نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 54(6) (2022) 287-290
DOI: 10.22060/mej.2022.20708.7299

Experimental Investigation of Electrochemical Finishing Process Using Box-Behnken Design in Response Surface Methodology

B. Nemati, R. Moharami, M. M. Mohammadi*

Department of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

ABSTRACT: Electrochemical polishing is a nontraditional finishing process by which the surface roughness of the metallic workpiece is reduced due to anodic dissolution. In this process, an electrochemical cell is formed using the workpiece as the anode, a tool as the cathode, and a power supply. Different parameters like inter electrode gap, the chemical composition of the electrolyte, and its temperature along with the electric potential affect the finishing performance. The important performance parameters are surface roughness, material removal rate, and the dimensional tolerance of the workpiece. In this article, the effect of inter electrode gap, cathode geometry, tool feed rate, and electric potential on the process outputs are evaluated experimentally. Due to the high number of input and output variables and possible interactions between the input variables, Box-Behnken design in response surface methodology is selected for designing the experiments. The experimental models are evaluated by analysis of variance. Using the response surface methodology, the effect of input parameters on process outputs and the possible interactions between the input variables are extracted. Also, multi-objective optimization is performed for determining the input variables which are adequate for maximizing the material removal rate along with achieving a predetermined amount for surface smoothness and geometric tolerance.

Review History:

Received: Oct. 25, 2021
Revised: Apr. 26, 2022
Accepted: Apr. 27, 2022
Available Online: May, 20, 2022

Keywords:

Surface roughness
Material removal rate
Box-Behnken design
Response surface methodology

1- Introduction

Improving the surface roughness of metallic parts by electrochemical dissolution processes has been the subject of numerous research papers [1-3]. In the present paper, an experimental study is performed for modeling the final surface finish, geometric accuracy, and material removal rate in the electrochemical finishing of CK45 steel bushes. The experiments are designed by Box-Behnken design in response to surface methodology. The process input variables are electric voltage, cathode geometry, inter electrode gap, and cathode feed rate. The effect of input variables on the outputs and the interactions of input variables are determined. Finally, multi-objective optimization is performed for determining the input variables adequate for maximizing the material removal rate along with achieving a predetermined amount of surface smoothness and geometric tolerance.

2- Materials and Procedures

In this research, an electrochemical finishing machine tool was constructed which involved a DC power supply, a suitable tool holder and tool feeding system which could provide both linear and rotational movement of the tool, an electrolyte charging system, and a special fixture for holding the steel bushes. During the electrochemical finishing, the Inter Electrode Gap (IEG) almost remained fixed. The constructed setup was used for reducing the surface roughness of CK45 steel pipes. The electrolyte was NaCl solution which has high current efficiency and low price [4].

The constant process variables were electrolyte's temperature, concentration, flow rate, and finishing time which were 30 $^{\circ}$C, 50 gr/lit, 45 lit/min, and 20 minutes, respectively. The cathode was made of brass and had three forms which are represented in Fig. 1.

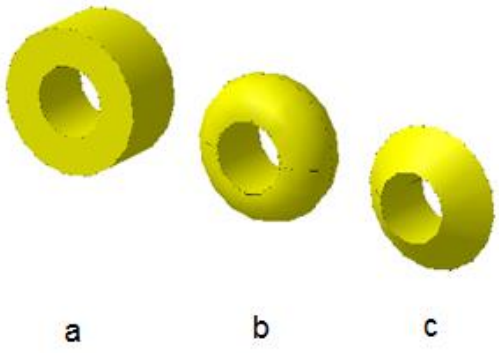


Fig. 1. Different cathode forms a: cylindrical form with rectangle cross section, b: cathode with circular cross section, c: cathode with triangle cross section

*Corresponding author's email: dr.mohammadi@znu.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Table 1. Factors and levels used in the Box-Behnken design

factors	levels		
Voltage (V)	6	9	12
Feed rate (mm/min)	10	15	20
IEG (mm)	0.5	1	1.5
Tool form	-1	0	1

Table 2. Analysis of variance (ANOVA)

outputs	source	*P*-value	Adjusted R^2	Predicted R^2
Ra	linear	< 0.0001	0.7654	0.6902
MRR	quadratic	0.0018	0.9812	0.9502
Tolerance	linear	0.0010	0.4719	0.3164

3- Design of Experiments

In this experimental study, the output variables were Material Removal Rate (MRR), surface roughness (*Ra*), and geometric accuracy. The input variables were tool form, inter electrode gap, and the electric potential difference between the anode (workpiece) and cathode (tool). The design of experiments was performed by Box-Behnken design which is a spherical, revolving design and is matched with response surface methodology. This DOE procedure enables one to evaluate the effect of each input variable and its interactions on the output parameters. Also, the empirical mathematical models were extracted for determining the relation between the input variable with the output parameters.

Numbers -1, 0, and 1 were specified for each cathode form in Fig. 1 i.e. (a, b, c) respectively. The number of experimental runs was 27. For each experimental run, the surface roughness, material removal rate, and geometric tolerance were measured. The empirical models were extracted using response surface methodology (RSM) and with Design Expert software.

4- Results and Discussion

According to the RSM results, the average surface roughness (*Ra*) had a linear dependence on the four input variables. Eq. (1) represents this linear relationship:

$$Ra = 1.127 - 0.018 \times A + 0.015 \times B + 2.111 \times C - 0.295 \times D \quad (1)$$

where *A*, *B*, *C*, and *D* are voltage and cathode feed rate. IEG, and tool form respectively.

Material removal rate had a second order dependence on the input variables. Eq. (2) represents this non-linear relationship:

$$MRR = -0.5 + 0.172 \times A - 0.028 \times B + 0.083 \times C - 0.05 \times D + 0.001 \times A \times B + 0.002 \times A \times D - 0.004 \times B \times C - 0.001 \times B \times D - 0.005 \times C \times D - 0.005 \times A^2 - 0.033 \times C^2 + 0.008 \times D^2 \quad (2)$$

Eq. (2) shows that electric potential is the most significant variable in influencing the material removal rate. Also, there are some weak interactions between the input variables.

Geometric error (tolerance) is the last output parameter which is affected linearly by the input variables. Eq. (3) represents this linear relationship:

$$Tolerance = -0.02 + 0.0025 \times A + 0.0008 \times B + 0.0083 \times C - 0.0125 \times D \quad (3)$$

As given by Eq. (3) the tolerance, which represents the geometric error between the inlet and outlet diameters of the hole after the finishing process, was strongly affected by tool form.

Analysis of Variance (ANOVA) was performed for evaluating the accuracy and adequacy of experimental modeling. Table 2 represents the results of this analysis.

5- Multi-Objective Optimization

The targets of multi-objective optimization were maximizing the MRR and keeping the tolerance error and surface roughness equal to or lower than 0.01 mm, and 2 micrometers respectively. This optimization was performed in design expert software using the desirability approach. All three responses had the same importance. Fig. 2, represents the optimization plots for output variables. In the optimum condition, the electric voltage, tool feeding rate, Inter Electrode Gap (IEG), and tool form were 11.9V, 11 mm/min, 0.5 mm, and tool form 1 (with triangle cross-section) respectively. Also, in the optimum condition, the values of MRR, surface roughness, and tolerance were 2m , 0.72 gram/min, and 0.01 mm

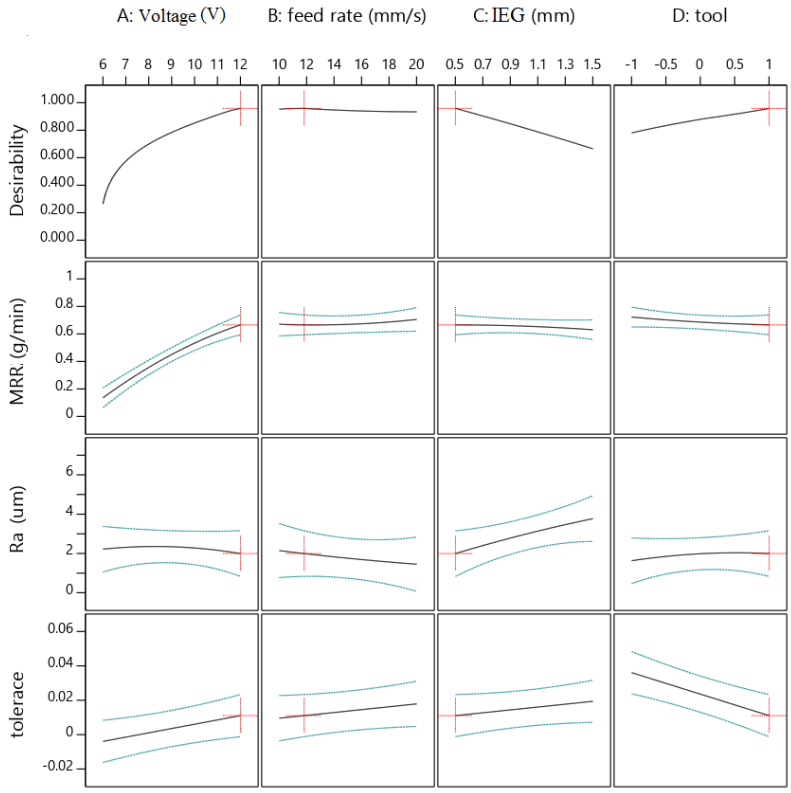


Fig. 2. Optimization plots for the output variables

respectively. The desirability of optimization was 89% which represents the high level of suitableness of the optimum condition.

6- Conclusions

In this investigation, the electrochemical finishing process was performed for reducing the surface roughness of the inner surface of CK45 steel bushes.

By employing response surface methodology the effects of electric voltage, tool form, inter electrode gap, and tool feeding rate on surface roughness, geometric tolerance, and material removal rate of finishing process were determined. The extracted empirical models provided a good explanation of the relationship between the input variables and the responses. Also, multi-objective optimization was performed for attaining the highest material removal rate along with predetermined limiting values for surface roughness and geometric accuracy.

References

[1] R. Singh, S. Dhami, N. Rajput, Comparison of EDM and ECM machined AISI 304 steel: Surface roughness, hardness and morphological characteristics, Materials Today: Proceedings, 48 (2022) 965-974.

[2] A. Gomez-Gallegos, F. Mill, A. Mount, Surface finish control by electrochemical polishing in stainless steel 316 pipes, Journal of Manufacturing Processes, 23 (2016) 83-89.

[3] A. Jerin, K. Karunakaran, Machinability investigation and optimizing process parameters in ECM of stainless steel− 12X18H10T for minimizing surface roughness, Materials Today: Proceedings, 3 (2021) 603.

[4] Y. Wang, Z. Xu, J. Liu, A. Zhang, Z. Xu, D. Meng, J. Zhao, Study on flow field of electrochemical machining for large size blade, International Journal of Mechanical Sciences, 190 (2021) 106018.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

B. Nemati, R. Moharami, M. M. Mohammadi , Experimental Investigation of Electrochemical Finishing Process Using Box-Behnken Design in Response Surface Methodology, Amirkabir J. Mech Eng., 54(6) (2022) 287-290.

DOI: 10.22060/mej.2022.20708.7299

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۶، سال ۱۴۰۱، صفحات ۱۴۰۹ تا ۱۴۲۲
DOI: 10.22060/mej.2022.20708.7299

مطالعه تجربی اثر پارامترهای فرآیند پرداخت الکتروشیمیایی روی صافی سطح، نرخ برداشت مواد و دقت ابعادی سوراخ‌های داخلی فولاد کربنی ساده با استفاده از روش سطح پاسخ و بر مبنای طرح باکس-بنکن

بهمن نعمتی، رسول محرمی، محمد مصطفی محمدی*

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایرانی.

خلاصه: فرآیند پرداخت الکتروشیمیایی از جمله فرآیندهای نوین پرداخت به شمار می‌رود. در این فرآیند سطوح قطعه کار تحت انحلال آندی کنترل شده قرار گرفته و زبری آن کاهش می‌یابد. عوامل مختلفی مانند هندسه، جنس ابزار و قطعه کار، نرخ پیشروی ابزار، ترکیب مایع الکترولیت، فاصله ابزار و قطعه کار، دبی الکترولیت، دمای الکترلیت و ولتاژ کاری بر خروجی فرآیند اثر گذار است. از طرفی پارامترهای خروجی مهم فرآیند صافی سطح نهایی، نرخ پرداخت‌کاری و دقت ابعادی ناحیه تحت پرداخت می‌باشند. در این مقاله اثر شکل ابزار، فاصله بین الکترودها، ولتاژ کاری و سرعت پیشروی ابزار بر پارامترهای خروجی بررسی شده است. به علت زیاد بودن تعداد پارامترهای ورودی و خروجی و احتمال برهمکنش میان اثرات پارامترهای مؤثر از روش طراحی آزمایش بر اساس متدولوژی سطح پاسخ استفاده شده است. به کمک این استراتژی نحوه اثرگذاری پارامترهای ورودی بر خروجی‌ها و اثرات خطی و غیر خطی پارامترهای ورودی و امکان بر هم کنش پارامترها با هم مورد ارزیابی تجربی قرار گرفته است. با استفاده از مدل تجربی حاصله و با اجرای روش بهینه سازی هم زمان، پارامترهای ورودی مطلوب جهت حصول نرخ پرداخت بیشینه در عین بسته نگاه داشتن تلرانس ابعادی و حصول صافی سطح در حد مطلوب بدست آمده است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۳
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۰۶
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۲/۳۰

کلمات کلیدی:
صافی سطح
نرخ پرداخت
تلرانس ابعادی
طرح باکس بنکن
روش رویه پاسخ

۱- مقدمه

انحلال آندی پدیده‌ای است که بموجب آن قطعه کار فلزی بر اثر واکنش‌های الکتروشیمیایی دچار خوردگی می‌شود و از این پدیده در ماشین‌کاری الکتروشیمیایی استفاده می‌شود. از انحلال آندی علاوه بر ماشین‌کاری حجیم در پرداخت سطحی قطعات نیز استفاده می‌توان استفاده کرد. در واقع فرآیند ماشین‌کاری الکتروشمیایی برای ماشین‌کاری حجیم و پرداخت نهایی قابل اعمال است [۱]. در فرآیند پرداخت الکتروشیمیایی قطعه کار به قطب مثبت منبع تغذیه متصل شده و نقش آند را دارد. ابزار به قطب منفی وصل می‌شود و میان ابزار و قطعه کار مایع الکترولیت جریان دارد. با اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی میان قطعه و ابزار، یون‌های فلزی از سطح قطعه کار برداشت شده و به سمت قطب منفی یعنی ابزار حرکت می‌کنند و با یون‌های منفی داخل الکترولیت واکنش می‌دهند. بدین ترتیب بدون اینکه قطعه کار با ابزار تماس مکانیکی داشته باشد فرآیند ماشین‌کاری و پرداخت صورت می‌گیرد. همین امر زمینه استفاده از این فرآیند در مواردی که انجام فرآیندهای ماشین‌کاری مکانیکی تماسی مشکل باشد را فراهم می‌کند. یکی از موارد مهم استفاده از این فرآیندها، ماشین‌کاری و پرداخت فلزات سخت است، زیرا به علت عدم تماس مکانیکی ابزار و قطعه کار، سختی فلزات تاثیری بر نرخ ماشین‌کاری الکتروشیمیایی نخواهد داشت [۲]. همچنین برای پرداخت کاری و پلیسه‌گیری قطعاتی که دسترسی به سطوح مورد نظر در آنها به صورت مکانیکی مشکل است، می‌توان از این فرآیندها استفاده نمود. از دیگر مزایای مهم فرآیندهای پرداخت الکتروشیمیایی نسبت به پرداخت مکانیکی و نیز فرآیندهای حرارتی مانند تخلیه الکتریکی ، کم بودن اثرات نامطلوب مکانیکی مانند تخلخل سطحی روی قطعه کار است [۳]. مسئله مورد نظر در این مقاله نیز به ناظر بر این کاربرد از عملیات‌های برداشت مواد الکتروشیمیایی است.

بازدهی عملیات‌های ماشین‌کاری به سه عامل مهم نرخ برداشت مواد، صافی سطح نهایی و دقت ابعادی بستگی دارد و کنترل این پارامترها در عملیات‌های پیچیده‌ای مانند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی همواره چالش بر انگیز است. بازدهی این گونه عملیات‌ها به علت طبیعت الکتروشمیایی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: dr.mohammadi@znu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

آن‌ها تحت تأثیر پارامترهای زیادی است و ارزیابی نحوه اثر گذاری پارامترها همواره از موضوعات داغ تحقیقاتی در این زمینه به شمار می‌رود. از طرفی با افزایش پیچیدگی‌های هندسی ماشین‌کاری، تنظیمات درست فرآیند جهت حصول پارامترهای خروجی ذکر شده اختصاصی‌تر و مشکل‌تر خواهد شد.

کومار و پابلا [۴] مروری بر پارامترهای مؤثر در فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی انجام دادند. بر این اساس غلظت و نرخ تغذیه الکترولیت به همراه ولتاژ الکتریکی اثرات بسزایی بر زبری سطح و نرخ برداشت مواد دارند و توسط محققان مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. زاهو و همکاران [۵] با استفاده از فرآیند پرداخت الکتروشمیایی توانستند زبری سطح بیرونی لوله‌های استیل استنت عروقی را کاهش دهد. دما، دبی، فاصله الکترودها و ولتاژ الکتریکی پارامترهای کنترلی فرآیند بودند. آزمایش‌های این افراد وابستگی شدید صافی سطح به ولتاژ و دبی الکترولیت را نشان می‌داد. هانگ و سو [۶] پرداخت الکتروشیمیایی فولاد ضد زنگ داپلکس را مطالعه کردند. آن‌ها اثر ریز ساختار استیل بر نرخ برداشت مواد را بررسی نمودند. جرین و کاروناکاران [۷] مطالعه تجربی روی اثر فاصله گپ ماشین‌کاری، اختلاف پتانسیل و جریان الکتریکی، و نیز غلظت الکترولیت بر زبری سطح پرداخت الکتروشیمیایی فولادهای ضدزنگ ۱۲X۱۸H۱۰T نمودند. آن‌ها از روش تاگوچی برای ساخت مدل‌های تجربی و بهینه سازی پارامترهای فرآیند استفاده کردند. آزمون‌های تجربی و مدل برازش شده نشان می‌داد شدت جریان الکتریکی مؤثرترین فاکتور روی زبری سطح نهایی بود. لیو و کو [۸] از ماشین‌کاری الکتروشیمیایی برای پرداخت سطوح پیشانی قطعات استوانه‌ای استفاده کردند. آن‌ها با کنترل و بهینه‌سازی هندسه ابزار خطاهای ابعادی و کیفیت سطح ماشین‌کاری شده را افزایش دادند. این تحقیق نشان می‌داد هندسه ابزار با تأثیر بر مسیر حرکت الکترولیت، نحوه شستشوی لجن‌های حاصل از ماشین‌کاری را تحت تأثیر قرار داده و به واسطه آن کیفیت ماشین‌کاری را تغییر می‌دهد. همین نتیجه گیری در باره اهمیت طراحی ابزار بر نحوه جریان الکترولیت و در نتیجه اثرات طراحی ابزار بر دقت و کیفیت سطح ماشین‌کاری توسط تانگ و همکارانش نیز ارائه شد. آن‌ها بخصوص به اهمیت طراحی ابزار برای ماشین‌کاری قطعات پیچیده اشاره نمودند [۹]. و کیفیت سطح وانگ و ژو [۱۰] توپوگرافی سطحی فولاد کربنی ساده را در حین عملیات ماشین‌کاری الکتروشمیایی بررسی نمودند. آن‌ها مشاهده نمودند صافی سطح در زمان ۴ الی ۵ ثانیه پس از فرآیند میزان بالایی دارد ولی با افزایش زمان کاهش می‌یابد. لی [۱۱] عملیات پرداخت الکتروشیمیایی لوله‌های استیل ضد زنگ را مورد مطالعه تجربی قرار داد و اثر چگالی جریان، زمان ماشین‌کاری، دما و فاصله آند و کاتد را بر روس صافی سطح تحلیل نمود. او بهترین نتیجه را در دمای حدود ۷۰ درجه و گپ یک میلیمتر بدست آورد. گالجوس و همکاران [۱] اثر پارمترهای ماشین‌کاری الکتروشمیایی را بر روی صافی سطح نهایی لوله‌های استیل ۳۱۶ بررسی نمودند. پارامترهای مورد مطالعه آن‌ها عبارت بود از ولتاژ، دبی و دمای الکترولیت، و فاصله آند و کاتد. آن‌ها متوجه شدند که ولتاژ و دبی الکترولیت به مراتب اثر قویتری بر روی صافی سطح نهایی نسبت به دما و گپ ماشین‌کاری دارند. چوای و همکاران [۱۲] صافی سطح لوله‌های استیل ۳۱۶ را به صورت الکتروشیمیایی افزایش دادند. آن‌ها به کمک روش طراحی آزمایش تاگوچی توانستند اثر زمان، گپ ماشین‌کاری و جریان الکتریکی را بر صافی سطح نهایی استخراج و شرایط را برای افزایش صافی سطح بهینه کنند. هاچنگ و پا [۱۳] عملیات پرداخت الکتروشیمیایی را بر روی سوراخ‌های داخلی لوله‌هایی از جنس فولاد ابزار اعمال کردند از دو نوع ابزار در این تحقیق استفاده شد. انداز ه ابزارهای بکار رفته و ترکیب شیمیایی الکترولیت متغیرهای فرآیند بودند. آن‌ها نشان دادند اعمال جریان‌های الکتریکی کمتر به همراه کاهش فاصله بین ابزار و قطعه کار منجر به افزایش صافی سطح می‌شود. وانگ و همکاران [۱۴] اثر جریان الکترولیت بر پایداری ماشین‌کاری و وقوع عیوب سطحی برای پره‌هایی از جنس فولادهای ضد زنگ داپلکس را بررسی نمودند آنها الگوی میدان جریان مناسب برای دستیابی به صافی سطح بالا و عیوب سطحی حداقل بر روی قطعه ماشین‌کاری شده را بدست آوردند. ژانگ و همکاران [۱۵] ماشین‌کاری الکتروشیمیایی را بر روی یکی از سوپر آلیاژ پایه نیکل، در محلول ترکیبی سدیم کلراید–سدیم نیترات انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند با افزایش درصد سدیم کلراید در محلول میزان تختی سطح و صافی سطح ماشین‌کاری افزایش می‌یابد.

تحقیقات فوق الذکر نشان می‌دهد دستیابی به شرایط مطلوب در ماشین‌کاری و پرداخت الکتروشیمایی مستلزم انجام مطالعات تجربی برای شناسایی پارامترهای مؤثر و بهینه سازی مسئله است. از طرفی در مطالعات قبلی انجام شده روی پرداخت الکتروشیمیایی سطوح داخلی قطعات سوراخ دار مسئله دقت ابعادی بررسی نشده است. این مقاله افزایش صافی سطح در سطوح داخلی قطعات بوشی شکل فولاد کربنی CK۴۵ مد نظر قرار گرفته است و در عین حال با توجه به اثرات ماشین‌کاری الکتروشیمیایی بر دقت ابعادی که متأثر از خطاهای هندسی قطعه کار است و همچنین با توجه به اهمیت نرخ برداشت مواد در فرآیندهای پرداخت سطح، این دو پارامتر خروجی نیز علاوه بر صافی سطح نهایی مورد مطالعه قرار گرفته

component	percent
Fe	98.22
C	0.50
Mn	0.69
Si	0.26
Cr	0.03
Ni	0.04

شکل ۱. قطعه فولادی و نتایج آنالیز شیمیایی مربوطه

Fig. 1. Chemical composition of carbon steel workpiece

است. از محدودیت‌های تکنیک تاگوچی در طراحی آزمایش، عدم مشخص شدن برهمکنش میان پارامترها است. برای رفع این نقیصه و برای مدل سازی تجربی مسئله از روش طراحی باکس-بنکن در متدولوژی سطح پاسخ برای طراحی آزمایش‌ها تجربی استفاده شده است و مدل‌های تجربی جهت شناسایی نحوه اثر گذاری و برهمکنش متغیرهای ورودی بر خروجی استخراج شده است که این مورد نیز از نو آوری های تحقیق حاضر بحساب می‌آید. پارامترهای ورودی در آزمایش‌ها هندسه ابزار، سرعت پیشروی ابزار، فاصله بین ابزار و قطعه کار و ولتاژ اعمالی است. در نهایت از روش بهینه سازی همزمان برای دستیابی همزمان به صافی سطح، تلرانس ابعادی، و نرخ برداشت مواد مطلوب بهره گرفته شده است. با توجه به کاربرد روش الکتروشیمیایی برای پرداخت قطعات فلزی با سوراخ‌های عمیق و نیز قطعات ساخته شده از فلزات سخت می‌توان از نتایج این مطالعه و بالاخص از روش مطالعه تجربی مورد استفاده در تحقیق حاضر برای بهینه سازی فرآیندهای مشابه و انتخاب بهتر پارامترهای ورودی استفاده کرد.

۲- مواد و تجهیز آزمایش

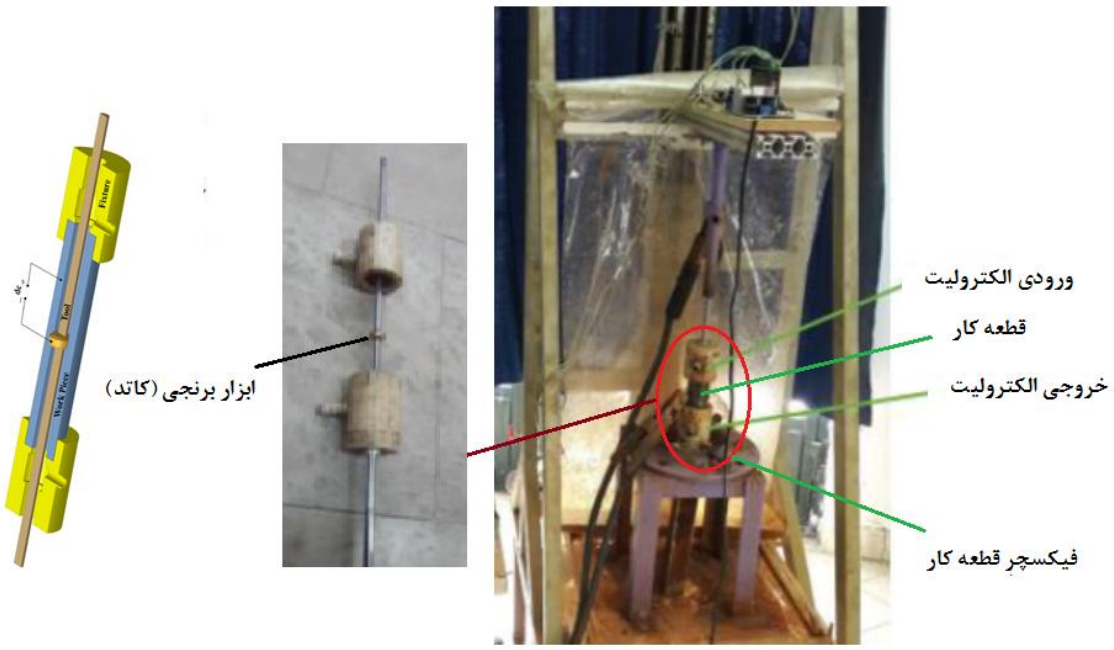
پرداخت الکتروشیمیایی بر روی سطوح داخلی قطعات بوشی شکل از جنس CK۴۵ انجام شد. جهت اطمینان از ترکیب شیمیایی فولاد تهیه‌شده، ماده تحت کوانتومتری قرار گرفت. نتایج آنالیز در شکل ۱ آمده است. طول قطعه کار ۶۰ میلی متر و قطر داخلی و خارجی آن به ترتیب ۲۰ و ۴۰ میلی متر بود که به کمک ماشین‌کاری سنتی (تراشکاری) آماده شد.

دستگاه الکتروپولیش ساخته شده شامل یک منبع تغذیه مستقیم با قابلیت تنظیم ولتاژ، قید و بستی برای بستن قطعه کار، ابزار و سیستم پیشروی ابزار است. در شکل ۲ قید و بست قطعه کار و نگهدارنده ابزار نشان داده شده است. منبع تغذیه دارای ورودی برق ۲۲۰ ولت و خروجی متغیر و رگوله شده ۰ الی ۲۴ ولت مستقیم است. ابزار مورد استفاده در سه شکل متفاوت و از جنس برنج ساخته شده است. در شکل ۳ هندسه ابزارها آمده است. ابزار روی محوری بسته شده و داخل قطعه کار حرکت پیشروی طولی را موازی با محور قطعه کار انجام می‌گیرد. برای پیشروی با سرعت قابل تنظیم از استپر موتور استفاده شده است. قید و بست قطعه کار دارای دو بوش یک طرفه است که علاوه بر گرفتن قطعه کار و محدود کردن حرکت آن، مجراهای ورود و خروج الکترولیت را تأمین می‌کند. بدین ترتیب بعد از قرار گیری قطعه کار در فیکسچر، الکترولیت از حد فاصل ابزار و قطعه کار عبور می‌کند و در عین حال ابزار می‌تواند حرکت پیشروی با سرعت ثابت را انجام دهد.

مایع الکترولیت ترکیب آب مقطر و کلرید سدیم با غلظت۵۰ گرم بر لیتر است. دمای الکترولیت ۳۰ درجه سانتیگراد، دبی الکترولیت ۴۵ لیتر بر دقیقه و زمان فرآیند الکتروشیمیایی ۲۰ دقیقه ثابت در نظر گرفته‌شده است. الکترولیت در داخل وانی به کمک هیتر الکتریکی گرم شده و دمای آن با دقت یک درجه سانتیگراد توسط ترموستات کنترل می‌شود. دبی الکترولیت توسط پمپ الکتریکی تأمین می‌شود. الکترولیت از مجرای ورودی فیکسچر قطعه کار به حد فاصل قطعه کار و ابزار پولی شکل شارژ می‌شود. ابزار حرکت پیشروی را در راستای محور قطعه کار با سرعت ثابت انجام می‌دهد. ابزار به قطب منفی منبع تغذیه متصل بوده و نقش کاتد را ایفا می‌کند و قطعه کار آند است.

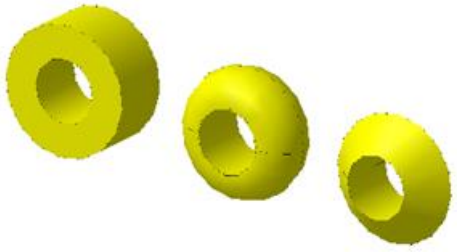
۳- طراحی آزمون‌های تجربی به روش باکس-بنکن

متغیرهای ورودی مورد مطالعه در این مقاله عبارت است از شکل ابزار، قطر ابزار (که مشخص کننده میزان گپ میان آند و کاتد است)، سرعت حرکت پیشروی ابزار و ولتاژ الکتریکی. خروجی‌های مورد نظر عبارت است از صافی سطح ، خطای هندسی ناشی از اختلاف قطر سوراخ در ابتدا و انتهای قطعه کار و نرخ برداشت مواد. هدف مهندسی مشخص شده در این مقاله دستیابی به نرخ برداشت مواد بیشینه و در عین حال کمتر بودن زبری سطح از میزان دو میکرومتر و تلرانس ابعادی تعریف شده از میزان ۰/۰۱ میلیمتر است. خطای هندسی (تلرانس) تعریف شده به عنوان معیار دقت ابعادی برگزیده شده است. با توجه به تعدد اهداف و لزوم دستیابی همزمان به آنها، مسئله مورد نظر از مسائل بهینه سازی همزمان به شمار می‌آید.



شکل ۲. دستگاه پرداخت الکتروشیمیایی قطعات بوشی شکل

Fig. 2. The electrochemical finishing setup for steel bushes



الف **ب** **ج**

شکل ۳. ابزارهای مورد استفاده با فرم پولی تخت باشعاع انحنای بی نهایت (الف)، قوسی با شعاع انحنای ده میلی متر (ب) و مقطع مثلثی با شعاع انحنای صفر (ج)

Fig. 3. Three forms of cathode tool. a- flat clyndrical tool , b- curved tool with curvature radious of 10 mm, c- tool with triangle cross section with sharp edge

در روش متدولوژی سطح پاسخ برای مدل سازی تجربی مسئله از توابع چند جمله‌ای بخصوص چند جمله‌ای‌های مرتبه دو استفاده می‌شود. رابطه (۱) چند جمله‌ای مرتبه دو ربط دهنده متغیرهای ورودی (x_i) و متغیر خروجی y را نشان می‌دهد.

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^{k} a_i x_i + \sum_{i=1}^{k} a_{ii} x_i^2 + \sum_{i,j=1}^{k} \sum_{i<j}^{k} a_{ij} x_k x_j + \varepsilon \qquad (۱)$$

در این رابطه که رابطه‌ای مرتبه دوم است a_i ها ضرایب رگرسیونی می‌باشند. در واقع هدف از مدل سازی فیزیکی و طراحی آزمایش یافتن این ضرایب با کمترین تعداد آزمایش‌های انجام شده است به نحوی که خطای مدل سازی در حد قابل قبولی باشد. برای برازش خطاها از آنالیز واریانس استفاده می‌شود. تکنیک‌های طراحی آزمایش گوناگونی برای یافتن ضرایب رگرسیونی در مدل مرتبه دوم متدولوژی سطح پاسخ وجود دارد که در این مقاله از روش طراحی باکس بنکن استفاده شده است [۱۶].

جدول ۱. متغیرهای ورودی و سطوح تغییرات آنها

Table 1. Input parameters and their variation level

متغیرها	سطح تغییرات		
ولتاژ	۶	۹	۱۲
نرخ پیشروی (میلی‌متر برثانیه)	۱۰	۱۵	۲۰
گپ (میلی‌متر)	۰/۵	۱	۱/۵
فرم ابزار	-۱	۰	۱

برای طراحی آزمایش‌ها و برازش منحنی‌های پاسخ و استخراج ضرایب رگرسیونی رابطه (۱) از طرح باکس بنکن در روش سطح پاسخ استفاده شد. در این روش هر متغیر ورودی در سه سطح تغییر می‌کند. روش طراحی باکس بنکن نوعی طراحی آزمایش سه سطحی ناکامل[1] و کروی[2] است که با تعداد آزمایش‌های کمتری نسبت به طراحی کامل[3] می‌تواند رویه‌های پاسخ را برازش نماید. این روش در طراحی آزمایش دو یا سه سطحی با تعداد متغیر چهار عدد یا کمتر از چهار عدد نسبت به روش‌های طراحی دیگر مانند کامپوزیت مرکزی[4]کم هزینه‌تر بوده یعنی تعداد آزمایش کمتری را در بر دارد ولی در آزمایش‌هایی که تعداد $N = 2K(K-1)+T$ متغیرهای ورودی بیش از چهار عدد باشد این مزیت خود را از دست می‌دهد [۱۷]. در روش باکس بنکن تعداد آزمایش‌ها با رابطه محاسبه می‌شود که در این رابطه N، K و T به ترتیب تعداد آزمایش‌ها، تعداد فاکتورها و تعداد تکرار آزمایش در نقطه مرکزی است. به عنوان مثال اگر تعداد متغیرهای ورودی یا همان فاکتورها سه عدد و تعداد تکرار آزمایش در نقطه مرکزی آزمایش‌ها نیز سه عدد باشد در کل با ۱۳ آزمایش می‌توان رویه‌های پاسخ را بدست آورد [۱۸].

در تحقیق حاضر تعداد متغیرهای ورودی نیز چهار عدد است و تعداد تکرار آزمایش در نقطه مرکزی سه عدد می‌باشد و این متغیرها و سطوح تغییرات آنها در جدول ۱ نشان داده شده است. ولتاژ بر حسب ولت، سرعت حرکت پیشروی ابزار بر حسب میلیمتر بر ثانیه، گپ بین ابزار و قطعه کار بر حسب میلیمتر و فرم ابزار بر اساس اعداد ثابت صفر (برای ابزار ب در شکل ۳) عدد ۱- برای ابزار با سطح تخت (الف در شکل ۳) و عدد ۱ برای ابزار با مقطع مثلثی (قسمت ج در شکل ۳) وارد شده است. بر اساس روش باکس بنکن برای چهار متغیر ورودی با سه سطح تغییر، مطابق جدول ۲، تعداد ۲۷ آزمایش طراحی شده است .

روش اندازه گیری پارامترهای خروجی:

صافی سطح، نرخ برداشت مواد و خطای هندسی سوراخکاری پارامترهای خروجی در این تحقیق بوده‌اند. برای اندازه گیری صافی سطح سطح داخلی بوش‌ها، هر نمونه پس از پرداخت الکتروشیمیایی برش خورده و زبری سطح داخلی آن به کمک دستگاه زبری سنج شرکت میتوتویو با درجه تفکیک ۰/۰۱ میکرون اندازه‌گیری شد. همچنین اختلاف قطر سوراخ‌های دو انتهای قطعه توسط میکرومتر داخل سنج و با دقت ۰/۰۱ میلی متر اندازه گیری شده و قدر مطلق اختلاف قطری به عنوان خطای هندسی (تلرانس ابعادی) منظور گشت. همچنین برای اندازه گیری نرخ پرداخت کاری از اختلاف وزن قطعات قبل و بعد از پرداخت الکتروشمیایی به عنوان نرخ برداشت مواد استفاده شد. مقدار کاهش وزن قطعه به کمک ترازوی دقیق آزمایشگاهی با درجه تفکیک ۰/۰۰۱ گرم صورت گرفت. با تقسیم نمودن این اختلاف وزن به مدت زمان ماشین‌کاری، نرخ برداشت مواد برحسب گرم بر دقیقه محاسبه شد. همچنین، نتایج اندازه‌گیری‌ها در جدول ۲ قابل مشاهده است.

1 - Incomplete three level design
2 - Spherical design
3 - Factorial design
4 - Central composite design

جدول ۲. آزمایش‌های طراحی شده به روش باکس-بنکن و نتایج اندازه‌گیری‌ها

Table 2. The designed experiments with Box-Behnken method and the measurement results

		فاکتور۱	فاکتور۲	فاکتور۳	فاکتور۴	پاسخ۱	پاسخ۲	پاسخ۳
شماره نمونه	شماره تست	A: ولتاژ	B:نرخ پیشروی ابزار	C:فاصله بین گپ و ابزار	D:فرم ابزار	زبری	نرخ برداشت مواد	تلرانس
۲۲	۱	۹	۱۵	۱	۰	۳/۴۸	۰/۴۶	۰/۰۱
۲۳	۲	۹	۲۰	۰/۵	۰	۲/۰۵	۰/۵۰۵	۰/۰۲
۲۱	۳	۹	۱۰	۰/۵	۰	۲	۰/۵۱	۰/۰۲
۶	۴	۹	۱۵	۰/۵	۱	۲/۲۸	۰/۴۶	۰/۰۱
۲۷	۵	۹	۱۰	۱/۵	۰	۵	۰/۴۹	۰/۰۲
۱۵	۶	۹	۱۰	۱	-۱	۳/۳۸	۰/۵۳۵	۰/۰۱
۱	۷	۹	۱۵	۱/۵	۱	۳/۶۷	۰/۳۷۵	۰/۰۱
۱۹	۸	۱۲	۲۰	۱	۰	۳/۴	۰/۷۱	۰/۰۴
۱۲	۹	۹	۲۰	۱	-۱	۴/۱۸	۰/۵۵	۰/۰۳
۲۶	۱۰	۱۲	۱۵	۱	-۱	۳/۰۶	۰/۷۲۵	۰/۰۶
۲	۱۱	۱۲	۱۵	۱	۱	۳/۰۱	۰/۶۵۵	۰/۰۱
۱۰	۱۲	۱۲	۱۵	۰/۵	۰	۲/۱۳	۰/۶۸	۰/۰۳
۹	۱۳	۱۲	۱۵	۱/۵	۰	۳/۷۹	۰/۶۷	۰/۰۵
۱۳	۱۴	۹	۱۵	۱/۵	-۱	۵/۱۲	۰/۴۴۵	۰/۰۵
۸	۱۵	۹	۱۰	۱	۱	۲/۹۳	۰/۴۴	۰/۰۱
۱۶	۱۶	۱۲	۱۰	۱	۰	۳/۴۳	۰/۶۸	۰/۰۲
۱۸	۱۷	۶	۱۰	۱	۰	۳/۰۷	۰/۱۶	۰/۰۲
۲۰	۱۸	۹	۱۵	۱	۰	۳/۵۱	۰/۴۶	۰/۰۳
۲۴	۱۹	۹	۲۰	۱/۵	۰	۴/۷۷	۰/۴۴۵	۰/۰۲
۱۷	۲۰	۹	۲۰	۱	۱	۲/۵۲	۰/۴۳۵	۰/۰۱
۷	۲۱	۹	۱۵	۱	۰	۳/۵	۰/۴۷	۰/۰۲
۱۱	۲۲	۶	۱۵	۱/۵	۰	۳/۷۵	۰/۱۳	۰/۰۱
۴	۲۳	۶	۱۵	۱	۱	۳/۲۲	۰/۱۳	۰/۰۱
۱۴	۲۴	۶	۱۵	۱	-۱	۳/۰۶	۰/۲۳۵	۰/۰۴
۳	۲۵	۶	۲۰	۱	۰	۳/۸	۰/۱۲۵	۰/۰۳
۲۵	۲۶	۹	۱۵	۰/۵	-۱	۲/۳۸	۰/۵۲	۰/۰۲
۵	۲۷	۶	۱۵	۰/۵	۰	۲/۵۹	۰/۱۴	۰/۰۱

۴- مدل‌های ریاضی استخراج شده و آنالیز واریانس

با برازش ضرایب رگرسیونی رابطه (۱) به روش باکس بنکن در نرم افزار دیزاین اسپرت برای هر متغیر خروجی یک مدل‌های ریاضی جهت مشخص کردن نحوه تغییرات آن متغیر نسبت به متغیرهای ورودی بدست آمد که در قسمت ذیل به مدل‌ها و آنالیز واریانس مربوط به برازش چند جمله‌ای می‌آید. رابطه (۲) مدل ریاضی استخراج شده برای زبری سطح را بر اساس رابطه (۱) نشان می‌دهد. در واقع زبری سطح رابطه خطی با متغیرهای ورودی در رنج آزمایش‌های انجام شده دارد.

$$Ra = 1.127 - 0.018 \times A + 0.015 \times B + 2.111 \times C - 0.295 \times D \quad (۲)$$

در این رابطه V، F، G و T به ترتیب ولتاژ الکتریکی، نرخ پیشروی ابزار، گپ بین الکترودها و کد مربوط به فرم ابزار می‌باشند. پارامترهای A، B، C و D به ترتیب ولتاژ، نرخ پیشروی ابزار، فاصله گپ بین ابزار و قطعه، و فرم ابزار هستند. همان طور که مشهود است زبری سطح رابطه خطی با تمامی متغیرهای ورودی دارد و برهم کنش بین متغیرها نیز اثر مشهودی بر روی زبری سطح ندارد.

رابطه (۳) مدل ریاضی استخراج شده برای نرخ برداشت مواد را بر اساس معادله چند جمله‌ای (۱) نشان می‌دهد. نرخ برداشت مواد رابطه مرتبه دو با متغیرهای ورودی در رنج آزمایش‌های انجام شده دارد.

$$MRR = -0.5 + 0.172 \times A - 0.028 \times B + 0.083 \times C - 0.05 \times D + 0.001 \times A \times B + 0.002 \times A \times D - 0.004 \times B \times C - 0.001 \times B \times D - 0.005 \times C \times D - 0.005 \times A^2 - 0.033 \times C^2 + 0.008 \times D^2 \quad (۳)$$

همان طور که مدل ریاضی نشان می‌دهد نرخ برداشت مواد با ولتاژ (A) میزان گپ بین ابزار و قطعه کار (C) و فرم ابزار (D) رابطه مرتبه دو دارد و از طرفی برهمکنش تمامی متغیرها نیز در رابطه (۳) مشهود است. تمامی جملات حاوی حاصلضرب دو متغیر نشان دهنده بر همکنش آن متغیرها در نرخ برداشت مواد هستند. همچنین رابطه (۴) نحوه تغییرات خطای هندسی (میزان عدم دقت) را با متغیرها ورودی نشان می‌دهد.

$$Tolerance = -0.02 + 0.0025 \times A + 0.0008 \times B + 0.0083 \times C - 0.0125 \times D \quad (۴)$$

که بر اساس رابطه (۴) خطای هندسی وابستگی خطی به متغیرهای آزمایش دارد و بیشترین تأثیر را از متغیر فرم ابزار می‌پذیرد.

از آنالیز واریانس برای صحت سنجی مدل سازی سطح پاسخ استفاده می‌شود. در جدول ۳ نتایج حاصل از آنالیز واریانس[1] برای هر سه مدل استخراج شده آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر پارامتر احتمالی ترتیبی[2] p کمتر از ۰/۰۵ است و از طرفی اختلاف ضرایب R^2 پیشبینی شده و R^2 تنظیم شده کمتر از ۰/۲ است و براین اساس مدل‌های استخراج شده با دقت بالایی زبری سطح، نرخ برداشت مواد و تلرانس هندسی را پیش بینی خواهند نمود [۱۹].

۵- رویه‌های پاسخ و تحلیل نتایج

بر اساس مدل‌های ریاضی استخراج شده، رویه‌های پاسخ سه بعدی به کمک روش متدولوژی سطح پاسخ استخراج شدند و در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند. با توجه به وجود چهار متغیر ورودی و عدم امکان نمایش رویه به صورت پنج بعدی، از دو رویه سه بعدی برای نمایش نحوه تغییرات متغیر خروجی نسبت به متغیرهای ورودی استفاده شده است. برای ترسیم هر رویه مرتبط با دو فاکتور ورودی متغیر، دو فاکتور دیگر ثابت فرض شده‌اند و در واقع رویه‌های نمایش داده شده نحوه اثر دو متغیر ورودی را در حالتی که دو متغیر دیگر ثابت هستد نشان می‌دهند.

همان طور که در شکل ۴ (قسمت‌های a و b) نشان داده شده است و از رابطه (۲) نیز معلوم است زبری سطح بیشترین تأثیر را از میزان گپ میان ابزار و قطعه کار می‌پذیرد و شدت تغییرات زبری نسبت به سایر متغیرها خیلی کمتر از میزان تغییرات آن در برابر تغییرات گپ پرداخت کاری است. زبری سطح بر اساس بالاتر یا پایین‌تر بودن R_a نسبت به عدد یک میکرومتر به دو دسته زبری سطح ماکروسکوپی و میکروسکوپی قابل دسته بندی است. در تحقیق حاضر زبری سطح بیش از یک میکرومتر بوده و بدین ترتیب نوع ماکروسکوپی زبری در اینجا مطرح است. کاهش زبری سطح ماکروسکوپی

1 - Analysis Of Variance (ANOVA)
2 - Sequential *p*-value

جدول ۳. نتایج آنالیز واریانس برای زبری سطح ، نرخ ماشین‌کاری و دقت ابعادی

Table 3. Results of analysis of variance for surface roughness, material removal rate and tolerance

	درجه مدل	مقدار پارمتر احتمالی p	مقدار تنظیم شده R^2	مقدارپیش بینی شده R^2	
زبری سطح	خطی	۰/۰۰۰۱>	۰/۷۶۵۴	۰/۶۹۰۲	پیشنهادی
نرخ برداشت مواد	درجه دوم	۰/۰۰۱۸	۰/۹۸۱۲	۰/۹۵۰۲	پیشنهادی
تلرانس	خطی	۰/۰۰۱۰	۰/۴۷۱۹	۰/۳۱۶۴	پیشنهادی

در فرآیندهای الکتروشیمیایی با خوردگی بیشتر پیک‌های زبری بر اثر بالاتر بودن چگالی جریان در پیک‌ها نسبت به قسمت‌های فرورفته (دره‌ها) اتفاق می‌افتد [۲۰]. بنابراین اختلاف چگالی جریان میان قله‌های زبری نسبت به دره‌های زبری در میزان افزایش صافی سطح اهمیت دارد. هرچه میزان اختلاف چگالی جریان کمتر باشد قله‌ها و دره‌ها با نرخ نزدیک‌تری دچار خوردگی می‌شوند و پرداخت سطحی کمتر می‌شود و بالعکس. با افزایش گپ میان ابزار و قطعه کار میزان اختلاف چگالی جریان میان قله‌ها و دره‌های زبری کمتر خواهد شد. شکل ۵ بصورت شماتیک یک حالت نمونه برای این مسئله را مطرح کرده است.

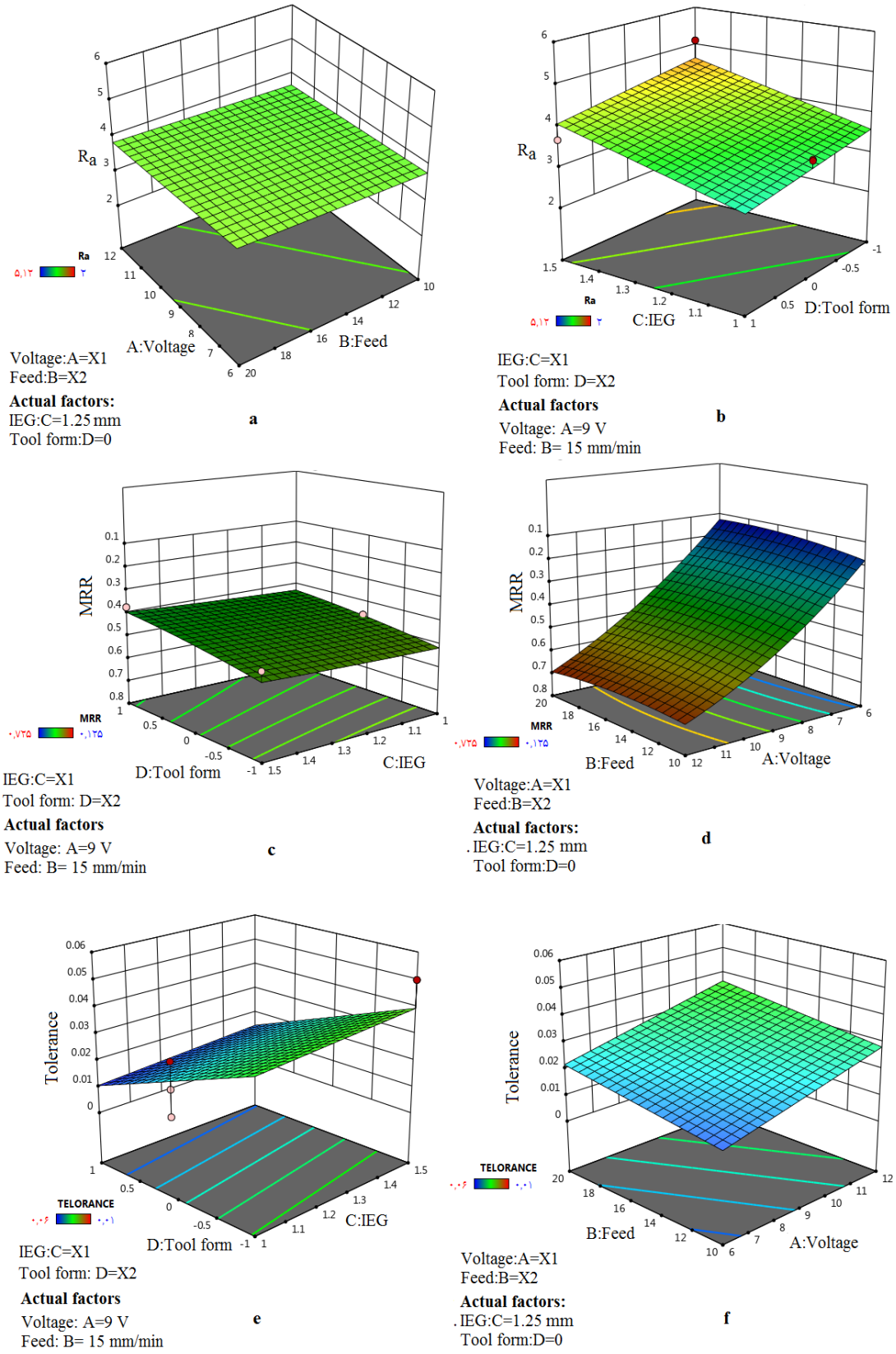
فرض شده است که فاصله گپ تا دره یک بار برابر با AB و بار دیگر برابر با AC است و فواصل AB و BC با هم برابر است. نسبت فاصله ابزار از فرورفتگی به فاصله آن از برآمدگی برای دو حالت گپ AB و AC با مقادیر X_1 و X_2 آمده است. با افزایش فاصله بنابر محاسبات ذیل، نسبت فاصله ابزار از فرورفتگی به برآمدگی لزوماً از مقدار واحد کمتر است.

$$\begin{cases} X_1 = \dfrac{BA}{ED} \\ X_2 = \dfrac{CA}{FD} \end{cases} \rightarrow \frac{X_2}{X_1} = \frac{CA \times ED}{FD \times BA} \xrightarrow{CA=2BA} \frac{X_2}{X_1} = 2\frac{ED}{FD} = \frac{2ED}{2ED+DO} = 1 - \frac{DO}{2ED+DO} \prec 1 \quad (۵)$$

رابطه (۵) در واقع نسبت فاصله دره‌های زبری از ابزار را به فاصله قله زبری از ابزار دردو حالت گپ کوچک و بزرگ بررسی می‌کند و نشان می‌دهد با افزایش میزان گپ ابزار این نسبت کاهش می‌یابد. یعنی با افزایش گپ نسبت فاصله دره‌های زبری به قله‌های زبری کاهش خواهد یافت و بدین ترتیب اختلاف چگالی جریان میان قله و دره نیز با افزایش گپ کاهش خواهد یافت و این امر موجب کاهش میزان بهبود صافی سطح در عمل پرداخت کاری خواهد شد. از طرف دیگر افزایش این نسبت به معنی خوردگی بالاتر قله‌ها نسبت به دره‌ها و کاهش بیشتر زبری سطح است.

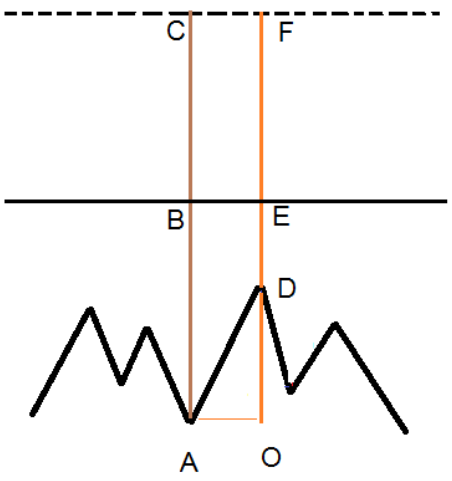
بر اساس شکل ۴ قسمت a و قسمت d تغییرات ولتاژ اثر چندانی روی مقدار زبری سطح نداشته است در عین حال افزایش ولتاژ باعث افزایش نرخ برداشت مواد شده است. همان طور که در بالا اشاره شد زبری سطح ماکروسکوپی تحت تأثیر میزان اختلاف چگالی جریان میان دره‌ها و قله‌های زبری قرار می‌گیرد. افزایش ولتاژ باعث افزایش یکنواخت چگالی جریان روی سطح می‌شود و اختلاف چگالی جریان میان قله و دره تغییر چندانی نمی‌کند. در واقع با افزایش ولتاژ و با ثابت ماندن مقاومت الکتریکی مسیر میزان جریان الکتریکی در کل سطح ماشین کاری زیاد می‌شود و چگالی جریان نیز افزایش یافته ولی اختلاف چگالی جریان میان نقاط دره و قله با توجه به ثابت بودن میزان مقاومت الکتریکی تغییر چندانی نمی‌کند و بدین ترتیب افزایش ولتاژ اثر چندانی روی صافی سطح ندارد.

همچنین در شکل ۴ مشاهده می‌شود فرم ابزار مثلثی (با کد ۱) باعث بهبود صافی سطح و کاهش زبری شده است. با تغییر فرم ابزار از حالت استوانه‌ای (فرم ۱-) به حالت مقطع مثلثی در واقع لبه ابزار تیزتر شده و



شکل ۴. رویه‌های پاسخ برای زبری سطح (قسمت‌های a و b) نرخ برداشت مواد، (قسمت‌های c و d) و تلرانس ابعادی (قسمت‌های e و f) در شرایطی که دو فاکتور ورودی ثابت و دو فاکتور دیگر متغیر در نظر گرفته شده‌اند و مقادیر فاکتورهای ثابت در هر یک از اشکال اعلام شده است.

Fig. 4. Response surfaces for surface roughness (a,b), material removal rate (c, d), geometric tolerance (e, f)



شکل ۵. اثر افزایش فاصله گپ روی اختلاف مسیر جریان میان قله‌ها و دره‌ها

Fig. 5. Effect of enhancement of gap on currnt difference betwwen picks and valleys

جریان الکترولیت در موضع ماشین کاری تغییرات زاویه ناگهانی داده و تربولانس بالایی در نوک ابزار ایجاد می‌شود. افزایش تربولانس حرکت الکترولیت موجب شستشوی بهتر لجن‌های ماشین کاری شده و به نظر می‌رسد همین عامل باعث صافی سطح برای ابزار با مقطع مثلثی شده است. افزایش صافی سطح ماشین کاری بر اثر افزایش تربولانس حرکت الکترولیت پدیده‌ای شناخته شده است. شکل ۴ قسمت a نشان می‌دهد تغییرات نرخ پیشروی ابزار (در محدوده تحت آزمون) اثر چندانی روی زبری سطح نداشته است. در واقع نرخ پیشروی در محدوده تحت آزمون (۱۰ الی ۲۰ میلیمتر بر دقیقه) نتوانسته است روی اختلاف چگالی جریان میان قله‌ها و دره‌ها و نیز روی شستشوی لجن‌های ماشین‌کاری اثر چندانی گذارد.

همان طور که در شکل ۴ (قسمت‌های c و d) نشان داده شده است، نرخ برداشت مواد با افزایش ولتاژ افزایش می‌یابد و با تغییرات سایر متغیرهای ورودی چندان تغییر نمی‌کند. با افزایش ولتاژ الکتریکی و با فرض مقاومت مشخص در مسیر الکترولیت، جریان الکتریکی زیاد می‌شود و بر طبق قانون فارادی میزان برداشت مواد بیشتر خواهد شد. رابطه (۶) قانون فارادی را بیان نموده است.

$$M = \frac{Ita}{Fy} \qquad (۶)$$

در این رابطه M، I، t، F،a و v به ترتیب جرم برداشته شده، شدت جریان، زمان، ثابت فارادی، جرم اتمی و ظرفیت الکتروشیمیایی ماده قطعه کار است. بر این اساس با افزایش شدت جریان نرخ برداشت مواد نیز مستقیماً افزایش خواهد یافت. شدت جریان الکتریکی هم بنابر قانون اهم با ولتاژ الکتریکی متناسب است. قسمت d شکل ۴ نشان می‌دهد تغییرات نرخ پیشروی ابزار اثر ضعیفی روی نرخ ماشین کاری دارد. این پدیده نشان می‌دهد تغییرات نرخ پیشروی ابزار در محدوده آزمایش باعث تغییر هیچ یک از پارامترهای رابطه (۶) نشده است. با توجه به قانون فارادی، ثابت فارادی، ظرفیت الکتروشیمیایی، جرم اتمی و زمان بطور طبیعی ثابت‌اند و تنها پارامتر قابل تغییر در رابطه جریان الکتریکی است. با توجه به ثابت بودن ولتاژ الکتریکی در طول هر آزمون، جریان الکتریکی تنها تحت تأثیر مقاومت الکتریکی در مسیر ماشین‌کاری قرار می‌گیرد. مقاومت الکتریکی الکترولیت به میزان لجن شویی الکترولیت وابسته است. ثابت بودن نرخ ماشین‌کاری در محدوده تغییرات پیشروی نشان می‌دهد نرخ کلی شستشوی لجن‌ها توسط الکترولیت تغییرا چندانی نمی‌کند و مقاومت الکترویکی الکترولیت در این محدوده کاری تقریباً ثابت مانده است. قسمت c شکل ۴ نشان می‌دهد افزایش گپ ماشین‌کاری از مقدار ۰/۵ به ۱/۵ میلیمتر نیز اثر چندانی روی نرخ برداشت مواد نداشته است. بر اساس قانون فارادی با افزایش مقاومت الکتریکی الکترولیت در حد فاصل گپ ماشین‌کاری جریان الکتریکی کاهش یافته و باید نرخ ماشین کاری نیز کاهش یابد. از طرفی افزایش گپ ماشین کاری اثر مثبتی روی قدرت شستشوی الکترولیت می‌گذارد زیرا الکترولیت در مقطعی بازتر حرکت می‌کند بدین ترتیب این دو اثر در تضاد با یکدیگر هستند. آزمایش حاضر نشان می‌دهد در محدوده گپ مورد آزمایش دو اثر ذکر شده عملاً یک دیگر را خنثی کرده و نرخ ماشین‌کاری با افزایش گپ ماشین‌کاری تغییرات چندانی نمی‌کند. همچنین شکل ۴ قسمت c نشان می‌دهد استفاده از ابزار با مقطع مثلثی باعث بهبود ضعیف نرخ ماشین‌کاری شده است. تغییر فرم ابزار همان طور که در تحلیل زبری سطح بیان شد باعث تغییرات توربلانس موضعی سیال الکترولیت می‌شود و برای ابزار با مقطع مثلثی بهبود شستشوی لجن‌ها را می‌تواند به همراه داشته باشد و همین امر می‌تواند عامل افزایش نرخ برداشت مواد گردد.

بر اساس رابطه (۴) و شکل ۴ قسمت e تلوراس ابعادی بیشترین وابستگی را به شکل ابزار دارد و وابستگی آن به سایر پارامترها (با مقایسه ضرایب رابطه (۴)) بسیار ضعیف‌تر است. با تغییر شعاع انحنای ابزار از بینهایت (برای ابزار استوانه‌ای) تا مقدار صفر (برای ابزار با مقطع مثلثی) دقت ابعادی افزایش یافته و تلرانس کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد علت کاهش دقت ابعادی به افزایش سطح پیرامونی ابزار و وابستگی الگوی جریان الکترولیت به شکل ابزار بخصوص در قسمت‌های انتهایی و ابتدایی سوراخ باز گردد. ابزار استوانه‌ای سطح پیرامونی زیادی دارد و ماشین‌کاری لبه‌ها در حین عبور کل سطح این ابزار از لبه‌ها صورت خواهد گرفت و الگوی جریان الکترولیت نیز در این میان با حرکت ابزار استوانه‌ای دچار تغییرات بیشتری بخصوص در دو لبه انتهایی خواهد شد. با تغییرات الگوی جریان و تغییرات عدد رینولدز جریان در لبه‌های ابتدایی و انتهایی میزان ماشین‌کاری در این قسمت‌ها طبیعتاً تحت تأثیر تغییرات الگوی جریان قرار می‌گیرد و پراکندگی در ابعاد سوراخ‌های دو انتها بیشتر شده و دقت ابعادی نیز در مجموع کاهش می‌یابد.

۶- بهینه سازی همزمان

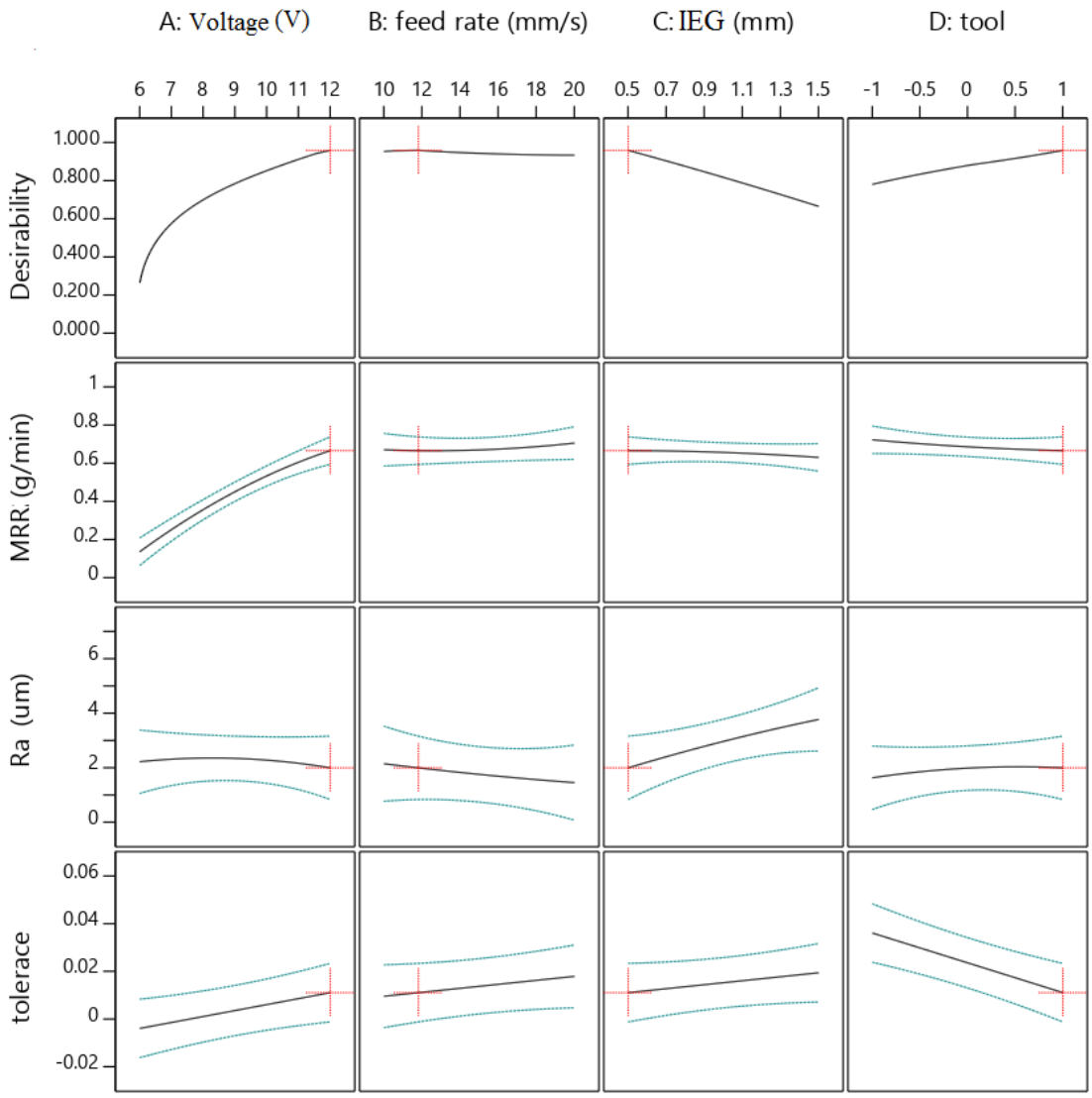
مسئله مهندسی هدف در این مقاله تعیین متغیرهای ورودی به نحوی است که حداقل زبری سطح ۲ میکرون، حداکثر خطای هندسی ۰/۰۱ میلی متر و حداکثر نرخ برداشت ماده برای فرآیند پرداخت الکتروشیمیایی حاصل آید. بنابراین یکی از پارامترهای خروجی بیشینه شده و در عین حال باید دو پارامتر دیگر در محدوده مجاز تعریف شده قرار گیرند. برای دستیابی به این هدف عملیاتی می‌توان از روش بهینه سازی همزمان استفاده کرد. در بهینه سازی همزمان، تابعی تک هدفه (با یک متغیر خروجی) به نام تابع مطلوبیت با توجه به وضعیت مورد نظر برای متغیرهای خروجی هدف در مسئله ساخته می‌شود. در واقع تابع مطلوبیت $D(y)$ متوسطی وزن دار از n عدد تابع مطلوبیت جزئی‌تر $d_i(y_i)$ مرتبط با هر متغیر خروجی (هدف) y_i است. مقادیر $d_i(y_i)$ مابین صفر و یک هستند و عدد یک برای آن نشانگر مطلوب‌ترین مقدار برای هر متغیر خروجی و صفر نشانگر مقدار غیر قابل قبول است. فرم عمومی تابع مطلوبیت بدین صورت است:

$$D(y)=(d_1(y_1)^{k_1}\times d_2(y_2)^{k_2}\times\ldots\times d_n(y_n)^{k_n})^{\frac{1}{\sum_i k_i}} \quad (۷)$$

در این رابطه k_i ضریب اهمیت نسبی متغیر شمار i و n تعداد متغیرهای ورودی می‌باشند. مقادیر مطلوبیت جزئی d_i با توجه به وضعیت جواب‌ها نسبت به محدوده‌های مطلوب برای هر متغیر پاسخ تعریف می‌شوند.

در مسئله حاضر ضریب اهمیت سه متغیر خروجی برابر با یکدیگر فرض شده است بنابراین مقادیر k_i برابر با یک در نظر گرفته شده است. با مشخص شدن کانتورهای پاسخ از مدل استخراج شده متدولوژی سطح پاسخ، محدوده‌هایی از متغیرهای ورودی که هر متغیر پاسخ خروجی را به مقادیر بهینه یا هدف نزدیک می‌کند معلوم می‌شود. اشتراک محدوده‌های تعیین شده، محدوده تغییرات نهایی برای بهینه‌سازی همزمان تمامی پاسخ‌ها را مشخص می‌کند. ممکن است بی‌نهایت جواب برای دستیابی به متغیرهای خروجی هدف بصورت همزمان در محدوده‌های تعیین شده وجود داشته باشد و هر جواب مطلوبیت کلی خاص خود را خواهد داشت. جواب بهینه جوابی است که تابع مطلوبیت کلی $D(y)$ را بیشینه کند [۲۱].

شکل ۶ متغیرهای ورودی محاسبه شده برای این بهینه سازی همزمان سه متغیر خروجی مسئله حاضر را نشان می‌دهد. ردیف اول شکل ۶ نشان دهنده تابع مطلوبیت و نحوه تغییرات آن با تغییر متغیرهای ورودی است. مقدار متغیرهای ورودی متناظر با نقطه بیشینه تابع مطلوبیت با علامت مثبت در شکل نشان داده شده است. ردیف‌های دوم تا چهارم در شکل مربوط به خروجی‌های فرآیند بوده و مقدار هر خروجی متناظر با متغیر ورودی مطلوب با علامت مثبت نمایش داده شده است. در نهایت مقدار ولتاژ ۱۱/۹ ولت و سرعت حرکت خطی ابزار درون قطعه کار ۱۱ میلی‌متر بر ثانیه، گپ آند با کاتد ۰/۵ میلی‌متر و شکل ابزار با مقطع مثلثی به عنوان متغیرهای بهینه بدست آمد.



شکل ۶. نتایج بهینه‌سازی همزمان

Fig. 6. Results of multi-objective optimization

۷- نتیجه‌گیری

مسئله مورد بحث در این مقاله پرداخت الکتروشیمیایی سطوح داخلی بوش‌های فولادی CK۴۵ بود به نحوی که مقادیر از پیش تعیین شده‌ای برای خطای هندسی مجاز و زبری سطح داخلی بدست آید و در عین حال نرخ برداشت مواد بیشینه باشد. در این راستا دستگاه پرداخت الکتروشیمیایی سوراخ داخلی قطعات بوشی شکل ساخته شد و با توجه به پیچیدگی‌های عملیات پرداخت الکتروشمیایی، مطالعه تجربی سیستماتیک فرآیند به کمک روش متدولوژی سطح پاسخ صورت گرفت و از طرح باکس–بنکن برای طراحی آزمایش‌ها تجربی و از بهینه سازی همزمان در متدولوژی سطح پاسخ برای حصول اهداف مسئله استفاده شد و نتایج زیر بدست آمد:

1- افزایش ولتاژ باعث افزایش زیاد نرخ برداشت مواد و افزایش اندک خطای هندسی پرداخت‌کاری می‌شود. از طرفی در محدوده آزمایشی مشخص شده در این تحقیق، ولتاژ الکتریکی اثر چندانی بر روی زبری سطح ندارد.

2- افزایش سرعت پیشروی ابزار اثر ضعیفی بر روی نرخ برداشت مواد و زبری سطح داشت و در عین حال باعث افزایش اندکی در خطای هندسی شد.

3- فاصله ابزار از قطعه کار (کاتد از آند) که با قطر ابزار تنظیم می‌شد بیشترین اثر را بر روی زبری سطح نشان داد و با افزایش گپ بین ابزار و قطعه زبری سطح نیز افزایش می‌یافت.

4- شکل ابزار در این تحقیق از حالت استونه ای شکل به حالت پولی با مقطع گرد و مثلثی تغییر یافت و مدلسازی تجربی نشان داد شکل ابزار اثر مهمی روی خطای هندسی پرداخت الکتروشیمیایی دارد و با تبدیل ابزار از حالت استوانه‌ای به حالت پولی با مقطع مثلثی و با تیز شدن سطح پیرامونی ابزار، خطای هندسی پرداخت الکتروشیمیایی کاهش می‌یابد.

این تحقیق نشان داد هر چهار پارامتر ولتاژ، نرخ پیشروی ابزار، فاصله گپ میان ابزار و قطعه و فرم ابزار پارامترهای مؤثر در فرآیند بوده و کنترل زبری سطح، دقت ابعادی، و نرخ برداشت مواد با کنترل این پارامترها قابل انجام است. در نهایت مقدار ولتاژ ۱۱/۹ ولت و سرعت حرکت خطی ابزار درون قطعه کار ۱۱ میلی‌متر بر ثانیه، گپ آند با کاتد ۰/۵ میلی‌متر و شکل ابزار با مقطع مثلثی به عنوان متغیرهای بهینه جهت دستیابی به نرخ برداشت مواد بیشینه (برابر با ۰/۷۲۵ گرم بر دقیقه)، زبری سطح دو میکرومتری و خطای هندسی ۰/۰۱ میلیمتری بدست آمد. تمامی این نتایج حاکی از این است که به کمک روش سیستماتیک معرفی شده در این مقاله می‌توان بخش مهمی از مسائل واقعی مهندسی ساخت و تولید که مرتبط با حصول شرایط بیشینه یا کمینه برای برخی متغیرهای هدف و در عین حال حفظ سایر متغیرهای هدف در محدوده مجاز است، را حل نمود.

۸- فهرست علائم

a	جرم اتمی
A	اختلاف پتانسیل
a_i	ضرایب رگرسیونی
B	نرخ پیشروی
β	مقدار هدف
σ	مقدار کمینه متغیر پاسخ
C	فاصله گپ
D	فرم ابزار
$D(y)$	تابع مطلوبیت کلی
$d_i(y_i)$	تابع مطلوبیت جزئی
F	ثابت فارادی
I	جریان الکتریکی
I	جریان الکتریکی
i, k	اندیس‌های شمارنده
k_i	ضریب اهمیت متغیر i
K	تعداد متغیرهای ورودی
M	جرم برداشته شده
N	تعداد آزمایش‌ها
R_a	زبری سطح میانگین
t	زمان
T	تعداد تکرار آزمایش نقطه مرکزی
v	ظرفیت الکتروشیمیایی
x_i	متغیرهای ورودی
y	پارامتر خروجی

منابع

[1] A. Gomez-Gallegos, F. Mill, A. Mount, Surface finish control by electrochemical polishing in stainless steel 316 pipes, Journal of Manufacturing Processes, 23 (2016) 83-89.

[2] H.A.-G. El-Hofy, Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes, McGraw Hill Professional, 2005.

[3] R. Singh, S. Dhami, N. Rajput, Comparison of EDM and ECM machined AISI 304 steel: Surface roughness, hardness and morphological characteristics, Materials Today: Proceedings, 48 (2021) 965-974.

[4] A. Kumar, B. Pabla, Review on optimized process parameters of electrochemical machining and its variants, Materials Today: Proceedings, (2021) 46, 10854-10860.

[5] H. Zhao, J. Van Humbeeck, J. Sohier, I. De Scheerder, Electrochemical polishing of 316L stainless steel slotted tube coronary stents, Journal of Materials science: materials in medicine, 13(10) (2002) 911-916.

[6] C. Huang, C. Hsu, The electrochemical polishing behavior of duplex stainless steel (SAF 2205) in phosphoric-sulfuric mixed acids, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 34(9) (2007) 904-910.

[7] A. Jerin, K. Karunakaran, Machinability investigation

and optimizing process parameters in ECM of stainless steel− 12X18H10T for minimizing surface roughness, Materials Today: Proceedings, 3 (2021) 603.

[8] Y. Liu, N. Qu, Investigation on the performance of macro electrochemical machining of the end face of cylindrical parts, International Journal of Mechanical Sciences, 169 (2020) 105333.

[9] L. Tang, X. Feng, K. Zhai, Y. Ji, Z. Wang, Q. Lei, L. Ren, Gap flow field simulation and experiment of electrochemical machining special-shaped inner spiral tube, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 100(9) (2019) 2485-2493.

[10] B. Wang, J. Zhu, Effect of electrochemical polishing time on surface topography of mild steel, Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material, 14(3) (2007) 236-239.

[11] E.-S. Lee, Machining characteristics of the electropolishing of stainless steel (STS316L), The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 16(8) (2000) 591-599.

[12] S.-G. Choi, S.-H. Kim, W.-K. Choi, E.-S. Lee, The optimum condition selection of electrochemical polishing and surface analysis of the stainless steel 316L by the Taguchi method, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 82(9-12) (2016) 1933-1939.

[13] H. Hocheng, P. Pa, Electropolishing and electrobrightening of holes using different feeding electrodes, Journal of Materials Processing Technology, 89 ((1999) 440,446.

[14] Y. Wang, Z. Xu, J. Liu, A. Zhang, Z. Xu, D. Meng, J. Zhao, Study on flow field of electrochemical machining for large size blade, International Journal of Mechanical Sciences, 190 (2021) 106018.

[15] S. Zhang, J. Liu, X. Lin, Y. Huang, M. Wang, Y. Zhang, T. Qin, W. Huang, Effect of electrolyte solutions on the electrochemical dissolution behavior of additively manufactured Hastelloy X superalloy via laser solid forming, Journal of Alloys and Compounds, 878 (2021) 160395.

[16] D.C. Montgomery, Design and analysis of experiments, John wiley & sons, 2017.

[17] G. Ye, L. Ma, L. Li, J. Liu, S. Yuan, G. Huang, Application of Box–Behnken design and response surface methodology for modeling and optimization of batch flotation of coal, International Journal of Coal Preparation and Utilization, 40(2) (2020) 131-145.

[18] A.S. Souza, W.N. dos Santos, S.L. Ferreira, Application of Box–Behnken design in the optimisation of an on-line pre-concentration system using knotted reactor for cadmium determination by flame atomic absorption spectrometry, Spectrochimica acta part B: atomic spectroscopy, 60(5) (2005) 737-742.

[19] M.J. Anderson, P.J. Whitcomb, RSM simplified: optimizing processes using response surface methods for design of experiments, Productivity press, 2016.

[20] D. Landolt, Fundamental aspects of electropolishing, Electrochimica Acta, 32(1) (1987) 1-11.

[21] H. Akçay, A.S. Anagün, Multi response optimization application on a manufacturing factory, Mathematical and Computational Applications, 18(3) (2013) 531-538.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Nemati, R. Moharami, M. M. Mohammadi , Experimental Investigation of Electrochemical Finishing Process Using Box-Behnken Design in Response Surface Methodology, Amirkabir J. Mech Eng., 54(6) (2022) 1409-1422.

DOI: 10.22060/mej.2022.20708.7299