

## کواهی ارائه مقاله

بدینوسیله کواهی می شود مقاله مولفین

فرید ایلیچی، مسعود آزادی مقدم، فرهاد گلکامان و رحیم نریانی

با عنوان

استفاده از روش رویه پانخ در مدل سازی آماری و بهینه سازی فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی فولاد CK45

در اولین کنفرانس ملی مکانیک کاربردی پذیرفته و ارائه شده است.

کمیته علمی کنفرانس از شرکت و ارائه مقاله توسط نویسندگان قدردانی نموده و آرزو مند توفیق روز افزون ایشان در پیشبرد

علم و فناوری کشور عزیزمان ایران می باشد.

دکتر کامیار زفرمیان

دکتر رقیه مطلب زاده

دکتر علی رضایی

دبیر علمی کنفرانس

رئیس کنفرانس

رئیس دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز



## استفاده از روش رویه پاسخ در مدل سازی آماری و بهینه سازی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد Ck۴۵

فرید ایلچی<sup>۱</sup>، مسعود آزادی مقدم<sup>۲\*</sup>، فرهاد کلاهان<sup>۳</sup>، رحیم نریمانی<sup>۱</sup>

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری<sup>۱</sup>

دانشجو دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد<sup>۲</sup>

دانشیار گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد<sup>۳</sup>

### چکیده

در این تحقیق تاثیر پارامترهای تنظیمی ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر کیفیت سطح و نرخ برداشت ماده فولاد قالب Ck۴۵ مدل سازی و بهینه سازی شده است. روش ارائه شده با استناد به روش های آماری و بر داده های تجربی انجام یافته است. پارامترهای ورودی شامل جریان الکتریسیته، زمان های روشنی، ضریب عملکرد و ولتاژ کاری می باشند. همچنین زبری سطح و نرخ برداشت ماده به عنوان مشخصه های خروجی فرآیند در نظر گرفته شده است. به منظور گردآوری داده های مورد نیاز در انجام این تحقیق، آزمایشات تجربی با استفاده از روش پاسخ سطح انجام شده است. به منظور ایجاد ارتباط بین پارامترهای ورودی و مشخصه خروجی با بکارگیری تابع رگرسیونی، مدل ریاضی مبتنی بر مقادیر حاصل از نتایج تجربی طراحی گردیده است. نتایج آنالیز واریانس نشان می دهد که شدت جریان الکتریسیته به طور قابل توجهی کیفیت سطح و نرخ برداشت ماده را تحت تاثیر قرار می دهد. مدل ارائه شده همچنین قادر است سطوح مورد نظر از زبری سطح و نرخ برداشت ماده را برای فرآیند، با توجه به مقادیر پارامترهای کنترلی، بدست آورد.

**کلمات کلیدی:** ماشین کاری تخلیه الکتریکی، مدل سازی آماری، رگرسیون، آنالیز واریانس، روش رویه پاسخ.

## ۱- مقدمه

ماشین کاری به روش تخلیه الکتریکی<sup>۱</sup> یک شیوه ماشین کاری غیر تجاری است که در آن براده برداری با تخلیه الکتریکی بین ابزار و قطعه کار انجام می‌گیرد. در این روش، تخلیه الکتریکی باعث ایجاد حرارت موضعی بسیار زیاد و در نتیجه ذوب و تبخیر بخش کوچکی از قطعه کار می‌شود. دو الکتروود ابزار و قطعه کار درون سیالی به نام سیال دی الکتریک غوطه‌ور هستند. عمل تخلیه الکتریکی در فضای بین ابزار و قطعه کار منجر به تولید جرقه‌های پیایی شده و هر جرقه جز کوچکی از ماده را از سطح قطعه جدا می‌کند. با پیشروی این روند شکل معکوس ابزار در قطعه کار ایجاد می‌شود.

اولین کاربرد روش تخلیه الکتریکی در زمان جنگ جهانی دوم در انستیتوی تحقیقاتی مسکو توسط آقا و خانم لازارنکو بوده است [۱]. همچنین اولین پیشرفت‌های مهم در استفاده از این روش به عنوان یک روش تولید صنعتی هم توسط این دو دانشمند صورت گرفته است. یکی از این نوآوری‌ها مربوط به استفاده از یک مدار الکتریکی آرسی در سیستم کنترل دستگاه بود که منجر به تامین قابلیت کنترل زمان جرقه گردید. دیگر پیشرفت مهم در این زمینه نیز بکار بردن یک سروکنترل ساده جهت تنظیم فاصله بین الکتروود و قطعه کار بود. یکی از محدودیت‌های اصلی این روش مربوط به جنس ابزار و قطعه کار است. برای تشکیل مدار الکتریکی احتیاج است که قطعه کار و ابزار هر دو هادی جریان الکتریسیته باشند. از مزیت‌های عمده آن نیز می‌توان به دقت ابعادی بسیار بالا در تولید و عدم وابستگی شرایط ماشین کاری به خواص مکانیکی قطعه (از قبیل تنش تسلیم و استحکام، مدول الاستیسیته و سختی) و همچنین قابلیت تولید حفرهای پیچیده اشاره کرد. با توجه به این خاصیت می‌توان عملیات ماشین کاری را بر روی قطعات فولادی سخت شده نیز به راحتی انجام داد. این قابلیت کاربرد روش مزبور را در صنایع قالب‌سازی بسیار گسترده نموده است [۱].

پارامترهای مختلفی در فرآیند تخلیه الکتریکی به‌عنوان متغیرهای تنظیمی اولیه از سوی اپراتور می‌بایست مشخص شوند. متغیرهایی از قبیل ولتاژ تخلیه، شدت جریان الکتریکی، زمان روشنی و خاموشی جرقه، مدت زمان کل سیکل، فاصله میان ابزار و قطعه کار، قطبیت ابزار و قطعه کار و فشار شستشوی دی الکتریک از جمله پارامترهای اصلی تنظیم دستگاه می‌باشند. این عوامل بر روی کیفیت ماشین کاری و شاخص‌های خروجی فرآیند از قبیل سرعت براده برداری، زبری سطح، نرخ خوردگی الکتروود و گشادی کناری حفره، تاثیر بسزایی دارند. هدف عمده‌ای که در این تحقیق دنبال می‌شود تبیین رابطه ریاضی بین پارامترهای تنظیمی و خروجی‌های فرآیند به کمک روش مدل‌سازی رگرسیون می‌باشد.

## ۲- مروری بر ادبیات موضوع و مدل‌سازی فرآیند

تا به امروز تحقیقات و آزمایشات بسیاری در زمینه شناسایی اثر پارامترهای مختلف ماشین‌کاری به شیوه تخلیه‌الکتریکی صورت گرفته است [۵-۲]. در اکثر قریب به اتفاق این پژوهش‌ها ابتدا سعی در شناسایی و استخراج یک رابطه منطقی ریاضی بین ورودی‌های سیستم با خروجی‌های آن شده است. برای این منظور اغلب از روش‌های رگرسیون یا شبکه‌های عصبی استفاده شده است. برخی از تحقیقات نیز به ارائه روش‌هایی پرداخته‌اند که بتوان با انتخاب پارامترهای مناسب ورودی، به خروجی‌های مورد نظر دست یافت.

پورتاس و لوئیس [۲]، به مدل‌سازی فرآیند به کمک رگرسیون آماری پرداخته و رابطه‌ی بین صافی سطح را با سه پارامتر ورودی شدت جریان، زمان برقراری جرقه و زمان خاموشی جریان به صورت ریاضی استخراج کرده‌اند. آن‌ها با استناد به این رابطه به تاثیر نپذیرفتن زیاد صافی سطح از زمان روشنی و خاموشی پالس اشاره نموده و مهم‌ترین عامل تاثیرگذار بر زبری سطح را شدت جریان دانسته‌اند. کیاک و چاکیر [۳]، یک سری آزمایش براساس اصول طراحی آزمایش‌ها<sup>۲</sup>، جهت بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر روی زبری سطح فولاد گرم‌کار AISI۲۰ در فرآیند تخلیه‌الکتریکی انجام داده‌اند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که با کاهش کیفیت سطح ابزار (زبرتر شدن سطح ابزار) زبری سطح قطعه کار به علت افزایش دانسیته شدت جریان افزایش می‌یابد. هارون و غانی [۴]، عملکرد الکترودهای گرافیتی و مسی را در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه‌الکتریکی مورد بررسی قرار داده و نرخ براده‌برداری بالاتر و فرسایش نسبی ابزار پایین‌تر را در ماشین‌کاری فولاد ابزار XW۴۲ بوسیله‌ی ابزار مسی نسبت به ابزار گرافیتی را گزارش نموده‌اند.

در این مقاله با بهره‌گیری از اصول طرح‌ریزی آزمایش‌ها، تکنیک رگرسیون خطی چندگانه و روش شناسی سطوح پاسخ<sup>۳</sup>، اثر متغیرهای ورودی (شدت جریان جرقه، زمان روشنی پالس و ولتاژ جرقه) بر روی ویژگی‌های ماشین‌کاری فولاد Ck۴۵ (نرخ براده‌برداری و فرسایش نسبی ابزار) در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه‌الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تجربی و تئوری بدست آمده از این تحقیق با مشخص نمودن منحنی‌های تکنولوژیکی و مدل‌های ریاضی- آماری، انتخاب بهینه‌ی پارامترهای ماشین‌کاری را میسر نموده و ماشین‌کاری با صرفه‌ی اقتصادی را موجب شده است.

## ۳- روش پاسخ سطح

روش پاسخ سطح، مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری یا ریاضی می‌باشد که برای مدل‌سازی و آنالیز مسائلی که پاسخ مطلوب توسط چندین پارامتر تحت تاثیر قرار می‌گیرند، مفید می‌باشد و هدف بهینه‌سازی پاسخ است. در بیشتر مسائل پاسخ سطح، رابطه‌ی بین پاسخ و متغیرهای مستقل مجهول هستند. بنابراین اولین قدم در

<sup>2</sup> . Design of Experiments (DOE)

<sup>3</sup> . Response Surface Methodology (RSM)

روش پاسخ سطح پیدا کردن تقریب مناسب برای رابطه صحیح بین پاسخ و مجموعه متغیرهای مستقل می‌باشد. معمولاً از چند جمله‌های مرتبه پایین در ناحیه‌ای از مقادیر متغیرهای مستقل استفاده می‌شود. اگر پاسخ بوسیله یک تابع خطی از متغیرهای مستقل مدل شود، آنگاه تابع تقریب مدل درجه اول نامیده می‌شود (رابطه ۱).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

اگر انحنای در سیستم وجود داشته باشد، آنگاه بایستی چند جمله‌ای درجه بالاتر در نظر گرفته شود، مانند مدل درجه دوم (رابطه ۲).

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i^2 + \sum_{i=1}^k b_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (2)$$

که در این رابطه  $b_0$  ضریب ثابت معادله است و  $b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_{ij}$  ضرایب مربوط به متغیرهای ورودی  $x_i$  سیستم می‌باشند مقدار خطای  $\varepsilon$  با توجه به دقت مورد نظر انتخاب می‌شود. برای برآورد پارامترها در تقریب زدن چند جمله‌ای‌ها از روش کمترین مربعات استفاده می‌شود [۶].

### ۳-۱- طراحی آزمایشات

هدف اصلی طراحی آزمایشات مطالعه‌ی ارتباط بین پاسخ به عنوان یک متغیر وابسته و پارامترهای ورودی می‌باشد. در این روش علاوه بر بررسی تاثیر هر پارامتر، اثرات متقابل بین هر پارامتر نیز در نظر گرفته می‌شود. طراحی آزمایشات روشی جهت حداقل‌سازی تعداد آزمایشات برای رسیدن به شرایط بهینه است. برای استخراج روابط مربوط به پاسخ سطح داده‌های ورودی از نتایج آزمایشات تجربی استخراج می‌شوند. برای مدل‌سازی سعی بر انجام حداقل تعداد آزمایشات تجربی می‌باشد تا در زمان و هزینه صرفه‌جویی شود. اگر آزمایشات بر پایه  $2^k$  فاکتوریل انجام شود، که  $K$  تعداد متغیرهای ورودی می‌باشد، می‌توان از روش طراحی چرخشی از مرتبه درجه دوم مرکزی برای کاهش تعداد آزمایشات بدون کاهش در دقت نتایج استفاده نمود بنابراین حداقل تعداد آزمایشات مورد نیاز طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$N = n_c + n_a + n \dots \quad (3)$$

$$n_c = 2^k \dots$$

$$n_a = 2k \dots$$

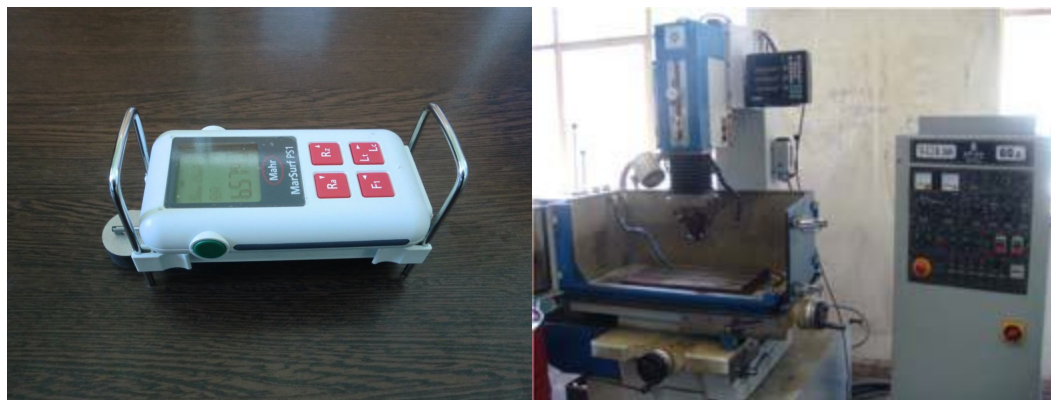
در رابطه فوق  $n_c$  تعداد نقاط فاکتوریل یا نقاط مرکزی می‌باشد و  $n_a$  تعداد نقاط محوری است که با فاصله  $\gamma = k \frac{1}{2}$  از نقاط مرکزی قرار دارند [۷].

#### ۴- انجام آزمایشات

برای انجام آزمایشات، از دستگاه اسپارک مدل آدرخش ۳۰۴H ساخت شرکت تهران اکرام استفاده شد (شکل ۱). در تمام آزمایشات از نفت سفید به‌عنوان سیال دی الکتریک استفاده گردید. جنس قطعه‌کارها از نوع فولاد قالب Ck۴۵ می‌باشد که به شکل استوانه و با ابعادی به قطر ۳۰ میلیمتر و ارتفاع ۱۵ میلیمتر توسط دستگاه وایرکات برش خورده و دو سمت آن‌ها پرداخت و کدگذاری شده‌اند. همچنین الکتروود ابزار از جنس مس با خلوص ۹۹/۹٪ و دارای ابعادی به قطر ۱۶ و ارتفاع ۳۰ میلیمتر می‌باشد. ماشین‌کاری در فواصل زمانی ثابت انجام شده و مقدار ماده براده‌برداری شده با استفاده از اختلاف وزن قطعه‌کار قبل و بعد از ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی اندازه‌گیری شده است. نرخ ماده برداشته شده بر حسب میلیمتر مکعب بر ساعت با استفاده از معادله (۴) قابل محاسبه گردیده است.

$$MRR = \frac{\text{wear weight of workpiece}}{\text{time of machining}} \quad (۴)$$

زبری سطح (Ra) هر یک از قطعات با استفاده از دستگاه زبری‌سنج مدل Mahr - PS1 ساخت کشور آلمان با دقت ۰/۰۰۱ میکرون اندازه‌گیری و به منظور نتایج بهتر، هر آزمایش ۳ مرتبه انجام شده و میانگین محاسبه شده است (شکل ۱).



شکل ۱: تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایشات

یکی از مهم‌ترین معیارهای اندازه‌گیری کیفیت سطح، زبری سطح و به عبارت دیگر پروفیل و میزان پستی و بلندی‌های سطح می‌باشد. کیفیت سطح در فرآیندهای براده‌برداری، متاثر از پارامترهای ماشین‌کاری، نوع و پروفیل ابزار و سایر شرایط دستگاه می‌باشد [۸].

جدول (۱)، پارامترهای ورودی و سطوح در نظر گرفته شده برای هر کدام از آن‌ها را نشان می‌دهد و همچنین در جدول (۲)، نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب و بر اساس طرح سطح پاسخ نشان داده شده‌است.

جدول ۱: پارامترهای ورودی و سطوح در نظر گرفته شده

سطوح					واحد	پارامترهای ورودی	علامت مشخصه
-۲	-۱	۰	۱	۲			
۲	۵	۸	۱۱	۱۴	آمپر	جریان	A
۵۰	۱۵۰	۲۵۰	۳۵۰	۴۵۰	میکروثانیه	زمان روشنی پالس	B
۴	۵	۶	۷	۸	ثانیه	ضریب عملکرد	C
۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	ولت	ولتاژ	D

جدول ۲: نتایج حاصل از انجام آزمایشات

خروجی‌ها		پارامترهای ورودی				ردیف
زبری سطح ( $\mu\text{m}$ )	نرخ براده برداری ( $\text{g/hr}$ )	ولتاژ	آمپر	زمان روشنی پالس	ضریب عملکرد	
۵/۴۲۶	۱/۱۷۶	-۱	-۱	-۱	-۱	۱
۴/۰۳۰	۸/۴۹۵	-۱	۱	-۱	-۱	۲
۴/۷۱۱	۱/۱۶۸	-۱	-۱	۱	-۱	۳
						.
						.
						.
۶/۳۶۱	۲/۶۳۰	.	.	.	.	۲۹
۶/۹۳۷	۲/۷۹۰	.	.	.	.	۳۰
۷/۱۹۴	۲/۶۲۰	.	.	.	.	۳۱

## ۵- مدل سازی متغیرهای پاسخ

روابط ۵ و ۶ مدل‌های بدست آمده برای پیش‌بینی و محاسبه‌ی نرخ براده برداشت ماده و زبری سطح را نمایش می‌دهند.

$$MRR\left(\frac{\text{gr}}{\text{hr}}\right) = 2.461 + 1.463A + 0.370C - 0.141D + 0.377A^2 + 0.599AC - 0.414AD \quad (5)$$

$$Ra = (\mu m) = 6.969 + 1.892A - 0.277B - 0.151C - 0.210A^2 - 0.222B^2 + 0.199AB \quad (۶)$$

در رابطه‌ی (۵)، نرخ برداشت ماده بر حسب گرم بر ساعت، A جریان بر حسب آمپر، C ضریب عملکرد بر حسب ثانیه و D ولتاژ گپ بر حسب ولت و در رابطه (۶) زبری سطح بر حسب میکرومتر و B زمان روشنی پالس بر حسب میکروثانیه می‌باشد.

#### ۵-۱- بررسی صحت روابط تجربی

صحت روابط تجربی به‌وسیله‌ی تکنیک آنالیز واریانس<sup>۴</sup> بررسی می‌شود. در صورتیکه مقدار P بدست آمده کمتر از ۰/۰۵ باشد، در سطح اطمینان مورد نظر (۰/۹۵)، پارامتر مورد نظر موثر خواهد بود.

جداول ۳ و ۴ نتایج مربوط به آنالیز واریانس مدل‌های ارائه شده را نشان می‌دهند و همچنین نتایج اصلاح شده رگرسیون در جداول ۵ و ۶ آمده است.

جدول ۳: آنالیز واریانس برای مدل نرخ برداشت ماده

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات تصحیح شده	مقدار F	مقدار P
رگرسیون	۶	۶۷/۷۷۲	۱۱/۲۹۵	۱۹/۷۶۱	۰/۰۰۰
خطی	۳	۵۵/۱۰۱	۱۸/۳۶۷	۳۲/۱۲۰	۰/۰۰۰
درجه دو	۱	۴/۱۸۲	۴/۱۸۲	۷/۳۱	۰/۰۰۰
اثر متقابل	۲	۸/۴۸۹	۴/۲۴۴	۷/۴۲	۰/۰۰۰
خطا	۲۴	۱۳/۷۲۲	۰/۵۷۱	-	۰/۰۰۰
خطای عدم تطبیق	۸	۴/۱۴۶	۰/۵۱۸	۰/۸۷۱	۰/۰۰۰
خطای خالص	۱۶	۹/۵۷۶	۰/۵۹۸	-	۰/۰۰۰
مجموع	۳۰	۸۱/۴۹۵	-	-	۰/۰۰۰

جدول ۴: آنالیز واریانس برای مدل زبری سطح

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات تصحیح شده	مقدار F	مقدار P
رگرسیون	۶	۹۱/۳۹۶	۱۵/۲۳۲	۷۰/۲۵۱	۰/۰۰۰
خطی	۳	۸۸/۲۵۶	۲۹/۴۱۸	۱۳۵/۶۶۱	۰/۰۰۰
درجه دو	۱	۲/۵۰۶	۱/۲۵۳	۵/۷۸۰	۰/۰۰۰
اثر متقابل	۲	۰/۶۳۴	۰/۳۱۷	۲/۲۹۱	۰/۰۰۰
خطا	۲۴	۵/۲۰۴	۰/۲۱۷	-	۰/۰۰۰
خطای عدم تطبیق	۸	۱/۹۲۵	۰/۱۱۷	۱/۱۷۰	۰/۰۰۰
خطای خالص	۱۶	۳/۲۷۸	۰/۲۰۵	-	۰/۰۰۰
مجموع	۳۰	۹۶/۶۰۱	-	-	۰/۰۰۰

<sup>۴</sup> . Analysis of Variance (ANOVA)



جدول ۵: نتایج رگرسیون اصلاح شده برای نرخ برداشت ماده

مقدار T	میانگین مربعات	مجموع مربعات	فاکتور
۹/۴۷۶	۰/۱۵۴	۱/۴۶۲	A
۲/۳۹۹	۰/۱۵۴	۰/۳۷۰	C
-۰/۹۱۰	۰/۱۵۴	-۰/۱۴۱	D
۲/۷۰۵	۰/۱۳۹	۰/۳۷۷	A*A
۳/۱۷۰	۰/۱۸۹	۰/۵۹۹	A*C
-۲/۱۹۱	۰/۱۸۹	-۰/۴۱۴	A*D

$$R-Sq = \%۸۵.۱۶ \quad R-Sq(adj) = \%۸۰.۹۵$$

جدول ۶: نتایج رگرسیون اصلاح شده برای زبری سطح

مقدار T	میانگین مربعات	مجموع مربعات	فاکتور
۱۹/۸۶۶	۰/۰۹۵	۱/۸۹۱	A
-۲/۹۱۱	۰/۰۹۵	-۰/۲۷۶	B
-۱/۵۹۰	۰/۰۹۵	-۰/۱۵۱	C
-۲/۴۴۱	۰/۰۸۶	-۰/۲۱۰	A*A
-۲/۵۷۱	۰/۰۸۶	-۰/۲۲۱	B*B
۱/۷۱۰	۰/۱۱۶	۰/۱۹۹	A*B

$$R-Sq = \%۹۴.۶۱ \quad R-Sq(adj) = \%۹۳.۲۷$$

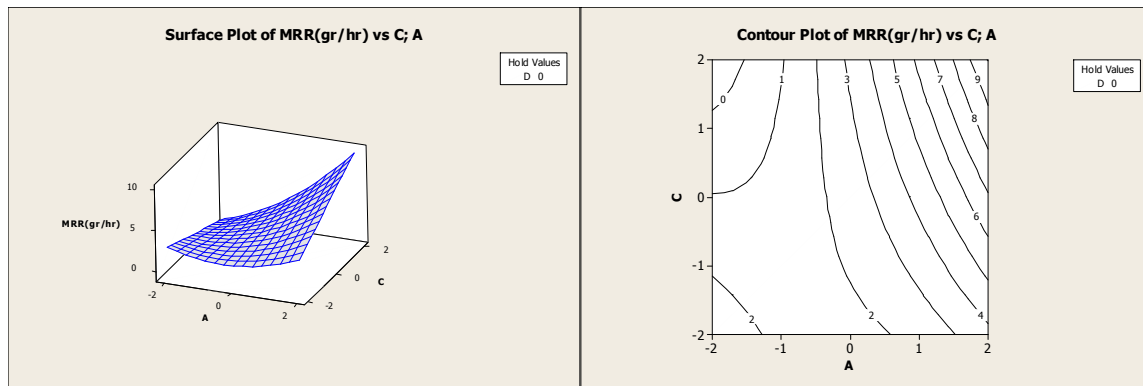
معنی‌دار بودن ضرائب و جملات هر کدام از مدل‌ها توسط توزیع T به عمل آمده است (جداول ۵ و ۶). همچنین مقادیر پیش بینی شده برای ضرائب ثابت در جداول مذکور ارائه شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که مدل‌های نرخ برداشت ماده و زبری سطح بیشترین تاثیرپذیری را از پارامتر شدت جریان داشته‌اند.

#### ۶- بحث و تحلیل نتایج اخذ شده

با توجه به اینکه مدل‌های موجود از کفایت لازم برای بیان تغییرپذیری داده‌ها برخوردارند، می‌توان توسط نمودارهای رسم شده بر اساس مدل‌های حاصل، اثر پارامترهای ورودی بر روی ویژگی‌های ماشین‌کاری را مورد مطالعه قرار داده و مقادیر متغیرهای پاسخ را در سطوح میانی متغیرهای ورودی پیش‌بینی نمود.

#### ۶-۱- بررسی اثرات پارامترهای ورودی بر روی نرخ برداشت ماده

شکل (۲)، سطح پاسخ مربوط به نرخ برداشت ماده در حالت اثر متقابل دو پارامتر شدت جریان و ضریب عملکرد را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، برای رسیدن به حداکثر میزان نرخ برداشت ماده می‌بایست پارامترهای شدت جریان و ضریب عملکرد در بالاترین میزان خود قرار گیرند.

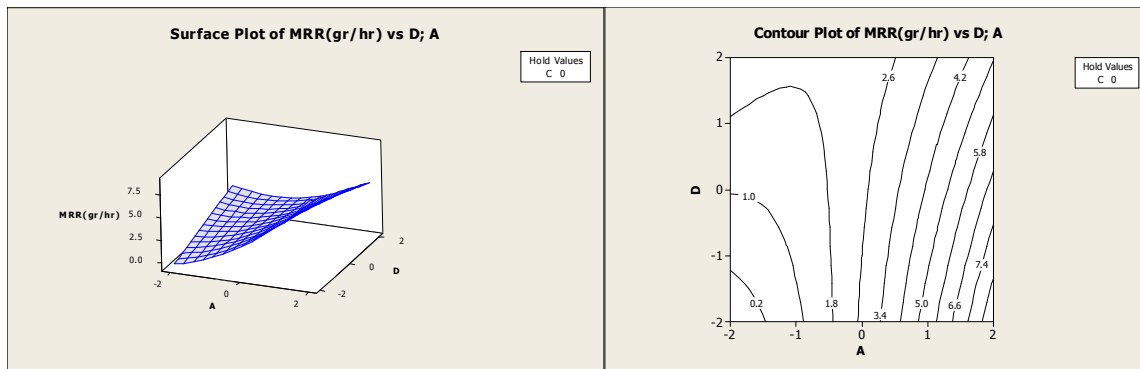


(ب)

(الف)

شکل ۲: الف) نمودار تاثیر متقابل شدت جریان و ضریب عملکرد بر روی نرخ برداشت ماده در حالت  $(D=0)$   
 ب) منحنی سه بعدی تاثیر متقابل شدت جریان و ضریب عملکرد بر روی نرخ برداشت ماده

در شکل (۳)، اثر متقابل پارامترهای شدت جریان و ولتاژ گپ بر نرخ برداشت ماده نشان داده شده است بطوری که افزایش شدت جریان و کاهش ولتاژ گپ تاثیر بسزایی در افزایش نرخ براده برداری دارد.



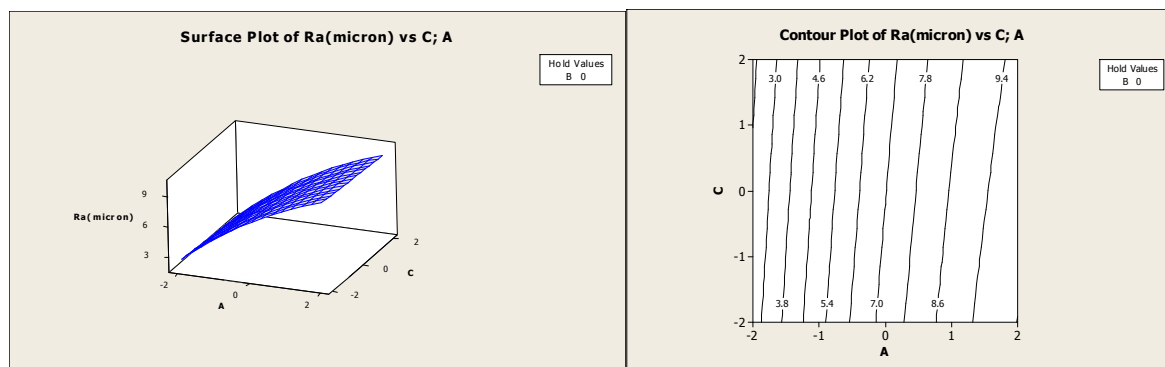
(ب)

(الف)

شکل ۳: الف) نمودار تاثیر متقابل شدت جریان و ولتاژ گپ بر روی نرخ برداشت ماده در حالت  $(C=0)$   
 ب) منحنی سه بعدی تاثیر متقابل شدت جریان و ولتاژ گپ بر روی نرخ برداشت ماده

## ۶-۲- بررسی اثرات پارامترهای ورودی بر روی زبری سطح

شکل (۴)، بیانگر این است که کمترین زبری سطح که حدود ۳ میکرومتر است در حالتی اتفاق می افتد که پارامترهای شدت جریان و ضریب عملکرد در حداقل مقادیر خود قرار داشته باشند.

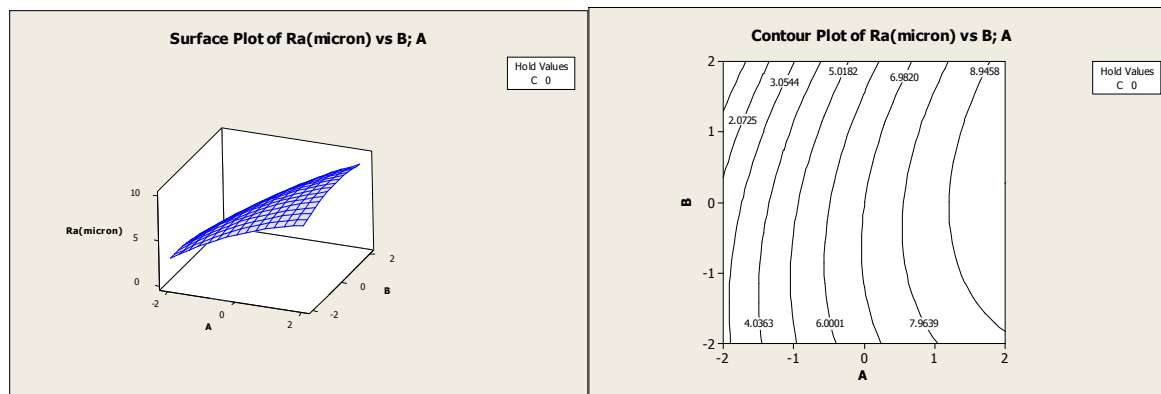


(ب)

(الف)

شکل ۴: الف) نمودار تاثیر متقابل شدت جریان و ضریب عملکرد بر روی زبری سطح در حالت (B=0) ب) منحنی سه بعدی تاثیر متقابل شدت جریان و ضریب عملکرد بر روی زبری سطح

در شکل (۵) تاثیر متقابل دو پارامتر زمان روشنی پالس و شدت جریان برای دستیابی، به حداقل زبری سطح که به میزان  $2.075 \mu m$  می باشد، قابل ملاحظه است بطوریکه این دو پارامتر می بایست در کمترین محدوده خود قرار گیرند.



(ب)

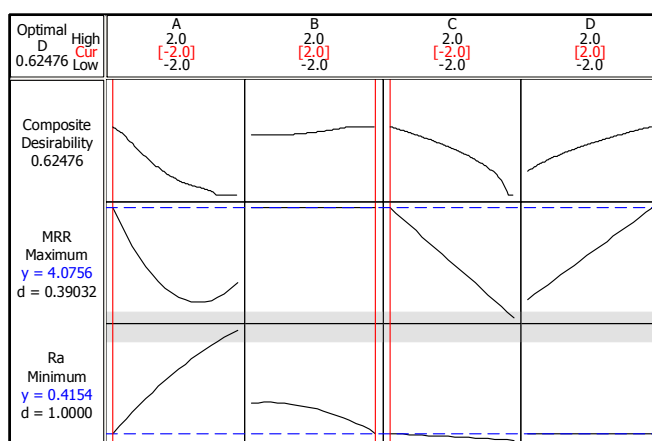
(الف)

شکل ۵: الف) نمودار تاثیر متقابل زمان روشنی پالس و شدت جریان بر روی زبری سطح در حالت (C=0) ب) منحنی سه بعدی تاثیر متقابل زمان روشنی پالس و شدت جریان بر روی زبری سطح

## ۷- آزمایشات صحه گذاری

در این قسمت از تحقیق با توجه به نتایج بهینه سازی (شکل ۶) آزمایشات صحه گذاری برای ارزیابی دقت مدل ارائه شده انجام شده است. با توجه به شکل ۶ مقادیر پیش بینی شده برای نرخ برداشت ماده و زبری سطح

و همچنین سطوح پارامترهای ورودی برای نیل به این خروجی‌ها ارائه شده است. به عنوان مثال مقدار پیش-بینی شده برای نرخ برداشت ماده حدود ۰/۳۹ گرم بر ساعت می‌باشد. با توجه به شکل ۶ سطوح پارامترهای تنظیمی برای دستیابی به این خروجی‌ها به صورت کد شده ارائه شده است. به عنوان مثال شدت جریان در سطح ۲- و زمان روشنی پالس در سطح ۲ باید تنظیم گردند. جدول ۷ مقادیر پیش‌بینی شده را با نتایج حاصل از آزمایشات صحه‌گذاری نشان می‌دهد. با توجه به این جدول حداکثر خطا کمتر از ۹ درصد می‌باشد که با توجه به تجهیزات مورد استفاده در حد قابل قبولی می‌باشد.



شکل ۶: نمودار نتایج بهینه‌سازی

جدول ۷: نتایج آزمایشات صحه‌گذاری

خطا (%)	مقدار حاصل از آزمایشات تجربی	مقدار پیش‌بینی شده	پارامتر خروجی
۸	۳/۷۵۶	۴/۰۷۵	نرخ برداشت ماده
۹	۰/۴۵۴	۰/۴۱۵	زبری سطح

## ۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تاثیر پارامترهای تنظیمی و تعیین سطوح بهینه‌ی آنها در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی فولاد قالب Ck۴۵ مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. برخی از نتایج بدست آمده به صورت زیر می‌باشند:

- ۱- تکنیک رگرسیون‌ی ابزاری بسیار مناسب برای بیان رابطه‌ی بین ویژگی‌های ماشین‌کاری و پارامترهای ورودی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه‌الکتریکی می‌باشد و مدل‌های ریاضی بدست آمده ازکفایت لازم برای بیان این همبستگی برخوردارند.

۲- با استفاده از منحنی‌های دو بعدی بدست آمده می‌توان پارامترهای ورودی مناسب و بهینه را برای حصول یک پارامتر خروجی مشخص (نرخ براده برداری و زبری سطح) انتخاب نموده و راندمان ماشین‌کاری را افزایش داد.

۳- پارامتر شدت جریان دارای بیشترین تاثیر بر هر دو مشخصه خروجی فرآیند می‌باشد.

۴- افزایش پارامترهای جریان، ضریب عملکرد و کاهش پارامتر ولتاژ گپ باعث زیاد شدن نرخ براده‌برداری می‌شود.

۵- افزایش زمان روشنی پالس در ابتدا نرخ براده برداری را افزایش می‌دهد ولی بعد از مدتی باعث کاهش آن می‌شود که علت آن تاثیر برخی از عوامل ترمودینامیکی می‌باشد.

۶- جهت دستیابی به حداقل زبری سطح پارامترهای شدت جریان، زمان روشنی پالس و ضریب عملکرد می‌بایست در سطوح پایین خود قرار گیرند.

## ۸- مراجع

- [1] Y. Tzeng, F. Chen, "Multi-objective optimization of high-speed electrical discharge machining process using a Taguchi fuzzy-based approach", *Materials and Design*, Vol 28, pp. 1159-1168, (2007).
- [2] I.Puertas, C.J. Luis, L.Alvarez , "Journal of Materials processing Technology ", Vol 32, pp. 152-159, (2004).
- [3] Kiyak, M., Çakir, O., "Examination of machining parameters on surface roughness in EDM of tool steel" *Journal of Material Process and Technology.*, Vol 19, pp. 141-144, (2007).
- [4] C. Haron, C.H., Ghani, J.A., Burhanuddin, Y., Seong, Y.K., Swee, C.Y., " Copper and graphite electrodes performance in electrical-discharge machining of XW42 tool steel" *Journal of Materials processing Technology*, Vol 25, pp. 196-201, (2008).

[۵] محمدرضا شبگرد، حسین جباری خامنه، رامین محمدپور شتربانی؛ "آنالیز ویژگیهای ماشین کاری فولاد ابزار H13 در فرآیند EDM با استفاده از ابزار گرافیتی"؛ نهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشگاه بیرجند، اسفند ماه ۱۳۸۷.

- [6] Montgomery, D.C., "Design and Analysis of Experiments, Wiley, New York", (1997).
- [7] Box G.E.P., Hunter J.S., "Multi-factor experimental design for exploring response surfaces", *Ann. Math. Stat* (1957).
- [8] S. Assarzadeh, M. Ghoreishi, "A dual response surface-desirability approach to process modeling and optimization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder-mixed electrical discharge machining (PMEDM) parameters", *International Journal of Advanced Manufacturing Technolog* vol 64, pp.1459-1477, (2013).