



بهینه‌سازی چند هدفه پارامترهای ماشین کاری الکتروشیمیایی با استفاده از روش سطح پاسخ

علی مهرور^۱، علی باستی^{۲*} و علی جمالی^۲^۱عضو هیات علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه شهرضا^۲دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۱/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۰۸

چکیده

در فرآیند ماشین کاری الکتروشیمیایی به سبب پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی پیچیده‌ای که در حین فرآیند رخ می‌دهد، پیش‌بینی پارامترهای بهینه بسیار دشوار است. در این مقاله از روش سطح پاسخ به‌عنوان روش طراحی آزمایش‌ها و با توجه به رویکرد تابع مطلوبیت با استفاده از روش Derringer، راهکاری مناسب جهت بهینه‌سازی همزمان متغیرهای پاسخ ارائه شده است. از این رو چهار پارامتر ماشینکاری ولتاژ، پیشروی ابزار، جریان الکترولیت و غلظت الکترولیت، به‌عنوان متغیر طراحی و زبری سطح و نرخ براده‌برداری، به‌عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شده است. از روش سطح پاسخ، جهت مدل‌سازی و تعیین مدل‌های حاکم بین متغیر پاسخ با پارامترهای ورودی استفاده شده است. دو متغیر پاسخ، رفتار عکس و متناقض دارند. در مرحله بعدی برای بهینه‌سازی چند هدفه، پارامترهای ورودی بهینه که به‌طور همزمان دو متغیر پاسخ را در حالت بهینه قرار دهد، برابر ولتاژ ۲۵/۵۶ ولت، پیشروی ابزار ۰/۵ میلی متر بر دقیقه، جریان الکترولیت ۶/۴۵ لیتر بر دقیقه و غلظت الکترولیت ۱۳۸/۱ گرم در لیتر تعیین شده است. خطای نسبی در اعتبارسنجی برای نرخ براده‌برداری و زبری سطح، ۶/۴ و ۶/۷ درصد بدست آمده که صحت و اطمینان روش اجرا شده را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: ماشین کاری الکتروشیمیایی؛ بهینه‌سازی؛ سطح پاسخ؛ روش Derringer.

Multi-Objective Optimization of Electrochemical Machining Parameters Using Response Surface Methodology

A. Mehrvar¹, A. Basti^{2,*}, Ali Jamali²¹ Faculty member, Mech. Eng. group, Univ. of Shahreza, Isfahan, Iran.² Assoc. Prof., Mech. Eng., Univ. of Guilan, Rasht, Iran.

Abstract

Electrochemical machining (ECM) process involves several physical and chemical phenomena that make it difficult to model the process. Therefore, selection of proper and optimal parameters setting is a challenging issue. In this paper, an approach is applied to look for the optimum solution to this problem. In this way, four parameters, i.e. voltage, tool feed rate, electrolyte flow rate and electrolyte concentration; and two machining criteria, i.e. material removal rate (MRR) and surface roughness (R_a) are considered as input variables and responses, respectively. Therefore, mathematical models have first been developed using response surface methodology (RSM). Then, the Derringer method has been utilized for optimizing the two responses simultaneously. MRR and R_a response would not be optimized in the same manner and have contradictive behaviors. The result of multi-objective optimization provides an optimal ECM process parameter setting, so the user can select desired optimal process parameters combination to achieve the optimal result. The optimal input parameters were determined as 25.56 V, 0.5 mm/min, 6.45 l/min, 138.1 g/l. Finally, optimization result was verified experimentally and the percentage error were 6.4 and 6.7 for MRR and R_a responses respectively.

Keywords: Electrochemical Machining; Optimization; Response Surface Methodology; Derringer Method.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۱۳۳۳۶۹۰۰۳۳

آدرس پست الکترونیک: basti@guilan.ac.ir

۱- مقدمه

از آنجایی که در فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی پدیده‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و هیدرودینامیکی رخ می‌دهد و همچنین عوامل و پارامترهای متعددی در فرآیند دخیل است [۱،۲]، از این‌رو تعیین پارامترهای بهینه از گلوگاه‌های اساسی در بکارگیری این روش است. از طرفی در مقاله مروری [۳]، به‌طور صریح بیان شده است که فعالیت‌های تحقیقاتی بیشتری برای بهینه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی مورد نیاز است.

می‌توان به موارد زیر با توجه به فعالیت‌های صورت پذیرفته در زمینه بهینه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی اشاره کرد. نتو و همکارانش [۴] در این مقاله، به بررسی تداخل پارامترها در فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی پرداخته‌اند. نرخ براده‌برداری، کیفیت سطح و اضافه ماشین‌کاری به‌عنوان متغیر پاسخ، مورد مطالعه قرار گرفته است. چهار پارامتر ورودی پیشروی، جنس الکترولیت، جریان الکترولیت و ولتاژ در طول انجام آزمایش‌ها جهت تعیین متغیرهای پاسخ بهینه تغییر داده شده است. دو نوع الکترولیت، یکی از جنس کلرید سدیم و دیگری نیترات سدیم مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این مقاله جمع‌بندی کلی و ارائه پارامترهای موثرتر است و بهینه‌سازی و تعیین دقیق و ارائه راه‌حل‌های مناسب جهت رسیدن به شرایط مطلوب در این مقاله، بررسی نشده است؛ همچنین موند و همکارانش [۵] در این تحقیق، به کنترل و بررسی میکرو جرقه‌ها و جریان‌های سرگردان در میکرو ماشین‌کاری الکتروشیمیایی پرداخته‌اند. به کمک روش سطح پاسخ، بررسی تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری روی دو فاکتور ذکر شده ارائه گردیده است. در این مقاله نیز، بهینه‌سازی به‌صورت تک هدفه است.

در تحقیق دیگری سنتیکومار و همکارانش [۶]، به بررسی تاثیر برخی پارامترهای موثر و اصلی در فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی از جمله ولتاژ، غلظت الکترولیت، جریان الکترولیت و پیشروی ابزار روی نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح در ماشین‌کاری الکتروشیمیایی پرداخته‌اند؛ همچنین از روش سطح پاسخ، جهت مدل‌سازی و تعیین اثر پارامترهای فرآیند استفاده شده است؛ در نتیجه این مقاله، تنها به مدل‌سازی و آنالیز رفتار پارامترهای ماشین‌کاری و

متغیرهای پاسخ پرداخته و شرایط بهینه تعیین نشده است. همچنین چیو و همکارانش [۷] در این مقاله، به بررسی ماشین‌کاری الکتروشیمیایی جهت ساخت در ابعاد میکرو پرداخته‌اند. ابتدا سیستمی طراحی و ساخته شده که توانایی انجام میکرو براده‌برداری الکتروشیمیایی را داشته باشد. در مرحله بعدی یک سری آزمایش‌هایی انجام شده است تا تاثیر پارامترهای اصلی فرآیند همچون، پارامترهای الکتریکی، پیشروی، الکترولیت و پالس روشنایی روی دقت ابعادی و کیفیت سطح تعیین شود. در این مقاله نیز، به بررسی کیفی فرآیند پرداخته شده، راه‌حل و شرایط بهینه بدست نیامده است.

باهر و همکاران [۸]، به بررسی توانایی روش ماشین‌کاری الکتروشیمیایی در براده‌برداری چدن لاملار^۱ با استفاده از نیترات سدیم به‌عنوان الکترولیت پرداخته‌اند. در این تحقیق، پارامترهای مختلف فرآیند از جمله ولتاژ، پالس روشنایی، فرکانس ارتعاش ابزار، پیشروی و فشار الکترولیت روی نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح به‌منظور تعیین پارامترهای بهینه مطالعه شده است. روش مورد استفاده جهت بررسی پارامترها، روش سطح پاسخ است. کلوک و همکارانش [۹]، در تحقیقی بر اساس آزمایش‌ها، به بررسی ماشین‌کاری الکتروشیمیایی آلیاژهای مدرن پایه نیکل و تیتانیوم پرداخته‌اند. به‌منظور افزایش بازده موتور جت از موادی که به سختی ماشین‌کاری می‌شوند مانند، آلیاژهای پایه نیکل و تیتانیوم برای ساخت پره و دیسک استفاده می‌شود که با استفاده از روش ماشین‌کاری الکتروشیمیایی، بیشترین نرخ براده‌برداری و بهترین کیفیت سطح ایجاد خواهد شد. در این مقاله، به تحقیقی پایه‌ای جهت بررسی توانایی روش ماشین‌کاری الکتروشیمیایی در ماشین‌کاری این دسته از آلیاژها پرداخته شده است.

سامانتا و چاکرابرتی [۱۰] در این تحقیق، نرخ براده‌برداری و دقت ابعادی را به‌عنوان عملکرد ماشین‌کاری در نظر گرفته، به کمک الگوریتم زنبور عسل به تعیین شرایط بهینه به‌صورت تک و چند هدفه پرداخته‌اند. از روش ضرایب وزنی بهینه‌سازی برای حالت چند هدفه، مورد بررسی قرار گرفته

^۱ Lamellar Cast Iron

ساخت دستگاه ذکر شده، با در نظر گرفتن واحدهای اندازه-گیری و مانیتورینگ مناسب جهت انجام آزمایش‌ها و در نهایت کسب دانش فنی جهت براده‌برداری الکتروشیمیایی است. واحد ماشین این دستگاه شامل، بستر، پایه و قسمت در برگیرنده قطعه کار و ابزار است.

محفظه کاری شامل، فیکسچر مناسبی جهت قرارگیری قطعه کار و از جنس پلکسی گلاس است. ابعاد محفظه کاری به صورت مکعبی با ضلع ۲۰ سانتی متر است؛ همچنین محل-هایی جهت ورود و خروج الکتروولت به محفظه کاری در نظر گرفته شده است. واحد کنترل دستگاه مد نظر، وظیفه کنترل دهانه ماشینکاری، کنترل نرخ پیشروی ابزار و کنترل پارامترهای الکتروولت را برعهده دارد. این واحد هماهنگ کننده قسمت‌های مختلف است. منبع تغذیه دستگاه، ۳۰ ولت و ۱۰۰ آمپر و کورس مفید حرکتی ابزار، ۲۰ سانتی متر است. واحد الکتروولت مسئول ذخیره، تغذیه و تصفیه الکتروولت را بر عهده دارد. این واحد از دو تانک به حجم ۵۰ لیتر و دو پمپ که یکی سبب تغذیه الکتروولت به محفظه-کاری می‌شود و دیگری وظیفه تخلیه از تانک دوم به اول و هدایت آن به فیلترها را دارد.



شکل ۱- دستگاه ماشینکاری الکتروشیمیایی

است. در این مقاله، هیچ‌گونه معیار و یا مقایسه‌ای برای تضمین نقاط سراسری بهینه بدست آمده ارائه نشده است. لندولت و همکارانش [۱۱]، در تحقیقی نقش حرکت سیال، توزیع جریان الکتریکی لایه منفعل^۱ را بررسی و کیفیت سطح میکروبراده‌برداری الکتروشیمیایی را مورد مطالعه قرار داده، مثال‌های متنوعی را ارائه کرده‌اند. در این مقاله به هیچ وجه در این تحقیق اثر متقابل پارامترها بررسی نشده، تعیین شرایط بهینه انجام نپذیرفته است؛ همچنین باتاچاریا و موند [۱۲] در تحقیقی به منظور درک بهتر، از فرآیند میکروماشین‌کاری الکتروشیمیایی برای دستیابی به نرخ براده‌برداری بالاتر انجام داده‌اند. آزمایش‌هایی روی پارامترهای اساسی فرآیند از جمله، ولتاژ ماشین‌کاری، غلظت الکتروولت، پالس روشنایی و فرکانس پالس منبع تغذیه انجام گرفته است تا تاثیر آن‌ها روی نرخ براده‌برداری و دقت تعیین شود. در واقع بهینه‌سازی و تعیین راه‌حل‌های دقیق، در این تحقیق انجام نگرفته است.

در این مقاله ابتدا با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها، مدل‌های ریاضی حاکم بر پارامترهای ورودی و متغیرهای پاسخ تعیین می‌شود. روش طراحی آزمایش‌های مورد استفاده، روش سطح پاسخ است. در این مرحله دو مدل ریاضی برای متغیرهای پاسخ بر اساس پارامترهای ورودی ماشین‌کاری ولتاژ، پیشروی ابزار، جریان الکتروولت و غلظت الکتروولت تعیین می‌شود. سپس بهینه‌سازی چند هدفه به کمک روش Derringer انجام می‌گیرد که در نتیجه نقطه‌ای بهینه همزمان تعیین می‌شود.

۲- جزئیات و شیوه اجرای آزمایش‌ها

۲-۱- دستگاه ماشینکاری الکتروشیمیایی و مواد

آزمایش‌ها توسط دستگاه ماشین‌کاری الکتروشیمیایی طراحی و ساخته شده، توسط نویسندگان مقاله اجرا شده است. تصویر این دستگاه، در شکل ۱ نمایش داده شده است. این دستگاه شامل، چهار واحد مجزا است که با یکپارچگی خاصی در تعامل می‌باشند. این چهار قسمت عبارتند از: واحد ماشین، واحد منبع تغذیه، واحد الکتروولت و واحد کنترل.

^۱ Passive Films

شده است که نیاز به تکرار آزمایش‌ها نمی‌باشد. هر فاکتور در پنج سطح، مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. فاکتورهای ورودی (متغیر مستقل) عبارت است از: ولتاژ ماشین‌کاری (x_1)، پیشروی ابزار (x_2)، جریان (فلو) الکترولیت (x_3)، غلظت الکترولیت (x_4) و متغیرهای پاسخ عبارت است از: نرخ براده‌برداری^۳، زبری سطح^۴. فاکتورهای ورودی و سطوح آن‌ها نیز، در جدول ۲ قرار داده شده است. به دلیل اینکه روش سطح پاسخ جهت بررسی آزمایش‌ها انتخاب شده است، روش طرح ترکیبی مرکزی^۵ مورد استفاده قرار گرفته شده است.

این طرح آزمایش شامل، 2^k آزمایش فاکتوریال، $2k$ آزمایش محوری و تعدادی آزمایش مرکزی جهت تخمین خطای آزمایش است. تعداد کل آزمایش‌های برابر جمع این آزمایش‌ها بوده، k تعداد فاکتور مورد بررسی خواهد بود. در این تحقیق تعداد فاکتورهای ورودی (طراحی) چهار است، تعداد کل آزمایش‌ها، برابر ۳۱ آزمایش است. جهت اندازه‌گیری متغیر پاسخ نرخ براده‌برداری، وزن هر قطعه‌کار قبل و بعد از ماشین‌کاری توسط ترازوی دقیقی با دقت 0.0001 گرم اندازه‌گیری شده که اختلاف جرم قبل و بعد از ماشین‌کاری به‌عنوان نرخ براده‌برداری در نظر گرفته شده است. زبری سطح نیز، به کمک دستگاه زبری سنج مدل SJ-210-MITUTOYO با دقت هزارم میکرون اندازه‌گیری شده که پارامترهای طول برش^۶ و سرعت اندازه‌گیری^۷ به ترتیب برابر، 0.8 میلی‌متر و 0.5 mm/s تنظیم شده است. شکل ۳ بیان‌گر قطعه‌کار قبل و بعد از چند آزمایش به‌صورت نمونه است؛ همچنین مقادیر مربوط به متغیرهای پاسخ برای ۳۱ آزمایش انجام شده، در جدول ۳ ارائه شده است.

۳- روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ، یکی از روش‌های قدرتمند در طراحی آزمایش‌ها است. این روش مجموعه تکنیک‌های ریاضی و

الکترولیت مورد استفاده محلول نیترات سدیم با غلظت‌های مختلف است. در بیشتر تحقیقات، از الکترولیت نیترات سدیم NaNO_3 و یا کلرید سدیم NaCl استفاده شده است [۱۳]. بطور کلی الکترولیت‌های مورد استفاده در ماشین‌کاری الکتروشیمیایی، به دو دسته فعال و غیر فعال تقسیم می‌شوند. الکترولیت‌های غیر فعال، دارای یون اکسیدکننده (مانند نیترات سدیم) می‌باشند. این الکترولیت‌ها به‌عنوان الکترولیت‌هایی شناخته می‌شوند که دقت ماشین‌کاری بهتری نسبت به الکترولیت‌های فعال (مانند کلرید سدیم) ایجاد می‌کنند. از آنجایی که عملکرد ماشین‌کاری به‌عبارت دیگر، تابع‌های هدف در این مقاله، نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح است و دقت ابعادی مورد بررسی نگرفته است، از محلول نیترات سدیم که دقت بهتری ایجاد می‌کند، استفاده شده است. جنس ابزار از مس است و قطر ابزار ۸ میلی‌متر بوده، نوک آن باید پولیش و سنگ‌زنی شود که هرگونه آثار تراشکاری برطرف شود و سطحی صاف و صیقلی ایجاد شود. جنس قطعه‌کار استیل ۳۲۱^۱ است. ترکیب شیمیایی عناصر این فلز برحسب درصد وزنی با توجه به آزمون کوانتومتری، در جدول ۱ ارائه شده است.

از گرد ۸ میلی‌متر این فلز به طول ۱۸ میلی‌متر برای هر قطعه‌کار جهت ساخت آن استفاده شده است؛ همچنین به‌منظور بر طرف شدن آثار ماشین‌کاری و برشکاری، انجام سنگ‌زنی و ایجاد سطحی صاف و صیقلی برای قطعه‌کار ضروری است. هر قطعه‌کار به کمک سه نظامی در محفظه کاری قرار گرفته، ارتباط به منبع تغذیه به کمک پیچ بوده است که جهت اجرای آن فیکسچری طراحی و ساخت شده است. شکل ۲ نشان‌دهنده این فیکسچر به‌همراه ابزار و قطعه‌کار در محفظه کاری است.

۲-۲- اجرای آزمایش‌ها و اندازه‌گیری

از نرم‌افزار مینیتب^۲ جهت انجام طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است. زمان کل هر آزمایش برای تمامی آزمایش‌ها، ۲ دقیقه در نظر گرفته شده است؛ همچنین تعداد هفت آزمایش مرکزی جهت تخمین خطای آزمایش انجام

³ Material Removal Rate (MRR)

⁴ Surface Roughness (Ra)

⁵ Central Composite Second-Order Rotatable Design (CCD)

⁶ Cut-Off Length

⁷ Measuring Speed

¹ Stainless Steel 321

² Minitab

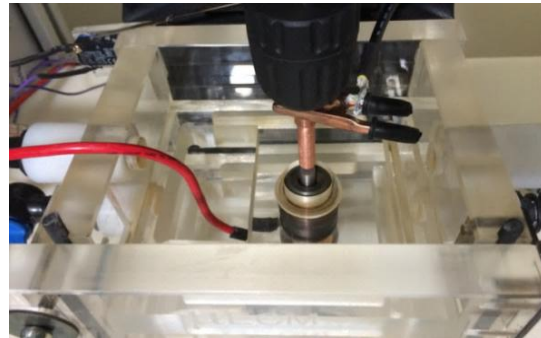
جدول ۲- پارامترهای فرآیند و سطوح آن‌ها

فاکتور	نماد	واحد	سطوح			
			۱	۲	۳	۴
ولتاژ	x_1	V	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
پیشروی	x_2	mm/min	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵
جریان الکترولیت	x_3	L/min	۵	۶	۷	۸
غلظت الکترولیت	x_4	g/L	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰

جدول ۳- ماتریس نهایی طراحی آزمایش و مقادیر متغیر پاسخ

شماره آزمایش	x_1	x_2	x_3	x_4	نرخ براده‌برداری (g/min)	زبری سطح (μm)
۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۰/۱۲۵۳	۰/۷۶
۲	۱	-۱	-۱	-۱	۰/۲۱۳۴	۱/۰۸
۳	-۱	۱	-۱	-۱	۰/۱۵۴۷	۰/۸۹
۴	۱	۱	-۱	-۱	۰/۳۳۶۱	۱/۱۳
۵	-۱	-۱	۱	-۱	۰/۱۲۴۶	۰/۸۴
۶	۱	-۱	۱	-۱	۰/۲۱۰۷	۱/۱۶
۷	-۱	۱	۱	-۱	۰/۱۵۶۹	۰/۹۶
۸	۱	۱	۱	-۱	۰/۲۵۲۵	۱/۳۱
۹	-۱	-۱	-۱	۱	۰/۱۶۷۳	۱/۲۹
۱۰	۱	-۱	-۱	۱	۰/۲۹۲۱	۱/۹۴
۱۱	-۱	۱	-۱	۱	۰/۱۹۷۵	۱/۶۳
۱۲	۱	-۱	۱	۱	۰/۳۲۱۸	۲/۲۱
۱۳	-۱	۱	-۱	-۱	۰/۱۷۷۹	۱/۴۷
۱۴	۱	۱	-۱	۱	۰/۲۹۷۹	۲/۱۵
۱۵	-۱	۱	۱	-۱	۰/۲۰۱۹	۱/۷۸
۱۶	۱	۱	۱	۱	۰/۳۲۲۵	۲/۴۹
۱۷	-۲	.	.	.	۰/۱۱۵۴	۱/۲۲
۱۸	۲	.	.	.	۰/۳۳۷۹	۲/۱۷
۱۹	.	-۲	.	.	۰/۱۹۸۹	۱/۱۲
۲۰	.	۲	.	.	۰/۲۷۵۵	۱/۵۱
۲۱	.	-۲	.	.	۰/۱۹۲۷	۱/۱۲
۲۲	.	۲	.	.	۰/۲۱۹۴	۱/۳۵
۲۳	.	.	۲	.	۰/۱۳۶۵	۰/۷۲
۲۴	.	.	.	۲	۰/۲۶۹۶	۲/۴۵
۲۵	.	.	.	.	۰/۲۳۵۱	۱
۲۶	.	.	.	.	۰/۲۲۹۱	۰/۹۸
۲۷	.	.	.	.	۰/۲۲۵۰	۱/۰۲
۲۸	.	.	.	.	۰/۲۲۳۸	۰/۹۶
۲۹	.	.	.	.	۰/۲۲۲۰	۱/۰۴
۳۰	.	.	.	.	۰/۲۲۷۵	۰/۹۵
۳۱	.	.	.	.	۰/۲۲۳۲	۱/۰۲

آماری پرکاربرد، جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار متغیر پاسخ است؛ همچنین به کمک این روش، مدل ریاضی حاکم بین متغیرهای ورودی و متغیر پاسخ را می‌توان تعیین کرد.



شکل ۲- محفظه ماشینکاری



شکل ۳- قطعه کار قبل و بعد از ماشینکاری

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی قطعه کار بر حسب درصد وزنی

P	S	Si	Mn	C	Fe
۰/۰۳۴	۰/۰۱۴	۰/۴۷۹	۱/۶۶	۰/۰۴۵	به حد میزان
Ti	Co	Mo	Cu	Ni	Cr
۰/۲۲۷	۰/۱۶۹	۰/۶۴	۰/۵۹	۸/۸۱	۱۸/۰۵

هنگامی که متغیرهای مستقل قابل اندازه‌گیری بوده، از خطا نیز صرف نظر شود رابطه (۱) را داریم [۱۵، ۱۴]:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (1)$$

که k تعداد متغیرهای مستقل (فاکتورها) است. جهت بدست آوردن رابطه بین متغیرهای مستقل و پاسخ‌ها بطور عمومی، از چند جمله‌ای درجه دو در روش سطح پاسخ جهت مدل‌سازی دقیق استفاده می‌شود:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

که β_0 مقدار ثابت، β_i و β_j و β_{ij} به ترتیب، ضریب خطی، درجه دو و اثر تعامل فاکتورها می‌باشند که به کمک تکنیک حداقل مربعات بدست خواهند آمد [۱۷، ۱۶].

۳-۱- مدل ریاضی نرخ براده‌برداری

همانطور که بیان شد، با استفاده از نرم‌افزار مینیتب، نتایج حاصل از تحلیل واریانس مربوط به نرخ براده‌برداری، در جدول ۴ ارائه گردیده است. با توجه به مقادیر تحلیل واریانس، مقدار p-value مربوط به مدل درجه دوم کسب شده، به‌طور کامل محسوس کمتر از ۰/۰۵ است که نشان دهنده کفایت مدل در بازه اطمینان ۹۵ درصد است؛

همچنین مقدار p-value مربوط به تست فقدان تناسب^۱، بیشتر از ۰/۰۵ مطلوب است. با توجه به تحلیل واریانس مربوط به نرخ براده‌برداری و نتایج مربوط به آزمون student's t-test جهت تعیین مقدار p-value برای هر یک از ترم‌های این مدل (جدول ۵)، ترم‌های موثر و غیر موثر تشخیص داده می‌شود. با بررسی مقادیر p-value برای ترم‌های مختلف، نتیجه‌گیری می‌شود که تمامی ترم‌های خطی، ترم‌های درجه

جدول ۴- جدول تحلیل واریانس مربوط به نرخ براده‌برداری

مقدار p	مقدار F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییرات
۰/۰۰۰	۲۱۹/۱۶	۰/۰۰۷۴۱۹	۰/۱۰۳۸۷۳	۱۴	رگرسیون
۰/۰۰۰	۷۴۲/۰۰	۰/۰۲۵۱۲۰	۰/۱۰۰۴۷۸	۴	خطی
۰/۰۰۰	۱۵/۸۵	۰/۰۰۰۵۳۷	۰/۰۰۲۱۴۸	۴	درجه دو
۰/۰۰۲	۶/۱۴	۰/۰۰۰۲۰۸	۰/۰۰۱۲۱۶	۶	اثر متقابل
		۰/۰۰۰۰۳۴	۰/۰۰۰۵۴۲	۱۶	مانده
۰/۱۹۵	۲/۰۶	۰/۰۰۰۰۴۲	۰/۰۰۰۴۱۹	۱۰	فقدان تناسب ^۱
		۰/۰۰۰۰۲۰	۰/۰۰۰۱۲۲	۶	خطا خالص
			۰/۱۰۴۴۱۴	۳۰	کل

R-Sq = 99.48%, R-Sq(adj) = 99.03

جدول ۵- نتایج آزمون student's t-test برای نرخ براده‌برداری

All Term	Coefficient	SE coefficient	T value	P-value
x ₁	۰/۰۵۳۶۲۱	۰/۰۰۱۱۸۸	۴۵/۱۴۸	۰/۰۰۰
x ₂	۰/۰۱۶۲۰۴	۰/۰۰۱۱۸۸	۱۳/۶۴۴	۰/۰۰۰
x ₃	۰/۰۰۳۷۹۶	۰/۰۰۱۱۸۸	۳/۱۹۶	۰/۰۰۶
x ₄	۰/۰۳۲۱۶۳	۰/۰۰۱۱۸۸	۲۷/۰۸۰	۰/۰۰۰
x ₁ * x ₁	-۰/۰۰۰۳۶۲	۰/۰۰۱۱۸۸	-۰/۳۳۳	۰/۷۴۳
x ₂ * x ₂	۰/۰۰۲۲۷۵	۰/۰۰۱۱۸۸	۲/۰۹۱	۰/۰۵۳
x ₃ * x ₃	-۰/۰۰۰۵۵۱۲	۰/۰۰۱۱۸۸	-۵/۰۶۶	۰/۰۰۰
x ₄ * x ₄	-۰/۰۰۰۶۲۶۲	۰/۰۰۱۱۸۸	-۵/۷۵۵	۰/۰۰۰
x ₁ * x ₂	۰/۰۰۰۲۴۴	۰/۰۰۱۴۵۵	۰/۱۶۸	۰/۸۶۹
x ₁ * x ₃	۰/۰۰۰۲۹۴	۰/۰۰۱۴۵۵	۰/۲۰۲	۰/۸۴۳
x ₁ * x ₄	۰/۰۰۰۸۷۱۹	۰/۰۰۱۴۵۵	۵/۹۹۴	۰/۰۰۰
x ₂ * x ₃	۰/۰۰۰۷۳۱	۰/۰۰۱۴۵۵	۰/۵۰۳	۰/۶۲۲
x ₂ * x ₄	-۰/۰۰۱۰۴۴	۰/۰۰۱۴۵۵	-۰/۷۱۸	۰/۴۸۳
x ₃ * x ₄	۰/۰۰۰۴۵۶	۰/۰۰۱۴۵۵	۰/۳۱۴	۰/۷۵۸

^۱ Lack-of-Fit

x_1, x_2, x_3, x_4 و x_3 و x_4 ، موثر و بقیه ترم‌ها غیر موثر می‌باشند. با حذف ترم‌های غیر موثر، مدل کاهش یافته با توجه به ترم‌های موثر برای زبری سطح به صورت زیر بدست می‌آید:

$$Ra = 8.61964 - 0.30371x_1 - 6.6753x_2 - 0.87792x_3 - 0.0234x_4 + 0.0069x_1^2 + 7.74256x_2^2 + 0.05743x_3^2 + 5.79702E - 05x_4^2 + 0.00338x_1x_3 + 0.00035x_1x_4 + 0.01013x_2x_4 + 0.00051x_3x_4 \quad (۴)$$

با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل واریانس، مقادیر R^2 و R^2_{adj} برای این مدل کاهش یافته به ترتیب برابر، ۹۹/۸۰ و ۹۹/۶۷ درصد است.

همچنین نمودار مربوط به بررسی مانده‌ها در شکل ۵، نشان‌دهنده کفایت و صحت مدل است.

۴- بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند

۴-۱- روش Derringer با رویکرد تابع مطلوبیت

در رویکرد تابع مطلوبیت، هدف تعیین مقادیر متغیرهای ورودی به گونه‌ای است که به ازای آن‌ها اولاً همگی پاسخ‌ها، مطلوبیت بیشتر از صفر داشته باشند و دوم اینکه، مطلوبیت کلی بیشینه باشد. سویچ و درینگر [۱۸]، شکل مناسبی از توابع مطلوبیت را معرفی می‌کنند که در این روش به هر متغیر، پاسخ امتیازی می‌دهد و پارامترهای ورودی را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که امتیاز کل را بیشینه نماید. برای تعریف رویکرد تابع مطلوبیت فرض می‌شود، هر کدام از n متغیر پاسخ به k متغیر مستقل (ورودی) از طریق رابطه (۵) وابسته باشند:

$$y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (۵)$$

که y_i i امین متغیر پاسخ، f رابطه بین این متغیر پاسخ و متغیرهای ورودی (در اینجا پارامترهای ماشین‌کاری الکتروشیمیایی) و ε خطا را نشان می‌دهند. در تابع مطلوبیت d_i ، مقداری بین ۰ و ۱ به هر متغیر پاسخ y_i نسبت داده می‌شود که ۱ نشان‌دهنده آنست که متغیر پاسخ در حد نهایت مطلوبیت (هدف) و ۰، نشان‌دهنده بدترین حالت مطلوبیت برای متغیر پاسخ است. مقدار d_i با بهبود پاسخ مربوطه افزایش می‌یابد. بسته به این که هدف بیشینه نمودن، کمینه نمودن و یا رسیدن به یک مقدار مشخص باشد، توابع

دوم متغیرهای ورودی x_2, x_3 و x_4 و تعامل بین متغیر x_1 و x_4 موثر می‌باشند و دیگر ترم‌ها غیر موثر می‌باشند. با حذف ترم‌های غیر موثر و اجرای دوباره تحلیل واریانس، مدل کاهش یافته بدست آمده برای نرخ براده‌برداری برحسب ترم‌های موثر به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$MRR = -0.35879 + 0.00549x_1 - 0.02305x_2 + 0.08043x_3 + 0.00069x_4 + 0.23137x_2^2 - 0.00547x_3^2 - 2.48952E - 06x_4^2 + 3.48750E - 05x_1x_4 \quad (۳)$$

مقادیر ضرایب همبستگی R^2 و R^2_{adj} برای مدل کاهش یافته نرخ براده‌برداری به ترتیب برابر، ۹۹/۴۵ و ۹۹/۲۵ درصد است.

تحلیل مانده^۱ نیز برای بررسی مدل بدست آمده، انجام گردیده است. شکل ۴ نشان دهنده توزیع احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها^۲ است. همانگونه که مشخص است، داده‌ها آزمایش تقریباً در راستای یک خط قرار گرفته است که نشان‌دهنده کفایت مدل است و مقادیر آزمایش‌ها و مقادیر تخمین‌زده شده برای متغیر، پاسخ همبستگی نزدیکی بهم دارند.

با توجه به بررسی‌های بالا، نشان داده می‌شود که مدل بدست آمده برای نرخ براده‌برداری، هیچگونه بی‌کفایتی را نشان نمی‌دهد.

۳-۲- مدل ریاضی زبری سطح

همانند قسمت قبل، نتایج تحلیل واریانس برای زبری سطح، در جدول ۵ ارائه شده است. مقدار p-value مربوط به مدل درجه دوم کسب شده، به‌طور کامل محسوس کمتر از ۰/۰۵ است که نشان‌دهنده کفایت مدل در بازه اطمینان ۹۵ درصد است؛ همچنین مقدار p-value مربوط به تست فقدان تناسب، بیشتر از ۰/۰۵ می‌باشد که مطلوب است.

برای تعیین ترم‌های موثر مدل زبری سطح نیز، آزمون student's t-test انجام شده است (نتایج در جدول ۷). با توجه به مقدار p-value برای ترم‌های مختلف، نتیجه‌گیری می‌شود که تمامی ترم‌های خطی و درجه دوم و تعامل بین ترم x_1 و

^۱ Residual

^۲ Normal Probability Plot of Residuals

مطلوبیت مختلفی را می‌توان تعریف کرد. برای حالتی که هدف بیشینه کردن باشد [۱۸]:

$$d_i = \begin{cases} 0 & \text{if } y_i < L_i \\ \left(\frac{U_i - y_i}{U_i - T_i}\right)^r & \text{if } L_i < y_i < T_i \\ 1 & \text{if } y_i > T_i \end{cases} \quad (۶)$$

در حالتی که هدف کمینه کردن باشد [۱۷]:

$$d_i = \begin{cases} 1 & \text{if } y_i < T_i \\ \left(\frac{y_i - U_i}{T_i - U_i}\right)^r & \text{if } T_i < y_i < U_i \\ 0 & \text{if } y_i > U_i \end{cases} \quad (۷)$$

جدول ۶- جدول تحلیل واریانس مربوط به نرخ براده‌برداری

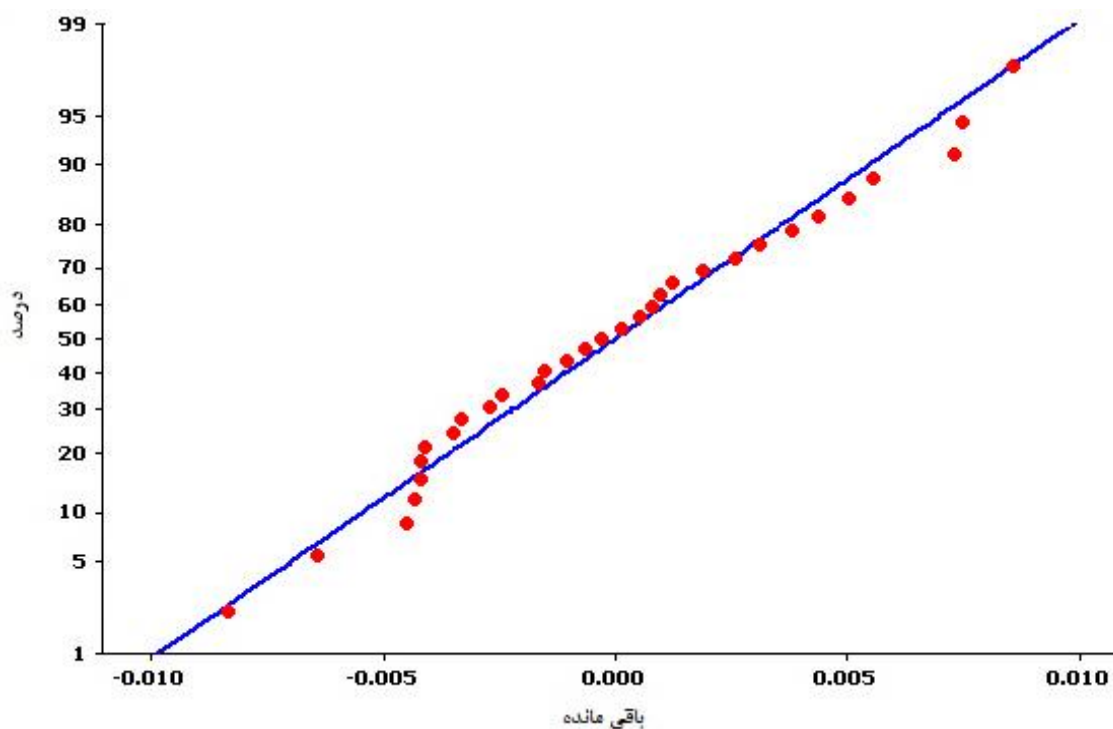
منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار p
رگرسیون	۱۴	۷/۷۲۸۳۱	۰/۵۵۲۷۴	۶۴۸/۰۷	۰/۰۰۰
خطی	۴	۶/۱۶۶۷۸	۱/۵۴۱۷۰	۱۸۰۷/۵۹	۰/۰۰۰
درجه دو	۴	۱/۳۹۳۱۴	۰/۳۴۸۲۸	۴۰۸/۳۵	۰/۰۰۰
اثر متقابل	۶	۰/۱۷۸۳۹	۰/۰۲۹۷۳	۳۴/۸۶	۰/۰۰۰
مانده	۱۶	۰/۰۱۳۶۵	۰/۰۰۰۸۵		
فقدان تناسب ^۱	۱۰	۰/۰۰۶۸۸	۰/۰۰۰۶۹	۰/۶۱	۰/۷۸۷
خطا خالص	۶	۰/۰۰۶۷۷	۰/۰۰۱۱۳		
کل	۳۰	۷/۷۵۱۹۵			

R-Sq = 99.82%, R-Sq(adj) = 99.67

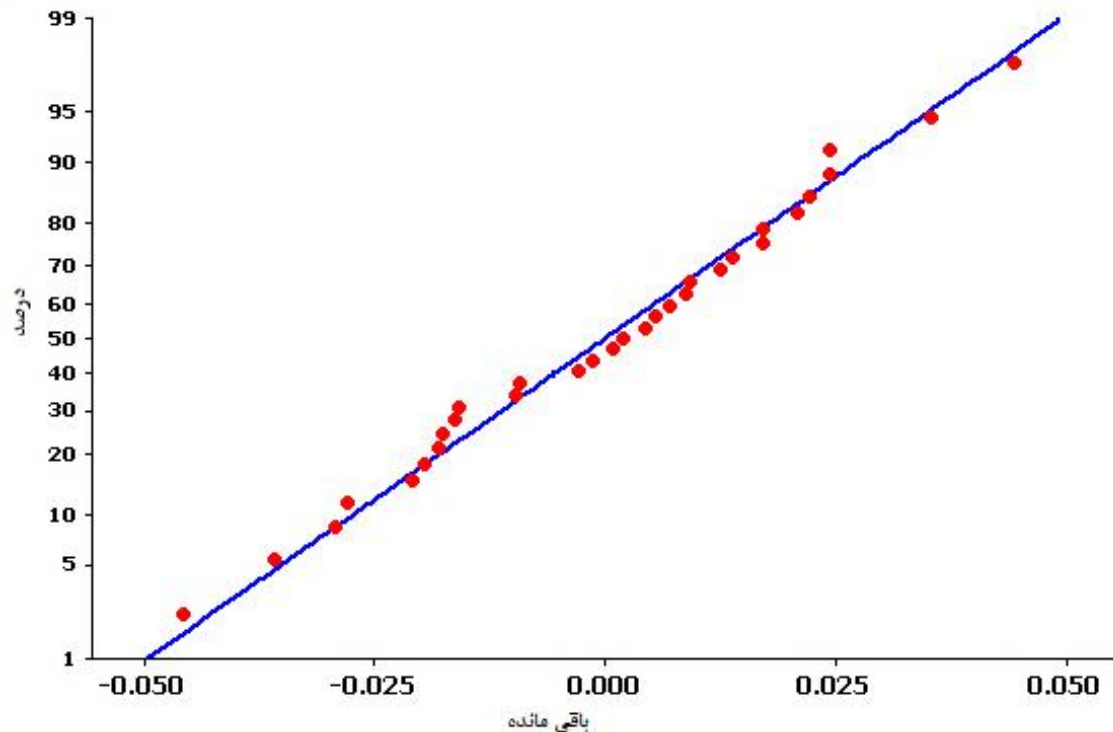
جدول ۷- نتایج آزمون student's t-test برای زبری سطح

All Term	Coefficient	SE coefficient	T value	P-value
x ₁	۰/۲۳۹۵۸۳	۰/۰۰۵۹۶۱	۴۰/۱۹۰	۰/۰۰۰
x ₂	۰/۱۰۳۷۵۰	۰/۰۰۵۹۶۱	۱۷/۴۰۴	۰/۰۰۰
x ₃	۰/۰۷۰۴۱۷	۰/۰۰۵۹۶۱	۱۱/۸۱۲	۰/۰۰۰
x ₄	۰/۴۲۸۷۵۰	۰/۰۰۵۹۶۱	۷۱/۹۲۲	۰/۰۰۰
x ₁ * x ₁	۰/۱۷۲۴۲۶	۰/۰۰۵۴۶۱	۳۱/۵۷۲	۰/۰۰۰
x ₂ * x ₂	۰/۰۷۷۴۲۶	۰/۰۰۵۴۶۱	۱۴/۱۷۷	۰/۰۰۰
x ₃ * x ₃	۰/۰۵۷۴۲۶	۰/۰۰۵۴۶۱	۱۰/۵۱۵	۰/۰۰۰
x ₄ * x ₄	۰/۱۴۴۹۲۶	۰/۰۰۵۴۶۱	۲۶/۵۳۷	۰/۰۰۰
x ₁ * x ₂	-۰/۰۰۵۶۲۵	۰/۰۰۷۳۰۱	-۰/۷۷۰	۰/۴۵۲
x ₁ * x ₃	۰/۰۱۶۸۷۵	۰/۰۰۷۳۰۱	۲/۳۱۱	۰/۰۳۴
x ₁ * x ₄	۰/۰۸۶۸۷۵	۰/۰۰۷۳۰۱	۱۱/۸۹۹	۰/۰۰۰
x ₂ * x ₃	۰/۰۰۸۱۲۵	۰/۰۰۷۳۰۱	۱/۱۱۳	۰/۲۸۲
x ₂ * x ₄	۰/۰۵۰۶۲۵	۰/۰۰۷۳۰۱	۶/۹۳۴	۰/۰۰۰
x ₃ * x ₄	۰/۰۲۵۶۲۵	۰/۰۰۷۳۰۱	۳/۵۱۰	۰/۰۰۳

¹ Lack-of-Fit



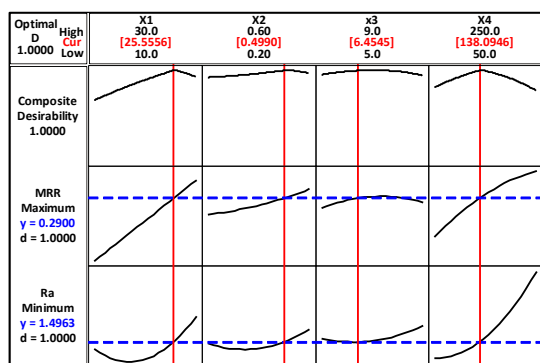
شکل ۴- نمودار توزیع احتمال نرمال باقی مانده‌ها برای نرخ برابره برداری



شکل ۵- نمودار توزیع احتمال نرمال باقی مانده‌ها برای زبری سطح

همچنین با افزایش پیشروی ابزار، فاصله دهانه ماشین‌کاری کاهش یافته، سبب افزایش جریان الکتریکی در دهانه ماشین‌کاری می‌شود که سبب افزایش نرخ براده‌برداری می‌شود. به‌علاوه برای دستیابی به شستشوی مناسب در دهانه ماشین‌کاری، حالت بهینه برای جریان الکترولیت در سطح میانی برای هر دو متغیر پاسخ نرخ براده‌برداری و زبری سطح رخ می‌دهد؛ در حالی‌که سطوح میانی ولتاژ، پیشروی ابزار و غلظت الکترولیت، سبب انحلال محلی بیشتر در سطح قطعه-کار شده و ارتفاع قله‌ها و دره‌ها را در سطح قطعه‌کار کاهش داده، سبب کاهش زبری سطح (Ra) خواهد شد. در شکل ۶ خط عمودی قرمز رنگ در هر سلول، نشان‌دهنده مقدار پارامتر ورودی بهینه و خط‌چین افقی آبی رنگ مقدار متغیر پاسخ بهینه را نشان می‌دهد. نتیجه می‌شود که شرایط بهینه همزمان در ولتاژ ۲۵/۵۶ V، پیشروی ابزار ۰/۵ mm/min و جریان الکترولیت ۶/۴۵ l/min و غلظت الکترولیت ۱۳۸/۱ g/l ایجاد می‌شود.

برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از بهینه‌سازی، برای شرایط بهینه بدست آمده، آزمایشی انجام شده است. درصد خطای نسبی بدست آمده در مقایسه بین مقادیر تخمین‌زده شده و واقعی متغیرهای پاسخ نرخ براده‌برداری و زبری سطح به ترتیب، ۶/۴ و ۶/۷ است که در جدول ۸ ارائه شده است.



شکل ۶- شرایط بهینه همزمان دو متغیر پاسخ

جدول ۸- نتایج آزمایش اعتبارسنجی برای شرایط بهینه

نرخ براده برداری		زبری سطح	
آزمایش شده	پیش‌بینی شده	آزمایش شده	پیش‌بینی شده
۰/۳۱	۰/۲۹	۱/۶۰۴	۱/۴۹۶
خطای نسبی (/.)	نرخ براده‌برداری	زبری سطح	
	۶/۴	۶/۷	

U_i و L_i به ترتیب حدود پایین و بالا و T_i مقدار پاسخ y_i می‌باشند که $L_i \leq T_i \leq U_i$ و ضریب r توسط کاربر تعیین می‌شوند و رفتار تابع مطلوبیت را تعیین می‌کنند. چنانچه $r=1$ باشد، آنگاه تابع مطلوبیت به صورت خطی افزایش می‌یابد. برای $r < 1$ تابع مطلوبیت محدب و برای $r > 1$ مقعر خواهد بود [۱۹]. پس از آنکه مقادیر مطلوبیت برای هر متغیر پاسخ محاسبه شد، آنها با محاسبه میانگین هندسی‌شان، به شکل تابع مطلوبیت واحد (نهایی) ترکیب می‌شوند که این تابع مطلوبیت نهایی، به صورت رابطه (۸) محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$D = (d_1 d_2 \dots d_n)^{1/n} = \left[\prod_{i=1}^n (d_i) \right]^{1/n} \quad (8)$$

که D تابع مطلوبیت نهایی^۱، d تابع مطلوبیت انفرادی^۲ هر متغیر پاسخ و n تعداد متغیر پاسخ می‌باشند [۲۰].

هدف از بهینه‌سازی در فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی، بیشینه نمودن نرخ براده‌برداری و کمینه نمودن زبری سطح است. به کمک روش Derringer، پارامترهای بهینه ماشین‌کاری برای بهینه‌سازی همزمان دو متغیر پاسخ تعیین می‌شود. نتیجه با استفاده از نرم افزار مینیتب بدست آمده است که در شکل ۶ نمایش داده شده است. در این شکل اولین ردیف بیانگر، پارامترهای ماشین‌کاری، بازه تغییرات آنها و مقدار بهینه پارامتر که بین حد بالا و پایین آن متغیر قرار گرفته است؛ همچنین ستون اول نشان‌دهنده، مقدار تابع هدف کلی، تابع هدف هر یک از متغیرهای پاسخ و مقدار بهینه متغیر پاسخ است. علاوه بر این، هر یک از سلول‌های داخل شکل، توصیف کننده نحوه تغییرات متغیر پاسخ با توجه به تغییر یک پارامتر است؛ در حالی‌که دیگر پارامترها ثابت باشند. این قسمت از شکل نشان می‌دهد که با افزایش ولتاژ، پیشروی ابزار و غلظت الکترولیت نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد. علت این افزایش این است که با افزایش ولتاژ و غلظت الکترولیت دانسیته جریان الکتریکی افزایش و به سبب آن نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد.

^۱ Overall (Composite) Desirability

^۲ Individual Desirability Function

پیشروی ابزار (mm/min)	x_2
جریان الکترولیت (l/min)	x_3
غلظت الکترولیت (g/l)	x_4
مقدار ثابت	β_0
ضریب خطی	β_i
ضریب درجه دو	β_j
ضریب اثر تعامل	β_{ij}
خطا	ε
ضریب انتخابی توسط کاربر	r
تعداد متغیر مستقل	k

۷- مراجع

- [1] Rumyantsev E, Davydov A (1989) Electrochemical machining of metals. MIR Publishers, Moscow.
- [2] Hinduja S, Kunieda M (2013) Modelling of ECM and EDM processes. CIRP Ann: Manuf Techn 62: 775-797.
- [3] VenkataRao R, Kalyankar VD (2014) Optimization of modern machining processes using advanced optimization techniques: a review. Int J Adv Manuf Technol 73: 1159-1188.
- [4] Neto JCS, Silva EM, Silva MB (2006) Intervening variables in electrochemical machining. J Mater Process Technol 179: 92-96.
- [5] Munda J, Malapati M, Bhattacharyya B (2007) Control of micro-spark and stray-current effect during EMM process. J Mater Process Technol 194: 151-158.
- [6] Senthilkumar C, Ganesan G, Karthikeyan R (2011) Parametric optimization of electrochemical machining of Al/15% SiCp composites using NSGA-II. Trans Nonferrous Met Soc China 21: 2293-2300.
- [7] Chiou YC, Lee RT, Chen TJ, Chiou JM (2012) Fabrication of high aspect ratio micro-rod using a novel electrochemical micro-machining method. Precision Eng 36: 193-202.
- [8] Bähre D, Weber O, Rebschläger A (2013) Investigation on pulse electrochemical machining characteristics of lamellar cast iron using a response surface methodology-based approach. Procedia CIRP 6: 362-367.
- [9] Klocke F, Zeis M, Klink A, Veselova D (2013) Experimental research on the electrochemical machining of modern titanium- and nickel-based alloys for aero engine components. Procedia CIRP 6: 368-374.
- [10] Samanta S, Chakraborty S (2011) Parametric optimization of some non-traditional machining

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به ارائه شیوه‌ای مناسب و مطمئن جهت بهینه‌سازی همزمان متغیرهای پاسخ نرخ براده‌برداری و زبری سطح جهت تعیین پارامترهای بهینه فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی به کمک روش Derringer پرداخته شده است. از آنجایی که تعیین پارامترها و شرایط مناسب این فرآیند از جمله گلوگاه‌ها اساسی است، نتایج اصلی در زیر ارائه گردیده است:

۱. روش پیشنهادی عملکرد مناسب و مطمئنی در تعیین پارامترهای بهینه به صورت چند هدفه دارد؛ بطوریکه خطای نسبی برای متغیرهای پاسخ نرخ براده‌برداری و زبری سطح به ترتیب، ۶/۴ و ۶/۷ درصد است که بیانگر صحت و عملکرد مناسب این روش است.
۲. افزایش ولتاژ، پیشروی ابزار و غلظت الکترولیت، سبب افزایش در نرخ براده‌برداری می‌شود؛ همچنین شستشوی مناسب الکترولیت در دهانه ماشین‌کاری که به کمک جریان الکترولیت صورت می‌گیرد، بیشترین نرخ براده‌برداری را ایجاد می‌کند که شرایط بهینه در سطوح میانی این پارامتر قرار دارد.
۳. پایین‌تر از سطوح میانی برای ولتاژ، پیشروی ابزار و غلظت الکترولیت، سبب کاهش زبری سطح می‌شود. همچنین شستشوی مناسب که به کمک تنظیم جریان الکترولیت، سبب بهبود کیفیت سطح می‌شود.

۶- علائم، نشانه‌ها و ارقام

مطلوبیت انفرادی	d_i
مطلوبیت نهایی	D
حد پایین	L_i
نرخ براده‌برداری (g/min)	MRR
زبری سطح (μm)	Ra
مقدار متغیر پاسخ	T_i
حد بالا	U_i
متغیر مستقل (پارامترهای ورودی)	x_i
ولتاژ (V)	x_1

- Aluminum Matrix Composite (A413-B4C): A Response Surface Approach. *Mater Manuf Processes* 28(12): 1340-1347.
- [16] Montgomery DC (2009) Design and analysis of experiments. John Wiley, New York.
- [17] MyersRH, Montgomery DC (1995) Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. Wiley, New York.
- [18] Derringer G, Suich R (1980) Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *J Quality Tech* 12(4): 214-219.
- [19] Castillo ED, Montgomery DC, Mc Carville DR (1996) Modified desirability functions for multiple response optimization. *J Quality Tech* 28(3): 337-345.
- [20] AssarzadehS, Ghoreishi M (2013) A dual response surface-desirability approach to process modeling and optimization of Al₂O₃ powder-mixed electrical discharge machining (PMEDM) parameters. *Int J Adv Manuf Technol* 64: 1459-1477.
- processes using artificial bee colony algorithm. *Eng Appl Artif Intell* 24: 946-957.
- [11] Landolt D, Chauvy PF, Zinger O (2003) Electrochemical micromachining, polishing and surface structuring of metals: fundamental aspects and new developments. *Electrochimica Acta* 48: 3185-3201.
- [12] Bhattacharyya B, Munda J (2003) Experimental investigation on the influence of electrochemical machining parameters on machining rate and accuracy in micromachining domain. *Int J Adv Manuf Technol* 43: 1301-1310.
- [13] Yusup N, Zain AM and Hashim SZM. Evolutionary techniques in optimizing machining parameters: Review and recent applications (2007-2011). *Expert Syst Appl* 2012; 39: 9909-9927.
- [14] Moradi M, Ghoreishi M, Frostevarg J, Kaplan AFH (2013) An investigation on stability of laser hybrid arc welding. *Optics and Lasers in Eng* 5: 481-487.
- [15] Sivaprakasam P, Hariharan P, Gowri S (2013) Optimization of Micro-WEDM Process of