

بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر فرآیند ماشین کاری جرقه ای الکتروشیمیایی سیم های متحرک (TW-ECSM)

چکیده: ماشین کاری جرقه ای الکتروشیمیایی سیم های متحرک (TW-ECSM) یکی از جدیدترین فرآیندهای ماشین کاری می باشد که پتانسیل ماشین کاری مواد پیشرفته غیر رسانا مانند شیشه، کوارتز، نیتريد سيليكون، کامپوزیت های مختلف و سرامیک را دارد و اغلب برای ایجاد حفره های پیچیده در مواد بر استحکام، به ویژه در صنعت هوافضا، برای تولید انبوه پره های توربین، قطعات موتور جت و نازل ها به کار می رود. مطالعات نشان می دهد که رویکردهای ترکیبی اعمال شده برای مدل سازی و بهینه سازی فرآیند ماشین کاری جرقه ای الکتروشیمیایی سیم های متحرک، معقول هستند. در این پژوهش از یک مدل ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم به منظور پیش بینی میزان نرخ براده برداری در حین عملیات ماشین کاری و زبری سطح و بر هم کنش های مؤثر آن ها استفاده شده است. سپس با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری سوبل، تأثیر پارامترهای مختلف شامل ولتاژ، سرعت تغذیه سیم، تراکم الکتروولت و ضخامت قطعه کار، بر نرخ براده برداری و زبری سطح به دست آمده است. نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت نشان می دهند که ولتاژ بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری و سرعت تغذیه سیم بیشترین اثر را بر زبری سطح داشته است.

واژه های راهنما: ماشین کاری جرقه ای الکتروشیمیایی سیم های متحرک، زبری سطح، نرخ براده برداری، کیفیت سطح، تحلیل حساسیت

محمد لنجابی شراهی
دانشجوی کارشناسی ارشد

احسان منصوری*

استادیار،
گروه مهندسی صنایع،
دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه اراک، اراک

معین طاهری

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

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷

Mohammad
LAnjabi Sharahi
MSc Student

Ehsan Mansouri*

Assistant Professor,
Department of
Industrial
Engineering, Faculty of
Engineering, Arak
University, Arak

Moein Taheri

Associate Professor,
Department of
Manufacturing
Engineering, Faculty of
Engineering, Arak
University, Arak

Investigating the effect of different parameters on the travelling wire electro chemical spark machining process (TW-ECSM)

Abstract: Travelling Wire Electro Chemical Spark Machining (TW-ECSM) is one of the newest machining processes that has the potential to machine advanced materials such as glass, quartz, silicon nitride, various composites and ceramics, and has the factors of creating complex cavities in materials. Forging is used, especially in the aerospace industry, to produce turbine assemblies, jet engine parts, and nozzles. The Studies show that the combined methods applied to model and optimize the TW-ECSM process are reasonable. In this research, a second-order linear regression mathematical model has been used to predict the rate of chip removal during machining operations and surface roughness and their effective interactions. Then, using the Sobol statistical analysis method, various differences including voltage, wire feeding speed, electrolyte density and thickness of the work piece on the material removal rate and surface roughness have been obtained. The results obtained from the sensitivity analysis show that the voltage has the greatest effect on the chip removal rate and the wire feeding speed has the greatest effect on the surface roughness.

Keywords: Travelling wire electro chemical spark machining, Surface roughness, Material removal rate, Surface quality, Sensitivity analysis

۱- مقدمه

الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک برای غلبه بر مشکل ماشین‌کاری سرامیک غیر رسانای Al_2O_3 پرداخته‌اند.

ملیک و مانا [۷] بیان نموده‌اند که ماشین‌کاری جرقه‌ای شیمیایی الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک، ترکیبی از ماشین‌کاری الکتروشیمیایی^۵ (ECM) و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی^۶ (WEDM) است. این فرآیند ماشین‌کاری می‌تواند به طور مؤثر برای ماشین‌کاری مواد غیررسانای سخت که ماشین‌کاری آن‌ها با روش‌های ماشین‌کاری غیرمتعارف مانند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی^۷ (EDM)، ماشین‌کاری الکتروشیمیایی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی و غیره امکان‌پذیر نیست، استفاده شود. راتان و مولیک [۸] بیان نموده‌اند که ماشین‌کاری مواد مهندسی پیشرو مانند سرامیک‌ها و کامپوزیت‌های مختلف که دارای سختی، شکنندگی، استحکام و عایق الکتریکی بالا هستند، بسیار دشوار می‌شود. آن‌ها به توسعه‌ی فرآیند راه‌اندازی ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک با کمک میدان مغناطیسی و استفاده از آن برای ماشین‌کاری مواد عایق الکتریکی پرداخته‌اند.

و [۹] روشی ترکیبی با استفاده از ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی و انحلال الکتروشیمیایی با یکدیگر را در یک فرآیند ساده پیشنهاد داده و بررسی نموده است. یاداو و همکارانش [۱۰] به بررسی تجربی و مطالعه‌ی عملکرد ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک نانوکامپوزیت اپوکسی سیلیس پرداخته‌اند.

بویان و همکارانش [۱۱] با استفاده از روش ترکیبی متشکل از روش تاگوچی و روش سطح پاسخ، مدل‌سازی تجربی فرآیند ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم متحرک را انجام داده‌اند. آزمایشات آن‌ها بر روی شیشه بوروسیلیکات با استفاده از آرایه متعامد L27 با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی مانند ولتاژ اعمال شده، زمان پالس، زمان خاموشی پالس، غلظت الکترولیت و سرعت تغذیه سیم همراه با عملکرد فرآیند مانند نرخ براده‌برداری انجام شده است. کومار و همکارانش [۱۲] تأثیر ولتاژ، غلظت الکترولیت و شکاف بین الکترودی را بر نسبت ابعاد میکرواسلات‌های ماشین‌کاری شده بر روی شیشه بوروسیلیکات با کمک فرآیند ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم متحرک با استفاده از طراحی آرایه L9 تاگوچی بررسی نموده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است

در سال‌های اخیر، صنایع هوافضا و صنایع دفاعی مدرن نیاز دارند که محصولات بسیار پیچیده آن‌ها در مسیری با دقت بالا، سرعت بالا، دمای بالا، فشار بالا و قدرت زیاد توسعه یابد. مواد به‌کاررفته در این محصولات عمدتاً شیشه، سرامیک و کامپوزیت است. شیشه بوروسیلیکات به دلیل بهبود استحکام، مقاومت حرارتی و مقاومت در برابر خوردگی برای این نوع محصولات اهمیت بیشتری پیدا می‌کند و کاربردهای گسترده‌ای در سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی دارد [۱]. فرآیند ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم متحرک^۱ (TW-ECSM) از پدیده تخلیه الکتروشیمیایی برای تولید گرما به‌منظور حذف مواد کار با ذوب و تبخیر استفاده می‌کند. برای اولین بار توسط کورافوجی به‌عنوان حفاری تخلیه الکتروشیمیایی برای ایجاد ریز چاله در قطعه کار شیشه ارائه شد [۲].

وتریچ و فاسیکو [۳] بیان نموده‌اند که ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتروشیمیایی، یک فناوری غیرمتعارف است که می‌تواند چندین ماده نارسای الکتریکی مانند شیشه یا برخی از سرامیک‌ها را ماشین‌کاری کند. آن‌ها برخی از عوامل محدودکننده‌ی اصلی این فرآیند را بررسی نموده و راه‌حل‌های ممکن را مورد بحث قرار داده‌اند. موندا و باتاچاریا [۴] بیان نموده‌اند که میکروماشین‌کاری الکتروشیمیایی^۲ (EMM) می‌تواند به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های میکروماشین‌کاری برای ماشین‌کاری مواد رسانای الکتریکی، سخت و دشوار با ترکیب پارامترهای ماشین‌کاری مناسب استفاده شود. آن‌ها تلاش نمودند تا یک مدل ریاضی جامع برای همبستگی تأثیرات تعاملی و مرتبه‌ی بالاتر پارامترهای مختلف ماشین‌کاری، یعنی نسبت زمان روشنی/خاموشی و ولتاژ ماشین‌کاری، ولتاژ ماشین‌کاری، غلظت الکترولیت، فرکانس ولتاژ و فرکانس ارتعاش ابزار بر روی معیارهای میکروماشین‌کاری، ایجاد کنند.

بویان و یاداو [۵] تلاش نمودند تا کاربرد یک روش ترکیبی متشکل از روش تاگوچی^۳ (TM) همراه با روش سطح پاسخ^۴ (RSM) برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی چند هدفه ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم متحرک را توسعه دهند. بویان و مانا و کندال [۶] بر توسعه‌ی یک ماشین‌کاری جرقه‌ای

¹ Travelling Wire Electro-Chemical Spark Machining (TW-ECSM)

² Electrochemical Micro Machining (EMM)

³ Taguchi Methodology (TM)

⁴ Response Surface Methodology (RSM)

⁵ Electro Chemical Machining (ECM)

⁶ Wire-Cut Electrical Discharge Machining (WEDM)

⁷ Electrical Discharge Machining (EDM)

ابتدا، برای تعیین سطح پارامترهای ورودی مربوط به حداقل زبری سطح و حداکثر نرخ براده برداری استفاده می‌شود. این سطوح از پارامترهای ورودی بیشتر به‌عنوان یک مقدار مرکزی در طراحی ماتریس طراحی مرکب مرکزی قابل چرخش (CCRD) استفاده می‌شود [۵]. همچنین تلاش شده است تا تجزیه و تحلیل پارامتری بهینه بر روی فرآیند ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک انجام شود تا کنترل بهتری برای برش باکیفیت حاصل شود.

۲- مدل‌سازی

در این بخش ابتدا مختصری به تعیین نرخ براده برداری و کیفیت سطح در فرآیند ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک بر روی قطعه‌کار از جنس شیشه بوروسیلیکاتی پرداخته‌شده و سپس آنالیز حساسیت و روش‌های مختلف آن به‌طور مختصر بررسی شده و سپس با توجه به نیاز به بررسی تأثیر متقابل بین ورودی‌های مختلف، روش آنالیز حساسیت آماری سوبل جهت تحلیل و بررسی اثر پارامترهای مختلف انتخاب گشته و به شرح مختصر آن پرداخته‌شده است.

۲-۱- تعیین نرخ براده برداری و کیفیت سطح بر روی ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی با سیم

بویان و یاداوا مطالعات تجربی بر روی ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی با سیم انجام داده‌اند. شکل (۱) - (الف) نمودار شماتیک و (ب) نمای عکاسی واقعی تنظیمات آزمایشی آن‌ها را نشان می‌دهد. پارامترهای متغیر فرآیند ورودی (عوامل کنترل) گرفته‌شده شامل ولتاژ، غلظت الکترولیت، سرعت تغذیه سیم و ضخامت قطعه کار بوده‌اند. یک سری آزمایش جامع برای تعیین محدوده‌ی پارامتر برای یک برش باکیفیت انجام شده است. در آزمایش‌ها از میله گرافیتی (قطر ۸ میلی‌متر، طول ۵۵ میلی‌متر) به‌عنوان آند و سیم برنجی با قطر ۰/۲۵ میلی‌متر به‌عنوان کاتد استفاده‌شده است [۵].

در کار حاضر، مقادیر کمتر زبری سطح و مقادیر بالاتر نرخ براده برداری مطلوب است. این ویژگی‌های دررورش ناگوچی به‌عنوان ویژگی‌های نوع کمتر از بهتر (LB) و نوع بالاتر از بهتر (HB) نامیده می‌شوند.

که ولتاژ به‌عنوان عامل مؤثر اصلی و پس از آن غلظت الکترولیت و شکاف بین الکتروود پارامترهای بعدی تأثیرگذار بوده‌اند.

موهیتکار و همکارانش [۱۳] حوزه‌ی کاربرد فرآیند ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی را از مواد غیرسازنا به مواد نیمه‌سازنا یعنی کاربید سیلیکون (SiC) گسترش داده‌اند. آن‌ها به منظور افزایش سرعت براده برداری و برای کاهش اندازه ورودی و همچنین زبری سطح، از روش همرفت مغناطیسی هیدرودینامیکی (MHD) استفاده نموده‌اند.

صفی‌خانی و همکارانش [۱۴] به تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر جریان نانوسیال در لوله‌های تخت با استفاده از روش تحلیل حساسیت آماری ای‌فست پرداخته‌اند. خورشیدی و همکارانش [۱۵] به تجزیه و تحلیل حساسیت صفحات مستطیلی کامپوزیت چند لایه ارتعاشی در تعامل با سیال نامرغوب با استفاده از روش آماری ای‌فست پرداخته‌اند. طاهری و بطحایی [۱۶] به بررسی عوامل ماشین‌کاری قطعات متالورژی پودر بازیابی، از براده‌کاری و تف جوشی با طراحی آزمایش‌ها و آنالیز حساسیت آماری پرداخته‌اند. مصطفوی و طاهری [۱۷] تأثیر پارامترهای هندسی بر راندمان حرارتی و مصرف سوخت هیترهای یک ایستگاه کاهش فشار گاز طبیعی با استفاده از تحلیل حساسیت آماری سوبل بررسی نموده‌اند.

مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که تاکنون از روش‌های آماری آنالیز حساسیت برای بررسی دقیق و کمی میزان تأثیرگذاری پارامترهای مختلف بر نرخ براده برداری در فرآیند ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک استفاده نشده است.

در این مقاله، به بررسی کلی فرآیند ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک پرداخته‌شده است و برای اولین بار تحلیل حساسیت انجام و نمودارها بررسی گردیده است. برای این منظور، روش‌های مختلف آنالیز حساسیت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. پس از آن، روش آنالیز حساسیت آماری سوبل مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از این روش به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی مختلف بر روی پارامترهای خروجی زبری سطح و نرخ براده برداری پرداخته شده است. زبری سطح (Ra) و نرخ براده برداری (MRR) به‌عنوان خروجی‌های مدل در نظر گرفته‌شده‌اند و اثر پارامترهای ورودی بر آن‌ها به روش تحلیل حساسیت آماری بررسی شده است.

¹ Magneto-Hydro Dynamic

است. تأثیر عوامل کنترل مختلف بر MSNR در معادلات (۷) و (۸) نشان داده شده است.

از نظر ریاضی، نسبت S/N برای ویژگی‌های کیفیت نوع LB و HB به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = -10 \log_{10}(MSD) \quad (1)$$

$$\text{FOR LB type, } MSD = \frac{1}{n \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (2)$$

$$\text{FOR HB type, } MSD = \frac{1}{n \sum_{i=1}^n y_i} \quad (3)$$

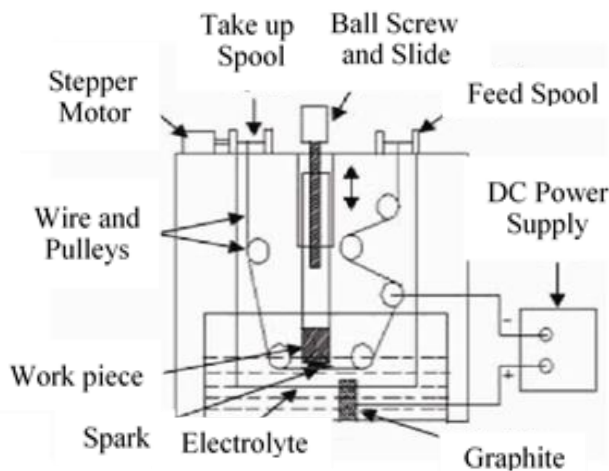
که در آن y_i داده‌های مشاهده شده یا ارزش کیفی آزمایش چهارم است و n تعداد آزمایش‌ها در شرایط مشابه آزمایش است. در بهینه‌سازی چند هدفی، یک نسبت S/N کلی برای همه ویژگی‌های کیفیت به جای نسبت S/N جداگانه برای هر مشخصه کیفیت محاسبه می‌شود. این نسبت کلی S/N به نام نسبت S/N چندگانه (MSNR) معروف است. MSNR برای آزمایش زام مطابق زیر محاسبه می‌شود.

$$\eta_j^e = 10 \log_{10}(y_j^e) \quad (4)$$

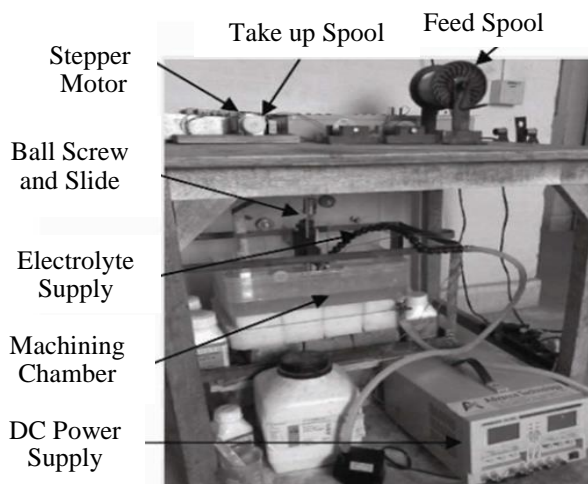
$$y_j = \sum_{i=1}^p w_i y_{ij} \quad (5)$$

$$y_{ij} = \frac{L_{ij}}{L_i} \quad (6)$$

که در آن Y_j کل کاهش کیفیت نرمال شده در آزمایش j است، w_i نشان‌دهنده ضریب وزنی برای ویژگی کیفیت i است، p تعداد ویژگی‌های کیفیت و y_{ij} افت کیفیت نرمال شده مرتبط با ویژگی کیفیت i th در شرایط آزمایشی j است و از حداقل صفر تا حداکثر یک متغیر است. L_{ij} افت کیفیت یا MSD برای مشخصه کیفیت یکم در آزمایش j و L_i^* حداکثر افت کیفیت برای مشخصه کیفیت یکم در بین تمام آزمایش‌های آزمایشی است. مقادیر از دست دادن کیفیت برای ویژگی‌های کیفی مختلف در هر اجرای آزمایشی با استفاده از معادلات (۲) و (۳) محاسبه می‌شود. از طریق نرم‌افزار MINITAB پارامترهای بهینه برش فرآیند با چندین ترکیب وزنی از ویژگی‌های کیفی به دست آمده است. ارزش ضریب وزنی به قضاوت مهندسی بستگی دارد. سطوح پارامترها در جدول (۱) نشان داده شده



(الف) نمودار شماتیک



(ب) عکس دستگاه

شکل ۱ (الف) نمودار شماتیک، (ب) نمای عکاسی از میز توسعه یافته جهت راه‌اندازی TW-ECSM [۵]

جدول ۱ سطوح پارامترها

نماد	عوامل کنترلی	واحدها	سطح کد				
			-۲	-۱	۰	۱	۲
A	ولتاژ	Vol	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵	۶۰
B	غلظت الکترولیت	g/l	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰
C	سرعت تغذیه سیم	m/min	۰/۶	۱/۲	۱/۸	۲/۴	۳
D	ضخامت قطعه کار	mm	۲	۳	۴	۵	۶

می‌کند. در این روش می‌توان اثر متقابل بین چندین ورودی را بر روی خروجی مشخص کرد. روش سوپل یکی از روش‌های آنالیز حساسیت آماری و مستقل از مدل است که بر پایه‌ی تجزیه واریانس می‌باشد. از این روش می‌توان برای توابع و مدل‌های غیرخطی و غیریکنواخت استفاده کرد. سطوح بهینه فاکتورهای کنترلی مختلف یا پارامترهای فرآیند ورودی برای حداقل زبری سطح و حداکثر نرخ براده‌برداری به‌دست‌آمده عبارت‌اند از ولتاژ در سطح ۲ (۵۰ ولت)، غلظت الکترولیت در سطح ۳ (250 g/l)، سرعت تغذیه سیم در سطح ۲ (۴ میلی‌متر). به‌طور کلی، یک مدل رگرسیون مرتبه دوم در زیر ارائه‌شده است که در روش زبری سطح استفاده می‌شود زیرا مدل‌های مرتبه اول اغلب عدم تناسب را نشان می‌دهند [۱۸].

$$Y = b_0 + \sum_{i=1} b_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j b_{ij} x_i x_j \quad (9)$$

۳- آنالیز حساسیت پارامترها

در این بخش تأثیر پارامترهای فرآیند شامل ولتاژ (V)، غلظت الکترولیت (EC)، سرعت تغذیه سیم (Wv) و ضخامت قطعه کار (Wt) بر زبری سطح و نرخ براده‌برداری در فرآیند ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک بر اساس مدل‌سازی ریاضی یعنی معادلات (۷) و (۸) تحلیل می‌شوند. شکل‌های (۲) تا (۹) پراکندگی نقاط نرخ ماشین‌کاری با تغییرات هم‌زمان چهار پارامتر ورودی را نشان می‌دهد. نقاط پراکنده موجود در این شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزار سیملب و به روش سوپل استخراج شده‌اند. در روش سوپل برخلاف روش‌های گرافیکی که در آن‌ها تمامی ورودی‌ها به‌جز یک ورودی ثابت است، با استفاده از الگوریتمی خاص تمامی پارامترها به‌طور هم‌زمان تغییر می‌نمایند، بنابراین نقاط در این نمودارها به صورت پراکنده درآمده و برای هر مقدار ورودی، خروجی‌های مختلفی حاصل می‌گردد که ناشی از تغییر سایر ورودی‌ها به صورت هم‌زمان است.

۳-۱- اثر پارامترهای فرآیند بر نرخ براده‌برداری

تأثیر ولتاژ بر روی نرخ براده‌برداری در شکل (۲) نشان داده شده است. نرخ براده‌برداری در حین فرآیند ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک با افزایش ولتاژ افزایش نسبتاً زیادی می‌یابد، زیرا در ولتاژ بالا تعداد زیادی

$$Ra = 7.57143 - 0.7000X1 + 102333X2 - 0.0833X3 + 0.4000X4 + 1.4779X12 + 0.3029X22 + 0.2029X32 + 0.3779X42 + 0.9500X1X2 \quad (7)$$

$$-1.1750X1X3 - 0.1750X1X4 - 0.5000X2X3 + 0.2000X2X4 + 0.3750X3X4$$

$$MRR = 0.4905 + 0.1641X1 - 0.0054X2 + 0.0442X3 + 0.0081X4 - 0.0238X12 - 0.0018X22 - 0.0199X32 + 0.0197X42 - 0.0273X1X2 + 0.0125X1X3 - 0.0126X1X4 + 0.0291X2X3 + 0.0257X2X4 + 0.0239X3X4 \quad (8)$$

که در آن X1 ولتاژ (ولت)، X2 غلظت الکترولیت (g/l)، X3 سرعت تغذیه سیم (m/min) و X4 ضخامت قطعه کار (mm) است.

۲-۲- روش‌های آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت ابزاری جهت بررسی سیستم‌ها و تعیین تأثیر پارامترهای ورودی بر روی متغیرهای خروجی سیستم‌ها می‌باشد. آنالیز حساسیت را به چند طریق طبقه‌بندی می‌کنند. برحسب کاربرد که به نوع قطعی یا احتمالی است یا برحسب فرم مدل که به روش‌های گرافیکی، ریاضی و آماری طبقه‌بندی می‌شود.

• روش گرافیکی:

در این روش تحلیل حساسیت، حساسیت را در فرم‌هایی به‌صورت نمودار و جدول یا سطوح نمایش می‌دهند. از روش گرافیکی عموماً برای نشان دادن تغییرات خروجی‌ها تحت تأثیر ورودی‌ها استفاده می‌شود.

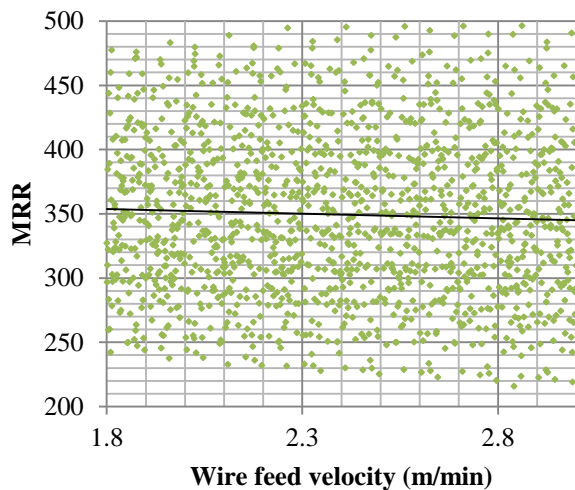
• روش ریاضی:

در روش ریاضی، حساسیت را از روی تغییرات خروجی برحسب تغییرات ورودی به دست می‌آورند. این روش‌ها عموماً درگیر محاسباتی هستند که به بررسی خروجی به ازای مقدار کمی تغییر در ورودی می‌پردازد.

• روش آماری:

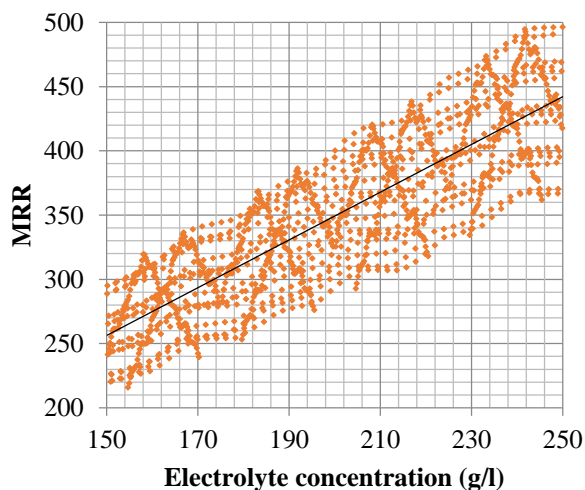
این تحلیل حساسیت به‌صورت توزیع احتمالی به شبیه‌سازی ورودی می‌پردازد، سپس تأثیر این ورودی را بر خروجی ارزیابی

بالاتر اتفاق می‌افتد. افزایش سرعت تغذیه سیم به این معنی است که شرایط انحلال الکتروشیمیایی به تدریج با عمل تخلیه پوشانده شده است، در نتیجه چگالی جریان بالا، منجر به تکامل مقدار فراوانی از حباب‌های گاز هیدروژن می‌شود که باعث تخلیه می‌شود؛ بنابراین، انرژی تخلیه در هر جرقه افزایش می‌یابد و در نتیجه نرخ براده‌برداری را افزایش می‌دهد.



شکل ۴ نمودار تغییرات نرخ براده‌برداری با ولتاژ و سرعت تغذیه سیم

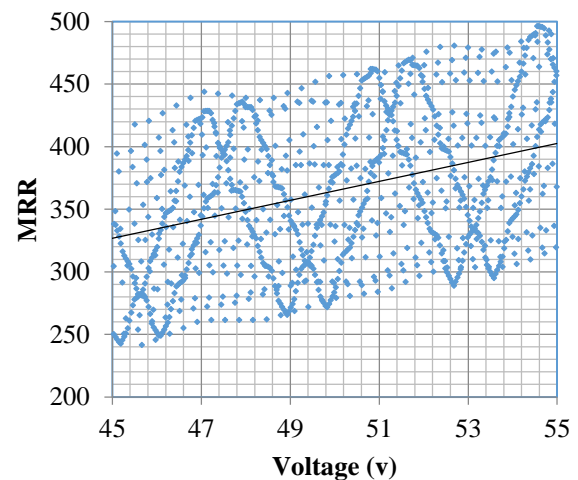
شکل (۵) اثر غلظت الکترولیت را بر نرخ براده‌برداری نشان می‌دهد. از نمودار پاسخ مشاهده شده است که نرخ براده‌برداری به صورت خطی و با شیب نسبتاً زیاد با افزایش غلظت‌های مختلف الکترولیت افزایش می‌یابد. این امر به دلیل کاهش رسانایی ویژه الکترولیت پس از رسیدن به سطح غلظت الکترولیت ۱۲۵۰ g/l رخ می‌دهد که در نتیجه جریان مدار را کاهش می‌دهد.



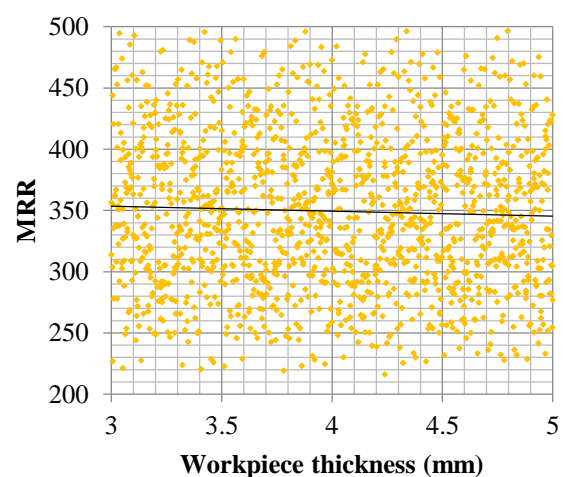
شکل ۵ نمودار تغییرات نرخ براده‌برداری با ولتاژ و غلظت الکترولیت

حباب گاز در دیواره کناری ابزار جمع می‌شود و در نتیجه جرقه زیادی در ناحیه جرقه ایجاد می‌شود.

تأثیر ضخامت قطعه کار، بر روی نرخ براده‌برداری در شکل (۳) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که نرخ براده‌برداری با افزایش ضخامت قطعه کار افزایش اندکی می‌یابد، زیرا ناحیه‌ی تخلیه در مجاورت سیم به بالای قطعه کار منتقل می‌شود و غلظت حباب بیشتری روی سیمی که از شیار عبور می‌کند، ایجاد می‌شود و در نتیجه انرژی تخلیه بالاتری در هر جرقه ایجاد می‌شود.



شکل ۲ نمودار تغییرات نرخ براده‌برداری تغییر ولتاژ



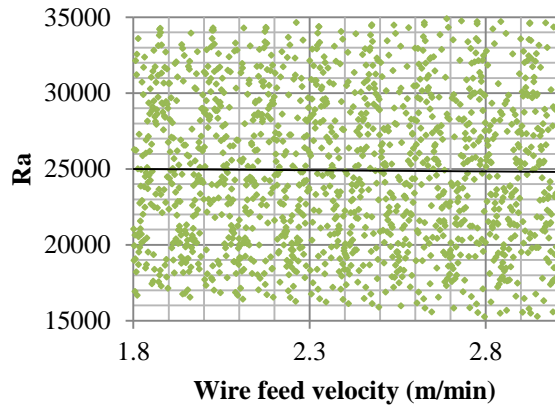
شکل ۳ نمودار تغییرات نرخ براده‌برداری با تغییر ضخامت قطعه کار

شکل (۴) اثر سرعت تغذیه بر نرخ براده‌برداری را نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که نرخ براده‌برداری با افزایش سرعت‌های مختلف تغذیه سیم افزایش اندکی می‌یابد. این موضوع به دلیل انرژی تخلیه بالاتر در هر واحد است. جرقه در سطح پایین‌تر از سرعت تغذیه سیم و تولید تعداد بیشتری حباب گاز در ولتاژ

۲-۳- اثر پارامترهای فرآیند بر زبری سطح

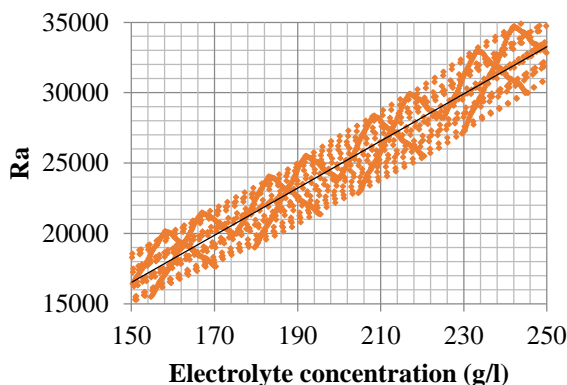
اثر ولتاژ بر روی زبری سطح در فرآیند ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک در شکل (۶) قابل مشاهده می‌باشد. از نمودار می‌توان مشاهده کرد که زبری سطح با افزایش ولتاژ، افزایش پیدا می‌کند. این موضوع به دلیل این واقعیت است که برای ایجاد کانال پلاسما به انرژی بیشتری نیاز است که باعث ایجاد دهانه کم‌عمق روی سطح ماشین‌کاری شده و قسمت دوم منحنی به دلیل تعداد زیادی حباب گاز در نتایج محیط ابزار (سیم) تولید می‌شود. جرقه بیشتر که باعث ایجاد دهانه عمیق‌تر روی قطعه کار می‌شود. اثر ضخامت قطعه کار، بر روی زبری سطح در فرآیند ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک نیز در شکل (۷) قابل مشاهده می‌باشد. در مورد ضخامت قطعه کار دلیل آن این است که انسداد در مسیر جریان منجر به تشکیل حباب کمتری روی سیم عبوری از شیار می‌شود و انرژی تولیدشده روی سیم دور از قطعه کار در گرم کردن الکترولیت هدر می‌رود.

شکل (۸) اثر سرعت تغذیه سیم را بر زبری سطح نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشاهده شد که زبری با تغییر در سرعت تغذیه سیم به صورت منحنی خطی و با نرخ کمی کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع این است که در سرعت تغذیه سیم بالاتر، تشکیل حباب بسیار کمتری در دیواره جانبی ابزار ایجاد می‌شود که باعث کاهش دهانه در سطح ماشین‌کاری شده می‌شود.

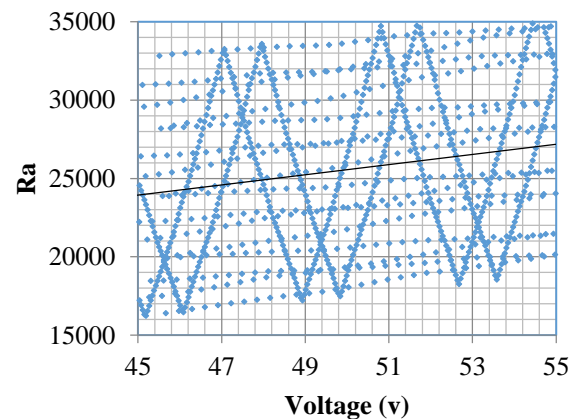


شکل ۸ نمودار تغییرات زبری سطح با ولتاژ و سرعت تغذیه سیم

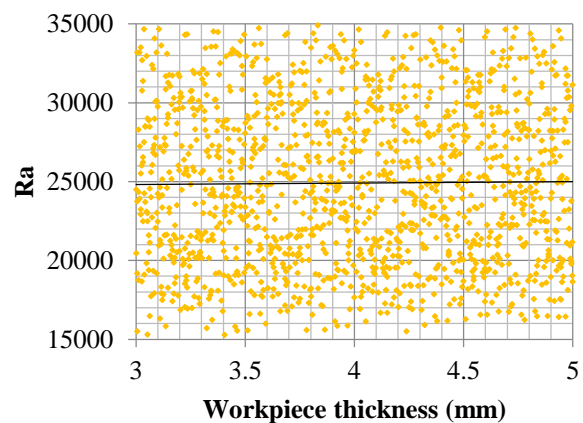
تأثیرات غلظت الکترولیت بر زبری سطح بر اساس یک مدل ریاضی مرتبه دوم همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است تعیین می‌شود. از شکل (۹) مشاهده می‌شود که زبری سطح با افزایش ولتاژ زمانی که غلظت الکترولیت در سطح پایین‌تر نگه‌داشته می‌شود، کاهش می‌یابد. در سطح بالاتر غلظت الکترولیت، زبری سطح با افزایش ولتاژ افزایش می‌یابد زیرا غلظت الکترولیت بالاتر به معنای رسانایی ویژه بالاتر به معنای افزایش رسانایی الکترولیت است که منجر به جریان مدار بیشتر می‌شود. در مقادیر بالاتر جریان مدار به این معنی است که انرژی گرمایی بیشتری به قطعه کار نفوذ می‌کند و در نتیجه مقدار بیشتری از عمق دهانه و در نتیجه مقدار بالاتر زبری سطح تولید می‌شود.



شکل ۹ نمودار تغییرات زبری سطح با ولتاژ و تراکم الکترولیت



شکل ۶ نمودار تغییرات زبری سطح با ولتاژ



شکل ۷ نمودار تغییرات زبری سطح با ضخامت قطعه کار

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

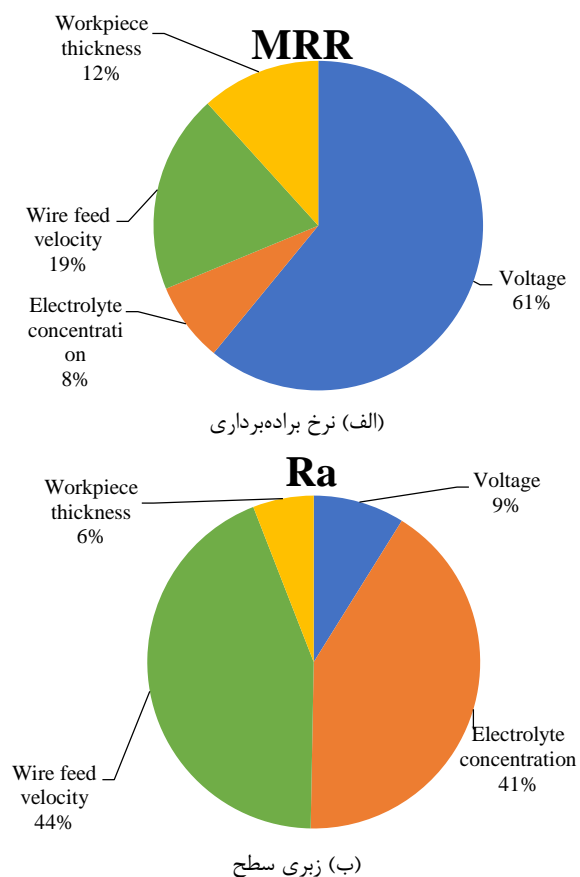
در مطالعه‌ی حاضر، از روش آنالیز حساسیت آماری، جهت بررسی اثر پارامترهای مختلف بر نرخ براده‌برداری و زبری سطح استفاده شد. بر اساس مطالعات انجام شده، نتایج به شرح زیر خلاصه می‌شود:

- (۱) پارامترهای ولتاژ و سرعت تغذیه سیم، مؤثرترین پارامترهای مؤثر بر نرخ براده‌برداری می‌باشند.
- (۲) پارامترهای غلظت الکترولیت و سرعت تغذیه سیم، مؤثرترین پارامترهای مؤثر بر زبری سطح می‌باشند.
- (۳) به‌طور کلی ضخامت قطعه کار تأثیر کمتری بر زبری سطح و نرخ براده‌برداری در مقایسه با سایر پارامترهای فرآیند دارد.
- (۴) برای دستیابی به مقدار کمتر زبری سطح و مقدار بیشتر نرخ براده‌برداری، مقدار بیشتری از سرعت تغذیه سیم مورد نیاز است.

۵- مراجع

- [1] Kurafuji, H., and Suda, K., Electrical discharge drilling of glass, *Annals of the CIRP*, Vol. 16, pp. 415-419, (1968).
- [2] Jain, V. K., Rao, P. S., Choudhury S. K., and Rajurkar, K. P., Experimental investigations into traveling wire electrochemical spark machining (TW-ECSM) of composites, *ASME Transaction Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, No. 1, pp. 75-84, (1991).
- [3] Wuthrich, R., and Fascio, V., Machining of non-conducting materials using electrochemical discharge phenomenon-an overview, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, No. 9, pp. 1095-1108, (2005).
- [4] Munda, J., and Bhattacharyya, B., Investigation into electrochemical micromachining (EMM) through response surface methodology based approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 35, No. 7-8, pp. 821-832 (2006).
- [5] Bhuyan, B. K., and Yadava, V., Experimental modeling and multi-objective optimization of traveling wire electrochemical spark machining (TW-ECSM) process, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, No. 8, pp. 2467-2476, (2013).

روش آماری آنالیز حساسیت سوبل، نسبت به آنالیز واریانس این برتری را دارد که علاوه بر مشاهده‌ی تأثیر کیفی پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی، می‌توان تأثیر کمی و دقیق این پارامترها را به‌طور هم‌زمان به دست آورده و پارامترهای مهم با تأثیرگذاری بالا و پارامترهای کم اثر را به‌طور دقیق شناسایی نمود. همچنین در نمودارهای مربوط به این روش می‌توان هم‌زمان نتیجه را به‌صورت گرافیکی مشاهده نمود. شکل (۱۰) نتایج کلی روش آنالیز حساسیت سوبل را در برمی‌گیرد. در این شکل مشاهده می‌گردد که از بین چهار پارامتر ورودی مورد بررسی، پارامتر ولتاژ با ۶۱ درصد اثرگذاری، حساس‌ترین پارامتر مؤثر بر نرخ براده‌برداری و پارامتر سرعت تغذیه سیم با ۴۴ درصد اثرگذاری، حساس‌ترین پارامتر مؤثر بر زبری سطح می‌باشد. همچنین نتایج نهایی آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که از بین چهار پارامتر ورودی مورد بررسی، پارامتر غلظت الکترولیت با ۸ درصد اثرگذاری، پارامتر غیرحساس در نرخ براده‌برداری و پارامتر ضخامت قطعه‌کار با ۶ درصد اثرگذاری، پارامتر غیرحساس در زبری سطح می‌باشد. نتایج این شکل که از نرم‌افزار سیملب و به روش آنالیز حساسیت آماری سوبل، استخراج شده است، با توجه به شکل‌های (۲) تا (۹) و میزان شیب خطوط آن‌ها نیز قابل تأیید می‌باشد.



شکل ۱۰ نتایج کلی روش آنالیز حساسیت

- [13] Mohitkar, A. D., Rattan, N., and Mulik, R. S., Improvement in Machining Performances of SiC Workpiece Using TW-Electro Chemical Spark Machining, *Silicon*, Vol. 14, No. 4, pp. 1369-1379, (2022).
- [14] Safikhani, H., Taheri, M., and Usefi, M., Sensitivity analysis of the effective nanofluid parameters flowing in flat tubes using the EFAST method, *Challenges in Nano and Micro Scale Science and Technology*, Vol. 7, No.2, pp. 80-87, (2019).
- [15] Khorshidi, K., Taheri, M., and Ghasemi, M., Sensitivity Analysis of Vibrating Laminated Composite Rec-tangular Plates in Interaction with Inviscid Fluid Using EFAST Method, *Mechanics of Advanced Composite Structures*, Vol. 7, No. 2, pp. 219-231, (2020).
- [16] Taheri, M., and Bathaee, S. H., Investigating machining factors of recovery powder metallurgy parts, from filings and sintered by Design of experiments in conjunction with sensitivity analysis, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 7, No. 7, pp. 24-37, (2020).
- [17] Mostafavi, S. A., and Taheri, M., Effect of geometrical parameters on thermal efficiency and fuel consumption of heaters of a natural gas pressure reduction station using Sobol statistical sensitivity analysis, *Heat Transfer*, Vol. 50, No. 2, pp. 1254-1267, (2021).
- [18] Saltelli A., and Sobol, I. M., About the use of rank transformation in sensitivity analysis of model output, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 50, pp. 225-239, (1995).
- [6] Manna, A., and Kundal, A., An experimental investigation on fabricated TW-ECSM setup during micro slicing of nonconductive ceramic, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76, No. 1, pp. 29-37, (2015).
- [7] Malik, A., and Manna, A., Travelling wire electrochemical spark machining: an overview, *Non-traditional Micromachining Processes*, pp. 393-411, (2017).
- [8] Rattan, N., and Mulik, R. S., Experimental set up to improve machining performance of silicon dioxide (quartz) in magnetic field assisted TW-ECSM process, *Silicon*, Vol. 10, No. 6, pp. 2783-2791, (2018).
- [9] Wu, X., Study of removing the recast layer by electrochemical dissolution with wire low feedrate in WEDM, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 105, No. 1, pp. 1143-1156, (2019).
- [10] Yadav, P., Yadava, V., and Narayan, A., Experimental investigation for performance study of wire electrochemical spark cutting of silica epoxy nanocomposites, *Silicon*, Vol. 12, No. 5, pp. 1023-1033, (2020).
- [11] Bhuyan, B. K., Bhuyan, P., and Mishra, S., Modeling and response optimization of traveling wire electro-chemical spark machining of borosilicate glass using hybrid approach, *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, Vol. 19, No. 3, pp. 425-447, (2020).
- [12] Kumar, M., Vaishya, R. O., Suri, N. M., and Gupta, A., Parametric optimization of traveling wire electrochemical discharge machining (TW-ECDM) process for aspect ratio during machining of borosilicate glass, *Materials Today: Proceedings*, (2022).