پژوهش تشریح شده، در بخش سوم نتایج مدل سازی و تحلیل های حساسیت و بهینه سازی ارائه و مورد بحث قرار گرفته، و در نهایت در بخش چهارم جمع بندی و نتیجه گیری ارائه شده است.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد و ابزار

در این تحقیق فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی بر روی نمونه هایی از جنس آلومینیوم T6 ۷۰۷۵ انجام گرفت. رسانایی حرارتی و الکتریکی بالا، مقاومت بالا در برابر خوردگی و نیز وزن سبک و استحکام مطلوب، از جمله خواص این آلیاژ می باشد [۱۸]. جداول ۱ و ۲ به ترتیب ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی و فیزیکی آلومینیوم T6 ۷۰۷۵ مورد استفاده در این تحقیق را ارائه می دهد.

جدول ۱- مقادیر ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) آلومینیوم

T6 ۷۰۷۵	
آلیاژ آلومینیوم	Al 7075
Zn	۵/۱ - ۶/۱
Mg	۲/۱ - ۲/۹
Mn	۰/۳
Cu	۱/۲ - ۲



شکل ۱- چیدمان آزمایشگاهی، نمونه‌های ماشینکاری شده و تجهیزات اندازه‌گیری

نمونه با سه بار تکرار، انجام شد. پس از انجام زبری سنجی هر نمونه با ۳ مرتبه تکرار، مقادیر مربوط به میانگین نیز محاسبه شد.

برای بررسی عرض شکاف برش از دستگاه میکروسکوپ نوری مدل Olympus استفاده می‌شود. عرض شکاف توسط خط‌کش‌های میکروسکوپ در سه نقطه اندازه‌گیری شده و مقدار میانگین آن به عنوان پارامتر خروجی در جدول طراحی آزمایش در نظر گرفته می‌شود.

۳-۲- طراحی آزمایش

طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ یکی از رویکردهای کارآمد در بهینه‌سازی فرایندها به شمار می‌رود که با مدل‌سازی روابط میان متغیرهای مستقل و پاسخ‌های وابسته، امکان شناسایی و برآورد شرایط بهینه را فراهم می‌سازد. در میان طرح‌های موجود سطح پاسخ، روش باکس بنکن به دلیل نیاز به تعداد کمتر آزمایش‌ها و در عین حال قابلیت مناسب در برازش مدل‌های درجه دوم، از کاربرد وسیعی برخوردار است. این روش نوعی طرح عاملی سه‌سطحی ناقص محسوب می‌شود که در آن مجموعه‌ای از آزمایش‌های دو سطحی برای ترکیب‌های مختلف متغیرها تکرار می‌گردد. تعداد آزمایش‌ها به گونه‌ای تعیین می‌شود که تخمین ضرایب مدل درجه دوم با دقت کافی

۲-۲- پارامترهای عملکردی

در این تحقیق سه پارامتر نرخ براده برداری، کیفیت سطح و عرض شکاف برش به عنوان پارامترهای موثر خروجی مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای تعیین نرخ براده برداری، وزن قطعات ماشینکاری شده قبل و بعد از هر آزمایش اندازه‌گیری شد. برای تعیین وزن‌ها از ترازوی دیجیتال مدل DLS-100-6 با دقت ۰/۰۰۱ گرم استفاده شد. برای محاسبه نرخ براده برداری نمونه‌های ماشینکاری شده به کمک دستگاه ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی از رابطه (۱) استفاده می‌شود [۱۹]:

$$MRR = \frac{(W_{P1} - W_{P2})}{Time} \quad (1)$$

که در این رابطه، W_{P1} و W_{P2} به ترتیب وزن نمونه‌های آلومینیومی قبل و بعد از فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی است. Time نیز زمان ماشینکاری می‌باشد.

در این تحقیق برای بررسی زبری سطح قطعات ماشینکاری شده از دستگاه تیلور هابسون Taylor Hobson Surtronic 3+ با دقت ۰/۰۱ میکرومتر استفاده شد. برای انجام زبری سنجی با توجه به کوچک بودن نمونه‌ها و کاهش خطای اندازه‌گیری، قطعات بر روی میز اندازه‌گیری به کمک خمیر در موقعیت و شرایط مناسب قرار گرفت. در ابتدای داده برداری وضعیت کالیبره بودن دستگاه توسط گج زبری بررسی شد. زبری سنجی قطعات بر اساس معیار زبری سطح و برای هر

امکان پذیر باشد. همچنین ارزیابی حساسیت پاسخ های خروجی فرآیند نسبت به عوامل غیرقابل کنترل با استفاده از نسبت سیگنال به نویز صورت می گیرد [۲۰ و ۲۱].

برای انجام آزمایشات، شیارهایی بر روی یک قطعه از جنس آلومینیوم T6 ۷۰۷۵ با ضخامت ۱۲ میلیمتر به وجود آمد. این شیارها تحت شرایط مختلف با توجه به طراحی آزمایش پاسخ سطح به روش بکس بنکن به وجود آمدند. محدوده هر یک از پارامترهای ورودی بر اساس آزمایش های مقدماتی و با در نظر گرفتن سه معیار اصلی شامل پایداری فرآیند (عدم پارگی سیم)، دستیابی به نرخ براده برداری مناسب (غیراقتصادی نبودن فرآیند) و جلوگیری از افزایش بیش از حد زبری سطح (کیفیت قابل قبول) تعیین گردید. در مورد شدت جریان، مقادیر کمتر از ۰/۵ آمپر نرخ براده برداری بسیار پایینی داشتند و مقادیر بیشتر از ۱/۵ آمپر باعث پارگی مکرر سیم و زبری شدید سطح شدند، بنابراین بازه ۰/۵ تا ۱/۵ آمپر به عنوان محدوده پایدار و عملی انتخاب گردید. با همین رویکرد سه پارامتر دیگر (ولتاژ، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس) نیز تعیین شدند که سطوح نهایی هر یک در جدول ۳ ارائه شده است.

سایر پارامترها در فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی سرعت بالا برای تمام آزمایشات یکسان در نظر گرفته شده است. جدول ۴ مقادیر این پارامترها را نشان می دهد. جدول ۵ نیز نتایج آزمایش های تجربی مختلف را نشان می دهد. در این پژوهش از روش سطح پاسخ و طرح باکس بنکن استفاده شد. تعداد کل آزمایش ها ۲۷ بار تعیین گردید که شامل ۲۴ نقطه طراحی و ۳ تکرار در نقطه مرکزی می باشد. هر یک از آزمایش های اصلی (شماره ۱ تا ۲۴) به صورت یک بار اجرا شد. نقطه مرکزی (آزمایش های ۲۵ تا ۲۷) سه بار تکرار گردید. میانگین سه تکرار برای نقطه مرکزی به ترتیب برای زبری سطح ۷/۹۸ میکرومتر، نرخ براده برداری ۰/۰۰۱۱ گرم بر ثانیه و پهنای شکاف برش ۰/۷۰۲۲ میلی متر محاسبه شد. انحراف معیار متناظر برای هر پاسخ به ترتیب ۰/۰۳۵ میکرومتر، ۰/۰۰۰۰۲۵ گرم بر ثانیه و ۰/۰۰۱۷ میلی متر می باشد. با توجه به مقادیر اندک انحراف معیار محاسبه شده برای هر سه پاسخ خروجی، تکرارپذیری مناسب فرآیند و دقت کافی اندازه گیری ها تأیید می گردد.

جدول ۴- شرایط ماشینکاری بر روی قطعات آلومینیوم T6 ۷۰۷۵ با استفاده از دستگاه ماشینکاری تخلیه الکتریکی

سیمی	
نوع	مقدار
سیال دی الکتریک	آب دی یونیزه
سرعت سیم	۵۰۰ متر بر دقیقه
فشار شست و شو	۲ بار
کشش سیم	۱۲ نیوتون
قطبیت	قطعه کار مثبت
نوع ژنراتور	ایزو پالس

جدول ۳- سطوح پارامترهای طراحی آزمایش

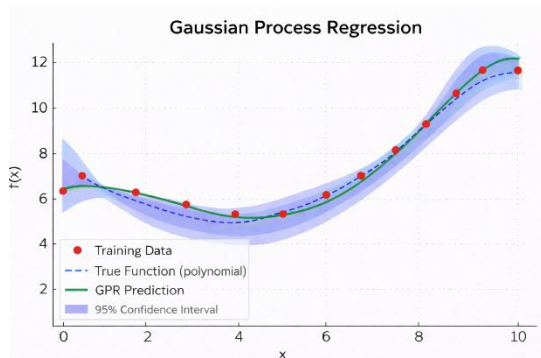
پارامتر	علامت	سطح پایینی	سطح میانی	سطح بالایی
ولتاژ (ولت)	V	۸۰	۱۰۰	۱۲۰
زمان روشنی پالس	T-on	۱۶	۳۲	۴۸
زمان روشنی پالس	T-off	۸	۱۶	۲۴
شدت جریان (آمپر)	I	۰.۵	۱	۱.۵

جدول ۵- نتایج آزمایش های تجربی براساس طراحی آزمایش

شماره آزمایش	ولتاژ (V)	جریان الکتریکی (A)	زمان روشنی پالس (μS)	زمان خاموشی پالس (μS)	زبری سطح (μm)	نرخ براده برداری (g/s)	پهنای شکاف برش (mm)
۱	۸۰	۰/۵	۳۲	۱۶	۳/۶۴	۰/۰۰۱۴	۰/۵۵۵۲
۲	۱۲۰	۰/۵	۳۲	۱۶	۴/۰۴	۰/۰۰۲۴	۰/۶۹۲۸
۳	۸۰	۱/۵	۳۲	۱۶	۷/۸۴	۰/۰۰۲۲	۰/۷۲۳۸
۴	۱۲۰	۱/۵	۳۲	۱۶	۵/۲۶	۰/۰۰۰۳	۰/۶۸۰۸
۵	۱۰۰	۱	۱۶	۸	۸/۵۴	۰/۰۰۱۷	۰/۶۸۷
۶	۱۰۰	۱	۴۸	۸	۹/۵۲	۰/۰۰۱۵	۰/۶۷۱۶
۷	۱۰۰	۱	۱۶	۲۴	۳/۴۸	۰/۰۰۱۱	۰/۶۳۹۴

۰/۷۲۶	۰/۰۰۰۱	۳/۹	۲۴	۴۸	۱	۱۰۰	۸
۰/۷۱۹۸	۰/۰۰۰۱۸	۱۱/۲	۸	۳۲	۱	۸۰	۹
۰/۷۲۱	۰/۰۰۰۱۲	۷/۴۶	۸	۳۲	۱	۱۲۰	۱۰
۰/۵۷۸۴	۰/۰۰۰۰۹	۴/۵۶	۲۴	۳۲	۱	۸۰	۱۱
۰/۸۲۶۲	۰/۰۰۰۱۹	۵/۱۴	۲۴	۳۲	۱	۱۲۰	۱۲
۰/۶۴۶۴	۰/۰۰۰۲۱	۲/۵۶	۱۶	۱۶	۰/۵	۱۰۰	۱۳
۰/۷۴۷۸	۰/۰۰۰۳۴۵	۴/۳۶	۱۶	۱۶	۱/۵	۱۰۰	۱۴
۰/۷۹	۰/۰۰۰۱۵۷	۳/۴۲	۱۶	۴۸	۰/۵	۱۰۰	۱۵
۰/۷۳۲۸	۰/۰۰۰۰۲	۵/۸۸	۱۶	۴۸	۱/۵	۱۰۰	۱۶
۰/۶۰۷۶	۰/۰۰۰۱۲۷	۶/۹	۱۶	۱۶	۱	۸۰	۱۷
۰/۶۶۳۸	۰/۰۰۰۱۵۶	۳/۸۶	۱۶	۱۶	۱	۱۲۰	۱۸
۰/۶۳۵۸	۰/۰۰۰۰۷۵	۳/۰۸	۱۶	۴۸	۱	۸۰	۱۹
۰/۷۱۳۴	۰/۰۰۰۱۷۷	۷/۴۲	۱۶	۴۸	۱	۱۲۰	۲۰
۰/۶۰۸۸	۰/۰۰۰۱۷۷	۸/۵۴	۸	۳۲	۰/۵	۱۰۰	۲۱
۰/۸۱۱۲	۰/۰۰۰۳۲	۸/۴۶	۸	۳۲	۱/۵	۱۰۰	۲۲
۰/۶۳۰۶	۰/۰۰۰۳۱۷	۳/۴	۲۴	۳۲	۰/۵	۱۰۰	۲۳
۰/۶۷۷۴	۰/۰۰۰۱۸۱	۵/۰۴	۲۴	۳۲	۱/۵	۱۰۰	۲۴
۰/۷۰۲۱	۰/۰۰۰۱۱۳	۷/۹۵	۱۶	۳۲	۱	۱۰۰	۲۵
۰/۷۰۲۴	۰/۰۰۰۱۰۸	۸/۰۳	۱۶	۳۲	۱	۱۰۰	۲۶
۰/۷۰۲۱	۰/۰۰۰۱۱	۷/۹۶	۱۶	۳۲	۱	۱۰۰	۲۷

شماتیکی از عملکرد روش رگرسیون فرآیند گاوسی در تخمین تابع هدف و بیان قابلیت آن در بازنمایی رفتار مدل ارائه شده است.



شکل ۲- پیش‌بینی و ارزیابی عدم قطعیت با استفاده از Gaussian Process Regression

عنصر کلیدی در رگرسیون فرآیند گاوسی، تابع کوواریانس یا تابع هسته (Kernel Function) است که میزان شباهت بین داده‌ها را در فضای ورودی تعیین می‌کند. تابع هسته نقش اساسی در شکل‌گیری ساختار مدل و رفتار پیش‌بینی‌ها دارد و انتخاب مناسب آن تأثیر مستقیمی بر دقت

۲-۴- مدل‌سازی با رگرسیون فرآیند گاوسی

رگرسیون فرآیند گاوسی (Gaussian Process Regression – GPR) یکی از روش‌های آماری پیشرفته در حوزه یادگیری ماشین غیرپارامتری است که به‌طور گسترده برای مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار سیستم‌های پیچیده و غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، برخلاف مدل‌های پارامتری متداول که یک رابطه ریاضی مشخص میان ورودی‌ها و خروجی‌ها فرض می‌شود، یک چارچوب احتمالاتی تعریف می‌گردد که در آن مجموعه‌ای از توابع ممکن برای توصیف رفتار سیستم در نظر گرفته می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود رگرسیون فرآیند گاوسی توانایی بالایی در تقریب روابط غیرخطی و پیچیده داشته باشد. مبنای نظری روش رگرسیون فرآیند گاوسی بر مفهوم فرآیند گاوسی استوار است. در این چارچوب فرض می‌شود که مقدار تابع هدف در نقاط مختلف فضای ورودی از یک فرآیند تصادفی پیروی می‌کند که دارای توزیع نرمال چندمتغیره است. به بیان دیگر، به‌جای تعریف یک تابع معین، یک توزیع احتمال بر روی فضای توابع تعریف می‌شود که امکان مدل‌سازی انعطاف‌پذیر رفتار سیستم را فراهم می‌سازد. این رویکرد به‌ویژه برای فرآیندهایی با رفتار غیرخطی و وابستگی متقابل بین پارامترها مناسب است. در شکل ۲، نمایش

براده برداری که رفتار غیرخطی ملایم تری نسبت به سایر پاسخ ها از خود نشان داد، از کرنل Matern 5/2 استفاده شد که رابطه آن طبق رابطه (۶) تعریف می شود.

$$k(x, x') = \sigma^2 \left(1 + \frac{\sqrt{5} r}{l} + \frac{5 r^2}{3 l^2} \right) \exp\left(-\frac{\sqrt{5} r}{l}\right) \quad (6)$$

در این مطالعه، چهار پارامتر کنترلی شامل ولتاژ اعمالی، شدت جریان، زمان روشن بودن پالس و زمان خاموشی پالس به عنوان متغیرهای ورودی مدل در نظر گرفته شدند. پاسخ های خروجی شامل زبری سطح، نرخ براده برداری و پهنای شکاف برش بودند که هر یک به طور مستقل مدلسازی شدند. بدین ترتیب، برای هر پاسخ خروجی یک مدل رگرسیون فرآیند گاوسی مجزا توسعه داده شد تا دقت و انعطاف پذیری مدلسازی افزایش یابد.

از آنجا که دامنه تغییرات پاسخ ها، به ویژه نرخ براده برداری، با سایر خروجی ها متفاوت بود، پیش از انجام مدلسازی، مقادیر هر پاسخ با استفاده از روش نرمال سازی Min-Max به بازه [0,1] تبدیل شدند. این اقدام موجب بهبود پایداری عددی فرآیند آموزش مدل و جلوگیری از اثر غالب یک پاسخ بر سایر پاسخ ها گردید. همچنین، متغیرهای ورودی در مرحله آموزش مدل استاندارد سازی شدند تا تأثیر مقیاس های متفاوت پارامترها کاهش یابد. فرآیند آموزش مدل ها با استفاده از روش استنتاج دقیق انجام شد که برای مجموعه داده های با حجم محدود مناسب بوده و دقت بالاتری نسبت به روش های تقریبی فراهم می کند. در نهایت، عملکرد مدل های توسعه یافته با استفاده از اعتبارسنجی متقاطع پنج بخشی ارزیابی شد تا قابلیت تعمیم پذیری مدل ها نسبت به داده های جدید بررسی گردد. نتایج کمی و تحلیل های مربوط به دقت مدل ها در بخش نتایج و بحث ارائه خواهد شد.

در مجموع، استفاده از رگرسیون فرآیند گاوسی به عنوان ابزار مدلسازی، امکان برقراری یک نگاشت دقیق و منعطف بین پارامترهای فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی و پاسخ های خروجی را فراهم کرد و بستر مناسبی برای انجام تحلیل های حساسیت و بهینه سازی چندهدفه در مراحل بعدی پژوهش ایجاد نمود.

و کارایی مدل خواهد داشت. بسته به نوع تابع هسته، مدل قادر است الگوهای متفاوتی از داده ها را بازنمایی کند. از این رو، کرنل های متنوعی از جمله نمایی، نمایی مربعی، ماترن و چندجمله ای در مدلسازی با رگرسیون فرآیند گاوسی مورد استفاده قرار گرفته اند [۲۲]. روش های مختلفی نیز برای انتخاب و بهینه سازی تابع هسته در مطالعات پیشین گزارش شده است [۲۳ و ۲۴]. در رگرسیون فرآیند گاوسی فرض می شود خروجی سیستم از ترکیب یک تابع ناشناخته و نویز تصادفی نرمال حاصل شده است.

اگر تابع هدف $f(x)$ از ورودی x و نویز نرمال ε تشکیل شده باشد، آنگاه طبق رابطه (۲) برای یک فرآیند گاوسی:

$$y = f(x) + \varepsilon \quad (2)$$

که در آن نویز طبق رابطه (۳) تعریف می شود.

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (3)$$

بنابراین تابع هدف در فرآیند گاوسی طبق رابطه (۴) تعریف می شود.

$$f(x) \sim N(\mu(x), k(x, x')) \quad (4)$$

تابع $\mu(x)$ میانگین و $k(x, x')$ تابع کوواریانس یا کرنل است. در بسیاری از کاربردهای عملی، برای ساده سازی فرآیند مدلسازی، تابع میانگین صفر در نظر گرفته می شود. برای مجموعه ای از داده های آموزشی شامل بردار ورودی X خروجی های مشاهده شده Y و همچنین نقاط ورودی جدید، توزیع مشترک پاسخ ها به صورت یک توزیع نرمال چندمتغیره تعریف می شود که امکان محاسبه تحلیلی میانگین و کوواریانس پیش بینی ها را فراهم می سازد [۲۲ و ۲۵].

در این پژوهش، به منظور مدلسازی دقیق رفتار غیرخطی فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی، از خانواده توابع هسته ماترن استفاده شد که به دلیل نرمی متوسط و توانایی در توصیف تغییرات غیرخطی، در بسیاری از مسائل مهندسی عملکرد مطلوبی دارند. برای مدلسازی زبری سطح و پهنای شکاف برش از کرنل Matern 3/2 استفاده گردید که رابطه ریاضی آن طبق رابطه (۵) بیان می شود.

$$k(x, x') = \sigma^2 \left(1 + \frac{\sqrt{3} r}{l} \right) \exp\left(-\frac{\sqrt{3} r}{l}\right) \quad (5)$$

که در این رابطه $r = \|x - x'\|$ فاصله اقلیدسی بین دو نقطه، l طول و σ^2 واریانس فرآیند گاوسی می باشد.

این کرنل برای توصیف رفتارهایی با نرمی کمتر و تغییرات نسبتاً سریع مناسب است. همچنین برای مدلسازی نرخ

۲-۵- بهینه‌سازی چندهدفه فرآیند

پس از توسعه مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر رگرسیون فرآیند گاوسی، مرحله بعدی پژوهش به بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند ماشینکاری ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی اختصاص یافت. از آنجا که اهداف عملکردی این فرآیند ماهیتی متناقض دارند، مسئله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه تعریف شد. به طور مشخص، کاهش زبری سطح و پهنای شکاف برش از یک سو و افزایش نرخ براده‌برداری از سوی دیگر، اهدافی هستند که بهبود هم‌زمان آن‌ها با یکدیگر در تضاد قرار می‌گیرد.

در این مطالعه، سه تابع هدف به صورت زیر تعریف شدند:

کمینه‌سازی زبری سطح

بیشینه‌سازی نرخ براده‌برداری

کمینه‌سازی پهنای شکاف برش

از آنجا که الگوریتم‌های متداول بهینه‌سازی چندهدفه معمولاً بر پایه کمینه‌سازی توابع هدف عمل می‌کنند، تابع مربوط به نرخ براده‌برداری با تبدیل مناسب به صورت کمینه‌سازی مقدار معکوس یا مکمل آن در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، چارچوب بهینه‌سازی امکان بررسی هم‌زمان هر سه هدف را فراهم ساخت.

متغیرهای تصمیم در مسئله بهینه‌سازی شامل چهار پارامتر کنترلی فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی، یعنی ولتاژ اعمالی، شدت جریان، زمان روشن بودن پالس و زمان خاموشی پالس بودند. حدود بالا و پایین هر متغیر تصمیم بر اساس دامنه‌های عملی و شرایط آزمایشگاهی تعیین شد تا پاسخ‌های به دست آمده از نظر فیزیکی و صنعتی قابل تحقق باشند.

برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، از الگوریتم

تکاملی NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic

Algorithm II) استفاده شد که یکی از پرکاربردترین و

کارآمدترین الگوریتم‌ها در این حوزه به شمار می‌رود. این الگوریتم با بهره‌گیری از مفاهیمی مانند مرتب‌سازی نامغلوب، حفظ تنوع جمعیت و اپراتورهای ژنتیکی، قادر است مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه را به صورت هم‌زمان تولید کند [۲۶ و ۲۷].

در فرآیند بهینه‌سازی، مدل‌های رگرسیون فرآیند گاوسی توسعه یافته به عنوان توابع جانشین مورد استفاده قرار گرفتند. بدین معنا که به جای انجام محاسبات پرهزینه یا آزمایش‌های

فیزیکی مکرر، پیش‌بینی‌های حاصل از مدل‌های رگرسیون فرآیند گاوسی برای ارزیابی توابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی به کار رفت. این رویکرد موجب کاهش چشمگیر هزینه محاسباتی و افزایش سرعت همگرایی فرآیند بهینه‌سازی شد.

خروجی الگوریتم NSGA-II به صورت مجموعه‌ای از راه‌حل‌های نامغلوب ارائه گردید که به آن جبهه پارتو (Pareto

Front) گفته می‌شود. جبهه پارتو مجموعه‌ای از نقاط بهینه را دربرمی‌گیرد که در هریک از آن‌ها، هرگونه افزایش مطلوبیت در یک تابع هدف، ناگزیر با کاهش کارایی در دست کم یکی از توابع هدف دیگر همراه است. بدین ترتیب، این جبهه درک جامعی از تعادل و مصالحه میان اهداف مختلف فرآیند را ممکن می‌سازد [۲۸]. برای انتخاب یک راه‌حل پیشنهادی از میان مجموعه نقاط جبهه پارتو، از یک معیار تصمیم‌گیری مناسب استفاده شد. در این پژوهش، نقطه‌ای که کمترین فاصله را از نقطه ایده‌آل (شامل کمینه زبری سطح، کمینه پهنای شکاف برش و بیشینه نرخ براده‌برداری) داشت، به عنوان راه‌حل بهینه نهایی معرفی گردید. این انتخاب امکان دستیابی به یک توازن منطقی میان اهداف مختلف فرآیند را فراهم ساخت. این الگوریتم با استفاده از تابع gamultiobj در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شد. پارامترهای الگوریتم به ترتیب اندازه جمعیت ۹۰۰، تعداد نسل ۴۵۰، کسر تبادل ۰/۹ و کسر پارتو ۰/۸۵ تنظیم گردیدند. این تنظیمات به گونه‌ای تعیین شدند که ضمن کاهش هزینه محاسباتی، همگرایی الگوریتم به جبهه پارتو واقعی تضمین گردد. به منظور پایش فرآیند بهینه‌سازی، تابع خروجی در هر نسل مقادیر بهترین توابع هدف و معیار پراکندگی جبهه پارتو را ذخیره نمود. نتایج نشان داد که الگوریتم پس از حدود ۲۲۰ نسل به جبهه پارتو پایدار دست می‌یابد و نسل‌های بعدی تغییر محسوسی در جبهه ایجاد نمی‌کنند.

در مجموع، ترکیب مدلسازی مبتنی بر رگرسیون فرآیند گاوسی و بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم NSGA-II، چارچوبی کارآمد و انعطاف‌پذیر برای تعیین شرایط بهینه ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی ایجاد کرد. نتایج عددی، تحلیل جبهه پارتو و بررسی همگرایی الگوریتم در بخش نتایج و بحث ارائه خواهد شد.

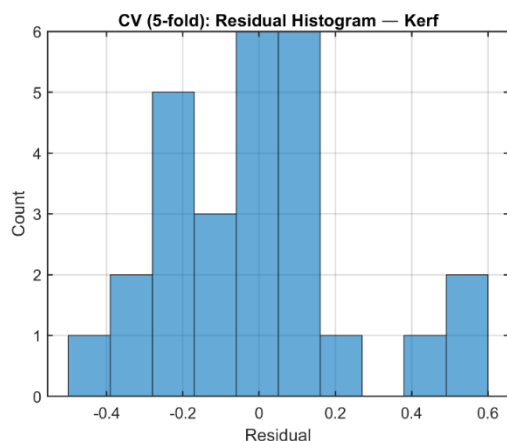
۳- بحث و نتایج

برای پیش‌بینی پاسخ‌های فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی (زبری سطح، نرخ براده‌برداری و پهنای شکاف برش) از مدل‌های رگرسیون فرایند گاوسی استفاده شد.

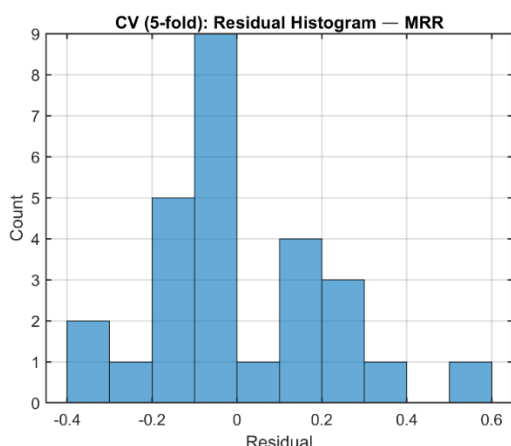
با توجه به اختلاف مقیاس پاسخ‌ها، ابتدا هر خروجی با نرمال‌سازی کمینه-بیشینه به بازه $[0, 1]$ نگاشت شد تا آموزش مدل پایدارتر شده و یک پاسخ بر پاسخ‌های دیگر غلبه نکند. سپس برای هر پاسخ، یک مدل رگرسیون فرایند گاوسی مستقل آموزش داده شد. برای زبری سطح و پهنای شکاف برش از کرنل ماترن $3/2$ و برای نرخ براده‌برداری کرنل ماترن $5/2$ استفاده شد تا رفتارهای غیرخطی با نرمی متوسط بهتر بازنمایی شوند.

به منظور بررسی توان تعمیم‌پذیری، اعتبارسنجی متقاطع پنج‌بخشی انجام شد. نتایج نشان داد مدل زبری سطح عملکرد قابل قبول‌تری نسبت به دو پاسخ دیگر دارد؛ به‌طوری که R^2 حدود $93/7\%$ گزارش شد، در حالی که ضریب تعیین برای نرخ براده‌برداری $87/32\%$ و برای پهنای شکاف برش $85/71\%$ به دست آمد. به منظور بررسی کیفیت برازش مدل‌های رگرسیون فرایند گاوسی و شناسایی وجود هرگونه الگوی سیستماتیک در خطاهای پیش‌بینی، تحلیل باقیمانده‌ها بر پایه نتایج اعتبارسنجی متقاطع پنج‌بخشی انجام شد. توزیع باقیمانده‌ها برای هر یک از پاسخ‌های زبری سطح، نرخ براده‌برداری و پهنای شکاف برش در قالب هیستوگرام‌های جداگانه ارائه شده است. در یک مدل مناسب، انتظار می‌رود باقیمانده‌ها حول مقدار صفر متمرکز شده و توزیعی تقریباً متقارن داشته باشند که نشان‌دهنده نبود سوگیری سیستماتیک در پیش‌بینی‌ها است. بر اساس نتایج به دست آمده، توزیع باقیمانده‌های زبری سطح نسبتاً متقارن بوده و تمرکز اصلی داده‌ها در اطراف صفر مشاهده می‌شود که بیانگر عملکرد پایدارتر مدل رگرسیون فرایند گاوسی در پیش‌بینی این پاسخ است. در مقابل، برای نرخ براده‌برداری و پهنای شکاف برش، پراکندگی باقیمانده‌ها بیشتر بوده و اندکی چولگی در توزیع مشاهده می‌شود. این رفتار نشان می‌دهد که اگرچه مدل قادر به شناسایی روند کلی داده‌ها است، اما در برخی نواحی فضای طراحی، به‌ویژه برای پاسخ‌هایی با رفتار پیچیده‌تر یا حساس‌تر به پارامترهای فرایندی، دقت پیش‌بینی کاهش می‌یابد. این موضوع با مقادیر پایین‌تر ضریب تعیین برای پاسخ‌های نرخ براده‌برداری و پهنای

شکاف برش هم‌راستا می‌باشد. هیستوگرام مقادیر باقیمانده برای هر پارامتر خروجی در اشکال ۳ تا ۵ نشان داده شده است.

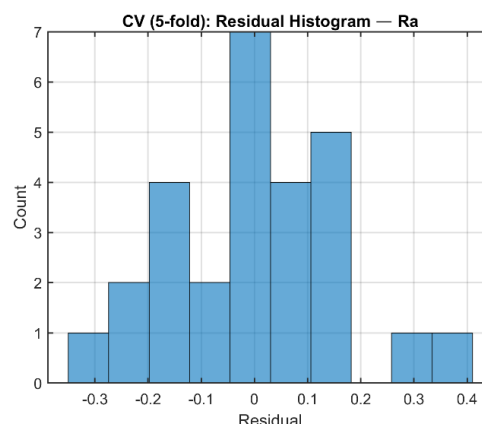


شکل ۳- هیستوگرام باقیمانده‌های پیش‌بینی مدل رگرسیون فرایند گاوسی برای پهنای شکاف برش بر اساس اعتبارسنجی متقاطع پنج‌بخشی

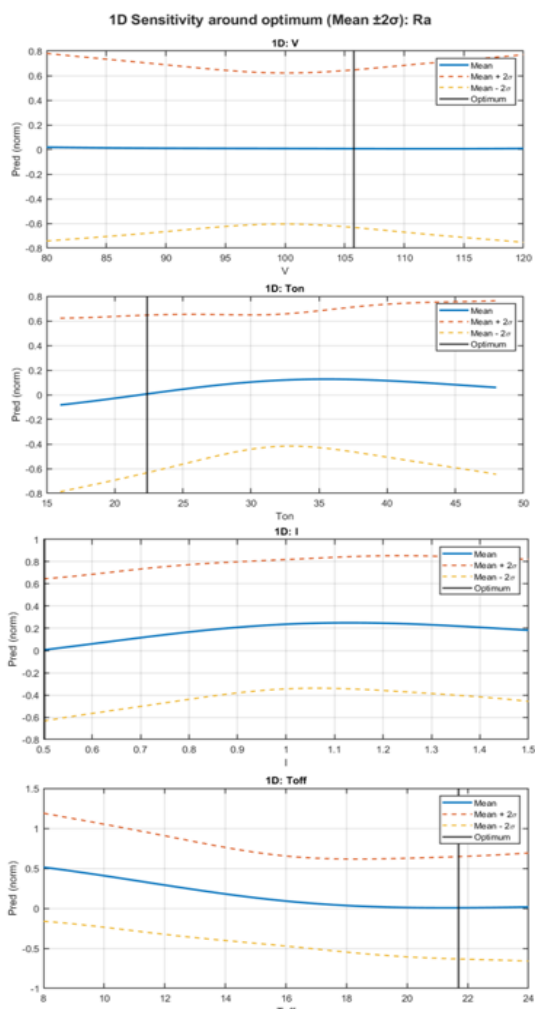


شکل ۴- هیستوگرام باقیمانده‌های پیش‌بینی مدل رگرسیون فرایند گاوسی برای نرخ براده‌برداری بر اساس اعتبارسنجی متقاطع پنج‌بخشی

زبری سطح نسبتاً محدود بوده و تغییرات میانگین پیش‌بینی شده در کل بازه ولتاژ اندک است، هرچند پهنای باند عدم قطعیت نشان می‌دهد که پیش‌بینی مدل در مقادیر انتهایی ولتاژ با عدم قطعیت بیشتری همراه است. همچنین زمان خاموشی پالس روندی کاهشی بر زبری سطح نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از بهبود شرایط تخلیه و کاهش تجمع حرارت در ناحیه برش باشد. به طور کلی، نمودارها نشان می‌دهند که کنترل دقیق جریان و زمان روشن پالس نقش کلیدی در بهبود کیفیت سطح در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی دارد.



شکل ۵- هیستوگرام باقیمانده‌های پیش‌بینی مدل رگرسیون فرآیند گاوسی برای زبری سطح بر اساس اعتبارسنجی متقاطع پنج‌بخشی

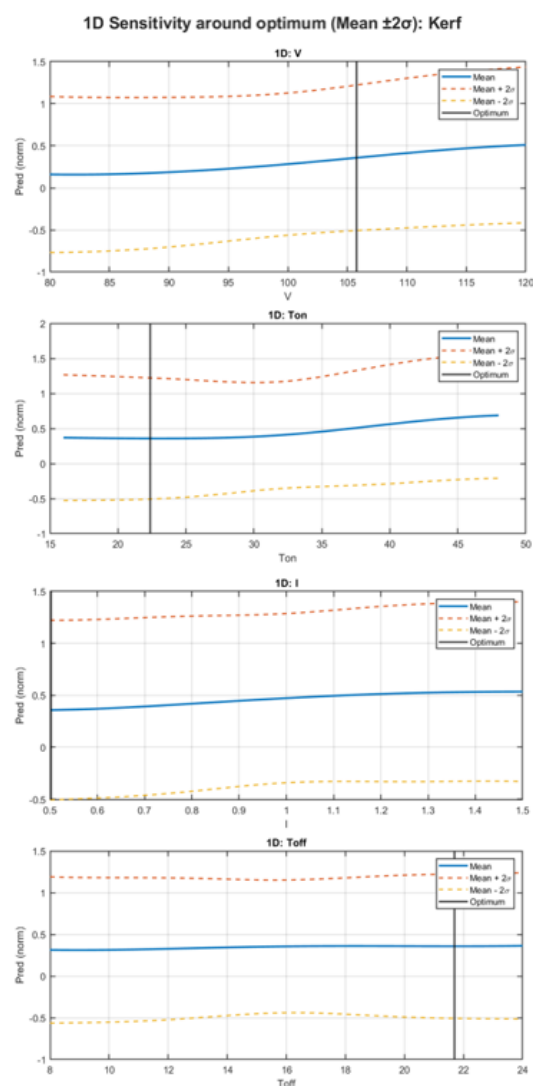


شکل ۶- آنالیز حساسیت یک‌بعدی زبری سطح اطراف نقطه بهینه با استفاده از مدل رگرسیون فرآیند گاوسی (میانگین پیش‌بینی و باند‌های 2σ)

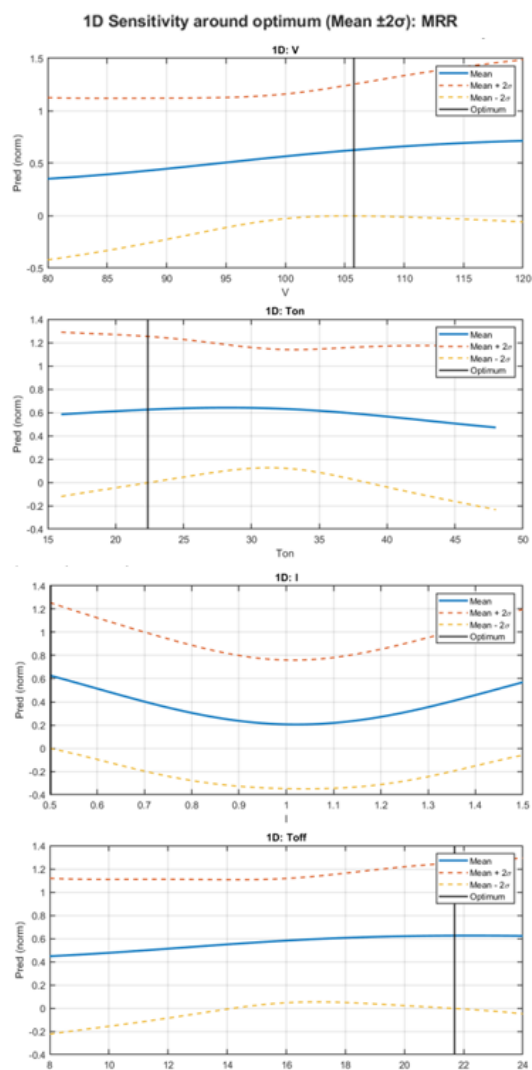
به منظور بررسی اثر مستقل هر یک از پارامترهای فرآیندی بر پاسخ‌های خروجی و همچنین ارزیابی پایداری پیش‌بینی مدل در اطراف نقطه بهینه، آنالیز حساسیت یک بعدی بر اساس مدل‌های رگرسیون فرآیند گاوسی انجام شد. در این تحلیل، هر پارامتر ورودی به صورت مجزا در بازه مجاز تغییر داده شد، در حالی که سایر پارامترها در مقدار بهینه ثابت نگه داشته شدند. علاوه بر مقدار میانگین پیش‌بینی‌شده، باند‌های عدم‌قطعیت $\pm 2\sigma$ نیز نمایش داده شدند تا میزان اطمینان مدل در نواحی مختلف فضای طراحی مشخص گردد. این نوع نمایش، علاوه بر آشکارسازی روند تغییرات پاسخ‌ها، امکان مقایسه حساسیت نسبی پارامترها و شناسایی نواحی پایدار یا ناپایدار فرآیند را فراهم می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده برای هر یک از پاسخ‌ها در ادامه به‌صورت تفکیک‌شده مورد بحث قرار می‌گیرد.

همانگونه که در شکل ۶ نشان داده شده است بر اساس نمودارهای حساسیت یک‌بعدی زبری سطح، مشاهده می‌شود که جریان الکتریکی و زمان روشن بودن پالس بیشترین تأثیر را بر تغییرات زبری سطح دارند. افزایش جریان در بازه مورد بررسی منجر به افزایش زبری سطح می‌شود که می‌تواند به افزایش انرژی تخلیه و تشدید ذوب و بازانجماد سطحی نسبت داده شود. از سوی دیگر، تغییرات زمان روشنی پالس رفتاری غیرخطی از خود نشان می‌دهد؛ به طوری که در مقادیر میانی، کمینه نسبی در زبری سطح مشاهده می‌شود که بیانگر وجود یک ناحیه بهینه برای بهبود کیفیت سطح است. تأثیر ولتاژ بر

مؤثر ذرات مذاب است. رفتار جریان و زمان روشنی پالس نسبت به نرخ براده برداری غیرخطی است و وجود نقاط بیشینه محلی در نمودارها نشان می دهد که افزایش بیش از حد این پارامترها الزاماً به افزایش نرخ براده برداری منجر نمی شود. پهنای نسبتاً بزرگ باندهای $2\pm\sigma$ در برخی نواحی، به ویژه برای زمان روشنی پالس، بیانگر عدم قطعیت بالاتر مدل در پیش بینی نرخ براده برداری بوده که با نتایج اعتبارسنجی متقاطع و مقادیر پایین تر ضریب تعیین برای این پاسخ هم خوانی دارد.



شکل ۸- آنالیز حساسیت یک بعدی پهنای شکاف برش اطراف نقطه بهینه با استفاده از مدل رگرسیون فرآیند گاوسی (میانگین پیش بینی و باندهای $2\pm\sigma$)

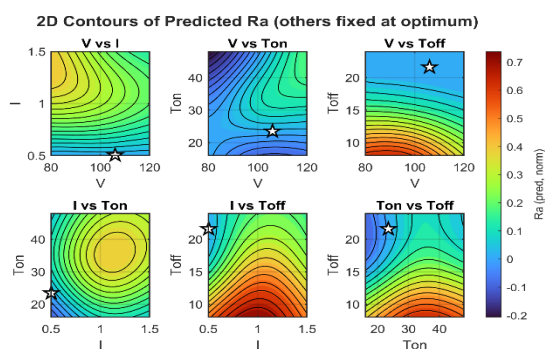


شکل ۷- آنالیز حساسیت یک بعدی نرخ براده برداری اطراف نقطه بهینه با استفاده از مدل رگرسیون فرآیند گاوسی (میانگین پیش بینی و باندهای $2\pm\sigma$)

نمودارهای حساسیت نرخ براده برداری نشان می دهند (شکل ۷) که ولتاژ اعمالی و زمان خاموشی پالس بیشترین تأثیر را بر تغییرات نرخ براده برداری دارند. افزایش ولتاژ منجر به افزایش یکنواخت نرخ براده برداری می شود که با افزایش شدت تخلیه و حجم ماده برداشته شده در هر پالس سازگار است. در مقابل، افزایش زمان خاموشی پالس تا حدی موجب بهبود نرخ براده برداری شده و سپس روندی تقریباً پایدار را نشان می دهد که بیانگر وجود یک بازه مناسب برای تخلیه پایدار و خروج

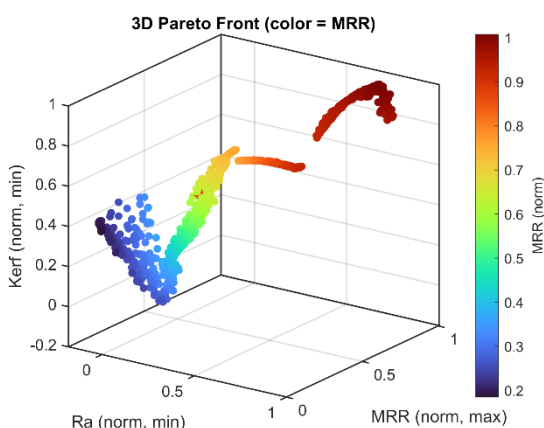
این رفتار، ماهیت چندهدفه فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی را تأیید می‌کند. نقطه بهینه انتخاب شده (نزدیک‌ترین نقطه به ایده‌آل نرمال شده) در ناحیه‌ای میانی از جبهه پارتو قرار دارد؛ به گونه‌ای که تعادل مناسبی بین کیفیت سطح و بهره‌وری ماشین‌کاری برقرار می‌کند. این نقطه نه افراط در بیشینه‌سازی نرخ براده‌برداری دارد و نه منجر به افزایش شدید زبری سطح و پهنای شکاف برش می‌شود، بنابراین از دیدگاه صنعتی، گزینه‌ای عملی و قابل پیاده‌سازی محسوب می‌شود. همچنین توزیع پیوسته و هموار نقاط روی جبهه پارتو نشان‌دهنده پایداری مدل رگرسیون فرآیند گاوسی و همگرایی مناسب الگوریتم ژنتیک چندهدفه است.

کانتورهای دوبعدی زبری سطح، تأثیر هم‌زمان جفت پارامترهای ورودی را بر زبری سطح، در حالی که سایر پارامترها در مقدار بهینه ثابت شده‌اند، نشان می‌دهند. نتایج بیانگر آن است که زبری سطح به شدت تحت تأثیر پارامترهای زمانی زمان روشن‌پالس و زمان خاموشی پالس قرار دارد، به‌ویژه در ترکیب $T_{on}-T_{off}$ که گرادیان‌های تندتری مشاهده می‌شود. در نمودارهای شامل ولتاژ، تغییرات زبری سطح نسبتاً ملایم‌تر بوده و خطوط هم‌مقدار با شیب کم‌تری تغییر می‌کنند که نشان می‌دهد ولتاژ در محدوده بررسی شده، اثر ثانویه‌تری بر زبری سطح دارد. در مقابل، افزایش زمان روشن‌پالس در بسیاری از نواحی منجر به افزایش زبری سطح شده که به افزایش انرژی تخلیه و ناپایداری حوضچه مذاب نسبت داده می‌شود. همانگونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، موقعیت نقطه بهینه روی نواحی با گرادیان کم قرار گرفته است که نشان‌دهنده پایداری زبری سطح نسبت به اغتشاشات کوچک پارامترها در اطراف نقطه بهینه است.



شکل ۱۰- کانتورهای دوبعدی پیش‌بینی‌شده زبری سطح با ثابت بودن سایر پارامترها در نقطه بهینه

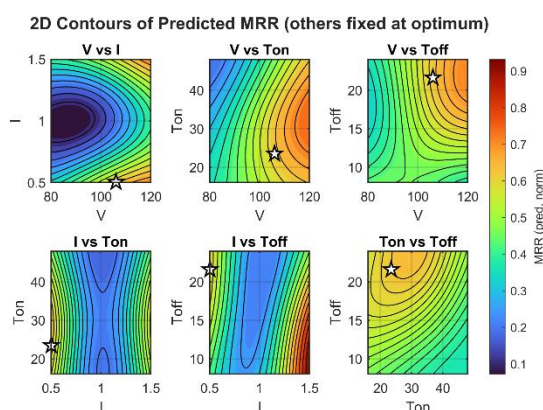
نمودارهای حساسیت پهنای شکاف برش (شکل ۸) نشان می‌دهد که زمان روشن بودن پالس و ولتاژ تأثیر غالبی بر پهنای شکاف برش دارند. افزایش زمان روشن‌پالس موجب افزایش تدریجی پهنای شکاف برش می‌شود که می‌تواند به افزایش انرژی ورودی و گسترش ناحیه ذوب نسبت داده شود. ولتاژ نیز رفتاری مشابه از خود نشان داده و افزایش آن منجر به افزایش پهنای شکاف برش می‌گردد. در مقابل، تغییرات جریان اثر نسبتاً ملایم‌تری بر پهنای شکاف برش دارد و تغییرات میانگین پیش‌بینی‌شده در کل بازه محدود است. زمان خاموشی پالس نیز تأثیری غیرخطی بر پهنای شکاف برش نشان می‌دهد؛ به طوری که در مقادیر میانی، پهنای شکاف کمینه شده و در مقادیر پایین یا بالا افزایش می‌یابد. این رفتار می‌تواند ناشی از تعادل میان خروج مذاب و پایداری قوس الکتریکی باشد.



شکل ۹- جبهه پارتو سه‌بعدی پارامترهای خروجی (رنگ) نشان‌دهنده نرخ براده‌برداری نرمال شده

شکل ۹ جبهه پارتو سه‌بعدی، مبادله میان سه تابع هدف شامل زبری سطح، نرخ براده‌برداری و پهنای شکاف برش را به‌خوبی نشان می‌دهد. در این نمودار، زبری سطح و پهنای شکاف برش باید کمینه و نرخ براده‌برداری بیشینه شوند و رنگ نقاط نمایانگر مقدار نرمال شده نرخ براده‌برداری است. مشاهده می‌شود که نقاط پارتو یک ساختار خمیده و غیرخطی را تشکیل داده‌اند که بیانگر تضاد ذاتی بین اهداف است. به طور مشخص، افزایش نرخ براده‌برداری (نقاط با رنگ گرم‌تر) اغلب با افزایش هم‌زمان زبری سطح و پهنای شکاف برش همراه است، در حالی که دستیابی به مقادیر بسیار پایین زبری سطح و پهنای شکاف برش مستلزم کاهش نرخ براده‌برداری می‌باشد.

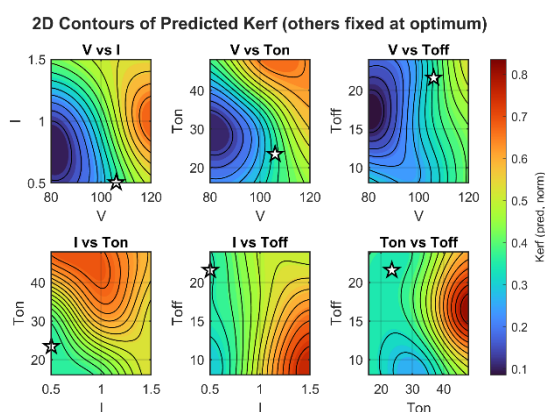
است. موقعیت نقطه بهینه در ناحیه‌ای با نرخ براده‌برداری نسبتاً بالا اما نه حداکثری قرار دارد، که نشان‌دهنده اولویت دادن به تعادل بین کیفیت سطح و بهره‌وری به جای بیشینه‌سازی صرف نرخ برداشت ماده است. شیب ملایم کانتورها در اطراف نقطه بهینه بیانگر آن است که نرخ براده‌برداری در این ناحیه نسبت به تغییرات کوچک پارامترها رفتار پایداری دارد، که از نظر عملی مزیت مهمی محسوب می‌شود.



شکل ۱۲- کانتورهای دوبعدی پیش‌بینی‌شده نرخ براده‌برداری با ثابت بودن سایر پارامترها در نقطه بهینه

در آزمایش اعتبارسنجی تجربی انجام‌شده به‌منظور ارزیابی قابلیت پیش‌بینی و کارایی مدل پیشنهادی، یک نقطه بهینه از جبهه پارتو انتخاب شد که ترکیب پارامترهای ورودی آن شامل ولتاژ ۸۰ ولت، شدت جریان ۰/۵ آمپر، زمان روشن بودن پالس ۱۶ میکروثانیه و زمان خاموشی پالس ۸ میکروثانیه است. این نقطه با رعایت کامل سطوح گسسته پارامترهای دستگاه انتخاب شده و در عین حال در مجموعه آزمایش‌های اولیه حضور نداشته است؛ از این‌رو، گزینه‌ای مناسب برای ارزیابی توان تعمیم‌پذیری مدل به شرایط کاری جدید محسوب می‌شود. بر اساس پیش‌بینی مدل رگرسیون فرایند گاوسی آموزش‌داده‌شده و تحلیل جبهه پارتو، مقادیر خروجی متناظر با این ترکیب بهینه برابر با زبری سطح ۲/۱ میکرومتر، پهنای شکاف برش ۰/۵۸ میلی‌متر و نرخ براده‌برداری ۰/۰۰۱۹ گرم بر ثانیه برآورد گردید. نتایج حاصل از آزمایش اعتبارسنجی نشان داد که مقادیر واقعی به‌ترتیب زبری سطح ۲/۱۷ میکرومتر، پهنای شکاف برش ۰/۶۲ میلی‌متر و نرخ براده‌برداری ۰/۰۰۱۸۳ می‌باشند.

کانتورهای پهنای شکاف برش در شکل ۱۱ نشان می‌دهند که پهنای شیار بیشترین حساسیت را نسبت به پارامترهای الکتریکی و زمانی به‌صورت توأمان دارد. به‌ویژه در نمودارهای I-Ton و Ton-TOFF، نواحی با پهنای شکاف برش بالا به‌وضوح قابل تشخیص‌اند که نشان‌دهنده اثر تجمعی افزایش انرژی تخلیه و مدت زمان اعمال آن است. در بسیاری از نواحی، کاهش جریان یا زمان روشنی پالس باعث کاهش پهنای شکاف برش می‌شود، اما این کاهش معمولاً با افت نرخ براده‌برداری همراه است. نقطه بهینه انتخاب‌شده در مرز نواحی با پهنای شکاف برش متوسط قرار دارد که بیانگر مصالحه منطقی بین باریک بودن شیار و حفظ نرخ برداشت ماده است. همچنین شکل کانتورها نشان می‌دهد که رفتار پهنای شکاف برش کاملاً غیرخطی است و وابستگی آن به پارامترها نمی‌تواند با مدل‌های خطی ساده توصیف شود؛ امری که ضرورت استفاده از مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین مانند رگرسیون فرایند گاوسی را توجیه می‌کند.



شکل ۱۱- کانتورهای دوبعدی پیش‌بینی‌شده پهنای شکاف برش با ثابت بودن سایر پارامترها در نقطه بهینه

کانتورهای نرخ براده‌برداری در شکل ۱۲ بیانگر آن هستند که نرخ براده‌برداری بیشترین حساسیت را نسبت به جریان و زمان روشن بودن پالس دارد. افزایش هم‌زمان این دو پارامتر منجر به افزایش قابل توجه نرخ براده‌برداری می‌شود که با اصول فیزیکی فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی و افزایش انرژی تخلیه سازگار است. در مقابل، افزایش زمان روشنی پالس در بسیاری از نواحی باعث کاهش نرخ براده‌برداری شده است که به دلیل کاهش تعداد تخلیه‌ها در واحد زمان قابل توجیه

سطح، نرخ براده برداری و پهنای شکاف برش استفاده شد. نتایج مدلسازی نشان داد که مدل‌های رگرسیون فرآیند گاوسی توسعه یافته، به‌ویژه برای پیش‌بینی زبری سطح، از دقت و توان تعمیم‌پذیری مناسبی برخوردار هستند. ارزیابی مدل‌ها با استفاده از اعتبارسنجی متقاطع پنج‌بخشی و تحلیل باقیمانده‌ها بیانگر آن بود که خطاهای پیش‌بینی به‌طور کلی فاقد الگوی سیستماتیک بوده و توزیعی نسبتاً متقارن حول مقدار صفر دارند. اگرچه برای پاسخ‌هایی نظیر نرخ براده برداری و پهنای شکاف برش پراکندگی خطاها بیشتر مشاهده شد، این رفتار با پیچیدگی فیزیکی فرآیند و حساسیت بالاتر این پاسخ‌ها نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی قابل توجیه است.

تحلیل حساسیت یک‌بعدی مبتنی بر مدل رگرسیون فرآیند گاوسی نشان داد که جریان الکتریکی و زمان روشن بودن پالس بیشترین تأثیر را بر زبری سطح دارند، در حالی که ولتاژ و زمان خاموشی پالس نقش غالب‌تری در تغییرات نرخ براده برداری ایفا می‌کنند. همچنین نتایج مربوط به پهنای شکاف برش حاکی از وابستگی غیرخطی این پاسخ به ترکیب پارامترهای زمانی و الکتریکی است. نمایش باندهای عدم قطعیت $\pm 2\sigma$ در نمودارهای حساسیت، علاوه بر آشکارسازی رفتار پاسخ‌ها، اطلاعات ارزشمندی درباره پایداری پیش‌بینی مدل در نواحی مختلف فضای طراحی فراهم کرد. در ادامه، مسئله بهینه‌سازی فرآیند به‌صورت یک مسئله چندهدفه با اهداف متناقض کمینه‌سازی زبری سطح و پهنای شکاف برش و بیشینه‌سازی نرخ براده برداری تعریف شد. استفاده از الگوریتم تکاملی NSGA-II در ترکیب با مدل‌های جانشین رگرسیون فرآیند گاوسی منجر به استخراج یک جبهه پارتو پیوسته و پایدار گردید که به‌خوبی مصالحه میان اهداف مختلف فرآیند را نمایش می‌دهد. تحلیل جبهه پارتو نشان داد که افزایش نرخ براده برداری معمولاً با افت کیفیت سطح و افزایش پهنای شیار همراه است و دستیابی به یک نقطه کاری مناسب مستلزم برقراری تعادل میان این شاخص‌هاست. به‌منظور ارزیابی عملی چارچوب پیشنهادی، یک نقطه بهینه از جبهه پارتو که ورودی‌های آن دقیقاً منطبق با سطوح گسسته قابل تنظیم دستگاه بود و در آزمایش‌های اولیه مورد استفاده قرار نگرفته بود، انتخاب و آزمایش اعتبارسنجی تجربی بر روی آن انجام شد. مقایسه نتایج تجربی و پیش‌بینی شده نشان داد که درصد خطای نسبی برای هر سه پاسخ در محدوده قابل قبول

مقایسه کمی بین مقادیر پیش‌بینی شده و تجربی بیانگر درصد خطای نسبی حدود $3/3$ درصد برای زبری سطح، $6/9$ درصد برای پهنای شکاف برش و $3/7$ برای نرخ براده برداری است. پایین بودن میزان خطا در هر سه پاسخ، به‌ویژه برای زبری سطح و نرخ براده برداری، نشان‌دهنده دقت مناسب مدل رگرسیون فرآیند گاوسی در بازنمایی روابط غیرخطی میان پارامترهای فرآیند و پاسخ‌ها می‌باشد.

از منظر فیزیکی فرآیند، انتخاب مقادیر پایین ولتاژ و جریان منجر به کاهش انرژی تخلیه جرقه‌ها شده و در نتیجه، زبری سطح کاهش یافته است. در عین حال، کاهش زمان روشن بودن پالس در کنار زمان خاموشی کوتاه‌تر، باعث کنترل بهتر ناحیه ذوب و انجماد مجدد شده و پهنای شکاف برش را در محدوده قابل قبولی نگه داشته است. هرچند این ترکیب پارامترها موجب کاهش نسبی نرخ براده برداری در مقایسه با شرایط پارانرژی‌تر می‌شود، اما نتایج نشان می‌دهد که این کاهش در چارچوب یک مصالحه بهینه چندهدفه قرار داشته و با بهبود هم‌زمان کیفیت سطح و دقت برش همراه بوده است. به‌طور کلی، نتایج آزمایش اعتبارسنجی بیانگر آن است که چارچوب پیشنهادی مبتنی بر مدلسازی رگرسیون فرآیند گاوسی و بهینه‌سازی چندهدفه پارتویی قادر است با دقت قابل قبول، شرایط کاری بهینه را پیش‌بینی کرده و پاسخ‌های واقعی فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی را تخمین بزند. این موضوع اعتبار مدل توسعه یافته را تأیید کرده و قابلیت استفاده عملی آن را برای انتخاب شرایط ماشینکاری بهینه در کاربردهای صنعتی نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک چارچوب جامع و کارآمد برای مدلسازی، تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی چندهدفه فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی سرعت بالا آلیاژ آلومینیوم T6 ۷۰۷۵ ارائه شد. با توجه به ماهیت غیرخطی، پیچیده و وابسته به تعامل پارامترهای فرآیندی در ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی، استفاده از روش‌های کلاسیک تجربی به‌تنهایی قادر به توصیف دقیق رفتار سیستم و استخراج شرایط کاری بهینه نیست. از این‌رو، در این تحقیق از رگرسیون فرآیند گاوسی به‌عنوان یک روش یادگیری ماشین غیرپارامتری و مبتنی بر چارچوب بیزی برای مدلسازی پاسخ‌های فرآیند شامل زبری

- [3] Afridi, S. A., Younas, M., Khan, Z., & Khan, A. M. (2025). Investigating wire electric-discharge machining (wedm) parameters for improved machining of D2 Steel: a multi-objective optimization study. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 26(4), 817-835.
- [4] Foorginejad, A., Mollayi, N., & Taheri, M. (2018). Application of the Relevance Vector Machine for Modeling Surface Roughness in WEDM Process for Ti-6Al-4V Titanium Alloy.
- [5] Karthikeyan, A. G., Prabhu, L., Khan, T., & A. Sebaey, T. (2025). Influence of WEDM input variables on the machinability of Ni-Cu superalloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 40(1), 1-8.
- [6] Abouhawa, M., Elshinawi, A., Eisa, A., & Fattouh, M. (2025). A hybrid machine learning approach to optimize kerf quality in AWJM of Ti-6Al-4V/CFRP/Al7075 stacks. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 19(11), 7413-7435.
- [7] Saha, S., Arunkumar, T., Debnath, K., & Chaurasia, S. (2025). Optimization of Kerf width in WEDM of sandwich woven CFRP-an ensemble machine learning based approach. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50(17), 13713-13724.
- [8] Sharma, S., Singh, S., Singh, V., Kumar, P., Dhankar, A., & Dogra, B. A. (2025, June). Impact of input elements on response characteristics in wire-EDM of Harddie steel: A review. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3261, No. 1, p. 160003). AIP Publishing LLC.
- [9] Babu, B. S., Sathiyaraj, S., Ramesh, A. K. P., Afridi, B. A., & Varghese, K. K. (2021). Investigation of machining characteristics of aluminium 6061 by wire cut EDM process. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6247-6252.
- [10] Saif, M., & Rawat, R. K. (2023). Investigation of aluminum alloy 6061 in Wire-EDM regarding surface roughness and material removal rate by adopting optimization techniques. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 9410-9420.
- [11] Saif, M., & Tiwari, S. (2021). Investigation towards surface roughness & material removal rate in Wire-EDM of aluminium alloy 6061 and 5083 using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 47, 1040-1047.
- [12] Thejasree, P., & Natarajan, M. (2024). Applications of hybrid artificial intelligence tool in wire electro discharge machining of 7075 aluminium alloy. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 18(10), 7305-7316.
- [13] Selvam, R., Vignesh, M., Pugazhenth, R., Anbuezhayan, G., & Satyanarayana Gupta, M. (2024). Effect of process parameter on wire cut

قرار دارد که این موضوع دقت مناسب مدل رگرسیون فرآیند گاوسی و قابلیت اعتماد روش بهینه‌سازی چندهدفه را تأیید می‌کند. همچنین تحلیل فیزیکی نتایج نشان داد که کاهش ولتاژ و جریان، در کنار تنظیم مناسب پارامترهای زمانی، منجر به بهبود هم‌زمان کیفیت سطح و کنترل پهنای شیار شده و این امر با اصول فیزیکی فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی سازگار است. در مجموع، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ترکیب رگرسیون فرآیند گاوسی، تحلیل حساسیت مبتنی بر عدم قطعیت و بهینه‌سازی چندهدفه پارتویی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای انتخاب شرایط کاری بهینه در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی مورد استفاده قرار گیرد. چارچوب ارائه‌شده علاوه بر کاهش تعداد آزمایش‌های پرهزینه، امکان درک عمیق‌تر رفتار فرآیند و تصمیم‌گیری آگاهانه در محیط‌های صنعتی را فراهم می‌سازد و می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای توسعه مطالعات آینده در زمینه ماشینکاری مواد پیشرفته و فرایندهای غیرسنتی به کار گرفته شود.

شایان ذکر است که این پژوهش عمدتاً بر مدلسازی و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی متمرکز بوده است. از این رو، بررسی تغییرات ریزساختاری، تشکیل فازهای ثانویه، سختی‌کاری سطحی و ترک‌های حرارتی ناشی از فرآیند در این مطالعه انجام نشده است. با توجه به اهمیت این موضوع در تفسیر دقیق‌تر کیفیت سطح و عملکرد قطعه در کاربردهای صنعتی، تأثیر پارامترهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی بر ساختار متالورژیکی و خواص مکانیکی سطحی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ می‌تواند توسط پژوهش‌گران مورد بررسی قرار گیرد.

۴- مراجع

- [1] Deepak, D., Yathindra, K. V., Vijayan, V., Sachidananda, H. K., & Bhat, S. K. (2025). Surface Integrity and Kerf Characteristics in Wire-EDM of WAAM-Fabricated Hybrid ER70S-308L Steel: A Taguchi-Based Parametric Analysis. *Results in Surfaces and Interfaces*, 100627.
- [2] Zaludin, W. M. I. B. W., Said, M. S. B., Yusoff, M. S. B., & Pa, N. M. B. N. (2025). Optimization of Kerf Width in Wedm of Al-Si/5% Aln Mmc Using Taguchi Method and Anova. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2933, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.

- [21] Afshari, H., Taher, F., Alavi, S. A., Afshari, M., Samadi, M. R., & Allahyari, F. (2024). Studying the effects of FDM process parameters on the mechanical properties of parts produced from PLA using response surface methodology. *Colloid and Polymer Science*, 302(6), 955-970.
- [22] Rasmussen, C. E. (2003). Gaussian processes in machine learning. In *Summer school on machine learning* (pp. 63-71). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [23] Li, J., & Wang, H. (2025). Gaussian Processes Regression for Uncertainty Quantification: An Introductory Tutorial. *arXiv preprint arXiv:2502.03090*.
- [24] Singh, S. K., Mali, H. S., Unune, D. R., Abdul-Rani, A. M., & Wojciechowski, S. (2022). Material independent effectiveness of workpiece vibration in μ -EDM drilling. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 531-546.
- [25] Cao, G. J. (2025). Advancements in Machine Learning Predicting Activation and Gibbs Free Energies in Chemical Reactions. *International Journal of Quantum Chemistry*, 125(7), e70036.
- [26] Amirabadi, H., Foorginejad, A., & Mojaveri, M. A. (2015). Cutting of Ti-6Al-4V titanium alloy using abrasive water jet and multiobjective optimization of geometry features. *Modares Mechanical Engineering*, 14(16).
- [27] Salari, M. and Mohammadi, R. (2025). Multi-Objective Optimization of the Natural Gas-Air Venturi-Type Mixer for Bi-Fuel Engines. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 15(3), 165-182.
- [28] Foorginejad, A., Khalili, K., Abdollahi, V., & 28, H. (2026). Multi-objective Optimization of Biomedical Scaffold Geometries for Mechanical and Porous Performance Enhancement. *International Journal of Engineering*, 39(1), 176-191.
- EDM using RSM method. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 18(5), 2957-2968.
- [14] Subrahmanyam, M., & Nancharaiah, T. (2020). Optimization of process parameters in wire-cut EDM of Inconel 625 using Taguchi's approach. *Materials Today: Proceedings*, 23, 642-646.
- [15] Eaysin, A., Zinnah, M. A., Nayem, M., Begum, H. A., Protayi, M. I. H., Ashrafi, S., & Rashid, A. B. (2025). Prediction and optimization of surface quality and material removal rate in wire-EDM cutting of tungsten-copper alloy (W70Cu30). *Results in Surfaces and Interfaces*, 18, 100409.
- [16] Safarabady, A., Tahmasbi, V., Sousanabadi Farahani, A. and Zolfaghari, M. (2023). Investigating factors affecting electrode wear rate in electrical discharge machining of AZ91 magnesium alloy metal matrix composite reinforced with silicon carbide microparticles. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 13(4), 119-134.
- [17] Nouri, H. (2022). Statistical analysis and multi-objective optimization of tungsten carbide alloy wirecut process using Taguchi method and genetic algorithm. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 12(3), 69-87.
- [18] Ranjbar, S., Foorginejad, A., Emam, S. M., Ebadi, M., & Shiri, K. (2026). Effects of cryogenic cooling on cutting temperature and surface roughness in turning of AA7075 aluminum alloy. *Scientific Reports*.
- [19] Shewakh, W. M., Afshari, H., Afshari, M., Jagannathan, D., Routray, A., Karthikeyan, A., ... & Bisht, Y. S. (2026). Analysing the influence of EDM parameters and electrode type on H13 steel quality using response surface methodology. *Ironmaking & Steelmaking*, 03019233261431367.
- [20] Ferreira, S. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, G. D., David, J. M., Brandão, G. C., ... & Dos Santos, W. N. L. (2007). Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica chimica acta*, 597(2), 179-186.