

مدلسازی فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی سوپر آلیاژ تک کریستال پایه نیکل با ترکیب روش عددی و طراحی آزمایش‌ها

علی مهرور^{۱*}، محسن معتمدی^۱ و علیرضا میرک^۲

^۱ استادیار، مهندسی مکانیک، مرکز آموزش عالی شهرضا، شهرضا

^۲ استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۲

چکیده

به سبب پدیده‌های فیزیکی، شیمیایی و هیدرودینامیکی پیچیده‌ای که در حین فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی رخ می‌دهد، مدلسازی و بطور کلی تدوین تکنولوژی براده‌برداری و کسب دانش فنی بسیار دشوار است. از این رو ارائه روشی با قابلیت تکرار پذیری بالا و مناسب از نقطه نظر زمان و هزینه جهت مدلسازی فرآیند از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این مقاله سه پارامتر ولتاژ، پیشروی ابزار و غلظت الکترولیت بعنوان متغیر طراحی و اضافه ماشینکاری و نرخ براده‌برداری به‌عنوان متغیر پاسخ و جنس قطعه‌کار سوپر آلیاژ تک کریستال پایه نیکل در نظر گرفته شده است. ۱۵ آزمایش هدفمند با استفاده از طراحی باکس-بنکن جهت پیاده‌سازی روش سطح پاسخ انتخاب شده است. سپس شبیه‌سازی با توجه به طرح آزمایش در نرم‌افزار کامسول اجرا شده است. در نتیجه دو مدل ریاضی درجه دوم بدست آمده است که رابطه بین دو متغیر پاسخ با پارامترهای ورودی را نشان می‌دهد. کفایت و صحت این دو مدل ریاضی به کمک تحلیل واریانس، ضریب همبستگی و نمودارهای مربوطه مورد بررسی و آنالیز قرار گرفته است. از این رو ترکیب شبیه‌سازی عددی و طراحی آزمایش‌ها به منظور مدلسازی و بررسی تاثیر پارامترهای ورودی ماشینکاری الکتروشیمیایی سوپر آلیاژ تک کریستال پایه نیکل روی متغیرهای پاسخ به نحو مطلوبی اجرا شده است.

کلمات کلیدی: ماشینکاری الکتروشیمیایی؛ سوپر آلیاژ تک کریستال پایه نیکل؛ المان محدود؛ طراحی آزمایش‌ها.

Modeling of Electrochemical Machining of Nickel-Based Single Crystal Super Alloy by Combining Numerical and Design of Experiments Methods

A. Mehrvar^{1,*}, M. Motamedi¹, A. Mirak²

¹ Assist. Prof., Mech. Eng., Univ. of Shahreza, Shahreza, Iran.

² Assist. Prof., Mater. Eng., Malek e Ashtar Univ. of Tech., Tehran, Iran.

Abstract

Due to the complex physical, chemical, and hydrodynamic phenomena that occur during the electrochemical machining process, it is difficult to model the process parameters. Therefore, a highly repeatable and appropriate method in terms of time and cost is important for modeling. In this paper, the simulation of the process is firstly performed by the numerical method and the Comsol software. The voltage, tool feed rate and electrolyte concentration are considered as input parameters and machining overcut and the material removal rate are considered as the response variables. Nickel-based single crystal superalloy workpiece is selected. 15 experiments were selected using the Box-Behnken design method to implement the response surface methodology. Then, the simulation was performed according to the experimental design in the Comsol software. As a result, two quadratic mathematical models showing the relationship between two response variables with the input parameters are obtained. The adequacy and accuracy of these two mathematical models have been examined by the analysis of variance, correlation coefficient, and related graphs. Therefore, the combination of numerical simulation and design of experiments for modeling and investigating the effect of input parameters of electrochemical machining of the nickel-based single-crystal superalloy has been implemented in a favorable manner.

Keywords: Electrochemical Machining; Nickel-based Single Crystal Super Alloys; FEM; DOE.

۱- مقدمه

فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی، یکی از روش‌های اقتصادی و پر بازده در ماشینکاری غیرسنتی است. این ماشینکاری یک فرآیند انحلال آندی است که از رابطه فارادی تبعیت می‌کند. در این فرآیند هیچگونه تماسی بین کاتد و آند وجود ندارد و در نتیجه هیچگونه تنش‌ی در سطح قطعه بوجود نمی‌آید. میزان سختی و چقرمگی قطعه‌کار تأثیری بر براده‌برداری ندارد و ابزار در این فرآیند دچار سایش نمی‌شود [۱]. این فرآیند در پرداختکاری، تولید اشکال پیچیده، سوراخکاری و برطرف کردن ترکهای شکست در قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نتیجه ماشینکاری الکتروشیمیایی در صنایع هوایی، صنایع نظامی، پزشکی، خودرو، الکترونیک، انرژی (پالایشگاه‌ها و نیروگاه‌ها)، لوازم خانگی، قطعات میکرو، نساجی، اپتیک، چاپ و ... کاربردهای زیادی دارد.

از آنجایی که در فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی پدیده‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و هیدرودینامیکی رخ می‌دهد و عوامل و پارامترهای متعددی در بکارگیری فرآیند دخیل است، مدل‌سازی و تدوین تکنولوژی براده‌برداری از گلوگاه‌های اساسی در بکارگیری این روش است [۲-۳]. از طرف دیگر دسترسی و تهیه برخی از مواد دشوار و پرهزینه است. جنس مورد بررسی در این مقاله، سوپر آلیاژ تک کریستال پایه نیکل است. سوپر آلیاژ CMSX-4، نسل دوم سوپرآلیاژهای پایه نیکل است که در ساخت انواع پره‌های توربین گازی هوایی و زمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجایی که مرز دانه‌ها اصولاً از نقاط ضعف آلیاژ در دماهای کاری بالا محسوب می‌شوند، بنابراین ساختارهای پلی-کریستال به دلیل حضور مرزدانه، از خواص مکانیکی دما بالای قابل توجهی برخوردار نیستند. از طرف دیگر، این سوپرآلیاژ تک کریستال که نمونه توسعه یافته CMSX-2 است، دارای بازه‌ی خواص مطلوب شامل، استحکام خزشی و خستگی مکانیکی و حرارتی بالا، پایداری فازی خوب، همراه با مقاومت زیاد در برابر خوردگی و اکسیداسیون داغ برای کاربردهای پره‌های توربین گازی است [۴].

بتاچریا و همکارش [۵] به منظور درک بهتر از فرآیند میکروماشینکاری الکتروشیمیایی برای دستیابی به نرخ براده‌برداری بالاتر تلاش‌های ارزنده‌ای انجام داده‌اند. یکسری از آزمایش‌هایی روی صفحه مسی با توجه به پارامترهای اساسی

فرآیند از جمله، ولتاژ ماشینکاری، غلظت الکترولیت، پالس روشنایی و فرکانس پالس منبع تغذیه انجام گرفته تا تأثیر آنها روی نرخ براده‌برداری و دقت تعیین گردد.

نتو و همکاران [۶]، به بررسی تداخل متغیرها و پارامترها در فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی پرداخته‌اند. نرخ براده‌برداری، کیفیت سطح و اضافه ماشینکاری مورد مطالعه قرار گرفته است. جنس قطعه‌کار فولاد و چهار پارامتر پیشروی، جنس الکترولیت، جریان الکترولیت و ولتاژ در طول انجام انجام آزمایش‌ها جهت مدل‌سازی انتخاب شده است. دو نوع الکترولیت، یکی از جنس کلرید سدیم و دیگری نترات سدیم مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داد که پیشروی بیشترین تأثیر بر نرخ براده‌برداری داشته و استفاده از الکترولیت از جنس نترات سدیم، سبب ایجاد سطح مطلوب‌تر و اضافه ماشینکاری کمتر می‌شود.

موندا و همکاران [۷]، به کنترل و بررسی میکرو جرقه‌ها و جریان‌های سرگردان در میکرو ماشینکاری الکتروشیمیایی پرداخته‌اند. به کمک روش سطح پاسخ مدل‌سازی پارامترهای ماشینکاری و دو فاکتور ذکر شده روی صفحه مسی ارائه گردیده است. پارامترهای ماشینکاری مورد مطالعه در این تحقیق عبارت است از: نسبت پالس روشن به خاموش، فرکانس پالس ولتاژ و فرکانس ارتعاش ابزار بوده که تأثیر آنها روی میکرو جرقه‌ها و جریان‌های سرگردان بررسی شده است. با بررسی مدل بدست آمده از روش سطح پاسخ و صحنه‌گذاری بر آن با توجه به آنالیز واریانس نتیجه گردید که نسبت پالس روشن به خاموش، ولتاژ ماشینکاری و غلظت الکترولیت در سطح بالا سبب کاهش خطر ایجاد میکرو جرقه می‌شود. مقدار متوسط برای پارامترهای فرکانس پالس ولتاژ و فرکانس ارتعاش ابزار نیز، بر کمتر شدن میکرو جرقه‌ها و جریان‌های سرگردان گردیده است.

سنتیکومار و همکاران [۸]، به بررسی تأثیر 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 کامپوزیت Al/SiCp پرداخته‌اند؛ همچنین از روش سطح پاسخ جهت مدل‌سازی پارامترهای فرآیند استفاده شده است. بعد از طراحی آزمایش‌ها به کمک نرم‌افزار مینیتب، مدل ریاضی مربوط به

با توجه به موارد مطرح شده در قسمت‌های قبل، خاصیت ذاتی فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی به گونه‌ای است که عوامل متعددی در حین اجرای این فرآیند رخ می‌دهد. علاوه بر این هر ماده بدلیل داشتن ظرفیت یونی و عدد اتمی متفاوت، نرخ‌برداره برداری متفاوتی دارد. از این رو تدوین تکنولوژی براده‌برداری و مدلسازی این فرآیند جهت دسترسی به عملکرد مناسب از اهمیت بسزایی برخوردار است. از طرف دیگر، انجام آزمایش‌ها در بسیاری از موارد هزینه‌بر است و در برخی از موارد دسترسی به مواد به میزان کافی امکان‌پذیر نبوده یا هزینه بسیار دارد. بدین صورت ارائه روشی که از ترکیب روش عددی جهت شبیه‌سازی فرآیند (به منظور حذف اجرای آزمایش) با روش طراحی آزمایش‌ها، می‌تواند جایگزین مناسب برای مدلسازی و تحلیل رفتار پارامترهای ورودی و توابع هدف باشد. از این رو در این مقاله به بررسی این روش پیشنهادی برای مدلسازی فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی سوپر آلیاژ تک کریستال پایه نیکل پرداخته شده است.

۲- طراحی آزمایش‌ها

در طراحی آزمایش‌ها به طور آگاهانه در متغیرهای ورودی فرآیند، تغییراتی ایجاد می‌شود تا از این طریق میزان تغییرات حاصل در پاسخ خروجی فرآیند مشاهده و شناسایی شود [۱۲]. فرآیند را می‌توان ترکیبی از عوامل و پارامترها در ماشینکاری الکتروشیمیایی تصور کرد که محصول خروجی با افزایش عملکرد ماشینکاری تبدیل می‌کنند. این محصول خروجی دارای یک یا چند مشخصه کیفی یا پاسخ‌های قابل مشاهده است (نرخ براده‌برداری، دقت، کیفیت سطح). متغیرهای پاسخ در این تحقیق، نرخ‌براده‌برداری و اضافه ماشینکاری (دقت) و پارامترهای ورودی ولتاژ، پیشروی و غلظت الکترولیت (قابلیت هدایت الکتریکی الکترولیت) در نظر گرفته شده است. روش طراحی آزمایش‌ها در این تحقیق، روش سطح پاسخ است و از نرم‌افزار مینیتب برای اجرای آن استفاده شده است.

۲-۱- طرح آزمایش

از نرم‌افزار مینیتب و طرح آزمایش باکس-بنکن جهت انجام بررسی‌ها و آنالیزها استفاده شده است. هر فاکتور (پارامتر

پاسخ نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح بدست آمده است. به کمک تحلیل واریانس کفایت و صحت مدل، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در انتها گراف‌های کانتوری رسم شده است که نشان‌دهنده نحوه تاثیر فاکتورها روی پاسخ‌ها است. گراف‌ها مربوط به تاثیر پارامترها روی نرخ براده‌برداری نشان می‌دهد که با افزایش پارامترها، نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد؛ همچنین با توجه به گراف‌های مربوط به کیفیت سطح، در سطح بالای تمامی فاکتورها بجز ولتاژ، کیفیت سطح مناسبتر می‌شود. در این مقاله با توجه به بیشینه کردن نرخ براده‌برداری و کمینه کردن زبری سطح مقادیر فاکتورهای ولتاژ، غلظت الکترولیت، نرخ پیشروی ابزار و جریان الکترولیت ارائه شده است.

یونگ و همکاران [۹]. 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 روی صفحه نیکل 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 نهایت به کمک اطلاعات حاصل شده در آزمایش‌های اولیه، میکرو ساختارهایی با دقت ابعادی و کیفیت سطح مناسب براده‌برداری شده است. با توجه به نتایج این تحقیق جهت دستیابی به دقت ابعادی و کیفیت سطح مناسب در این روش باید ولتاژ ماشینکاری و پالس روشنایی را کاهش داد؛ همچنین هرچه قطر ابزار کوچک‌تر باشد و انتهای آن بصورت انحنادار (قوسی شکل) باشد، مناسبتر است. در این مقاله نیز به بررسی کیفی فرآیند پرداخته شده و مدلسازی صورت پذیرفته است.

مدلسازی پارامترهای ماشینکاری الکتروشیمیایی و توابع هدف نرخ براده‌برداری و زبری سطح به کمک روش سطح پاسخ برای استیل ضدزنگ ۳۲۱ توسط مهرور و همکاران ارائه شده است [۱۰]؛ همچنین به کمک روش تابع مطلوبیت در سه محدوده برای زبری سطح بیشترین نرخ براده‌برداری تعیین شده است. در تحقیقی دیگر آنها به مدلسازی به کمک روش طراحی آزمایش‌ها، انجام آزمایش‌ها و نهایتاً بهینه‌سازی چند هدفه و تعیین نمودار پارتو بهینه به کمک روش تفاضل تکاملی پرداخته‌اند [۱۱].

روابط اساسی و اصلی حاکم در این فرآیند قانون فارادی، معادله لاپلاس و قانون اهم است. قانون فارادی بصورت رابطه (۳) بیان می‌شود [۱۳]:

$$m = \frac{AIt}{zF} \quad (3)$$

در رابطه بالا m ماده حل شده است که با جریان عبوری I در مدت زمان t براده‌برداری می‌شود. A وزن اتمی و z ظرفیت ماده است. A/z را اکی‌والان شیمیایی نامند و F ثابت فارادی و مقدار آن برابر ۹۶۵۰۰ کولومب است.

معادلات اساسی دیگر در فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی معادله لاپلاس است که با رابطه (۴) بیان می‌شود [۱۳]:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (4)$$

معادله بالا برای دهانه ماشینکاری در فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی برقرار است. با حل این معادله، پتانسیل (ϕ) در هر نود (نقطه) در الکترولیت (دهانه ماشینکاری) به ویژه در سطح قطعه‌کار به کمک روش عددی (المان محدود) بدست می‌آید.

هنگامی که پتانسیل در دهانه ماشینکاری برقرار می‌شود، جریانی ایجاد شده و ماشینکاری صورت می‌گیرد. جریان ایجاد شده را می‌توان به کمک قانون اهم در این فرآیند توصیف کرد [۱۳]:

$$i = -k\nabla\phi \quad (5)$$

در رابطه بالا i دانسیته جریان و k قابلیت هدایت الکتریکی الکترولیت است.

۳-۲- مدل‌سازی دو بعدی متقارن فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی

در این قسمت هدف ایجاد مدل، شرایط و شبیه‌سازی ماشینکاری الکتروشیمیایی در نرم‌افزار کامسول است. برای ساده‌سازی مدل و پایین آوردن زمان حل در نرم‌افزار، ابزار متقارن در نظر گرفته، از یک مدل دو بعدی متقارن برای شبیه‌سازی فرآیند استفاده شده است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مشخصات هندسه ابزار و قطعه‌کار و همچنین ابعاد هندسی آن در جدول ۲ آورده شده است.

ورودی) در ۳ سطح ارزیابی شده است. پارامترهای ورودی عبارت است از: ولتاژ ماشینکاری (V)، پیشروی ابزار (F) و هدایت الکتریکی الکترولیت (C) و متغیرهای پاسخ عبارت است از نرخ براده‌برداری (MRR) و اضافه ماشینکاری (e). فاکتورهای ورودی و سطوح آنها نیز در جدول ۱ قرار داده شده است. تعداد اجزای شبیه‌سازی در نرم افزار کامسول با توجه به تعداد متغیرهای مستقل (پارامترهای ورودی) که ۳ است، برابر ۱۵ اجرا است.

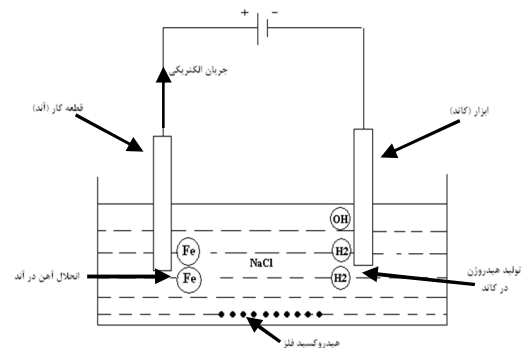
جدول ۱- پارامترهای ورودی و سطوح آنها

پارامترهای ورودی	سطوح		
	۱	۰	-۱
ولتاژ (V) ولت	۲۵	۲۰	۱۵
پیشروی ابزار (F) میلی‌متر بر دقیقه	۱	۰/۶	۰/۲
هدایت الکتریکی الکترولیت (C) زیمنس بر متر	۱۲	۱۰	۸

۳-۳- شبیه‌سازی فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی

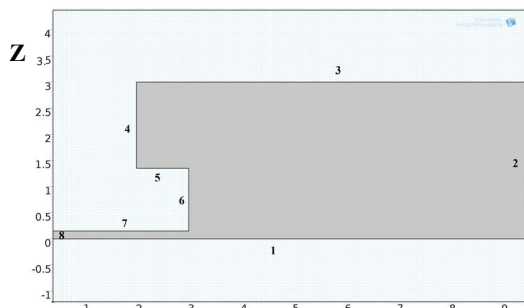
۳-۱- معادلات و روابط حاکم بر فرآیند

ماشینکاری الکتروشیمیایی یک فرآیند انحلال شیمیایی است که قطعه‌کار (آند) و ابزار (کاتد) داخل یک سلول الکترولیت قرار می‌گیرند و ولتاژ کمی بین الکترودها برقرار می‌گردد و ابزار با پیشروی معین به سمت قطعه‌کار حرکت می‌کند تا ماشینکاری صورت گیرد که نحوه براده‌برداری در شکل ۱ نشان داده شده است.

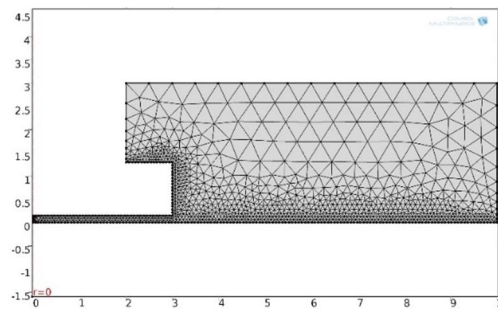


شکل ۱- ماشینکاری الکتروشیمیایی

همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، متغیر پاسخ نرخ براده‌برداری برابر با حداکثر جابجایی قطعه‌کار در راستای محور Z بعد از یک دقیقه است. انتظار می‌رود، سوراخ ایجاد شده قطر ۶ میلی‌متر داشته باشد و هر آنچه از این مقدار بیشتر براده‌برداری شده، بعنوان اضافه ماشینکاری (دقت) در نظر گرفته می‌شود. تصاویر در شکل ۶ نشان دهنده، شبیه‌سازی عددی برای اجزای ۲، ۷ و ۱۴ (به صورت تصادفی) است. اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی با آزمایش عملی در مقاله‌ای دیگر توسط نویسندگان بررسی شده است [۱۴].



شکل ۳- شرایط مرزی مورد استفاده برای مدل‌سازی



شکل ۴- شبکه مش‌بندی برای مدل‌سازی فرآیند

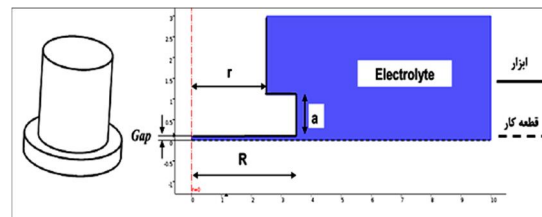
۴- تحلیل واریانس و ارائه نتایج

جدول ۴ مقادیر مربوط به متغیرهای پاسخ برای ۱۵ اجرای شبیه‌سازی عددی انجام شده ارائه شده است.

۴-۱- مدل ریاضی بدست آمده برای نرخ براده‌برداری به کمک روش سطح پاسخ

نتایج تحلیل واریانس مربوط به نرخ براده‌برداری در جدول ۵ ارائه و مدل ریاضی درجه دوم بر حسب پارامترهای ورودی کد نشده برای متغیر پاسخ نرخ براده‌برداری بصورت زیر است:

برای ۱۵ طرح آزمایش پیشنهادی، شبیه‌سازی انجام شده و مرز حرکت قطعه‌کار بدست آمده است. برای تعریف پیشروی ابزار به سمت قطعه‌کار برای مرز ۷، میزان پیشروی ابزار انتخاب شده است؛ همچنین برای ایجاد قیدهای هندسی، برای مرزهای ۲، ۴، ۶ و ۸ محدودیت جابجایی در راستای محور Z اعمال شده است (شکل ۳). در ورودی و خروجی الکتروولت گرادیان پتانسیل صفر، در مرز ابزار پتانسیل صفر و در مرز قطعه‌کار پتانسیل برابر ولتاژ ماشینکاری است، در نتیجه شرایط مرزی برای مدل‌سازی در جدول ۳ ارائه شده است. برای ایجاد مش با توجه به شکل ۴ از المان مثلثی استفاده شده است.



شکل ۲- هندسه دهانه ماشینکاری مورد استفاده برای آنالیز دو بعدی متقارن فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی

جدول ۲- هندسه مورد استفاده در مدل‌سازی

اندازه (mm)	پارامتر
۲	r
۳	R
۱/۷	A
۰/۱۵	Gap

جدول ۳- شرایط مرزی برای مدل‌سازی

اندازه (mm)	شرایط در نظر گرفته شده
۱	مرز قطعه‌کار (ولتاژ ۲۵ ولت)
۸ و ۲	گرادیان پتانسیل صفر است
۳-۷	مرز ابزار (پتانسیل صفر ولت)

جدول ۴- مقادیر متغیرهای پاسخ

شماره اجراها	پارامترهای ورودی			متغیرهای پاسخ	
	V	F	C	MRR (mm/min)	E (mm)
۱	۲۲/۵	۰/۶	۱۰	۱/۵۰	۰/۸۹
۲	۳۰/۰	۰/۲	۱۰	۱/۸۳	۰/۸۶
۳	۲۲/۵	۰/۲	۱۲	۱/۷۲	۰/۸۲
۴	۱۵/۰	۰/۶	۸	۱/۰۲	۰/۶۶
۵	۱۵/۰	۱/۰	۱۰	۱/۱۴	۰/۹۸
۶	۲۲/۵	۰/۲	۸	۱/۳۰	۰/۶۳
۷	۲۲/۵	۱/۰	۱۲	۱/۶۳	۱/۱۸
۸	۳۰/۰	۰/۶	۱۲	۲/۰۰	۱/۱۲
۹	۲۲/۵	۰/۶	۱۰	۱/۵۰	۰/۸۹
۱۰	۲۲/۵	۱/۰	۸	۱/۲۹	۱/۰۲
۱۱	۲۲/۵	۰/۶	۱۰	۱/۵۰	۰/۸۹
۱۲	۳۰/۰	۱/۰	۱۰	۱/۷۳	۱/۲۳
۱۳	۱۵/۰	۰/۶	۱۲	۱/۳۲	۰/۸۰
۱۴	۳۰/۰	۰/۶	۸	۱/۶۰	۰/۹۲
۱۵	۱۵/۰	۰/۲	۱۰	۱/۱۷	۰/۵۷

جدول ۵- نتایج تحلیل واریانس برای نرخ براده‌برداری

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۹	۰/۵۱۴۱۶۸	۰/۰۵۷۱۳۰	۸۷۸/۹۲	۰/۰۰۰
Linear	۳	۰/۵۰۸۹۲۵	۰/۱۶۹۶۴۲	۲۶۰۹/۸۷	۰/۰۰۰
V	۱	۰/۱۵۶۸۰۰	۰/۱۵۶۸۰۰	۲۴۱۲/۳۱	۰/۰۰۰
F	۱	۰/۲۹۲۶۱۳	۰/۲۹۲۶۱۳	۴۵۰۱/۷۳	۰/۰۰۰
C	۱	۰/۰۵۹۵۱۳	۰/۰۵۹۵۱۳	۹۱۵/۵۸	۰/۰۰۰
Square	۳	۰/۰۰۳۷۱۸	۰/۰۰۱۲۳۹	۱۹/۰۷	۰/۰۰۴
V*V	۱	۰/۰۰۰۲۸۳	۰/۰۰۰۲۸۳	۴/۳۵	۰/۰۹۱
F*F	۱	۰/۰۰۳۰۵۲	۰/۰۰۳۰۵۲	۴۶/۹۵	۰/۰۰۱
C*C	۱	۰/۰۰۰۱۴۴	۰/۰۰۰۱۴۴	۲/۲۲	۰/۱۹۷
2-Way Interaction	۳	۰/۰۰۱۵۲۵	۰/۰۰۰۵۰۸	۷/۸۲	۰/۰۲۵
V*F	۱	۰/۰۰۰۴۰۰	۰/۰۰۰۴۰۰	۶/۱۵	۰/۰۵۶
V*C	۱	۰/۰۰۰۹۰۰	۰/۰۰۰۹۰۰	۱۳/۸۵	۰/۰۱۴
F*C	۱	۰/۰۰۰۲۲۵	۰/۰۰۰۲۲۵	۳/۴۶	۰/۱۲۲
Error	۵	۰/۰۰۰۳۲۵	۰/۰۰۰۰۶۵		
Lack-of-Fit	۳	۰/۰۰۰۳۲۵	۰/۰۰۰۱۰۸	*	*
Pure Error	۲	۰/۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰		
Total	۱۴	۰/۵۱۴۴۹۳			

$R-Sq = 99.94\%$, $R-Sq(adj) = 99.82\%$

با توجه به مقادیر تحلیل واریانس، مقدار احتمال مربوط به مدل درجه دوم، بطور کاملاً محسوس کمتر از ۰/۰۵ است که نشان دهنده کفایت مدل در بازه اطمینان ۹۵ درصد است. علاوه بر این مقادیر ضرایب همبستگی R^2 و R^2_{adj} برای مدل MRR به ترتیب برابر، ۹۹/۹۴ و ۹۹/۸۲ درصد است.

شکل ۷ نشان دهنده نمودار نرمال است. همانگونه که مشخص است، تقریباً در راستای یک خط داده‌ها آزمایش قرار گرفته است و مقادیر آزمایش‌ها و مقادیر تخمین زده شده برای متغیر پاسخ همبستگی نزدیکی بهم دارند؛ همچنین نمودارهای بعدی در شکل ۸ باقی مانده‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهد. این نمودارها از الگویی پیروی نمی‌کنند. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، نشان داده می‌شود که مدل نرخ براده برداری هیچگونه بی‌کفایتی نشان نمی‌دهد.

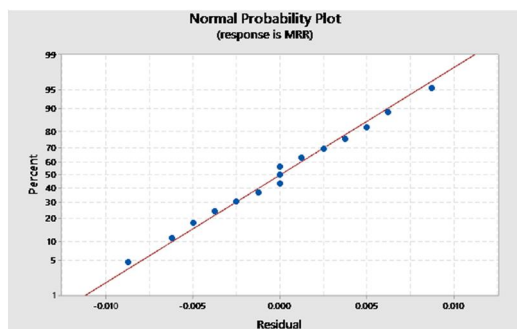
۴-۲- مدل ریاضی بدست آمده برای اضافه ماشینکاری

به کمک روش سطح پاسخ

همانند قسمت قبل، با توجه به جدول ۶ مربوط به تحلیل واریانس، مدل ریاضی اضافه ماشینکاری (e) بصورت رابطه ۷ بدست می‌آید:

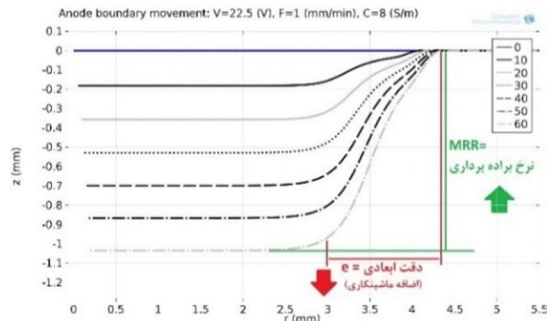
$$e = -0.316 + 0.04167 V + 0.4313 F + 0.0625 C - 0.000289 V*V - 0.1016 F*F + 0.00031 C*C - 0.00583 V*F + 0.001667 V*C - 0.02500 F*C \quad (7)$$

با توجه به نتایج تحلیل واریانس، مقدار احتمال مربوط به مدل بسیار کمتر از ۰/۰۵ که مطلوب است؛ همچنین مقادیر ضرایب همبستگی R^2 و R^2_{adj} برای این مدل به ترتیب برابر ۹۹/۹۵ و ۹۹/۸۵ درصد است؛ همچنین نمودارهای مربوط به بررسی نمودار نرمال و باقی مانده‌ها در شکل ۹ و شکل ۱۰ همگی نشان دهنده کفایت و صحت مدل است.

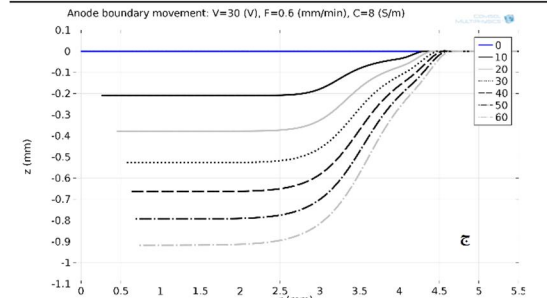
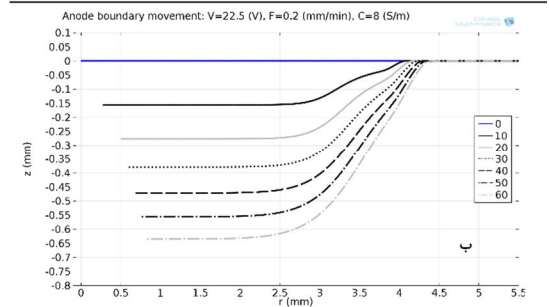
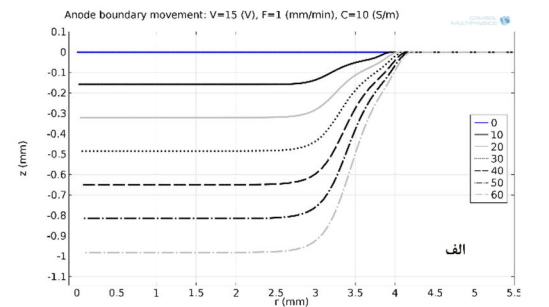


شکل ۷- نمودار نرمال برای نرخ براده برداری

$$MRR = -0.295 + 0.01767 V + 0.4313 F + 0.0575 C - 0.000156 V*V + 0.1797 F*F - 0.00156 C*C - 0.00333 V*F + 0.001000 V*C - 0.00937 F*C \quad (6)$$



شکل ۵- نحوه محاسبه متغیرهای پاسخ در شبیه سازی



شکل ۶- شبیه سازی عددی تغییر شکل مرز قطعه کار با

گذشت زمان (الف) اجرای ۲، (ب) اجرای ۷ و (ج) اجرای ۱۴

جدول ۶- نتایج تحلیل واریانس برای اضافه ماشینکاری

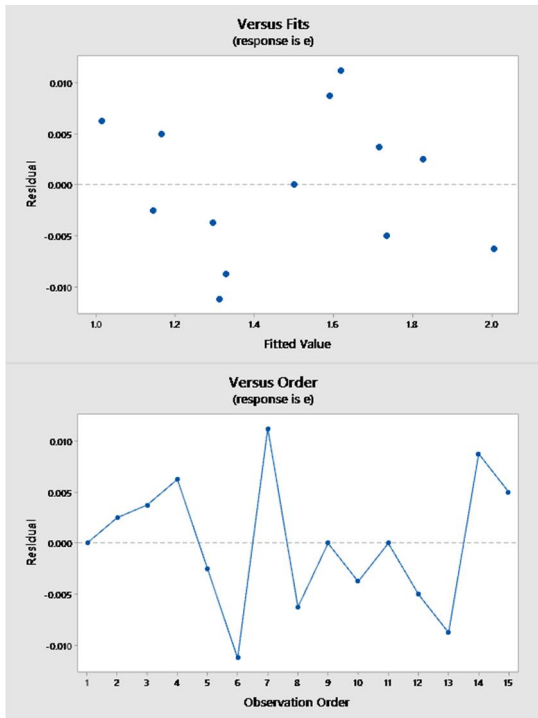
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۹	۰/۰۶۷۷۶	۰/۱۱۸۶۴۰	۱۰۳۱/۶۵	۰/۰۰۰
Linear	۳	۱/۰۶۰۵۷	۰/۳۵۳۵۲۵	۳۰۷۴/۱۳	۰/۰۰۰
V	۱	۰/۷۸۷۵۱	۰/۷۸۷۵۱۲	۶۸۴۷/۹۳	۰/۰۰۰
F	۱	۰/۰۰۶۶۱	۰/۰۰۶۶۱۳	۵۷/۵۰	۰/۰۰۱
C	۱	۰/۲۶۶۴۵	۰/۲۶۶۴۵۰	۲۳۱۶/۹۶	۰/۰۰۰
Square	۳	۰/۰۰۱۸۶	۰/۰۰۰۶۱۹	۵/۳۹	۰/۰۵۰
V*V	۱	۰/۰۰۰۹۸	۰/۰۰۰۹۷۵	۸/۴۸	۰/۰۵۳۳
F*F	۱	۰/۰۰۰۹۸	۰/۰۰۰۹۷۵	۸/۴۸	۰/۰۳۳
C*C	۱	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۶	۰/۰۵	۰/۸۳۲
2-Way Interaction	۳	۰/۰۰۵۳۲	۰/۰۰۱۷۷۵	۱۵/۴۳	۰/۰۰۶
V*F	۱	۰/۰۰۱۲۳	۰/۰۰۱۲۲۵	۱۰/۶۵	۰/۰۲۲
V*C	۱	۰/۰۰۲۵۰	۰/۰۰۲۵۰۰	۲۱/۷۴	۰/۰۰۶
F*C	۱	۰/۰۰۱۶۰	۰/۰۰۱۶۰۰	۱۳/۹۱	۰/۰۱۴
Error	۵	۰/۰۰۰۵۷	۰/۰۰۰۱۱۵		
Lack-of-Fit	۳	۰/۰۰۰۵۷	۰/۰۰۰۱۹۲	*	*
Pure Error	۲	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰		
Total	۱۴	۱/۰۶۸۳۳			

$R-Sq = 99.95\%$, $R-Sq(adj) = 99.85\%$

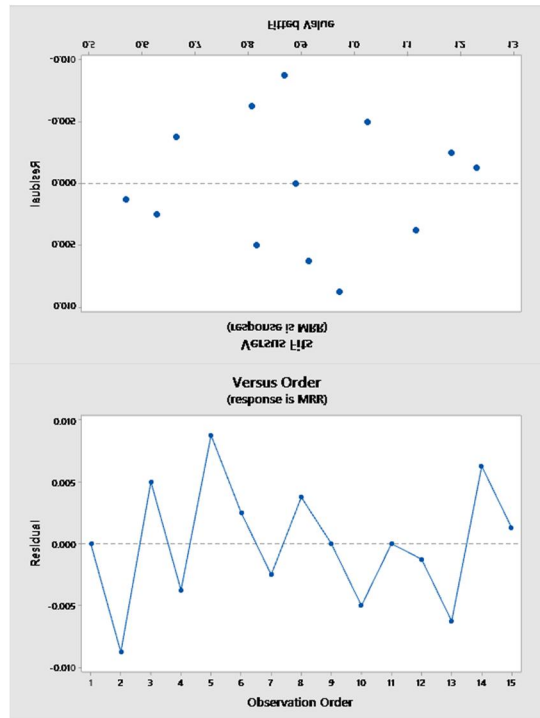
۳-۴- تاثیر پارامترهای ورودی فرآیند بر روی نرخ براده‌برداری و اضافه ماشینکاری

با توجه به جدول ۵ قسمت درجه ۱ و خطی رابطه بدست آمده برای نرخ‌براده‌برداری بیشتر تاثیر را روی این خروجی دارد. در واقع با توجه به تحلیل واریانس و در نظر گرفتن مقادیر P-value و F-value قسمت‌های خطی پیشروی ابزار، ولتاژ و غلظت الکترولیت به ترتیب بیشترین تاثیر را روی

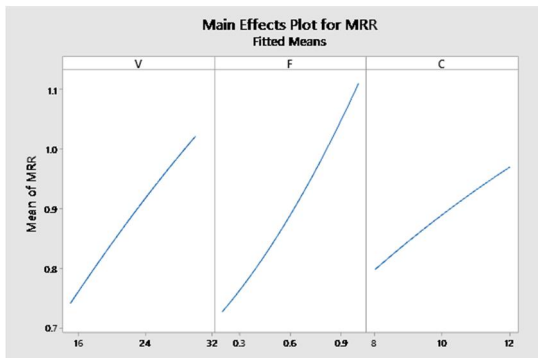
خروجی نرخ‌براده برداری دارند. قسمت درجه ۲ پیشروی ابزار و تداخل بین ولتاژ و غلظت نیز موثر است؛ همچنین شکل ۱۱ نشان دهنده آن است که با افزایش ولتاژ، پیشروی ابزار و قابلیت هدایت الکتریکی الکترولیت، نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد. افزایش این سه پارامتر، سبب افزایش جریان الکتریکی در دهانه ماشینکاری شده که افزایش سرعت انحلال را در بردارد.



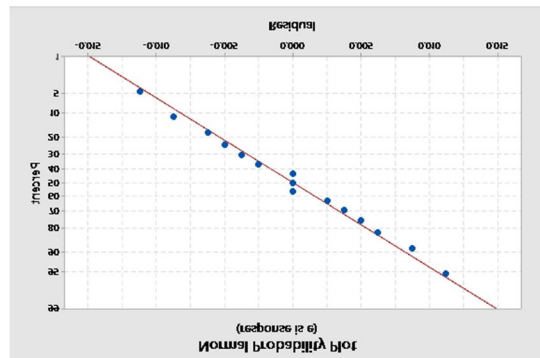
شکل ۱۰- نمودارهای باقی‌مانده برای اضافه ماشینکاری



شکل ۸- نمودارهای باقی‌مانده برای نرخ براده برداری



شکل ۱۱-تاثیر پارامترهای ورودی بر نرخ براده برداری



شکل ۹- نمودار نرمال برای اضافه ماشینکاری

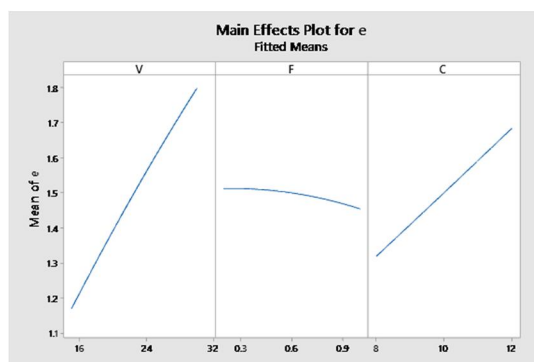
سطوح پایین ولتاژ و هدایت الکتریکی الکترولیت سبب کاهش اضافه ماشینکاری می‌شود. با کاهش این دو پارامتر، دانسیته جریان کاهش یافته و در نتیجه جریان‌های الکتریکی سرگردان در دهانه ماشینکاری کمتر می‌شود؛ همچنین با افزایش پیشروی ابزار از آنجایی که دهانه ماشینکاری کمتر می‌شود، تمرکز روی محل براده‌برداری بیشتر شده و دقت بهبود می‌یابد.

با توجه به جدول ۶ در رابطه مربوط به اضافه ماشینکاری قسمت‌های خطی پارامترهای ورودی موثر می‌باشند. با توجه به مقادیر P-value و F-value بدست آمده از تحلیل واریانس بیشترین تاثیر را به ترتیب ولتاژ، غلظت الکترولیت و پیشروی ابزار روی اضافه ماشینکاری دارند. قسمت‌های درجه ۲ ولتاژ و پیشروی و تداخل بین ولتاژ و غلظت الکترولیت، پیشروی و غلظت الکترولیت و همچنین ولتاژ و پیشروی ابزار موثر روی اضافه ماشینکاری می‌باشند؛ همچنین با توجه به شکل ۱۲

- سطوح پایینی برای ولتاژ و هدایت الکتریکی الکترولیت سبب کاهش اضافه ماشینکاری می‌شود؛ همچنین افزایش پیشروی ابزار به تمرکز بهتر دانسیته جریان الکتریکی و در نتیجه سبب کاهش اضافه ماشینکاری می‌شود.

۶- مراجع

- [1] Tailor PB, Agrawal A, Joshi SS (2013) Evolution of electrochemical finishing processes through cross innovations and modeling. *Int J Mach Tool Manu* 66: 15-36.
- [2] Rao RV, Kalyankar VD (2014) Optimization of modern machining processes using advanced optimization techniques: a review. *Int J Adv Manuf Tech* 73: 1159-1188.
- [3] Mehrvar A, Basti A, Jamali A (2020) Inverse modelling of electrochemical machining process using a novel combination of soft computing methods. *P I Mech Eng C-J Mec* 234(17): 3436-3446.
- [4] Mirak AR, Kermanpour A (2020) Effect of directional solidification on the microstructure and mechanical properties of a 2th Generation Ni-base single crystal superalloy CMSX-4. *Founding Res J* 3(4): 187-199.
- [5] Bhattacharyya B, Munda J (2003) Experimental investigation on the influence of electrochemical machining parameters on machining rate and accuracy in micromachining domain. *Int J Mach Tool Manu* 43(13): 1301-1310.
- [6] Neto JCS, Silva EM, Silva MB (2006) Intervening variables in electrochemical machining. *J Mater Process Tech* 179(1-3): 92-96.
- [7] Munda J, Malapati M, Bhattacharyya B (2007) Control of micro-spark and stray-current effect during EMM process. *J Mater Process Tech* 194(1): 151-158.
- [8] Senthilkumar C, Ganesan G, Karthikeyan R (2009) Study of electrochemical machining characteristics of Al/SiCp composites. *Int J Adv Manuf Tech* 43(3): 256-263.
- [9] Yong L, Di Z, Yongbin Z, Shaofu H, Hongbing Y (2010) Experimental investigation on complex structures machining by electrochemical micromachining technology. *Chinese J Aeronaut* 23(5): 578-584.
- [10] Mehrvar A, Basti A, Jamali A (2017) Optimization of electrochemical machining process parameters: Combining response surface methodology and differential evolution algorithm. *P I Mech Eng E-J Pro* 231(6): 1114-1126.



شکل ۱۲- تاثیر پارامترهای ورودی بر اضافه ماشینکاری

۵- نتیجه‌گیری

روش پیشنهادی که ترکیب روش عددی و روش طراحی آزمایش‌ها است، می‌تواند برای مسائلی استفاده شود که دسترسی به متریکال و یا انجام آزمایش‌ها هزینه‌بر و غیر قابل اجرا است. در این مقاله به کمک این روش، مدل‌سازی فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی سوپر آلیاژ تک کریستال پایه نیکل پیاده‌سازی شده است. در ادامه نتایج حاصل از مدل‌سازی متغیرهای خروجی با پارامترهای ورودی به کمک روش پیشنهادی ارائه خواهد شد:

- مدل‌های که بیان کننده رابطه بین پارامترهای فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی (ولتاژ، پیشروی ابزار و هدایت الکتریکی الکترولیت) و متغیرهای پاسخ (نرخ براده‌برداری و اضافه ماشینکاری) برای سوپر آلیاژ تک کریستال پایه نیکل CMSX-4 بدست آمده است.
- تمام قسمت‌های خطی، درجه دوم پیشروی ابزار و تعامل بین ولتاژ و هدایت الکتریکی الکترولیت، موثر در نرخ براده‌برداری می‌باشند.
- تمام قسمت‌های خطی، درجه دوم ولتاژ و پیشروی ابزار و تعامل بین ولتاژ و هدایت الکتریکی الکترولیت، تعامل بین پیشروی ابزار و غلظت الکترولیت، تعامل بین ولتاژ و پیشروی ابزار موثر بر اضافه ماشینکاری در این ماده می‌باشند.
- افزایش ولتاژ، پیشروی ابزار و هدایت الکتریکی الکترولیت سبب افزایش در نرخ براده‌برداری می‌شود.

- [13] Sun C, Zhu D, Li Z, Wang L (2006) Application of FEM to tool design for electrochemical machining freeform surface. *Finite Elem Anal Des* 43(2): 168-172.
- [14] Mehrvar A, Mirak A, Rezaei M (2020) Numerical and experimental investigation of electrochemical machining of nickel-based single crystal superalloy. *Modares Mech Eng* 20(7): 1873-1881.
- [11] Mehrvar A, Basti A, Jamali A (2017) Modelling and parameter optimization in electrochemical machining process: application of dual response surface-desirability approach. *Lat Am Appl Res* 47(4): 157-162.
- [12] Myers RH, Montgomery DC (1995) *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments*. Wiley, New York.