

آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر بر نرخ براده برداری و زبری سطح در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی

چکیده: مهم ترین هدف صنعت گران، به حداکثر رساندن نرخ براده برداری در حین کنترل کیفیت سطح می باشد. در این مقاله با توجه به معادله رگرسیون به دست آمده از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ، به بررسی میزان و نحوه تأثیرگذاری هفت پارامتر فرآیند شامل، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، زمان قطع قوس، ولتاژ گپ، نرخ تغذیه سیم، کشش سیم و فشار آب بر دو مشخصه نرخ براده برداری و زبری سطح با استفاده از روش آنالیز حساسیت سوبل پرداخته شده است. هدف از این تحقیق، انتخاب بهینه ترین پارامتر در فرآیند ماشین کاری به منظور افزایش نرخ براده برداری و کاهش زبری سطح می باشد. طبق نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت سوبل مشاهده می شود که فاکتور زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس هر یک به ترتیب با ۵۹٪ و ۲۸٪ تأثیر، اثرگذارترین پارامترها بر نرخ براده برداری و پارامترهای زمان روشنی پالس و فشار آب هر یک به ترتیب با ۸۱٪ و ۱۸٪ تأثیر، اثرگذارترین پارامترها بر زبری سطح می باشند.

واژه های راهنما: ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی، زبری سطح، نرخ براده برداری، آنالیز حساسیت، سوبل

حامد فرجی

دانشجوی کارشناسی ارشد

معین طاهری*

دانشیار،

گروه مهندسی ساخت و تولید،

دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه اراک، اراک

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴

Hamed Faraji
MSc Student

Moein Taheri*
Associate Professor,
Manufacturing
Engineering, Faculty
of Engineering,
Arak University,
Arak

Sensitivity analysis of the effective parameters on the material removal rate and surface roughness in the wire electrical discharge machining process

Abstract: The most important goal of the craftsmen is to maximize the material removal rate while controlling the surface quality. In this article, according to the regression equation obtained from the design of the experiment using the response surface method, to investigate the extent and manner of influence of seven process parameters including, pulse on time, pulse off time, arc off time, gap voltage, wire feeding rate, wire tension and water pressure has been studied on two characteristics of material removal rate and surface roughness using Sobol sensitivity analysis method. The purpose of this research is to select the most optimal parameter in the machining process in order to increase the material removal rate and reduce the surface roughness. According to the results obtained from the sensitivity analysis, it can be seen that the factor of pulse on time and pulse off time each have an effect of 59% and 28%, respectively, the most effective parameters on the material removal rate, and the parameters of pulse on time and water pressure, respectively, with 81% and 18% influence are the most effective parameters on surface roughness.

Keywords: Wire electrical discharge machining, Surface roughness, Material removal rate, Sensitivity analysis, Sobol

۱- مقدمه

نوین مانند روش ماشین کاری الکتروشیمیایی^۱ مشکلاتی را سر راه مصرف کنندگان قرار داده است. افزایش زبری سطح هم‌زمان با افزایش جریان، طولانی بودن زمان ماشین کاری مخصوصاً در حالت پرداخت کاری و مشکلات دیگر مانع توسعه سریع این روش شده است. استفاده از دی‌الکتریک‌های مخلوط شده با پودرهای خاص در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی باعث افزایش چشم‌گیری در راندمان این نوع ماشین کاری و رفع معایب آن می‌شود [۵]. یک واقعیت شناخته‌شده این است که نرخ براده‌برداری بالا و یک سطح بسیار صاف و بی‌نقص هرگز نمی‌تواند به‌طور هم‌زمان در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی حاصل شود.

انتخاب پارامترهای ماشین کاری بهینه‌شده در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی یک موضوع مهم است. پارامترهای نادرست انتخاب‌شده ممکن است منجر به مشکلات جدی مانند اتصال کوتاه سیم، شکستگی سیم و آسیب به سطح قطعه کار شود که محدودیت‌های خاصی را به برنامه تولید اعمال می‌کند و در نهایت باعث کاهش بهره‌وری در تولید می‌شود [۶].

از آنجایی که نرخ براده‌برداری و زبری سطح، مهم‌ترین پارامترهای خروجی در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی هستند؛ تحقیقات مختلفی توسط محققان مختلف در سراسر جهان برای بهبود میزان نرخ براده‌برداری و زبری سطح صورت گرفته که در ادامه به شرح مختصری از آن‌ها پرداخته شده است.

کبلوتی و همکاران [۷] به انجام مطالعه‌ای جهت بررسی اثر پارامترهای ورودی برش بر روی ارتعاش ابزار، نرخ براده برداری و زبری سطح پرداختند. جنس انتخابی آن‌ها فولاد AISI 4140 بوده و طراحی آزمایش‌ها بر اساس روش سطح پاسخ صورت گرفته است. نتایج آن‌ها بیانگر این موضوع بوده است که نرخ پیشروی بر روی زبری سطح اثرگذار است.

برغم‌دی و همکاران [۸] با استفاده از روش سطح پاسخ^۷ و طراحی مرکب مرکزی^۸ به بررسی تأثیر پارامترهای نیروی برنیشینگ، سرعت پیشروی و تعداد عبور ابزار، بر زبری سطح، میکرو سختی و مقاومت به خوردگی فولاد ایمپلنت زنگ نزن 316L ماشین کاری شده طی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی پرداخته‌اند. نتایج آزمایش‌های صورت گرفته نشان

ماشین کاری تخلیه الکتریکی^۱ یکی از اولین فرآیندهای ماشین کاری غیر سنتی برای برش مواد سخت و رسانا است که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی^۲ شکل خاصی از فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی می‌باشد که در آن الکتروود یک سیم رسانا و در حال حرکت مداوم است. الکتروود استفاده‌شده در این فرآیند، سیم‌هایی از جنس مس، برنج یا تنگستن می‌باشند. قطر این سیم‌ها از ۰/۰۵ تا ۰/۳ و همچنین فاصله بین ابزار و قطعه کار از ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۵ میلی‌متر متغیر می‌باشد که با سرعت قابل تنظیم از شکاف برش عبور می‌کند [۱].

از آنجایی که قطعات با اشکال پیچیده‌تر و جدیدتری در چند دهه گذشته توسعه یافته‌اند، فرآیندهای ماشین کاری سنتی با محدودیت‌هایی روبه‌رو شده‌اند. همچنین افزایش استفاده از ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی در تولید، از زمان اولین کاربرد صنعتی آن در بیش از ۳۰ سال پیش، با سرعت بسیار بالایی در حال رشد بوده است [۲].

ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی بر اساس انرژی ترموالکتریک^۳ بین قطعه کار و یک الکتروود کار می‌کند. اساس کار براده‌برداری در این فرآیند تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی حرارتی است، به‌طوری‌که حرارت بسیار زیاد تولیدشده سبب ذوب و تبخیر مقادیر بسیار کوچکی از قطعه می‌شود. مواد ذوب یا تبخیر شده از الکتروود جدا شده و سپس توسط دی‌الکتریک شسته می‌شوند [۳].

از جمله کاربردهای مختلف فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی می‌توان به تولید حفره‌های پیچیده در قالب‌ها اشاره کرد؛ که ساخت آن‌ها با استفاده از فرآیند ماشین کاری معمولی دشوار است. همچنین از فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی به شکل گسترده‌ای در بخش‌های هوافضا، صنعت خودرو و اجزای جراحی استفاده می‌شود [۴].

علاوه بر این که امروزه ماشین کاری تخلیه الکتریکی در صنعت، کاربردهای فراوانی پیدا کرده است، اما زبری سطوح^۴ قطعاتی که با این روش ماشین کاری می‌شوند و همچنین نرخ براده برداری^۵ کم آن نسبت به سایر روش‌های ماشین کاری

^۱ Electro discharge machining (EDM)^۲ Wire electrical discharge machining (WEDM)^۳ Thermoelectric^۴ Surface roughness (R_a)^۵ Material removal rate (MRR)^۷ Electrochemical machining^۸ Surface response methodology^۹ Central composite design

تأثیر بسیار زیادی بر زبری سطح دارند، درحالی که زمان روشنی پالس و جریان تأثیر قابل توجهی بر نرخ براده برداری دارند و همچنین مشاهده شده است که تغذیه سیم و برهم کنش بین جریان و زمان خاموشی پالس تأثیر قابل توجهی بر نرخ مصرف سیم داشته است.

نگوین و همکاران [۱۱] اثر ارتعاش فرکانس پایین متصل به قطعه کار از جنس SKD61 را به منظور بهبود نرخ براده برداری و زبری سطح در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی مطالعه کرده‌اند. اثر پارامترهای فرآیند شامل جریان پالس، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و فرکانس ارتعاش بر روی نرخ براده برداری و زبری سطح توسط آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. پارامتر بهینه شده در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با استفاده از مسئله چندهدفه مبتنی بر TOPSIS انجام شده است. نتایج تجربی نشان داده است، که دقت عملکرد در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاش فرکانس پایین به ۸۶/۶ درصد افزایش یافته است.

سیف و روات [۱۲] فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی را برای فولاد AA6061 بررسی کرده‌اند تا متغیرهای مختلف فرآیند، از جمله زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و جریان اوج را برای دستیابی به میزان نرخ براده برداری و زبری سطح بالا و مناسب بهینه کنند. ماتریس L18 تاگوچی، نسبت ANOVA, S/N و تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری برای بهینه سازی زبری سطح و نرخ براده برداری استفاده شده است. نتایج حاصل نشان داده است که زمان روشنی پالس و جریان اوج بیشترین تأثیر را برای نرخ براده برداری و زبری سطح با مشارکت به ترتیب ۱۳/۳۳ و ۱۶/۲۵ درصد دارند.

چاوداری و همکاران [۱۳] به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی از جمله زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، غلظت نانو پودر آلومینا بر روی نرخ براده برداری و زبری سطح پرداخته‌اند. مقادیر پارامترهای خروجی بهینه با استفاده از رویکرد L9 سه سطحی تاگوچی پیش‌بینی و با آزمایش‌های ترکیبی تأیید شده‌اند. روش تحلیل واریانس برای تأیید مجدد اهمیت و کفایت مدل رگرسیون به دست آمده اجرا شده است. قطعه کار مورد استفاده در این مطالعه از جنس آلیاژ حافظه دار بوده است. آن‌ها در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با افزودن نانو پودر آلومینا به سیال دی‌الکتریک قابلیت ماشین کاری را افزایش داده‌اند. طبق نتایج به دست آمده مشاهده شده است که نانو پودر آلومینا با ۷۶/۱۳ درصد بیشترین اثر را بر نرخ براده برداری داشته است. همچنین زمان روشنی پالس با ۹۱/۸۸ درصد، بیشترین تأثیر را

می‌دهند که نیروی برنیشینگ بیشترین تأثیر را بر زبری سطح، میکرو سختی و مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی داشته است. به طوری که پس از نیروی برنیشینگ، تعداد عبور ابزار و سرعت پیشروی به ترتیب بیشترین تأثیر را بر زبری سطح و مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی داشته است. همچنین ترکیب نیروی برنیشینگ و تعداد عبور ابزار نیز بیشترین تأثیر را بر کنترل زبری سطح و مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی داشته است.

اسکوئیان و همکاران [۹] به بررسی اثر استفاده از دو نانوذره اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم به صورت هم‌زمان با دی‌الکتریک در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم V-6Al-Ti4 پرداخته‌اند. پس از بررسی پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک نانوذرات، پارامترهای شدت جریان، غلظت، زمان روشنی پالس و ترکیب نسبی ذرات به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند. اثر هر یک از این پارامترها در سه سطح، بر نرخ براده برداری، سایش نسبی ابزار و صافی سطح نهایی قطعه بررسی شده است. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داده است که هرچقدر ترکیب نانو ذرات اکسید آلومینیوم تا یک اندازه مشخص بیشتر شود، به همان نسبت نرخ براده برداری هم در جریان بالاتر افزایش می‌یابد. با افزایش شدت جریان تا ۱۲ آمپر در زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه، انرژی زیاد تخلیه الکتریکی تأثیر محسوسی برافزایش سایش ابزار با ترکیب نسبی ۷۵٪ از نانو ذرات نداشته است و می‌توان به نرخ براده برداری بالا و حداقل سایش ابزار در ماشین کاری تخلیه الکتریکی دست یافت.

راماسوامی و همکاران [۱۰] به پیش‌بینی مجموعه بهینه پارامترهای فرآیند مانند جریان، زمان روشن/خاموش پالس، کشش سیم و تغذیه سیم برای دستیابی به حداقل زبری سطح و نرخ مصرف سیم و حداکثر نرخ براده برداری پرداخته‌اند. آزمایش‌ها با تخلیه‌های پالس تولیدشده بین سیم برنجی و قطعه نمونه (فولاد قالب D3) معلق در آب، به عنوان دی‌الکتریک انجام شده است. آزمایش‌ها بر اساس پنج عامل و پنج سطح آن با استفاده از طرح مرکب مرکزی فاکتوریل کامل بر اساس روش سطح پاسخ طراحی شده‌اند. نتایج آزمایش توسط نرم افزار MINITAB به صورت تحلیلی و گرافیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. مدل رگرسیون مرتبه دوم برای پیش‌بینی زبری سطح، نرخ مصرف سیم و نرخ براده برداری از نظر پارامترهای ماشین کاری تعاملی و برای مرتبه‌های بالاتر از طریق روش سطح پاسخ توسعه داده شده است. نتایج نشان داده‌اند که کشش سیم، جریان و برهم کنش‌های میان آن‌ها

بر زبری سطح داشته است.

چاوداری و همکاران [۱۴] با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی به بررسی تأثیر پارامترهای زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، شدت جریان و غلظت پودر نانو گرافن بر روی زبری سطح و نرخ براده برداری پرداخته‌اند. در تحقیقات آن‌ها، آرایه متعامد L16 برای انجام آزمایش‌ها اجرا شده است. آن‌ها به کمک روش تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA)، سطوح بهینه پارامترهای ورودی را به منظور به کاهش زبری سطح و افزایش نرخ براده برداری تعیین کرده‌اند. همچنین الگوریتم جستجوی انتقال حرارت (HTS) برای به دست آوردن ترکیب بهینه پارامترهای ورودی برای خروجی‌های زبری سطح و نرخ براده برداری اجرا شده است. نتایج بهینه‌سازی، حداکثر مقدار $1/55 \text{ mm}^3/\text{s}$ را برای نرخ براده برداری و حداقل مقدار $2/68$ میکرومتر را برای زبری سطح نشان داده است.

نواز و همکاران [۱۵] با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی به بررسی تأثیر عوامل مختلف ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی با سرعت بالا (HS-WEDM) بر ویژگی‌های ماشین‌کاری مانند نرخ براده برداری، عرض شکاف و زبری سطح فولاد دای DC53 پرداخته‌اند. عواملی مانند زمان روشن شدن پالس، شدت جریان، زمان خاموش شدن پالس و سرعت سیم انتخاب شده‌اند. آرایه متعامد تاگوچی L27 برای آزمایش انتخاب شده است. از آنالیز واریانس (ANOVA) برای یافتن فاکتور مهم در هر مشخصه ماشین‌کاری استفاده شده، در حالی که از تحلیل میانگین (ANOM) نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای یافتن مقدار بهینه عوامل برای بهبود هر مشخصه ماشین‌کاری استفاده شده است. در انتها نتایج نشان داده است که شدت جریان مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر نرخ براده برداری و زبری سطح است، در حالی که زمان روشنی پالس مهم‌ترین عامل مؤثر بر عرض شکاف است.

آلدین راج و همکاران [۱۶] با اجرای طرح آزمایش‌های سطح پاسخ دربرش بهینه برای فولاد پر منگنز (AST A128) با استفاده از فرآیند ماشین‌کاری الکتریکی سیمی، اثر پارامترهای مختلف مانند تغذیه سیم، جریان اوج، ولتاژ مدار باز و زمان خاموشی پالس را بر نرخ براده برداری، سختی و زبری سطح بررسی نموده‌اند. از روش طراحی مرکب مرکزی (CCD) برای چیدمان پارامترهای ورودی استفاده شده است. بررسی دقیق آنالیز واریانس نشان داده که پارامتر جریان اوج مهم‌ترین عامل تأثیرگذار فرآیند برای پارامترهای نرخ براده برداری و زبری سطح است. ولتاژ مدار باز و تغذیه سیم اصلی‌ترین عوامل مؤثر فرآیند بر سختی هستند. نتایج آزمون تأیید نشان داده که

مدل‌های ریاضی توسعه یافته با دقت کافی خوب بوده‌اند. نارش و همکاران [۱۷] با استفاده از مدل پیش‌بینی شده سیستم استنتاج فازی عصبی مصنوعی (ANFIS) رابطه بین پارامترهای فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی را گزارش داده‌اند. آن‌ها به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی از جمله، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ شکاف، جریان اوج بر روی نرخ براده برداری و زبری سطح پرداخته‌اند. نتایج به دست آمده توسط آن‌ها نشان داده است که مقادیر پیش‌بینی شده ویژگی‌های پارامترهای خروجی مطابقت خوبی با مقادیر واقعی دارد. ضریب همبستگی (R) برای هر دو پارامتر نرخ براده برداری و زبری سطح تقریباً $0/9945$ بود که تقریباً برابر با یک است و ضریب تعیین (R^2) و میانگین خطا ($\%$) ایجاد شده برای زبری سطح به ترتیب $0/9891$ و $2/04$ بود در حالی که برای نرخ براده برداری، ضریب تعیین (R^2) و میانگین خطا ($\%$) به ترتیب $0/9738$ و $1/70$ درصد بوده است.

ولینگیری و همکاران [۱۸] با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی، به بررسی اثر پارامترهای مهم ماشین‌کاری مانند، زمان روشنی پالس، زمان خاموش شدن پالس و جریان ورودی که بر معیارهای عملکرد از جمله زبری سطح و نرخ براده برداری تأثیر می‌گذارند، پرداخته‌اند. در مرحله اول آلیاژ آلومینیوم LM13 و کامپوزیت‌های LM13/SiC با فرآیند ریخته‌گری تحت فشار تحت شرایط پارامتریک بهینه برای دست‌یابی به سختی و استحکام کششی بهتر ساخته شده است. در مرحله دوم، به مطالعه ماشین‌کاری آلیاژ LM13 و کامپوزیت‌های LM13/SiC از طریق تکنیک‌های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی پرداخته شده است. مقادیر پارامترهای خروجی بهینه با استفاده از روش تاگوچی پیش‌بینی شده‌اند.

آنالیز حساسیت، روشی است که برای شناسایی پارامترهای ورودی مؤثر و غیر مؤثر بر پارامترهای خروجی یک مدل استفاده می‌شود و همچنین بررسی نتایج باعث افزایش دقت نتایج می‌شود. یکی از اهداف آنالیز حساسیت تأیید و بررسی کدهای کامپیوتری است. با آنالیز حساسیت می‌توان عدم قطعیت در خروجی یک مدل را بررسی کرد [۱۹].

بررسی تحقیقات انجام شده در گذشته نشان از عدم بررسی دقیق و کمی پارامترهای مؤثر بر فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی به‌ویژه با استفاده از روش‌های آنالیز حساسیت آماری دارد. آنالیز حساسیت موجب فهم عمیق‌تری از مدل در راستای کاهش عدم قطعیت در خروجی مدل می‌شود. در این

روش سطح پاسخ بر پایه طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی آماری استوار است. طراحی آزمایش‌ها به‌عنوان ابزاری به‌منظور رفع عیوب، صرفه‌جویی در وقت و هزینه به کمک مهندسان آمده، همچنین استفاده به‌موقع از طراحی آزمایش‌ها موجب کاهش زمان تولید و هزینه‌ها می‌شود. فرم کلی معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم با توجه به متغیرها به‌صورت رابطه (۱) می‌باشد [۲۱]:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i x_i + \sum_{i=1}^K \beta_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

در معادله (۱) ثابت‌های β پارامترهای ناشناخته یا ضرایب رگرسیون، همچنین x_i و x_j پارامترهای ورودی یا مستقل می‌باشند. مقادیر سطح‌های مختلف پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق که از طریق بررسی تحقیقات انتخاب شده‌اند در جدول (۱) ذکر شده‌اند. همچنین با توجه به نتایج به‌دست آمده از مرجع [۲۲] مدل نرخ براده‌برداری و زبری سطح به‌صورت کد^۲ شده برحسب متغیرهای ورودی ماشین‌کاری به‌صورت روابط (۲) و (۳) به شرح زیر می‌باشند.

$$MRR = 0.31376 + (4.69889 \times 10^{-1} \times A) - (7.92525 \times 10^{-3} \times B) - (2.38186 \times 10^{-3} \times C) - (3.89559 \times 10^{-3} \times D) + (2.21461 \times 10^{-3} \times G) \quad (2)$$

$$Ra = -1.05897 + (4.40811 \times A) + (4.80613 \times 10^{-2} \times G) \quad (3)$$

جدول ۱ مقادیر سطح‌های مختلف پارامترهای ورودی

واحد	سطح			ضرایب ورودی فرآیند
	۳	۲	۱	
A: زمان روشن‌پالس μs	-	۰/۵	۰/۴	
B: زمان خاموشی پالس μs	۱۶	۱۴	۱۲	
C: زمان قطع قوس μs	۱۶	۱۴	۱۲	
D: ولتاژ گپ V	۴۶	۴۴	۴۲	
E: نرخ تغذیه سیم m/min	۱۰/۸	۹/۶	۸/۴	
F: کشش سیم gf	۱۷۶۷/۶۶	۱۶۲۰	۱۴۷۳/۳۳	
G: فشار آب bar	۱۵/۰۰	۱۲/۸۵	۱۰/۷۰	

پژوهش ابتدا به بررسی کلی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی و تشریح روش‌های مختلف آنالیز حساسیت پرداخته شده است. سپس برای نخستین بار به بررسی پارامترهای ورودی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی شامل زمان روشن‌پالس، زمان خاموشی پالس، زمان قطع قوس، ولتاژ گپ، نرخ تغذیه سیم، کشش سیم و فشار آب و تأثیر آن‌ها بر پارامترهای خروجی نرخ براده‌برداری و زبری سطح به روش آنالیز حساسیت سوپل پرداخته شده است.

۲- مدل‌سازی

در این تحقیق مدل‌سازی به دو بخش تقسیم شده است. در بخش ابتدایی به‌طور مختصر به ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی پرداخته شده است. سپس آنالیز حساسیت و دسته‌بندی کلی روش‌های کلی آن شامل روش غربال کردن، روش آنالیز حساسیت محلی و روش آنالیز حساسیت جامع به شکل مختصر بررسی شده و سپس با توجه به نیاز مسئله به بررسی تأثیر متقابل بین پارامترهای ورودی پرداخته شده است. بعد از آن با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری سوپل به شناسایی پارامترهای مؤثر و غیر مؤثر بر خروجی مدل پرداخته شده است.

۲-۱- ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی یک روش ماشین‌کاری غیر سنتی می‌باشد. ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی یک فرآیند تخصصی ماشین‌کاری حرارتی است که قادر به ماشین‌کاری دقیق قطعاتی است که دارای درجه سختی‌های مختلف، شکل‌های پیچیده و لبه‌های تیز هستند که توسط فرآیندهای ماشین‌کاری سنتی بسیار دشوار می‌باشند. نرخ براده‌برداری و زبری سطح از خروجی‌های مهم در طی این فرآیند می‌باشند.

۲-۲- معادله رگرسیون نرخ براده‌برداری و زبری سطح

روش سطح پاسخ از جمله روش‌های آماری و ریاضی می‌باشد که به‌منظور مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ خروجی تحت تأثیر چندین متغیر ورودی قرار گرفته، استفاده می‌شود که هدف نهایی این روش مدل‌سازی و بهینه‌سازی این پاسخ‌ها است [۲۰].

۳-۲- بررسی روش‌های آنالیز حساسیت

درک رفتار مدل و تجزیه روابط ورودی‌ها و خروجی‌ها و تعیین پارامترهای حساس

ساده‌سازی مدل کامپیوتری و معادلات (کاهش ابعاد)

کاربرد در شناسایی خواص

مقایسه نتایج

روش سوبل برای مدل تعریف‌شده با تابع $Y = F(X)$ که Y خروجی مدل و $X(X_1, X_2, \dots, X_n)$ بردار پارامترهای ورودی می‌باشد و واریانس خروجی مدل (V) به صورت مجموع واریانس‌های هر ترم تجزیه‌شده به صورت رابطه (۴) می‌باشد:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i \leq j \leq n} V_{ij} + \dots + V_{1-n} \quad (4)$$

که در آن، V_i تأثیر مرتبه اول برای هر فاکتور ورودی ($V_{ij} = V[E(Y|x_i, x_j)] - V_i$ و $x_i(V_i = V[E(Y|x_i)])$) تا $V_{1...n}$ برهمکنش بین n فاکتور را نشان می‌دهند. شاخص‌های حساسیت به صورت نسبت واریانس هر مرتبه به واریانس کلی به دست می‌آیند $S_i = \frac{V_i}{V}$ شاخص حساسیت مرتبه اول، $S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V}$ شاخص حساسیت مرتبه دوم و...). شاخص حساسیت کلی یا همان تأثیر کلی هر پارامتر به صورت مجموع همه مرتبه‌های شاخص حساسیت برای آن پارامتر به صورت رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$S_{Ti} = S_i + \sum_{i \neq j} S_{ij} + \dots \quad (5)$$

روابط سوبل در مرجع [۲۴] به طور کامل ارائه شده است.

۴-۲- الگوریتم کلی فرآیند آنالیز حساسیت

در این پژوهش پارامترهای زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، زمان قطع قوس، ولتاژ گپ، نرخ تغذیه سیم، کشش سیم و فشار آب به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شده‌اند همچنین پارامترهای خروجی شامل نرخ براده برداری و زبری سطح هستند. شکل (۱) الگوریتم کلی آنالیز حساسیت را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، ابتدا باید پارامترهای ورودی انتخاب شوند. سپس دامنه تغییرات پارامترهای ورودی انتخاب شوند که این دامنه تغییرات در شکل مشخص شده است.

از روش آنالیز حساسیت به منظور بررسی و تعیین میزان تأثیرگذاری متغیرهای ورودی بر متغیرهای خروجی سیستم‌ها استفاده می‌شود. آنالیز حساسیت به منظور ساده‌سازی و افزایش میزان اعتماد به مدل و ارائه ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌های آن استفاده می‌شود. آنالیز حساسیت را می‌توان به چند بخش طبقه‌بندی کرد که برحسب شکل مدل، به روش‌های گرافیکی، ریاضی و آماری و همچنین از نظر روش‌های مختلف آن به سه بخش غربال کردن، روش آنالیز حساسیت محلی و روش آنالیز حساسیت جامع طبقه‌بندی می‌شوند.

روش غربال کردن: روش غربال کردن، برای مدل‌هایی که تعداد زیادی فاکتور ورودی و محاسبات گران دارند، مفید می‌باشد و از این روش جهت شناسایی اثرگذارترین فاکتورهای ورودی بر روی خروجی‌ها استفاده می‌شود.

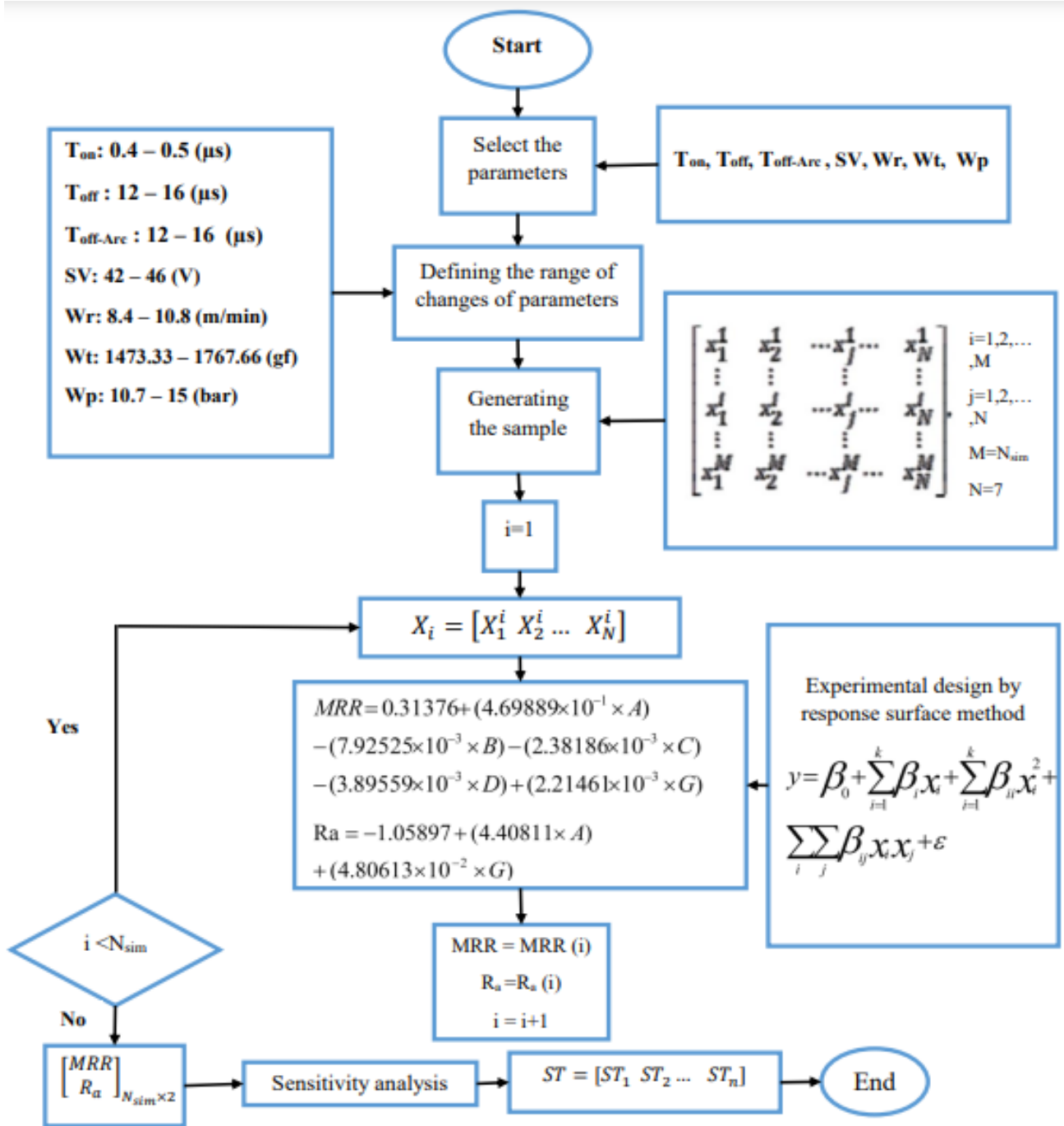
روش آنالیز حساسیت محلی: این روش، بیشتر با محوریت فاکتورهای مدل می‌باشد. این روش محاسباتی مشتق شده از توابع خروجی با در نظر گرفتن متغیرهای ورودی می‌باشد که به وسیله روش‌های محاسبات عددی انجام می‌گیرد. روش‌های آنالیز حساسیت محلی، در مواقعی که هدف استخراج سهم ورودی‌ها بر روی خروجی‌ها است، کمتر استفاده می‌شوند.

آنالیز حساسیت جامع (عمومی): خروجی غیرشخصی را با عامل‌های ورودی آن سهم‌بندی می‌کند و انواع توابع توزیع که پوشش می‌دهد، رنج قابل قبول فاکتورها را بیان می‌کند.

روش‌های اولیه آنالیز حساسیت مربوط به روش‌های محلی می‌باشد. این روش مبتنی بر محاسبه مشتقات جزئی مدل در یک نقطه معین است. به دلیل محدودیت‌های این روش گروه جدیدی به نام آنالیز حساسیت جامع توسعه داده شد. چون تمام بازه تغییرات متغیرهای ورودی را در نظر می‌گیرد. روش‌های آنالیز حساسیت واریانس محور شامل دو روش فست^۱ و سوبل هستند که شاخص‌های اصلی در این روش نشان‌دهنده اثر جزئی و کلی پارامترهای ورودی بر روی واریانس خروجی هستند. روش سوبل، یک روش آنالیز حساسیت جامع یا عمومی می‌باشد که بر پایه تجزیه و تحلیل واریانس است که واریانس در خروجی مدل را به هریک از پارامترهای ورودی و اثر متقابل پارامترها ربط می‌دهد [۲۳].

اهداف اصلی آنالیز حساسیت به شرح زیر می‌باشند:

¹ Fast



شکل ۱ الگوریتم کلی برای آنالیز حساسیت

کمک طراحی آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ به دست آمده است، که در بخش‌های قبل راجع به آن توضیح داده شد. مقدار پارامترهای خروجی در نرم‌افزار متلب آ صورت می‌پذیرد و مجدداً نرم‌افزار سیملب با استفاده از روش سوبل به تولید اندیس‌های حساسیت می‌پردازد و آنالیز حساسیت به پایان می‌رسد.

سپس دامنه تغییرات پارامترهای ورودی انتخاب شوند که این دامنه تغییرات در شکل مشخص شده است. پس از انتخاب دامنه پارامترهای ورودی، نرم‌افزار سیملب^۱ به تولید نمونه‌ها می‌پردازد و پس از تولید نمونه، پارامترهای خروجی با توجه به معادله رگرسیون کد شده تولید خواهند شد. معادله رگرسیون موجود، از مدل‌سازی روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها به

^۱Matlab

^۱Simlab

شکل (۲-ب) تأثیر زمان خاموشی پالس بر میزان نرخ براده برداری را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش زمان خاموشی پالس، میزان نرخ براده برداری به صورت تقریباً خطی کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که به دلیل کاهش تعداد جرقه‌ها در زمان مشخص که به نوبه خود، اندازه دهانه‌های تشکیل شده روی سطح ماشین‌کاری شده را کاهش می‌دهد، منجر به کاهش نرخ براده برداری می‌شود. از طرفی باید به این نکته توجه داشت که کم کردن بیش‌ازحد زمان خاموشی پالس باعث می‌شود تا زمان کافی به دی یونیزه شدن دی‌الکتریک داده نشود و شرایط پس از اسپارک اول برای اسپارک بعدی آماده نگردد و منجر به جرقه ناخواسته گردد که این امر هم سبب ناپایداری فرآیند ماشین‌کاری می‌شود [۲۵].

پارامتر تأثیرگذار بعدی، میزان فشار آب بر نرخ براده برداری است. شکل (۲-پ) نیز بیانگر این موضوع است که با افزایش فشار آب، نرخ براده برداری افزایش می‌یابد. توضیح این نکته ضروری است که این تأثیر بسیار اندک و ناچیز می‌باشد. توجه به این نکته ضروری است که افزایش سرعت تغذیه معمولاً منجر به افزایش سرعت انرژی گرمایی و سرعت ذوب و تبخیر می‌شود؛ بنابراین افزایش فشار آب برای کاهش تمایل قوس و همچنین غلبه بر مشکل افزایش تعداد حباب‌های گاز و حجم بیشتر مذاب بسیار ضروری است.

در شکل (۲-ت) تأثیر پارامتر ولتاژ گپ بر نرخ براده برداری مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش ولتاژ، میزان نرخ براده برداری به صورت نسبتاً خطی کاهش خواهد یافت. دلیل آن این است که با افزایش ولتاژ گپ، شکاف جرقه‌ها افزایش می‌یابد و بنابراین شدت جرقه را کاهش می‌دهد که منجر به کاهش نرخ براده برداری می‌شود. در نتیجه مواد کمتری ذوب می‌شوند و براده برداری کمتری صورت می‌گیرد [۲۶] بیان این نکته مهم است که به‌طور کلی همان‌طور که در تحلیل نمودار مشخص است، تغییرات ولتاژ گپ ممکن است در مشخصه‌های ماشین‌کاری اثر قابل توجهی نداشته باشد.

شکل (۲-ث) تأثیر ناچیز پارامتر زمان قطع قوس بر روی میزان نرخ براده برداری را نشان می‌دهد که با افزایش زمان قطع قوس، نرخ براده برداری با شیب بسیار کمی کاهش می‌یابد اما این کاهش چشم‌گیر نیست و می‌توان آن را به‌عنوان پارامتر غیرحساس در نظر گرفت.

تأثیر پارامتر ورودی نرخ تغذیه سیم بر نرخ براده برداری در شکل (۲-ج) مشاهده می‌شود. با توجه به شکل، تغییرات بسیار

۳- آنالیز حساسیت پارامترها

هدف اصلی آنالیز حساسیت بررسی تأثیر متغیرهای مستقل در یک بازه مشخص بر پاسخ‌های سیستم است. آنالیز حساسیت به منظور بهینه‌سازی پارامترهای اثرگذار و حذف پارامترهای غیرضروری می‌باشد. در این بخش به بررسی نمودارهای گرافیکی آنالیز حساسیت، پرداخته و تأثیر پارامترهای ورودی بر نرخ براده برداری و زبری سطح بررسی شده است. دو نکته کلیدی این است که زبری سطح پایین و راندمان پردازش بالا باید به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شوند؛ بنابراین، باید به بررسی آنالیز حساسیت پرداخت. نرخ براده برداری و زبری سطح به‌عنوان دو هدف در نظر گرفته می‌شوند.

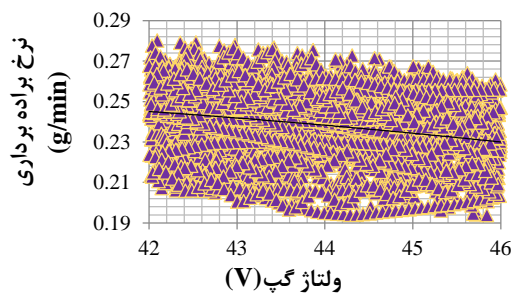
شکل‌های (۲) و (۳) پراکندگی نقاط نرخ براده برداری و زبری سطح با تغییرات هم‌زمان هفت پارامتر ورودی، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، زمان قطع قوس، ولتاژ گپ، نرخ تغذیه سیم، کشش سیم و فشار آب را نشان می‌دهد.

۳-۱- بررسی اثر پارامترهای ورودی مختلف بر نرخ براده برداری

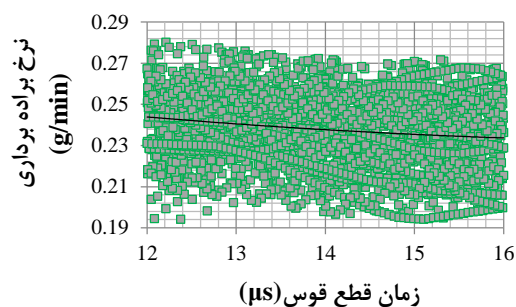
شکل (۲) تأثیر فاکتورهای مورد بررسی بر نرخ براده برداری را نشان می‌دهد. اثرات فاکتورهای ورودی به صورت کیفی مشخص شده است.

مطابق شکل (۲-الف) با افزایش زمان روشنی پالس، میزان نرخ براده برداری افزایش می‌یابد دلیل این مسئله را این‌طور می‌توان توضیح داد که بعد از تشکیل کانال پلاسما، پدیده ذوب و تأخیر در محل اتصال کانال پلاسما به الکترودها حادث می‌شود. در این هنگام، در اثر افت شدید فشار در داخل کانال بخار، جوشش حجمی در چاله مذاب فوق داغ اتفاق می‌افتد و در نتیجه بخشی از مواد مذاب به خاطر انفجار ناشی از این پدیده، به خارج چاله مذاب پرتاب می‌شود. تکرار پدیده‌های فوق باعث براده برداری در مقیاس ریز به ازای هر جرقه از سطح الکتروود و قطعه کار می‌شود. هرچه انرژی جرقه‌ها بیشتر باشد، نرخ ذوب، تبخیر و پرتاب مواد به خارج از حوضچه مذاب در اثر پدیده جوشش حجمی و در نتیجه سرعت براده برداری افزایش می‌یابد. انرژی هر جرقه با توجه به مفهوم الکتریکی آن تابعی از شدت جریان جرقه، زمان روشنی پالس و ولتاژ جرقه است؛ بنابراین هرچه مقادیر این پارامترها افزایش یابد، نرخ براده برداری نیز افزایش می‌یابد [۲۵].

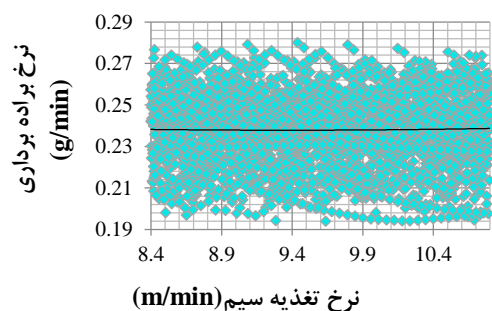
ناچیز نرخ براده برداری در اثر افزایش یا کاهش نرخ تغذیه سیم مشاهده می‌شود که این پارامتر ورودی قابل صرف نظر می‌باشد. اثر پارامتر کشش سیم بر روی نرخ براده برداری در شکل (۲-ج) قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به شکل، از تأثیر این پارامتر نیز مانند پارامترهای زمان قطع قوس و نرخ تغذیه سیم در طی فرآیند می‌توان صرف نظر نمود.



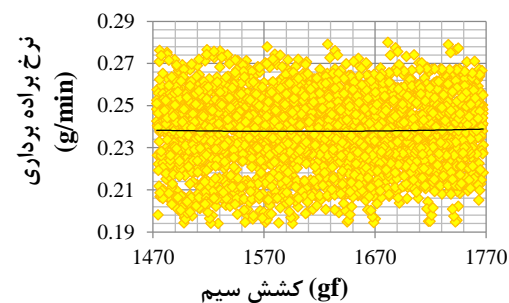
(ت) ولتاژ گپ



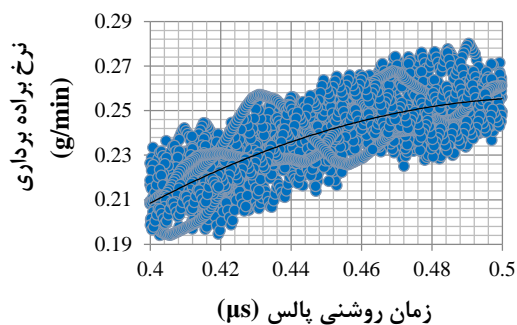
(ث) زمان قطع قوس



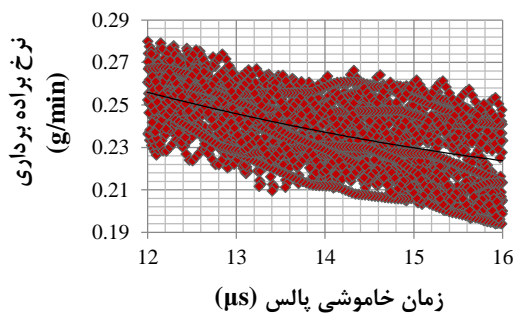
(ج) نرخ تغذیه سیم



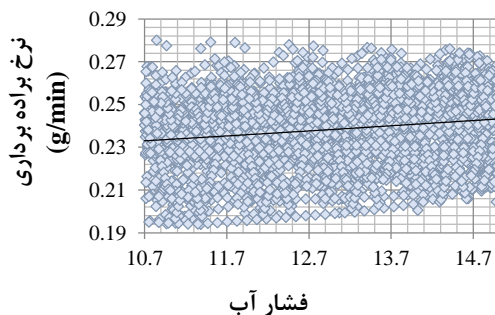
(چ) کشش سیم



(الف) زمان روشن پالس



(ب) زمان خاموشی پالس



(پ) فشار آب

شکل ۲ تأثیر فاکتورهای ورودی بر نرخ براده برداری

۳-۲- بررسی اثر پارامترهای ورودی مختلف بر زبری سطح

شکل (۳) تأثیر پارامترهای زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، فشار آب، ولتاژ گپ، زمان قطع قوس، نرخ تغذیه سیم و کشش سیم بر روی زبری سطح را نشان می‌دهد. اثرات فاکتورهای ورودی به صورت کیفی مشخص شده است.

با توجه به شکل (۳-الف) در صورتی که به بررسی مستقل اثر پارامتر زمان روشنی پالس بر زبری سطح پرداخته شود، نشان می‌دهد که با افزایش زمان روشنی پالس، زبری سطح به طور خطی و قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد زیرا انرژی تخلیه با افزایش زمان روشنی پالس افزایش می‌یابد. هرچه انرژی تخلیه بیشتر باشد، انفجار قوی‌تر و عمق و حجم دهانه ایجاد شده روی سطح ماشین‌کاری شده بیشتر می‌شود و در نتیجه سطح ناهموارتری ایجاد می‌شود. از این رو، برای به دست آوردن یک سطح با کیفیت مناسب از یک قطعه کار، زمان روشنی پالس باید تا حد امکان پایین باشد.

شکل (۳-ب) نشان می‌دهد که با افزایش میزان زمان خاموشی پالس، زبری سطح به طور نسبتاً خطی و با نرخ بسیار کم کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش زمان خاموشی پالس، نرخ ذوب پایین می‌آید و میزان ذوب پایین در مقادیر بالای زمان خاموشی پالس باعث کاهش زبری سطح می‌شود.

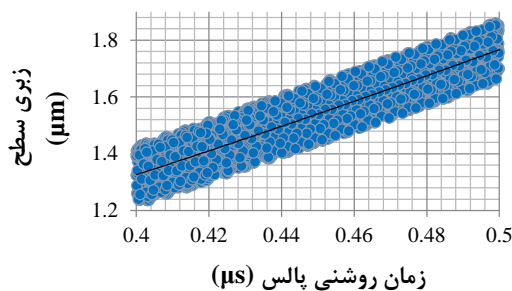
تأثیر پارامتر فشار آب بر روی زبری سطح نیز در شکل (۳-پ) قابل مشاهده است. در این شکل مشاهده می‌شود که افزایش فشار آب منجر به افزایش چشم‌گیر و قابل ملاحظه زبری سطح می‌شود. از این تغییرات زیاد و چشم‌گیر می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر فشار آب همانند زمان روشنی پالس در مقایسه با سایر پارامترهای ورودی، اثرگذارترین پارامتر بر خروجی زبری سطح می‌باشد.

شکل (۳-ت) نشان‌دهنده تأثیر پارامتر ورودی ولتاژ گپ بر روی زبری سطح می‌باشد. اثر این پارامتر بر روی زبری سطح، همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود تقریباً ثابت بوده و میزان تغییرات آن بسیار کم و ناچیز می‌باشد.

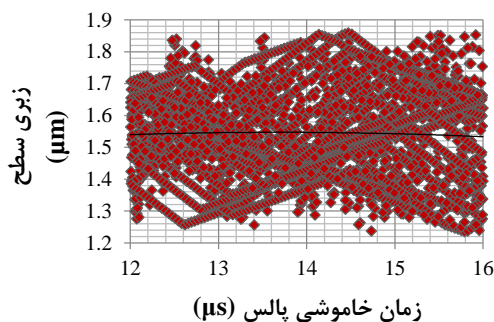
پارامتر بعدی که تأثیر آن بر روی زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است، زمان قطع قوس می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۳-ث) مشاهده می‌شود، زمان قطع قوس نیز همانند پارامتر ولتاژ گپ تأثیر مستقیم بر روی زبری سطح ندارد، یعنی با افزایش زمان قطع قوس، زبری سطح تغییر نمی‌کند.

پارامتر بعدی نرخ تغذیه سیم می‌باشد که تأثیر آن در شکل (۳-ج) آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده شده است، افزایش یا کاهش نرخ تغذیه سیم نیز بر روی تغییر میزان زبری سطح بی‌تأثیر می‌باشد.

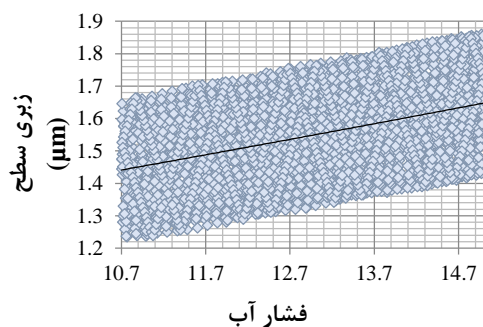
پارامتر آخری که تأثیر آن بر روی زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است، کشش سیم می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۳-چ) نیز قابل مشاهده است، می‌توان به تأثیر ناچیز کشش سیم بر روی زبری سطح پی برد.



الف) زمان روشنی پالس



ب) زمان خاموشی پالس



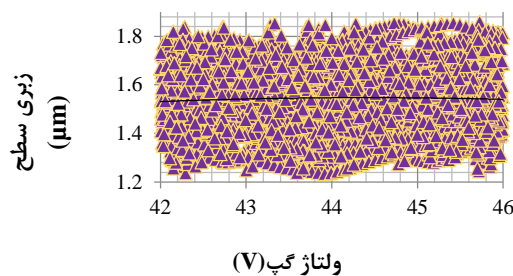
پ) فشار آب

۳-۳- مقایسه کمی اثر پارامترهای ورودی مختلف بر نرخ براده برداری با استفاده از روش آنالیز حساسیت سوبل

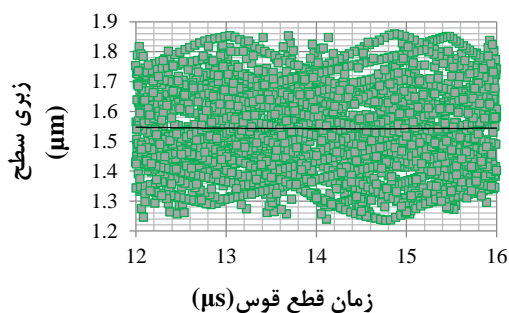
برتری روش آماری آنالیز حساسیت سوبل، مشاهده تأثیر کمی و دقیق پارامترهای ورودی به‌طور هم‌زمان بر روی پارامترهای خروجی می‌باشد؛ بنابراین در این بخش از تحقیق، پس از بررسی اثرگذاری‌های کیفی نمودارهای گرافیکی به تحلیل و بررسی نمودارهای کمی پرداخته‌شده است تا به میزان دقیق تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر پارامترهای خروجی پرداخت. بررسی اثرگذاری کمی این امکان را فراهم می‌آورد تا با تغییر پارامترها به خروجی مناسب دست‌یافت. مطابق شکل (۴)، پارامترهای زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس به ترتیب با ۵۹٪ و ۲۸٪ تأثیر، بیشترین تأثیر را بر نرخ براده‌برداری دارند. همچنین پارامتر ورودی زمان روشنی پالس رابطه مستقیمی با پارامتر خروجی دارد و افزایش آن باعث افزایش میزان نرخ براده‌برداری می‌شود. ولتاژ گپ، زمان قطع قوس و فشار آب هرکدام به ترتیب با ۷٪، ۳٪ و ۳٪ تأثیر در مراتب بعدی به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر نرخ براده‌برداری خواهند بود. نتایج شکل (۴) نشان‌دهنده تأثیر ناچیز نرخ تغذیه سیم و کشش سیم بر نرخ براده‌برداری با میزان هرکدام ۰٪ می‌باشند، یعنی با افزایش یا کاهش دو پارامتر نرخ تغذیه و کشش سیم، تغییری در میزان خروجی نرخ براده‌برداری رخ نمی‌دهد.

۳-۴- مقایسه کمی اثر پارامترهای ورودی مختلف بر زبری سطح با استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل

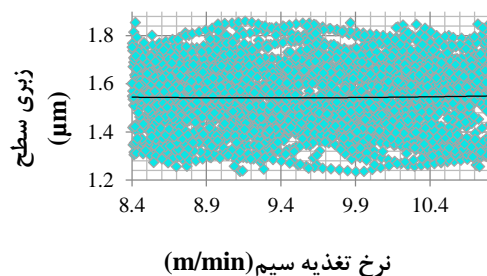
در شکل (۵) به مقایسه کمی بین درصد تأثیر فاکتورهای مختلف ورودی بر زبری سطح فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی پرداخته‌شده است. با توجه به شکل (۵)، پارامترهای زمان روشنی پالس و فشار آب به ترتیب با ۸۱٪ و ۱۸٪ در جایگاه اول و دوم به‌عنوان اثرگذارترین پارامترها بر زبری سطح می‌باشند. پارامتر کشش سیم با تأثیر بسیار کمی به میزان ۱٪، به‌عنوان پارامتر اثرگذار بعدی به‌حساب می‌آید. هرچند این پارامتر در دسته پارامترهای غیرضروری در نظر گرفته‌شده است. نتایج شکل (۵) همچنین نشان‌دهنده تأثیر ناچیز پارامترهای زمان خاموشی پالس، ولتاژ گپ، نرخ تغذیه سیم و زمان خاموشی قوس، بر سرعت برشی هرکدام با میزان



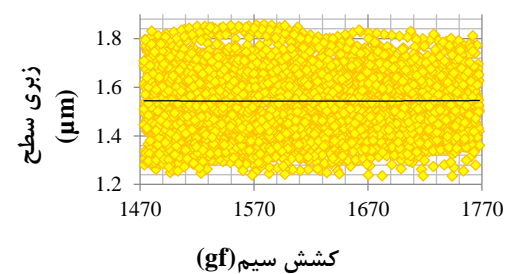
ت) ولتاژ گپ



ث) زمان قطع قوس



ج) نرخ تغذیه سیم



چ) کشش سیم

شکل ۳ تأثیر فاکتورهای ورودی بر زبری سطح

۴- نتیجه گیری

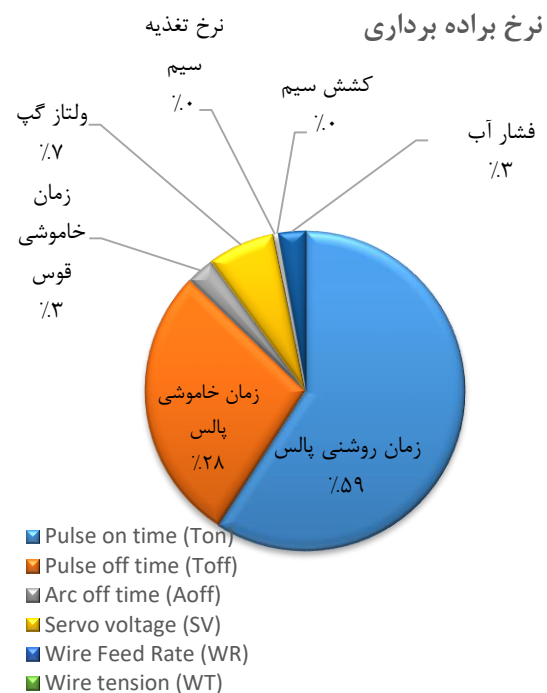
انتخاب پارامترهای بهینه برش نقش مهمی برای به دست آوردن سرعت برش بالاتر یا میزان نرخ براده برداری مناسب و کیفیت سطح خوب دارد.

روش آنالیز حساسیت میزان اثرگذاری فاکتورهای ورودی مناسب را به صورت کمی و کیفی ارائه می‌دهد. تفاوت این پژوهش با پژوهش‌های پیشین به این صورت است که، در این مقاله با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری سوپل که از دقت بالایی نسبت به سایر روش‌های آماری آنالیز حساسیت برخوردار می‌باشد، برای اولین بار به بررسی تأثیر هفت پارامتر ورودی شامل، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، زمان قطع قوس، ولتاژ گپ، نرخ تغذیه سیم، کشش سیم و فشار آب در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی پرداخته شده است. تاکنون تأثیر این هفت پارامتر بر روی این خروجی‌ها از طریق آنالیز حساسیت سوپل بررسی نشده است. در روش‌های گرافیکی، تمامی ورودی‌ها به جز یک ورودی ثابت در نظر گرفته می‌شوند ولی در روش سوپل تمامی پارامترها به‌طور هم‌زمان تغییر می‌کنند. بررسی‌های صورت گرفته در این مقاله بیانگر این است که پارامترهای زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس اثرگذارترین فاکتور بر خروجی نرخ براده برداری می‌باشند که سهم تأثیر هرکدام از این پارامترها به ترتیب ۵۹٪ و ۲۸٪ می‌باشند. همچنین پارامترهای ولتاژ گپ، زمان خاموشی قوس، فشار آب، کشش سیم و نرخ تغذیه سیم تأثیر ناچیزی بر نرخ براده برداری دارند که سهم اثرگذاری هرکدام به ترتیب ۷٪، ۳٪، ۳٪، ۰٪ و ۰٪ می‌باشند. پارامترهای زمان روشنی پالس و فشار آب به ترتیب اثرگذارترین فاکتور بر خروجی زبری سطح هستند که میزان تأثیر آن‌ها به ترتیب ۸۱٪ و ۱۸٪ می‌باشند. پارامترهای کشش سیم، زمان خاموشی پالس، ولتاژ گپ، نرخ تغذیه سیم و زمان خاموشی قوس را می‌توان کم‌اثرترین پارامتر بر زبری سطح دانست که سهم اثرگذاری کشش سیم ۱٪ و ۴ پارامتر دیگر ۰٪ می‌باشد.

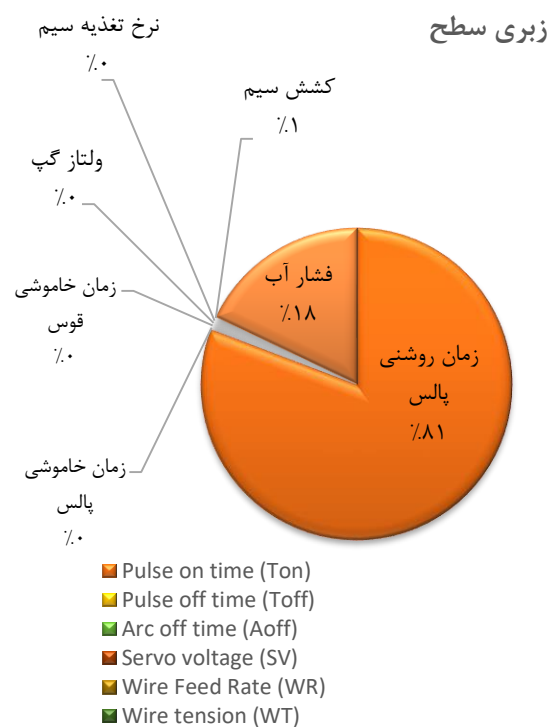
۵- صحت‌سنجی نتایج

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله، از نتایج طراحی آزمایش‌های موجود در مقاله مرجع [۲۲] استفاده شده است. در مقاله مرجع برای به دست آوردن یک رابطه تجربی بین فاکتورهای ورودی و خروجی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی از روش سطح پاسخ و ادغام روش‌های

تأثیر ۰٪ می‌باشد و می‌توان از این پارامترها به‌عنوان پارامترهای غیر حساس نام برد.



شکل ۴ اثر کمی پارامترهای ورودی بر نرخ براده برداری



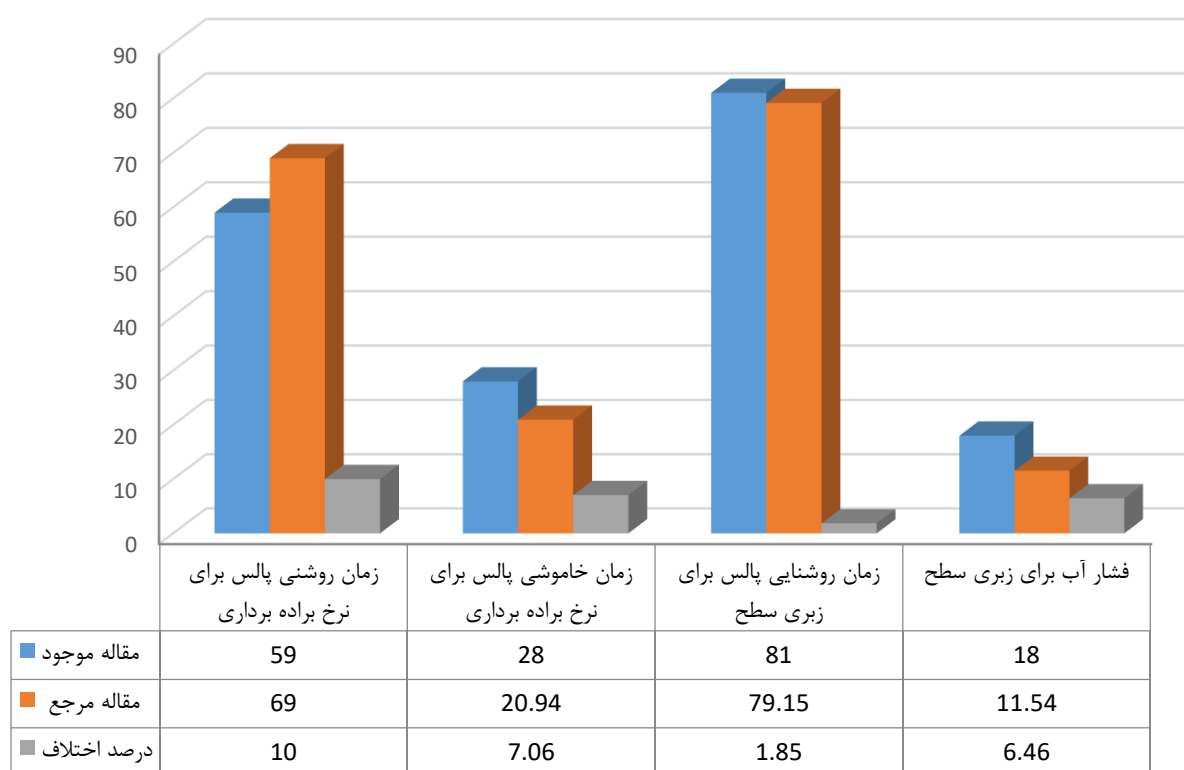
شکل ۵ اثر کمی پارامترهای ورودی بر زبری سطح

پالس برای فاکتور خروجی نرخ براده برداری و فاکتورهای زمان روشنی پالس و فشار آب برای خروجی زبری سطح صورت گرفته است.

نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان دهنده این موضوع است که همانند مرجع [۲۲] پارامترهای زمان روشنی و خاموشی پالس اثرگذارترین پارامترها بر نرخ براده برداری و پارامترهای زمان روشنی پالس و فشار آب اثرگذارترین پارامترها بر خروجی زبری سطح هستند.

الگوریتم شبکه عصبی پس انتشار و الگوریتم ژنتیک استفاده شد. همچنین مقایسه‌ای بین این دو روش صورت گرفته است. در مقاله مرجع [۲۲] اثرات اصلی فاکتورها با ادغام روش‌های الگوریتم شبکه عصبی پس انتشار و الگوریتم ژنتیک و در این پژوهش با استفاده از مدل آنالیز حساسیت سوبل بررسی شده است.

در شکل (۶) به مقایسه کمی بین نتایج این مقاله و مقاله مرجع [۲۲] پرداخته شده است. به منظور مختصر شدن صحت‌سنجی، از پارامترهای حساس استفاده شده است و مقایسه بین فاکتورهای زمان روشنی پالس و زمان خاموشی



شکل ۶ مقایسه نتایج مقاله موجود و مقاله مرجع برای خروجی نرخ براده برداری و زبری سطح

۷- مراجع

- [1] V. K. Jain, Advanced machining processes. Allied publishers, 2009, Pvt. Limited, Twelfth Reprint, Printing Division, A-104 Mayapuri Phase II, New Delhi - 11006, India, 2009, ISBN: 81-7764-294-4, india.
- [2] A. B. Puri and B. Bhattacharyya, "An analysis and optimisation of the geometrical inaccuracy due to wire lag phenomenon in WEDM," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, no. 2, pp. 151-159, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00158-X](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00158-X).

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی و اختصارات

T _{on}	زمان روشنی پالس (μs)
T _{off}	زمان خاموشی پالس (μs)
T _{off-Arc}	زمان قطع قوس (μs)
SV	ولتاژ گپ (V)
Wr	نرخ تغذیه سیم (m/min)
Wt	کشش سیم (gf)
Wp	فشار آب (bar)
MRR	نرخ براده برداری (g/min)
Ra	زبری سطح (μm)

- surface roughness," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 33, no. 4, pp. 284-291, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.05.002>.
- [12] M. SAIF, R. Rawat, and Sciences, "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* pp. 9410-9420, 2023, doi: <https://doi.org/10.15282/jmes.17.1.2023.10.0744>.
- [13] R. Chaudhari, P. Prajapati, S. Khanna, J. Vora, V.K. Patel, "Multi-response optimization of Al₂O₃ nanopowder-mixed wire electrical discharge machining process parameters of nitinol shape memory alloy," *Materials*, vol. 15, no. 6, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15062018>.
- [14] R. Chaudhari, J. Vora, L. López de Lacalle, S. Khanna, V. K. Patel, and I. J. Ayesta, "Parametric optimization and effect of nano-graphene mixed dielectric fluid on performance of wire electrical discharge machining process of Ni55. 8Ti shape memory alloy," *Materials*, vol. 14, no. 10, p. 2533, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14102533>.
- [15] Y. Nawaz, S. Maqsood, K. Naeem, R. Nawaz, M. Omair, and T. Habib, "Parametric optimization of material removal rate, surface roughness, and kerf width in high-speed wire electric discharge machining (HS-WEDM) of DC53 die steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 107, no. 7, pp. 3231-3245, 2020/04/01 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05175-3>.
- [16] K. Balasubramanian, D. Palanisamy, E. AGS, and M. Processes, "Experimental investigations on WEDM process for machining high manganese steel," *aterials and Manufacturing Processes*, vol. 35, no. 14, pp. 1612-1621, 2020, doi:<http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2020.1779941>.
- [17] C. Naresh, P. Bose, and C. Rao, "ANFIS based predictive model for wire edm responses involving material removal rate and surface roughness of Nitinol alloy," *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, pp. 93-101, 2020/01/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.216>.
- [18] S. Vellingiri, R. Soundararajan, N. Mohankumar, K. Nithyananthakumar, and K. Muthuselvam, "Exploration on WEDM process parameters effect on LM13 alloy and LM13/SiC composites using Taguchi method," *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 997-1003, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.050>.
- [3] M. Ghoreishi and A. J. J. A. M. Naderifard, "Thermal and Mechanical Modeling of Electro Discharge Machining Process Using Finite Element Method (FEM)," vol. 8, no. 4, pp. 1-11, 2012, doi: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00158-X](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00158-X).
- [4] K. H. Ho and S. T. Newman, "State of the art electrical discharge machining (EDM)," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, no. 13, pp. 1287-1300, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00162-7).
- [5] M. Asadi and M. Ghoreyshi, "Investigation of Electro Discharge Machining Parameters Using Aluminium Powder Suspended in Dielectric," 2005.
- [6] V. Kumar, A. Babu, R. Venkatasamy, and M. Raajenthiren, "Optimization of the WEDM parameters on machining Incoloy800 super alloy with multiple quality characteristics," *Optimization*, vol. 2, no. 6, pp. 1538-154, 2010.
- [7] K. Ouahid, B. Lakhdar, A. Mohamed Walid, and B. Abderrahim, "Multi response optimization of surface roughness in hard turning with coated carbide tool based on cutting parameters and tool vibration," *Structural Engineering and Mechanics, An Int 'l Journal*, vol. 70, pp. 395-405, 2019, doi: <https://doi.org/10.12989/sem.2018.66.3.285>.
- [8] M. Barghamadi, S. Rahmati, and E. Shakouri, "Study of the effect of burnishing process on the surface roughness, micro hardness and corrosion of 316 L stainless steel implant machined by the electrical discharge machining process," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 129-142, 2021, doi: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1399.21.3.2.0>.
- [9] S. Oskueyan, V. Abedini, and A. Hajialimohammadi, "Statistical Modeling of the Effective Parameters in Electrical Discharge Machining Process of Ti-6Al-4V Alloy Using the Mixtures of Aluminum Oxide and Silicon Oxide in Dielectric," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 1449-1462, 2020, doi: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1399.20.6.4.5>.
- [10] A. Ramaswamy, A. Perumal, J. Jagadeesan, P. kaladharan, and H. V. Nagarajan, "Optimization of WEDM process parameters for D3 die steel using RSM," *Materials Today: Proceedings*, vol. 37, pp. 2063-2069, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.505>.
- [11] H. P. Nguyen, N. V. Ngo, and Q. T. Nguyen, "Optimizing process parameters in edm using low frequency vibration for material removal rate and

- [23] J. Rezaeian, S. Jahanbakhshi, and S. J. J. o. P. R. Jamshidi, "Sensitivity Analysis of Production Parameters of an Iranian Oilfield Using Sobol Method," vol. 30, no. 99-4, pp. 37-46, 2020, doi: <https://doi.org/10.22078/pr.2020.4111.2861>.
- [24] M. H. Korayem and Z. Rastegar, "Application of Nano-Contact Mechanics Models in Manipulation of Biological Nano-Particle": *FE Simulation International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, *Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 8, no. 1, pp. 35-50, 2012.
- [25] V. Tahmasbi, M. Ghoreishi, and M. J. M. M. E. Taheri, "Sensitivity analysis of material removal rate in dry electro-discharge machining process," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 15, no. 13, pp. 382-386, 2016, doi: <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1394.15.13.57.7>.
- [26] P. Sharma, D. Chakradhar, S. J. M. Narendranath, and Design, "Evaluation of WEDM performance characteristics of Inconel 706 for turbine disk application," *Materials & Design*, vol. 88, pp. 558-566, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.036>.
- [19] A. Saltelli, "Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices," *Computer Physics Communications*, vol. 145, no. 2, pp. 280-297, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-4655\(02\)00280-1](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(02)00280-1).
- [20] A. Saltelli, S. Tarantola, and K.-S. J. T. Chan, "A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output," *Technometrics*, vol. 41, no. 1, pp. 39-56, 1999, doi: <https://doi.org/10.2307/1270993>.
- [21] A. Nekahi and K. Dehghani, "Modeling the thermomechanical effects on baking behavior of low carbon steels using response surface methodology," *Materials & Design*, vol. 31, no. 8, pp. 3845-3851, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.03.038>.
- [22] C. J. Tzeng, Y. K. Yang, M. H. Hsieh, and M. C. Jeng, "Optimization of wire electrical discharge machining of pure tungsten using neural network and response surface methodology," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 225, no. 6, pp. 841-852, 2011, doi: <https://doi.org/10.1243/09544054JEM2021>.