



تحلیل تجربی نرخ برداشت ماده در الکترولیز موضعی فولاد زنگ نزن آستنیتی در محلول‌های الکترولیت حاوی نیترات و کلراید سدیم

سهیلا حیدری^۱، محمد مصطفی محمدی^{۱*}، لیلا قلمچی^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- گروه شیمی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: dr.mohammadi@znu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۱ آبان ۱۴۰۳

پذیرش: ۶ بهمن ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

نرخ برداشت ماده

الکترولیز موضعی

شرایط الکترولیت

بهینه‌سازی

چکیده

افزایش نرخ برداشت ماده در فرایندهای ماشین‌کاری الکتروشیمیایی مبتنی بر الکترولیز از اهمیت بسزایی برخوردار است. از طرفی با توجه به طبیعت پیچیده فرایند الکترولیز موضعی، انجام مطالعات سیستماتیک تجربی به کمک روش‌های طراحی آزمایش کمک شایانی به تحلیل این گونه فرایندها می‌نماید. در این مقاله فرایند الکترولیز موضعی فولادهای زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ مورد مطالعه قرار گرفته است. الکترولیت مورد استفاده ترکیبی از نیترات سدیم و کلراید سدیم است. با استفاده از روش مرکب مرکزی در روش سطح پاسخ، آزمایش‌های لازم برای تحلیل اثرات پارامترهای الکترولیت در کنار دهانه ماشین‌کاری روی نرخ برداشت ماده طراحی شده است. این مطالعه تجربی برهمکنش اثرات پی‌هاش الکترولیت و دهانه ماشین‌کاری را بر نرخ برداشت ماده مورد ارزیابی قرار داده است. از طرفی با استفاده از روش سطح پاسخ، شرایط لازم برای بدست آوردن پاسخ بهینه برای نرخ برداشت ماده بررسی شده است. نتایج نشان داده است که نرخ برداشت ماده بیشینه زمانی بدست می‌آید که مقدار اندازه دهانه ماشین‌کاری کمینه بوده و مقدار غلظت کلراید سدیم ۵۵.۹۶ گرم بر لیتر باشد.

Experimental analysis of the material removal rate in localized electrolysis of austenitic stainless steel in (NaCl-NaNO₃) electrolyte solutions

Soheila Heidari¹, Mohammad Mostafa Mohammadi^{1*}, Leila Ghalamchi²

1- Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2- Department of Chemistry, University of Zanjan, Zanjan, Iran

* Corresponding Author's Email: dr.mohammadi@znu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 11 November 2024

Accepted: 25 January 2025

Keywords:

Material Removal Rate

Localized Electrolysis

Electrolyte Condition

Optimization

Abstract

Increasing the material removal rate in machining processes is of great importance. On the other hand, considering the complex nature of localized electrolysis, conducting systematic experimental studies using experimental design methods is of great help in analyzing such processes. In this paper, the localized electrolysis process of austenitic stainless steel AISI304 has been studied. The electrolyte used is a mixture of sodium nitrate and sodium chloride. Using the central composite design in response surface methodology, the necessary experiments have been designed to analyze the effects of sodium nitrate and sodium chloride concentrations along with machining gap and Ph of the electrolyte on the material removal rate. This experimental study has evaluated the interaction of the effects of electrolyte pH and inter-electrode gap on the output parameters. Also, the RSM optimization method has been explored to determine the essential criteria for achieving the optimal response for material removal rate of the machining. The maximum material removal rate may be achieved when the machining gap is minimum and the concentration of NaCl is 55.96 g/l.

Please cite this article using:

Heidari S, Mohammadi MM, Ghalamchi L. Experimental analysis of the material removal rate in localized electrolysis of austenitic stainless steel in (NaCl-NaNO₃) electrolyte solutions. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Feb 19;11(12):35-42. doi: 10.22034/ijme.2025.488207.2026 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

در روش الکترولیز موضعی که اساس ماشین‌کاری الکتروشیمیایی ماسکی (TMECM^۱) است، قسمت‌هایی از فلز توسط ماده ی عایق الکتریکی به نام ماسک پوشش داده می‌شود و سایر قسمت‌ها در معرض انحلال آندی قرار می‌گیرند. این روش به دو حالت کلی قابل انجام است. در حالت اول، روی یک سمت قطعه لایه ماسک قرار گرفته و تنها یک سمت از قطعه کار در معرض انحلال آندی قرار می‌گیرد و در حالت دوم هر دو سمت قطعه کار توسط ماسک پوشیده شده و همزمان در معرض واکنش‌های الکتروشیمیایی قرار می‌گیرند [۱]. در فرایند الکترولیز موضعی با ایجاد اختلاف پتانسیل میان قطعه کار (اند) و ابزار (کاتد) واکنش‌های الکتروشیمیایی در بستر مایع الکترولیت صورت می‌گیرد و این واکنش‌ها با توجه به جنس و شرایط الکترولیت و قطعه کار موجب وقوع اثرات متالورژیکی بر سطح قطعه کار می‌گردد و در نهایت نرخ و کیفیت ماشین‌کاری وابسته به این واکنش‌ها خواهد بود. از سوی دیگر در این فرایند مایع الکترولیت ممکن است ساکن و یا دارای جریان باشد [۲، ۳].

افزایش بازدهی ماشین‌کاری از اهداف مهم محققین در طراحی فرایند TMECM است. در این راستا آپادهای و همکاران [۴] اثرات پارامترهایی مانند ولتاژ، نرخ جریان و غلظت الکترولیت را روی نرخ برداشت^۲ ماده فولادها بررسی کردند. آن‌ها از الکترولیت‌های حاوی یون‌های کلراید و مس برای باربرداری استفاده کردند. آن‌ها متوجه شدند که افزودن یون‌های مس دو ظرفیتی به الکترولیت باعث کاهش ظرفیت الکتروشیمیایی انحلال آهن از ۳+ به ۲+ شده و بر اساس قانون فارادی، نرخ برداشت ماده افزایش می‌یابد. چان و همکاران [۵] و عملیات ماشین‌کاری الکتروشیمیایی ماسکی به صورت پالسی برای ماشین‌کاری اینوار استفاده کردند. آن‌ها رابطه میان هدایت الکتریکی الکترولیت و قابلیت ماشین‌کاری را تحلیل کردند. در این مطالعه از چهار نوع الکترولیت استفاده شد. مطالعات نشان داد در حین ماشین‌کاری لایه‌های غیر فعال روی اینوار بوجود می‌آید و قابلیت ماشین‌کاری به ظرفیت فرایند برای شکستن و از بین بردن این لایه‌ها بستگی دارد و وابستگی چندانی به هدایت الکتریکی الکترولیت ندارد. کیان و همکاران [۶] اثر ترکیب الکترولیت روی میزان ماشین‌کاری جانبی در TMECM را بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که استفاده از نیترات سدیم می‌تواند باعث کاهش ماشین‌کاری جانبی در فرایند TMECM گردد. تسای و همکاران [۷] از الکترولیت نیترات سدیم به عنوان الکترولیت برای ماشین‌کاری فولاد زنگ نزن ۳۰۴ استفاده کردند و دریافتند که غلظت الکترولیت تاثیر چشمگیری روی زمان ماشین‌کاری دارد ولی اثر چندانی روی میزان گشادی کناری نهایی نخواهد داشت.

استفاده از روش سطح پاسخ امکان تحلیل دقیق اثرات خطی و غیر خطی پارامترهای فرایند الکترولیز موضعی را فراهم می‌کند [۸]. در مطالعات پیشین عموماً تحلیل‌های خطی روی فرایند انجام شده و به تحلیل حساسیت بسنده شده است. در مطالعه حاضر برهمکنش پارامترهای فرایندی مانند پی‌هاش الکترولیت و دهانه ماشین‌کاری (IEG) روی نرخ برداشت ماده مورد بررسی قرار می‌گیرد و به سوالاتی مانند علت وابستگی اثرات دهانه ماشین‌کاری و پی‌هاش الکترولیت پاسخ داده می‌شود. مطالعات پیشین فاقد این سطح از تحلیل اثرات پارامتری روی فرایند الکترولیز موضعی بوده است.

۲- مواد و روش‌ها

فلز مورد مطالعه در این مقاله فولاد زنگ نزن ۳۰۴ است که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است. این شناسایی ترکیب با استفاده از روش کوانتومتری و بر اساس استاندارد ASTM1086 صورت گرفته است.

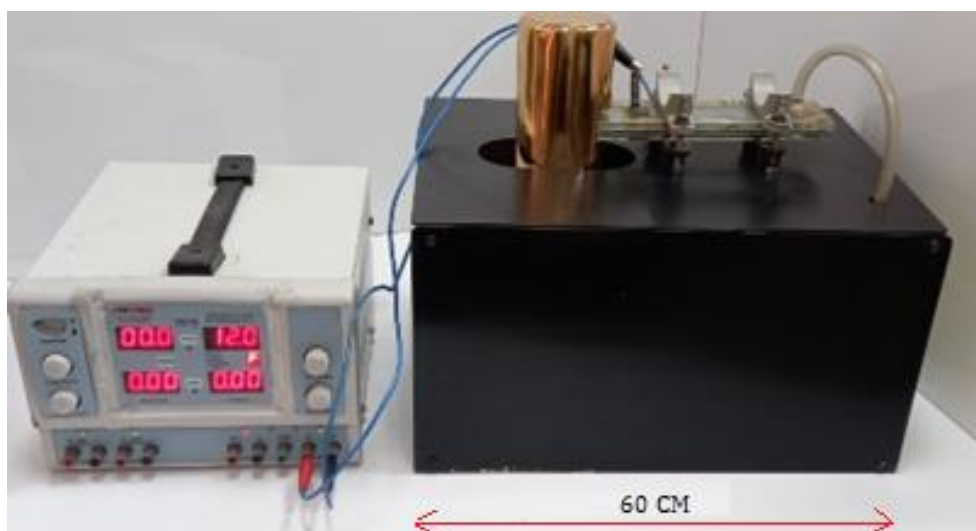
عملیات ماشین‌کاری تحت ولتاژ ۱۲ ولت مستقیم توسط منبع تغذیه تجاری با مدل و با الکتروود گرافیتی در محفظه الکترولیز موضعی نشان داده شده در شکل ۱ صورت گرفت. برای انجام ماشین‌کاری قسمتی از قطعه توسط لایه پلیمری پوشانده شد و سطح مربعی با طول یک سانتیمتر در معرض ماشین‌کاری قرار گرفت. فاصله الکترودهای از یکدیگر قبل از انجام عملیات بصورت قابل تنظیم بود. ماشین‌کاری شامل یک قید و بست برای تنظیم مکان الکترودهای در فاصله مناسب نسبت به هم، و مجرای برای عبور الکترولیت بود. دمای الکترولیت ۲۵ درجه ثابت نگه داشته شد. برای این کار از حجم زیادی از الکترولیت در دمای ۲۵ استفاده شد به نحوی که تغییر دمایی پس از انجام ماشین‌کاری در الکترولیت بر اساس اندازه‌گیری دمایی صورت گرفته، کمتر از ۱ درجه بود. مدت زمان عملیات شش دقیقه انتخاب شد.

¹ Through Mask Electrochemical Machining

² MRR

جدول ۱ نتایج کوانتومتری استیل ۳۰۴

عنصر	آهن	کربن	سیلیسیم	منگنز	فسفر	گوگرد	کرم	مولیبدن	نیکل	وانادیم	مس	تیتانیوم
مقدار	70.25	0.075	0.073	1.66	0.037	0.17	18.36	0.34	7.90	0.63	0.4	0.005



شکل ۱ تصویر دستگاه الکترولیز موضعی

۳- آزمون‌های طراحی شده

در این پژوهش ولتاژ مستقیم ۱۲ ولت به کاتد و آند اعمال شد و فرآیند ماشین‌کاری در غلظت‌های متغیر از سدیم کلراید و سدیم نیترات (۱۰ تا ۸۰ گرم بر لیتر)، pH در بازه‌ی ۱ تا ۱۲ و فاصله‌ی بین الکتروده (IEG) و قطعه‌کار در بازه‌ی ۰.۵ تا ۲.۵ میلی‌متر و در مدت زمان ثابت شش دقیقه و حجم ثابت یک لیتر آب مقطر انجام شد. برای اسیدی کردن محلول الکترولیت از محلول رقیق HCl و برای قلیایی کردن آن و تنظیمات pH از NaOH استفاده شده است. متغیرهای ورودی و میزان تغییرات آن‌ها در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲ متغیرهای ورودی و بازه تغییرات آن‌ها در طی آزمون‌های تجربی

شماره	پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴	سطح ۵
1	غلظت نمک (NaNO ₃) (g/l)	10	27.5	45	62.5	80
2	غلظت نمک (NaCl) (g/l)	10	27.5	45	62.5	80
3	دهانه ماشین‌کاری (mm)	0.5	1	1.5	2	2.5
4	pH	1	3.75	6.5	9.25	12

برای طراحی آزمون‌های تجربی از روش مرکب مرکزی در متدولوژی سطح پاسخ استفاده شد. روش مرکب مرکزی آزمون‌ها و نقاط حالت لازم برای برازش مرتبه دوم و برازش نقاط پاسخ با رویه‌های مرتبه دو را فراهم می‌کند و ضرایب نامعین معادله برازشی مرتبه دو در روش سطح پاسخ را بدست می‌آورد [۹]. در واقع روش مرکب مرکزی فضای حالتی شبه مکعبی شامل نقطه مرکزی و نقاط محوری معرفی می‌کند و با تکرار آزمایش‌ها در نقطه مرکزی علاوه بر تامین اطلاعات کافی برای برازش مرتبه دو، امکان انجام آزمون‌های تکرارپذیری در RSM را فراهم می‌سازد.

در این مطالعه تعداد متغیرهای ورودی در آزمایش‌های مطابق جدول ۲، چهار عدد بود که در ۵ سطح تغییر می‌کرد. در مجموع به تعداد ۳۱ آزمون صورت گرفت و در نقطه مرکزی، آزمایش‌ها ۷ بار تکرار شد. آزمایش‌های طراحی شده در جدول ۳ آمده است. متغیر خروجی نیز نرخ برداشت ماده ماشین‌کاری شده بود. در ستون‌های آخر جدول نتایج برای هر آزمون نشان داده شده است.

جدول ۳ آزمون‌های طراحی شده و نتایج آن‌ها

شماره نمونه	شماره آزمون	غلظت نیترات سدیم (g/l)	غلظت نمک طعام (g/l)	دهانه ماشین‌کاری (mm)	پی‌هاش	نرخ برداشت ماده (mm/min)
8	1	62.5	27.5	2.0	9.25	0.025
13	2	62.5	62.5	1.0	3.75	0.068
24	3	45	80	1.5	6.50	0.048
6	4	62.5	27.5	1.0	9.25	0.053
25	5	45	45	1.5	6.50	0.051
4	6	27.5	27.5	2.0	9.25	0.027
11	7	27.5	62.5	2.0	3.75	0.036
30	8	45	45	1.5	6.50	0.049
2	9	27.5	27.5	1.0	9.25	0.050
16	10	62.5	62.5	2.0	9.25	0.042
7	11	62.5	27.5	2.0	3.75	0.028
27	12	45	45	1.5	6.50	0.050
15	13	62.5	62.5	2.0	3.75	0.038
23	14	45	10	1.5	6.50	0.011
1	15	27.5	27.5	1.0	3.75	0.045
31	16	45	45	1.5	6.50	0.053
3	17	27.5	27.5	2.0	3.75	0.024
20	18	45	45	1.5	6.50	0.030
26	19	45	45	1.5	6.50	0.039
22	20	80	45	1.5	6.50	0.060
14	21	62.5	62.5	1.0	9.25	0.058
12	22	27.5	62.5	2.0	9.25	0.039
9	23	27.5	62.5	1.0	3.75	0.058
28	24	45	45	1.5	6.50	0.052
5	25	62.5	27.5	1.0	3.75	0.058
29	26	45	45	1.5	6.50	0.058
21	27	10	45	1.5	6.50	0.041
19	28	45	45	0.5	6.50	0.073
17	29	45	45	1.5	1.00	0.041
18	30	45	45	1.5	12.0	0.054
10	31	27.5	62.5	1.0	9.25	0.054

۴- ارزیابی و تحلیل رویه‌های پاسخ برای نرخ برداشت ماده

نرخ برداشت ماده یا سرعت الکترولیز موضعی می‌تواند بر حسب وزن ماده برداشت شده در واحد زمان یا حجم و یا عمق پیشروی ماشین‌کاری در واحد زمان بیان شود [۱۰]. راه‌های مختلفی برای اندازه‌گیری نرخ برداشت ماده وجود دارد. در این مقاله برای اندازه‌گیری نرخ برداشت ماده مقدار متوسط عمق ناحیه ماشین‌کاری شده قطعه‌کار اندازه‌گیری شده و به زمان ماشین‌کاری تقسیم شده است و نرخ برداشت ماده بر حسب میلی‌لیتر بر دقیقه ارائه شده است. اندازه‌گیری عمق قسمت ماشین‌کاری شده توسط ساعت اندازه‌گیری با دقت ۰,۰۱ میلی‌متر و با چند بار تکرار صورت گرفت و میانگین عمق ماشین‌کاری جهت محاسبه نرخ برداشت ماده محاسبه شد. لازم به ذکر است تکرار اندازه‌گیری‌ها جهت کاهش خطای تصادفی اندازه‌گیری صورت گرفته است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری نرخ برداشت ماده در جدول ۳ آمده است.

تحلیل واریانس ابزاری مناسب برای صحت‌سنجی مدل‌های برازش شده تجربی می‌باشد [۱۱-۱۳]. جدول ۴ نتایج تحلیل واریانس داده‌های حاصل از آزمون‌های ماشین‌کاری قطعه‌کار استیل ۳۰۴ را برای متغیر پاسخ نرخ برداشت نشان می‌دهد. بر اساس تحلیل واریانس تنها دو متغیر اندازه دهانه ماشین‌کاری (متغیر B) و غلظت NaCl (متغیر D) متغیرهای موثر با مقادیر پارامترهای احتمالی کمتر از ۰,۰۵ بودند و دو متغیر دیگر یعنی PH الکترولیت و غلظت نمک نیترات سدیم غیر موثر بودند. بنابراین کلیه تحلیل‌ها بر اساس متغیرهای موثر انجام شده و متغیرهای غیر موثر از تحلیل‌ها حذف شدند.

مقدار P-Value کمتر از ۰,۰۵ نشان دهنده موثر بودن پارامترها با احتمال بیش از ۹۵ درصد می‌باشد. همچنین مقدار بالای ۰,۵۴۵ از P-Value برای کمبود برازشی مدل، نشان دهنده صحت مدل ارائه شده است [۸]. از نظر آماری پارامترهای اندازه دهانه ماشین‌کاری و میزان نمک کلرید سدیم بیشترین تاثیر را روی نرخ برداشت ماده دارند. از طرفی در میان جملات مرتبه دوم، احتمال

تأثیر غلظت نمک طعام نسبت به سایر متغیرها بیشتر است. بر اساس نتایج آزمون‌ها، مدل ریاضی حاکم بر مسئله برای نرخ برداشت ماده به صورت زیر قابل ارائه است:

$$y = 0.031875 - 0.0225 B + 0.00191 D - 0.000017 D^2 \quad (1)$$

جدول ۴ تحلیل واریانس برای نرخ برداشت ماده

آماره P	آماره F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	
0.000	92.86	0.001188	1	0.003038	B - دهانه ماشین کاری
0.000	36.31	0.000811	1	0.000988	D - غلظت نمک طعام
0.000	24.81	0.000811	1	0.000811	D ²
		0.000033	27	0.000883	باقی مانده ها
0.545	0.82	0.000028	5	0.000139	کمبود برازش
		0.000034	22	0.000744	خطای خالص
			30	0.005720	کل

نتایج حاصل از تحلیل دقتی مدل در جدول ۵ آمده است. آماره R^2 ضریب دترمینان چندگانه نام داشته و معیاری از مقدار کاهش تغییر پذیری^۱ یا پراکندگی در پاسخ خروجی بر اثر تغییر متغیرهای ورودی است. مقدار R^2 مابین صفر و یک است و بدین معنی است که با افزایش آن میزان پراکندگی خروجی‌ها کمتر می‌شود. البته مقدار زیاد و نزدیک به یک این پارامتر لزوماً به معنای خوب بودن مدل رگرسیونی نیست. با اضافه شدن یک متغیر به مدل، مقدار R^2 افزایش می‌یابد هر چند که این متغیر از نظر آماری اثر مهمی در خروجی نداشته باشد. بنابراین ممکن است مدل‌هایی شامل متغیرهای زیاد بوده و R^2 شان بالا باشد ولی مدل در کل ضعیف باشد. برای رفع این نقیصه از آماره‌های ($Adjusted R^2$) استفاده می‌کنند و اگر تفاوت این دو آماره کمتر از ۲۰ درصد باشد مدل دقت بالایی خواهد داشت [۸]. در جدول ۲ مقادیر R^2 برای مدل بر حسب درصد بیان شده است.

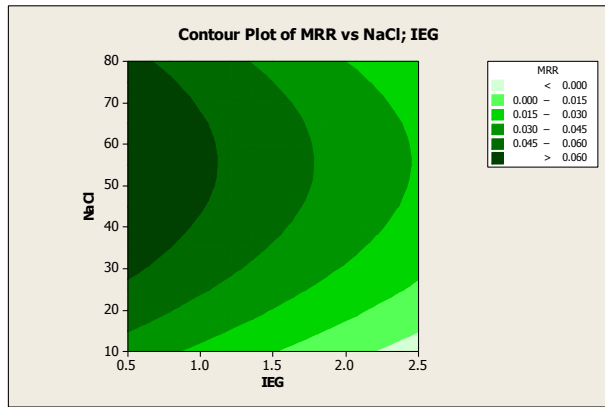
جدول ۵ تکرار پذیری مدل ایجاد شده برای پاسخ نرخ برداشت ماده

آماره F	R^2
84.56	R^2
82.84	R^2 تنظیم شده

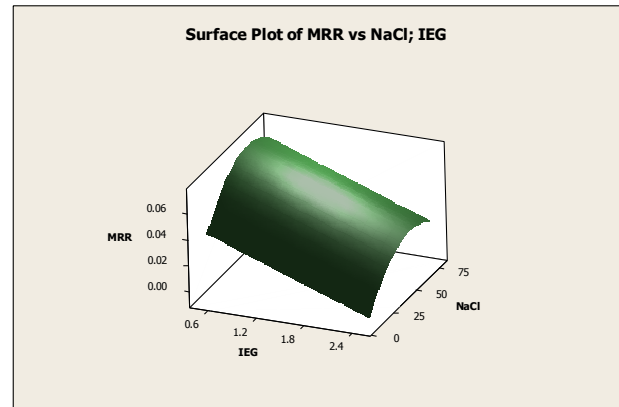
با توجه به این‌که اختلاف مقدار R^2 با R^2 تنظیم شده، کمتر از ۲۰ درصد (معادل ۰,۲) است لذا تکرار پذیری مدل قابل تایید است [۱۳]. در ادامه نتایج حاصل از الکترولیز موضعی بر روی استیل ۳۰۴ توسط نمودارهای دو بعدی مربوط به اثر فاصله بین قطعه کار و الکتروود و غلظت نمک‌ها روی نرخ برداشت ماده نشان داده شده است.

تصاویر نشان داده شده در شکل ۲ نمودارهای گراف دو بعدی اثر متغیرهای موثر روی خروجی نرخ برداشت ماده را نشان می‌دهند. شکل ۲-الف تأثیر فاصله الکتروود و قطعه کار (IEG) را در کنار غلظت نمک NaCl بر نرخ برداشت ماده در قالب رویه سه بعدی در فرآیند الکترولیز موضعی نشان می‌دهد. افزایش فاصله بین الکتروودها باعث افزایش طول مسیر حرکت یون‌ها در الکترولیت می‌شود و طبق قانون اهم با افزایش طول مسیر و افزایش مقاومت الکتریکی تحت ولتاژ ثابت، مقدار جریان الکتریکی کاهش می‌یابد و همین امر باعث کاهش عمق ماشین کاری می‌شود. با توجه به این‌که در تمامی آزمایش‌ها سطح ماشین کاری ثابت در نظر گرفته شده و با فرض ثابت ماندن مقاوت ویژه، با کم شدن فاصله بین الکتروودها، مقاومت کاهش یافته و جریان افزایش می‌یابد. در نتیجه نرخ برداشت ماده نیز افزایش می‌یابد. این تفسیر در صورتی صحیح است که مقاومت ویژه ثابت باشد. اگر لجن‌ها خوب شسته نشوند ممکن است با کاهش فاصله بین الکتروودها، مقاومت ویژه افزایش یابد.

¹ Variability



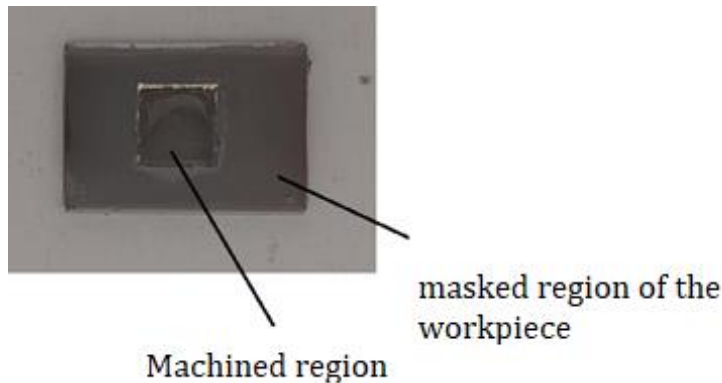
(ب)



(الف)

شکل ۲ نمودارهای دو بعدی و سه بعدی نرخ برداشت ماده برحسب میلی‌متر بر دقیقه

شکل ۲-ب اثرات هم‌زمان فاصله بین الکترودها و غلظت سدیم کلراید بر نرخ ماشین‌کاری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشهود است میزان نرخ برداشت ماده با افزایش مقدار ماده‌ی سدیم کلراید ابتدا بیشتر و سپس کمتر شده است. بررسی شکل نشان می‌دهد با افزایش مقدار نمک سدیم کلراید از غلظت‌های کم تا غلظت حدود ۵۶ گرم بر لیتر نرخ خوردگی افزایش یافته است که علت آن افزایش مقدار یون‌های الکترولیت و افزایش هدایت ناشی از آن است. همچنین به نظر می‌رسد با افزایش بیشتر از ۵۶ گرم بر لیتر از نمک سدیم کلراید، به دلیل تولید لجن بیشتر و اثرات مضر آن، نرخ ماشین‌کاری کاهش می‌یابد. تاثیر غلظت سدیم کلراید در مقادیر بالاتر از حدود ۵۶ گرم بر لیتر، به علت تولید لجن زیاد، موجب کاهش نرخ برداشت ماده می‌شود. در شکل ۳ قطعه ماشین‌کاری شده با بستر ماشین‌کاری مربع شکل با طول یک سانتیمتر مشاهده می‌شود. سطح اطراف محل ماشین‌کاری شده قبل از ماشین‌کاری با ماسک پلیمری پوشانده شده است.



شکل ۳ قطعه ماشین‌کاری شده با روش الکترولیز موضعی

دستیابی به بیشترین نرخ برداشت ماده از اهداف اولیه این مطالعه است. برای دستیابی به این هدف عملیاتی می‌توان از روش بهینه‌سازی در روش سطح پاسخ استفاده کرد. در این روش، 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 و متغیرهای ورودی به نحوی بدست می‌آید که تابع مطلوبیت بهینه‌سازی را بیشینه نماید. با مشخص شدن خطوط تراز پاسخ از مدل استخراج شده RSM، 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 [۱۴]. نتایج حاصل از بهینه‌سازی پارامترهای ورودی نسبت به پاسخ نرخ برداشت ماده در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶ نتایج بهینه‌سازی نرخ برداشت ماده

مقدار بهینه	متغیر ورودی
0.5	دهانه ماشین‌کاری
55.96	(g/L) NaCl

همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شده است در مسئله حاضر برای مقادیر ۵۵٫۹۶ گرم بر لیتر نمک سدیم کلراید و فاصله ۰٫۵ میلی‌متر از الکترودها بیشترین نرخ برداشت ماده به میزان ۰٫۰۷۴۲ میلی‌متر بر دقیقه حاصل خواهد شد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله نرخ برداشت ماده در فرایند الکترولیز موضعی روی فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ مورد مطالعه قرار گرفت. متغیرهای ورودی آزمون‌های تجربی عبارت بودند از غلظت نمک‌های سدیم نیترات و سدیم کلراید، PH و فاصله‌ی بین الکترودها که اثر آن‌ها بر روی نرخ برداشت بررسی شد. براساس روش سطح پاسخ تعداد ۳۱ آزمایش طراحی و انجام شد و یک مدل تجربی در قالب چند جمله‌ای مرتبه دو برای پیش بینی نرخ برداشت ماده و کنترل و بهینه‌سازی آن ارائه شد. نتایج در مجموع نشان می‌داد متغیرهای PH الکترولیت و غلظت نمک نیترات سدیم تاثیر چندانی روی نرخ برداشت ماده نداشته ولی دو متغیر اندازه دهانه ماشین‌کاری و غلظت نمک کلرید سدیم متغیرهای موثر بر نرخ برداشت ماده می‌باشند. نتایج نشان داد که نرخ برداشت ماده با کاهش اندازه دهانه ماشین‌کاری تا نیم میلی‌متر مستقیماً افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش غلظت نمک کلرید سدیم نرخ برداشت ماده ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. نتایج تحلیل واریانس در مجموع نشان می‌دهد نرخ برداشت ماده تابعی مرتبه دو از متغیرهای بررسی شده بوده و بخصوص برای غلظت الکترولیت نمک طعام، به طور معنی‌داری غیر خطی می‌باشد. همچنین مدل تجربی ارائه شده در تحقیق می‌تواند به خوبی نرخ برداشت ماده در الکترولیز موضعی حاضر را برای محلول دو جزئی نیترات و کلرید سدیم پیش‌بینی کند و برای بهینه‌سازی فرایند و همچنین برای ارزیابی‌های آتی در زمینه شبیه‌سازی فرایند الکترولیز موضعی مورد استفاده قرار گیرد.

فهرست علائم

- A پی‌هاش محلول
 B دهانه ماشین‌کاری (میلی متر)
 C غلظت نیترات سدیم (گرم بر لیتر)
 D غلظت کلرید سدیم (گرم بر لیتر)
 γ متغیر خروجی (نرخ برداشت ماده)

زیر نویس‌ها

MRR نرخ برداشت ماده

References

- [1] Baldhoff T, Nock V, Marshall AT. Through-mask electrochemical micromachining. Journal of The Electrochemical Society. 2018 Nov 28;165(16):E841. doi: 10.1149/2.1341814jes
- [2] Wu WT, Shih WH, Wang CT. Fabrication of a metal protector for a fiber sensor using through-mask electrochemical micromachining with pulse DC power. Microsystem technologies. 2011 Apr;17:707-14. doi: 10.1007/s00542-011-1225-y
- [3] Li H, Zhang C, Wang G, Qu N. Study of the Hole-Formation Process with Different Mask Diameters via Through-Mask Electrochemical Machining. International Journal of Electrochemical Science. 2018 Mar 1;13(3):3006-22. doi: 10.20964/2018.03.46
- [4] Upadhyay RK, Kumar A, Srivastava PK. Experimental investigations of catalytic effect of Cu²⁺ during anodic dissolution of iron in NaCl electrolyte. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2017 Nov;231(13):2408-15. doi: 10.1177/0954405416629865

- [5] Chun KH, Kim SH, Lee ES. Analysis of the relationship between electrolyte characteristics and electrochemical machinability in PECM on invar (Fe-Ni) fine sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016 Dec;87:3009-17. doi: [10.1007/s00170-016-8648-7](https://doi.org/10.1007/s00170-016-8648-7)
- [6] Shuangqing Q, Feng J. Investigation on the aluminum-alloy surface with micro-pits Array generating by through double mask electrochemical machining. In *AASRI International Conference on Industrial Electronics and Applications (IEA 2015)* 2015 Sep (pp. 59-62). Atlantis Press. doi: [10.2991/iea-15.2015.16](https://doi.org/10.2991/iea-15.2015.16)
- [7] Tsai TH, Lin MY, Huang WL. The optimization of parameters using Taguchi-method in through-mask electrochemical machining. *Sādhanā*. 2021 Jun;46:1-7. doi: [10.1007/s12046-021-01606-3](https://doi.org/10.1007/s12046-021-01606-3)
- [8] Anderson MJ, Whitcomb PJ. RSM simplified: optimizing processes using response surface methods for design of experiments. Productivity press; 2016 Aug 5. doi: [10.1201/9781315382326](https://doi.org/10.1201/9781315382326)
- [9] Rahmani J, Mohammadi MM, Khamedi R. Modeling and multi-objective optimization of low-frequency vibration-assisted chemical machining using central composite design in response surface methodology. *Scientia Iranica*. 2024 Aug 1;31(13):980-92. doi: [10.24200/sci.2023.59618.6339](https://doi.org/10.24200/sci.2023.59618.6339)
- [10] Nemati B, Mohamamdi MM, Moharrami R. Multi-objective optimization of electrochemical finishing for attaining the required surface finish and geometric accuracy in the hole-making process. *Scientia Iranica*. 2024 Apr 1;31(4):283-94. doi: [10.24200/sci.2023.58585.5802](https://doi.org/10.24200/sci.2023.58585.5802)
- [11] Ebrahimi SM, Hadad M, Araee A, Ebrahimi SH. Experimental investigation of the effects of hot turning parameters on the cutting tool wear and surface roughness of AISI630 hardened stainless steel. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Apr 21;8(2):52-64. [In Persian]
- [12] Asgari M, Shakouri E. Study of the effect of roller burnishing process parameters on surface roughness and micro hardness of cast iron parts. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Mar 21;8(1):23-34. [In Persian]
- [13] Montgomery DC. Design and analysis of experiments. John wiley & sons; 2017. doi: [10.2307/1269713](https://doi.org/10.2307/1269713)
- [14] Akçay H, Anagün AS. Multi response optimization application on a manufacturing factory. *Mathematical and Computational Applications*. 2013 Dec;18(3):531-8. doi: [10.3390/mca18030531](https://doi.org/10.3390/mca18030531)