

بررسی تأثیر پارامترهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر روی آلیاژ DIN 1.2080 با کمک روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی و دترمینان بهینه

پویان صدر^۱، امین کلاه‌دوز^{۲*}، سید علی افتخاری^۳

* نویسنده مسئول: aminkolahdoz@iaukhsh.ac.ir

چکیده

فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی، یکی از پرکاربردترین روش‌های ماشین کاری مخصوص، برای شکل دهی قطعات هادی جریان الکتریسیته است. در این روش ابزار با قطعه کار تماس نداشته و سختی قطعه کار نیز بر سرعت ماشین کاری تأثیری ندارد. در انجام فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی، انتخاب صحیح مقادیر پارامترهای ماشین کاری در قیمت تمام شده و کیفیت قطعات تولیدی مؤثر است. با توجه به کاربرد روزافزون این آلیاژ، از آن در صنایع مختلف از جمله صنعت ابزارسازی به خصوص در مواردی که مقاومت سایشی، تغییر شکل ناپذیری و سختی بالا مورد نیاز باشد استفاده می‌شود. فولاد DIN 1.2080 در دماهای پایین مقاومت سایشی بالایی دارد. عمق سختی پذیری بالا بوده و همچنین استفاده از آن برای برش در دماهای پایین مقرون به صرفه تر است. در این مقاله بررسی نوع و میزان تأثیر پارامترهای تنظیمی و تعیین سطوح بهینه آن‌ها در ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ DIN 1.2080 با استفاده از دو روش طراحی تاگوچی و دترمینان بهینه مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترهای تنظیمی مورد نظر شامل ولتاژ گپ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس است. همچنین نرخ برداشت براده و کیفیت سطح قطعات تولیدی به عنوان دو مشخصه خروجی مهم در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان دادند که جریان در اسپارک بیشترین تأثیر را بر روی دو پارامتر خروجی (بیش از ۶۵٪ بر روی نرخ براده برداری و بیش از ۴۸٪ بر روی صافی سطح) می‌گذارد، بعد از آن، زمان روشنی پالس زمان خاموشی پالس و در نهایت تغییرات ولتاژ به ترتیب بیشترین درصد تأثیر را بر روی دو خروجی دارند. هرچه مقدار جریان و زمان روشنی پالس بیشتر و ولتاژ و زمان خاموشی پالس کمتر باشد سرعت براده برداری بیشتر و صافی سطح کمتری خواهیم داشت.

واژه‌های کلیدی

ماشین کاری تخلیه الکتریکی، تاگوچی، ماتریس بهینه، مدل سازی رگرسیونی، بهینه سازی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک و عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، اصفهان

۲- استادیار، دانشکده مکانیک و عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، اصفهان

۳- استادیار، دانشکده مکانیک و عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، اصفهان

۱- مقدمه

باعث افزایش گپ و شستشوی بهتر و در نتیجه براده برداری بیشتر می‌شود.

آیستا و همکاران [۳] به کمک روش طراحی آزمایشات تاگوچی و مبحث تحلیل واریانس^۳، تأثیر جریان، ولتاژ و زمان روشنی پالس را در فرآیند شیارزنی آلیاژ C1023 بررسی کردند. آنها در این تحقیق نشان دادند که افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس، موجب کاهش نرخ خوردگی ابزار^۴ می‌شود. همچنین جریان و ولتاژ کمتر، نرخ برداشت براده را کاهش می‌دهد.

گوپالاکان و همکاران [۴]، تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی ماشین کاری تخلیه الکتریکی را بر روی نرخ برداشت براده^۵، نرخ خوردگی ابزار و زبری سطح^۶ بررسی کردند. در این مقاله مشخص شد شدت جریان و روشنی پالس بیشترین تأثیر را بر خروجی‌ها دارند، بدین ترتیب که با افزایش شدت جریان، نرخ برداشت براده ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس، کیفیت سطح افزایش خواهد یافت.

بررسی میزان نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح در ماشین کاری سرامیک SiSiC و با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی شدت جریان، ولتاژ، زمان روشنی و خاموشی پالس در مقاله کی لیو [۵] صورت گرفت. وی نشان داد تنظیمات انرژی بالا، باعث بی‌ثباتی ماشین کاری می‌شود. همچنین برای براده‌برداری خشن باید شدت جریان و زمان روشنی پالس بالا باشند و رسیدن به کیفیت سطح بالا به قیمت سرعت کم ماشین کاری تمام می‌شود.

فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی^۱ که زیرمجموعه ماشین کاری ترموالکتریکی است، گسترده‌ترین روش ماشین کاری غیر سنتی فلزات و مواد رسانا است. در این روش، جرقه‌های الکتریکی متوالی میان الکترود و قطعه کار در یک محیط مایع دی‌الکتریک صورت می‌گیرد. از آنجاکه در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی از انرژی بالای حرارتی-الکتریکی به جای نیروهای برشی-مکانیکی استفاده می‌شود. با این روش مواد مقاوم در برابر برش نظیر فولادهای سخت شده، کاربیدهای تنگستن و آلیاژهای با استحکام بالا و اشکال پیچیده را می‌توان ماشین کاری کرد. نیروی مکانیکی، امکان همچنین در این روش به دلیل نبود ماشین کاری قطعات ظریف و شکننده وجود دارد [۱]. فرآیند ماشین کاری EDM به علت داشتن چندین پارامتر مؤثر، از جمله فرایندهای چند متغیره محسوب می‌شود. بنابراین، مطالعات انجام شده در ماشین کاری تخلیه الکتریکی، عمدتاً بر روی تغییر و کنترل تنظیمات بهینه پارامترهای ماشین کاری با توجه به جنس قطعه کار متمرکز استفاده از براده است. عمده تمرکز محققان نیز بر روی روش‌های آماری و به‌ویژه مبحث طراحی آزمایشات^۲ بوده است.

استفاده از روش طراحی آزمایشات به منظور بهینه‌سازی پارامترهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ MAR-M274 (پایه نیکل) موضوع پژوهش اولمن و همکاران [۲] بود. در این مقاله نشان داد که جریان و زمان روشنی پالس، تأثیرگذارترین پارامترها هستند. همچنین افزایش ولتاژ،

³ Analyse of Varoance (ANOVA)

⁴ Tool Wear Rate (TWR)

⁵ Material Removal Rate (MRR)

⁶ Surface Roughness (SR)

¹ Electrical Discharge Machining (EDM)

² Design of Experiment (DOE)

صابونی [۱۰] در طرح پژوهشی خود به بررسی پارامترهای ماشین کاری EDM با ابزار گرافیتی بر روی خواص مکانیکی آلیاژهای حافظ دار NITI پرداخت. وی در این تحقیق با استفاده از روش تاگوچی به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی ماشین کاری تخلیه الکتریکی شامل جریان پالس، زمان روشنی پالس، ولتاژ و زمان خاموشی پالس، بر پارامترهای خروجی شامل مقدار سایش ابزار، نرخ براده برداری و صافی سطح پرداخت. وی نشان داد که مهم ترین پارامتر در خروجی های مورد بررسی برای آلیاژ حافظه دار NiTi، جریان پالس است که با افزایش آن، نرخ براده برداری و سایش ابزار، افزایش و صافی سطح کاهش می یابد. کمترین اثر را نیز ولتاژ دارد که با افزایش آن نرخ براده برداری و سایش ابزار کاهش می یابد و بر روی صافی سطح بی تأثیر است. وی همچنین مقدار عددی پارامترهای زمان خاموشی و روشنی پالس را برای بهینه سازی خروجی های تحقیق به دست آورد.

عندلیب [۱۱] به بررسی ماشین کاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به روش تخلیه الکتریکی پرداخت. وی پس از گردآوری داده های تجربی و استفاده از دو طرح تاگوچی و دترمینان بهینه در رویکرد طراحی آزمایش ها، به کمک دو روش تحلیل سیگنال به نویز (S/N) و مدل سازی ریاضی، سطوح بهینه پارامترها را به منظور بیشینه کردن نرخ برداشت براده و کمینه کردن زبری سطح، تعیین کرد. پارامترهای تنظیمی مورد نظر، شامل ولتاژ گپ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و فاکتور کار بود. وی سپس نتایج بهینه سازی این تحقیق را با آزمایش های تجربی مقایسه کرد که برای هر دو طرح تطابق خوبی وجود داشت. در بررسی نرخ برداشت براده مشخص شد برای داشتن حداکثر نرخ براده برداری تمام سطوح باید در سطح بالای خود تنظیم شوند و ولتاژ در این پارامتر خروجی تأثیری ندارد. وی

یی فونگ ژنگ [۶]، فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی را برای فولاد ابزار SKD11، بهینه سازی کرد. تحلیل آزمایش های وی نشان داد که شدت جریان، پارامتر کار و زمان روشنی پالس مهم ترین پارامترها هستند و به ترتیب بیشترین تأثیر را روی نرخ باربرداری و صافی سطح می گذارد.

راجموهان و همکاران [۷] با در نظر گرفتن پارامترهای ولتاژ، شدت جریان و زمان روشنی و خاموشی پالس به عنوان پارامترهای اصلی، به بهینه سازی نرخ برداشت فولاد ضدزنگ ۳۰۴ پرداختند. مقاله وی مبین آن است که شدت جریان و زمان خاموشی پالس بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری (MRR) فولاد ضدزنگ ۳۰۴ دارند. همچنین سطوح تنظیم بهینه برای داشتن بیشترین نرخ برداشت براده، با کمک روش نسبت سیگنال به نویز محاسبه شدند. آنها نشان دادند با وجود تعداد کم آزمایش ها در روش تاگوچی، این روش نتایج قابل قبولی ارائه می دهد.

زارع پور و همکاران [۸] با استفاده از روش تاگوچی به بررسی خوردگی ابزار مسی در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد ابزار DIN 1.2714 پرداختند. آنان دریافته شدت جریان بیشترین تأثیر را بر میزان خوردگی ابزار دارد. همچنین آنها با استفاده از روش سیگنال به نویز سطوح بهینه پارامترها را مشخص کردند.

ژن و همکاران [۹] با استفاده از منطق فازی و تاگوچی به بهینه سازی فرآیند تخلیه الکتریکی در ماشین کاری پرسرعت فولاد ابزار SKD 11 پرداختند. در این تحقیق تأثیرگذارترین پارامترها بر روی دقت و صحت فرآیند به ترتیب زمان روشنی پالس، پارامتر کار و شدت جریان اعلام شد. همچنین عنوان شد که اندازه و میزان ذرات اضافه شده به دی الکتریک تأثیر چندانی بر کیفیت ندارند.

۵- ارائه دو روش بهینه سازی کارآمد به منظور تعیین سطوح بهینه ی پارامترهای تنظیمی برای نیل به مشخصه های خروجی بهینه فرآیند.

۲- روش آزمایش

۲-۱- آلیاژ مورد بررسی

D3 یک فولاد ابزار سردکار پرآلیاژ، با شماره استاندارد DIN 1.2080 و نماد X210Cr12 است، با حدود ۲ درصد کربن و ۱۲ درصد کرم، یک فولاد بسیار پرمصرف در صنایع مختلف است که از سختی پذیری بسیار بالایی برخوردار است. جداول (۱) و (۲) به ترتیب، ترکیب شیمیایی و برخی از خواص مکانیکی مهم این آلیاژ را نشان می دهند [۱۲].

جدول (۱) ترکیب شیمیایی آلیاژ DIN 1.2080 برحسب درصد وزنی

Cr	S	P	Mn	Si	C		
۱۱/۰۰	...	...	۰/۲۰	۰/۱۰	۱/۹۰	%	Min
۱۳/۰۰	۰/۰۳۰	۰/۰۳۰	۰/۶۰	۰/۶۰	۲/۲۰	%	Max

جدول (۲) خواص مکانیکی آلیاژ DIN 1.2080

مشخصه	مقدار
چگالی	۷/۶۷ g/cm ³
سختی	۶۰ Rc
تنش تسلیم نهایی	۴۱۵ Mpa
نقطه ذوب	۱۲۰۴-۱۱۹۱ °C

از ویژگی های مهم این فولاد به مقاومت سایشی بسیار زیاد، استحکام فشاری بالا و قابلیت سختکاری عمقی می توان اشاره کرد. امروزه از این آلیاژ در ساخت قالب های پولک زنی حاد، ابزارهای تراشکاری، قالب های سردکار، برقوزنها، خان کشی و... استفاده می شود. الکتروود ابزار از جنس مس با خلوص ۹۹/۹٪ و قطر ۴۰ میلی متر انتخاب شد. برای نصب راحت تر الکتروود در ابزارگیر، دنباله ای به طول ۱۰ سانتیمتر و قطر ۱۱ میلی متر برای آن در نظر گرفته شد. نمونه ها با استفاده از ماشین اره لنگ به صورت دقیق با

دریافت پارامتر شدت جریان با بیشترین درصد تأثیرگذاری، مهم ترین پارامتر تنظیمی است و پس از آن زمان روشنی پالس و پارامتر کار به ترتیب تأثیرگذارترین پارامترها هستند. همچنین در بررسی زبری سطح، مشخص شد پارامتر ولتاژ در این خروجی نیز بی تأثیر است. علاوه بر آن فاکتور کار نیز بر زبری سطح تأثیر چندانی ندارد، اما پارامتر شدت جریان و زمان روشنی پالس به ترتیب بیشترین اثرگذاری را دارند. بررسی مقالات نشان می دهد. در ماشین کاری EDM مواد خاص به خصوص فولاد ابزار سردکار تحقیقات اندکی صورت گرفته است. از آنجا که تأثیر پارامترهای تنظیمی و تعیین سطوح بهینه آن ها به جنس قطعه کار و شرایط ماشین کاری وابسته است، برای هر آلیاژ و ماده خاص باید آزمایش های عملی مجددی صورت گیرد. علی رغم کاربرد روزافزون آلیاژ DIN 1.2080، به خصوص در ایران، تاکنون تحقیقی در زمینه بهبود شرایط ماشین کاری آن به روش تخلیه الکتریکی، همچنین عملکرد روش های مختلف مدل سازی و بهینه سازی برای این آلیاژ صورت نگرفته است.

به طور کلی اهداف این تحقیق را در موارد زیر می توان خلاصه کرد:

۱- حصول داده های تجربی ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ D3 با به کارگیری طراحی آزمایشات.

۲- شناخت و ایجاد ارتباط معنی دار بین پارامترهای ورودی فرآیند با مشخصه های خروجی مهم، شامل نرخ برداشت ماده و زبری سطح توسط ارائه مدل های رگرسیونی.

۳- شناسایی پارامترهای تأثیرگذار و میزان تأثیر این پارامترها بر مشخصه های خروجی فرآیند.

۴- تخمین مقادیر خروجی برحسب ورودی های مشخص برای بهینه سازی.

جهت متفاوت به طول تقریبی ۵ میلی متر حرکت داده شد. برای اندازه گیری نرخ برداشت ماده، جرم نمونه‌ها قبل و بعد از ماشین کاری مقایسه می‌شود. بدین منظور از ترازوی دیجیتال مدل FEJ200 با دقت ۰/۰۱ گرم، ساخت شرکت FEW در کشور چین، استفاده شده است.



شکل (۲) دستگاه اسپارک پیشراشه مدل ۵۰۱-۵۰A

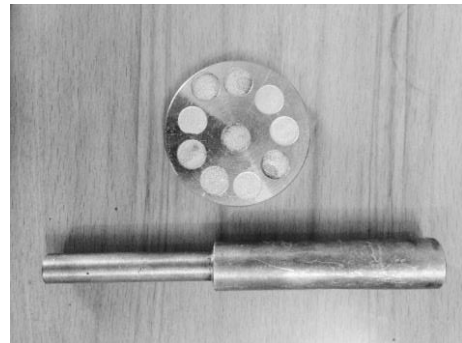
۲-۳- طراحی آزمایش

در این تحقیق از بین ورودی‌های موجود، اثر چهار پارامتر ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس، بر روی دو پارامتر خروجی نرخ برداشت ماده و زبری سطح در ماشین کاری به روش تخلیه الکتریکی آلیاژ DIN 1.2080، مورد بررسی قرار گرفته است. با انجام آزمایش‌های اولیه و بررسی تنظیمات قابل حصول در دستگاه و همچنین در نظر گرفتن قطر الکتروود و حدود بالا و پایین پارامترهای انتخاب شده، نهایتاً به دست آوردن بهترین نتیجه، جدول (۳)، به عنوان پارامترها و سطوح مورد ارزیابی تعیین شد.

جدول (۳) پارامترها و سطوح مورد ارزیابی

پارامترهای ورودی	واحد	سطوح		
		۱	۲	۳
ولتاژ (V)	V	۱۰۰	۲۲۰	....
شدت جریان (I)	A	۱۰	۱۵	۲۰
زمان روشنی پالس (T _{on})	μs	۲۵	۱۰۰	۲۰۰
زمان خاموشی پالس (T _{off})	μs	۲۵	۱۰۰	۲۰۰

ضخامت یکسان از یک پروفیل استوانه‌ای به قطر ۷ میلی متر برش خورده و با استفاده از ماشین تراش و سنگ زدن، سطح آن‌ها با دقت پرداخت شدند. سپس به منظور کنترل و ردیابی دقیق تر، قبل از انجام آزمایش‌ها، هر دو سمت این نمونه‌ها کدگذاری شدند. شکل (۱) یکی از نمونه‌ها و الکتروود مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل (۱) نمایی از نمونه و الکتروود مورد استفاده

۲-۲- تجهیزات مورد استفاده

برای انجام آزمایش‌های طراحی شده، از دستگاه اسپارک پیشراشه مدل ۵۰A-۵۰۱ (شکل ۲) استفاده شده است. از مهم‌ترین ویژگی‌های این دستگاه به امکان تغییر اکثر پارامترهای تنظیمی، دقت بالا و سیستم شست‌وشوی کارآمد آن می‌توان اشاره کرد. سیستم شستشو در دستگاه مورد استفاده، از نوع غوطه‌وری و پاششی است. به این معنا که در حین ماشین کاری، قطعه کار کاملاً در سیال دی‌الکتریک (نفت معمولی) غوطه‌ور شده و یک جریان پاششی برای شستشوی بهتر کمک می‌کند. زبری سطح نمونه‌های ماشین کاری شده، برحسب معیار Ra، توسط دستگاه زبری‌سنج^۱ MARSURF MAHR مدل M300C، ساخت کشور آلمان و با دقت ۰/۰۱ میکرون، اندازه‌گیری شد. برای کمتر کردن خطا در تعیین مقدار عددی زبری سطح، لمس کننده‌ی دستگاه^۲ روی سطح نمونه در دو

^۱ Roughness Tester

^۲ Prop

جدول (۵) ماتریس انجام آزمایشات بر اساس طرح دترمینان بهینه را که با استفاده از نرم افزار Design Expert به دست آمده است، نشان می دهد. در این طرح تنها یک چینش توسط نرم افزارهای آماری پیشنهاد می شود.

جدول (۵) خروجی های اندازه گیری شده در طرح دترمینان بهینه

ردیف	پارامترهای ورودی		پارامترهای خروجی			
	T _{On} (μs)	T _{Off} (μs)	I (A)	V (V)	MRR (cm ³ /min)	SR (R _a)
۱	۲۵	۲۰۰	۱۵	۲۲۰	۰/۰۴۰۴۲	۴/۳۰۸
۲	۲۰۰	۱۰۰	۱۰	۱۰۰	۰/۰۰۹۹۹	۳/۳۲۱
۳	۲۵	۲۵	۲۰	۲۲۰	۰/۰۳۴۳۳	۳/۰۴۳
۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۵	۱۰۰	۰/۰۳۷۳۷	۴/۰۳۴
۵	۱۰۰	۲۰۰	۱۵	۲۲۰	۰/۰۳۲۱۶	۵/۸۷۴
۶	۲۰۰	۲۵	۲۰	۱۰۰	۰/۰۰۸۲۶	۳/۶۹۶
۷	۱۰۰	۲۰۰	۱۰	۲۲۰	۰/۰۱۱۷۳	۳/۷۶۴
۸	۲۵	۱۰۰	۱۵	۲۲۰	۰/۰۴۵۱۹	۴/۴۲۴
۹	۱۰۰	۲۰۰	۲۰	۱۰۰	۰/۰۳۹۵۴	۶/۹۰۷
۱۰	۲۵	۱۰۰	۱۰	۱۰۰	۰/۰۰۹۹۹	۲/۹۷۶
۱۱	۱۰۰	۲۵	۲۰	۲۲۰	۰/۰۲۶۵۱	۲/۵۸۲
۱۲	۲۵	۱۰۰	۲۰	۱۰۰	۰/۰۵۳۰۲	۵/۹۹۵
۱۳	۲۵	۲۵	۱۵	۱۰۰	۰/۰۲۵۲۱	۳/۳۸۰
۱۴	۲۵	۲۵	۱۰	۲۲۰	۰/۰۰۹۵۶	۲/۲۱۴
۱۵	۲۰۰	۱۰۰	۱۵	۲۲۰	۰/۰۲۱۷۳	۴/۵۸۵
۱۶	۲۵	۲۰۰	۲۰	۲۲۰	۰/۰۴۶۹۴	۶/۶۲۹
۱۷	۲۰۰	۲۰۰	۱۰	۲۲۰	۰/۰۰۸۲۶	۴/۶۰۵
۱۸	۱۰۰	۲۵	۱۵	۱۰۰	۰/۰۱۴۳۴	۳/۱۰۰
۱۹	۱۰۰	۲۵	۱۰	۱۰۰	۰/۰۰۵۲۱	۱/۹۷۱
۲۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰	۲۲۰	۰/۰۱۱۳۰	۳/۳۷۸
۲۱	۱۰۰	۱۰۰	۲۰	۱۰۰	۰/۰۳۷۳۷	۵/۱۳۷
۲۲	۲۰۰	۲۰۰	۲۰	۱۰۰	۰/۰۳۰۴۲	۷/۹۷۵
۲۳	۲۰۰	۲۵	۱۵	۲۲۰	۰/۰۱۰۴۳	۳/۱۴۸
۲۴	۲۵	۲۰۰	۱۰	۱۰۰	۰/۰۱۰۸۶	۳/۸۸۲
۲۵	۲۰۰	۱۰۰	۲۰	۲۲۰	۰/۰۲۷۸۱	۵/۵۴۰
۲۶	۲۰۰	۲۰۰	۱۵	۱۰۰	۰/۰۲۸۲۵	۶/۲۱۵

پس از تعیین پارامترها و سطوح هریک، باید نحوه انجام آزمایش ها تعیین شود. با توجه به تعداد پارامترها و سطوح انتخابی، برای انجام کامل آزمایش ها احتیاج به ۵۴ آزمایش (۳^۳×۲^۱) است. اما با توجه به هزینه و زمان بر بودن انجام کامل آزمایش ها، در این پژوهش از دو طرح کسری تاگوشی و دترمینان بهینه استفاده شده است. برای طراحی ماتریس آزمایشات تاگوشی، از نرم افزار آماری MINITAB استفاده شد. جدول (۴) خروجی های اندازه گیری شده در طرح تاگوشی L18 را نشان می دهد. در این جدول، هر ردیف معرف یک آزمایش است. به عنوان نمونه، در آزمایش اول تمام پارامترهای ورودی باید در سطح اول خود تنظیم شوند. در دو ستون آخر خروجی های اندازه گیری شده (نرخ برداشت براده و زبری سطح) درج شده اند.

جدول (۴) خروجی های اندازه گیری شده در طرح تاگوشی

ردیف	پارامترهای ورودی		پارامترهای خروجی			
	T _{On} (μs)	T _{Off} (μs)	I (A)	V (V)	MRR (cm ³ /min)	SR (R _a)
۱	۲۵	۲۵	۱۰	۱۰۰	۰/۰۰۷۳۹	۲/۸۳۰
۲	۱۰۰	۱۰۰	۱۰	۱۰۰	۰/۰۱۲۱۷	۳/۹۱۰
۳	۲۰۰	۲۰۰	۱۰	۱۰۰	۰/۰۰۸۶۹	۳/۱۴۴
۴	۲۵	۲۵	۱۵	۱۰۰	۰/۰۲۵۲۱	۲/۸۶۴
۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۵	۱۰۰	۰/۰۳۷۳۷	۴/۰۳۴
۶	۲۰۰	۲۰۰	۱۵	۱۰۰	۰/۰۲۸۲۵	۶/۲۱۵
۷	۱۰۰	۲۵	۲۰	۱۰۰	۰/۰۲۰۴۳	۳/۸۶۷
۸	۲۰۰	۱۰۰	۲۰	۱۰۰	۰/۰۲۷۸۱	۶/۲۲۱
۹	۲۵	۲۰۰	۲۰	۱۰۰	۰/۰۵۰۸۵	۶/۰۷۵
۱۰	۲۰۰	۲۵	۱۰	۲۲۰	۰/۰۰۳۹۱	۳/۴۳۸
۱۱	۲۵	۱۰۰	۱۰	۲۲۰	۰/۰۱۳۴۷	۳/۱۵۵
۱۲	۱۰۰	۲۰۰	۱۰	۲۲۰	۰/۰۱۱۷۳	۳/۷۶۴
۱۳	۱۰۰	۲۵	۱۵	۲۲۰	۰/۰۲۲۱۶	۳/۲۲۰
۱۴	۲۰۰	۱۰۰	۱۵	۲۲۰	۰/۰۲۱۷۳	۴/۵۸۵
۱۵	۲۵	۲۰۰	۱۵	۲۲۰	۰/۰۴۰۴۲	۴/۳۰۸
۱۶	۲۰۰	۲۵	۲۰	۲۲۰	۰/۰۱۲۱۷	۴/۶۸۳
۱۷	۲۵	۱۰۰	۲۰	۲۲۰	۰/۰۵۵۱۹	۳/۷۶۲
۱۸	۱۰۰	۲۰۰	۲۰	۲۲۰	۰/۰۴۳۰۲	۶/۴۶۳

۳- نتایج

جدول (۶) نتایج تحلیل S/N برای مشخصه‌های خروجی فرآیند

S/N for SR	S/N for MRR	پارامترهای خروجی		ردیف
		SR	MRR	
-۹/۰۳۵۷	-۴۲/۶۲۷۱	۲/۸۳۰	۰/۰۰۷۳۹	۱
-۱۱/۸۴۳۵	-۳۸/۲۹۴۲	۳/۹۱۰	۰/۰۱۲۱۷	۲
-۹/۹۴۹۷	-۴۱/۲۱۹۶	۳/۱۴۴	۰/۰۰۸۶۹	۳
-۹/۱۳۹۵	-۳۱/۹۶۸۵	۲/۸۶۴	۰/۰۲۵۲۱	۴
-۱۲/۱۱۴۷	-۲۸/۵۴۹۵	۴/۰۳۴	۰/۰۳۷۳۷	۵
-۱۵/۸۶۸۸	-۳۰/۹۷۹۶	۵/۸۱۵	۰/۰۲۸۲۵	۶
-۱۱/۷۴۷۵	-۳۳/۷۹۴۶	۳/۸۶۷	۰/۰۲۰۴۳	۷
-۱۵/۸۷۷۲	-۳۱/۱۱۶۰	۶/۲۲۱	۰/۰۲۷۸۱	۸
-۱۵/۶۷۰۹	-۲۵/۸۷۴۲	۶/۰۷۵	۰/۰۵۰۸۵	۹
-۱۰/۷۲۶۱	-۴۸/۱۵۶۵	۳/۴۳۸	۰/۰۰۳۹۱	۱۰
-۹/۹۸۰۰	-۳۷/۴۱۲۶	۳/۱۵۵	۰/۰۱۳۴۷	۱۱
-۱۱/۵۱۳۰	-۳۸/۶۱۴۰	۳/۷۶۴	۰/۰۱۱۷۳	۱۲
-۱۰/۱۵۷۱	-۳۳/۰۸۸۶	۳/۲۲۰	۰/۰۲۲۱۶	۱۳
-۱۳/۲۲۶۸	-۳۳/۲۵۸۸	۴/۵۸۵	۰/۰۲۱۷۳	۱۴
-۱۲/۶۸۵۵	-۲۷/۸۶۸۱	۴/۳۰۸	۰/۰۴۰۴۲	۱۵
-۱۳/۴۱۰۵	-۳۸/۲۹۴۲	۴/۶۸۳	۰/۰۱۲۱۷	۱۶
-۱۱/۵۰۸۴	-۲۵/۱۶۲۸	۳/۷۶۲	۰/۰۵۵۱۹	۱۷
-۱۶/۲۰۸۷	-۲۷/۳۲۶۶	۶/۴۶۳	۰/۰۴۳۰۲	۱۸

۳-۱- تحلیل براساس داده‌های طرح تاگوچی

طرح آزمایشات تاگوچی اساساً به منظور انجام تحلیل سیگنال به نویز پیشنهاد شده است. این روش یک ابزار قوی در تحلیل آماری داده‌های آزمایشات است. در هر آزمایش، باید همواره به دنبال بالاترین نسبت (S/N) در نتایج باشیم [۱۳]. مقدار (S/N) بالا نشان‌دهنده این است که اثر پارامترهای قابل کنترل، بیشتر از اثر پارامترهای غیر قابل کنترل است. طراحی فرآیند تولید با بالاترین نسبت (S/N) همواره باعث ایجاد کیفیت بهینه با حداقل واریانس می‌شود. در روش تاگوچی، پس از تعیین پارامترهای ورودی و خروجی و مقادیر آن‌ها، تبدیل داده‌ها و مشاهدات به یک عدد (نسبت S/N) در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول، میانگین مربعات انحراف (MS)، که یک کمیت آماری است و انحراف از مقدار مشخصه و هدف را نشان می‌دهد، محاسبه می‌شود. این تابع با توجه به شرایط مسئله، دارای حالت‌های مختلف است [۱۳]. دو حالت استفاده شده در این تحقیق به‌قرار زیر است:

الف- مقدار کوچک‌تر، بهتر است: در اندازه‌گیری زبری سطح هرچه عدد، کوچک‌تر باشد بهتر است. بنابراین، برای محاسبه تابع زیان از فرمول (۱) استفاده می‌شود [۱۴]:

$$S/N = -10 \times \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n (1/Y_i^2)/n}{n} \right) \quad (1)$$

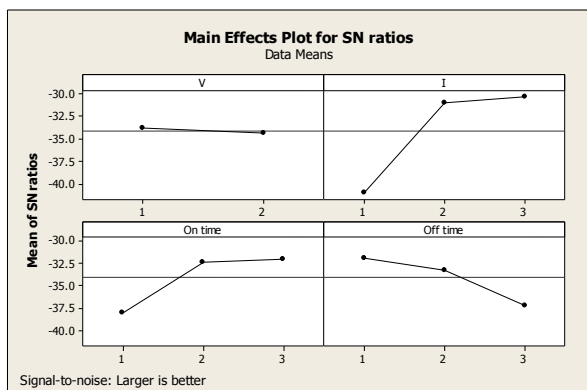
ب- مقدار بزرگ‌تر، بهتر است: در اندازه‌گیری میزان براده برداری، هرچه عدد بزرگ‌تر باشد بهتر است، بنابراین برای محاسبه تابع زیان از فرمول (۲-۴) استفاده می‌شود [۱۴]:

$$S/N = -10 \times \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^2)/n}{n} \right) \quad (2)$$

جدول (۶) مقادیر را برای تمامی سیگنال به نویز خروجی‌های ماشین کاری نشان می‌دهد.

۳-۱-۱- تعیین سطوح بهینه پارامترها برای نرخ براده برداری

یکی از مزیت‌های روش S/N، امکان تعیین سطوح هر پارامتر به منظور بهینه کردن خروجی مدنظر است. با توجه به شکل (۳)، سطح دارای بالاترین مقدار متوسط S/N، به‌عنوان سطح بهینه برای بیشینه‌سازی نرخ براده برداری خواهد بود.



شکل (۳) نمودار نسبت تغییرات سیگنال به نویز برای MRR

سرعت دلخواه انجام شود. این امر کنترل سرو موتور را تسهیل می کند.

در انتها با انجام آزمایش صحنه گذاری، میزان دقت پیش بینی روش S/N سنجیده شد (جدول ۷). همان طور که ملاحظه می شود میزان خطای پیش بینی حدود ۶٪ است. این خطا به دلیل تأثیر عوامل محیطی و سایر پارامترهای غیر قابل کنترل بر روی ماشین کاری است. با توجه به عدم قطعیت های موجود در ماشین کاری تخلیه الکتریکی و ماهیت صنعتی آن، این مقدار خطای پیش بینی در حد قابل قبولی قرار دارد.

جدول (۷) نتیجه آزمایش صحنه گذاری برای نرخ براده برداری

درصد خطا	پیش بینی تحلیل تاگوچی	نسبت S/N مقدار آزمایش	سطوح بهینه
۵/۷۸۳۲	۰/۰۴۸۰۷	۰/۰۵۰۳	$V_1 I_3 T_{on3} T_{off}$

یکی دیگر از مزایای روش سیگنال به نویز، تعیین میزان تأثیرگذاری هر پارامتر در خروجی مورد نظر است. بدین منظور می توان از نتایج تحلیل واریانس داده های نرخ براده برداری (جدول ۸) استفاده کرد. در این جدول، درجه آزادی برای هر یک از پارامترهای ورودی به صورت مجزا تعریف می شود که برابر تعداد سطوح آن منهای یک است.

جدول (۸) نتایج حاصل از تحلیل واریانس داده های تاگوچی برای MRR

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	مقدار P
ولتاژ	۱	۱/۲۵۸	۱/۲۵۸	۱/۷۱	۰/۲۲۰
شدت جریان	۲	۴۳۸/۰۰۹	۲۱۹/۰۰۴	۲۱۹/۴۶	۰/۰۰۰
زمان روشنی پالس	۲	۱۳۷/۱۲۸	۶۸/۵۶۴	۹۳/۴۴	۰/۰۰۰
زمان خاموشی پالس	۲	۹۱/۸۵۲	۴۵/۹۲۶	۶۲/۵۹	۰/۰۰۰
خطا	۱۰	۷/۳۳۸	۰/۷۳۴	....	....
مجموع	۱۷	....	....	....	....

در صورتی که $P\text{-value} < \alpha$ باشد فرض تأثیرگذار بودن پارامتر تأیید و اگر $P\text{-value} > \alpha$ باشد فرض تأثیرگذار بودن پارامتر رد می شود. با توجه به اینکه خطای ریسک در این

بنابراین، برای رسیدن به حداکثر نرخ برداشت ماده، ولتاژ و زمان خاموشی پالس باید در سطح اول خود قرار گیرند، در حالی که دو پارامتر دیگر باید در سطوح بالای خود تنظیم شوند. بنابراین، سطوح بهینه برای بیشینه سازی نرخ برداشت براده در ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ DIN 1.2080 عبارتند از: $V_1 I_3 T_{on3} T_{off}$. انتخاب سطوح بالای شدت جریان باعث می شود حداکثر نرخ انرژی تخلیه شده بر سطح قطعه کار ایجاد شده و با ذوب و تبخیر احجام بزرگ تری از قطعه کار، MRR افزایش یابد. در رابطه با زمان روشنی پالس، این پارامتر تعیین کننده مدت ایجاد و حضور واقعی جرقه بین کار و الکتروود است. با افزایش این پارامتر، در هر سیکل میزان بیشتری از سطح کار کننده می شود و بنابراین نرخ براده برداری بیشتری خواهیم داشت.

در زمان خاموشی پالس، جریان قطع شده و توسط مایع دی الکتریک ذرات کنده شده از سطح فلز، از محل دور می شوند. هرچه این پارامتر کمتر باشد، میانگین تعداد جرقه ها در واحد زمان بیشتر شده و سرعت براده برداری افزایش می یابد. ولتاژ در میزان براده برداری نقشی اساسی ندارد زیرا فقط موجب می شود که عمل یونیزاسیون با

- **آماره P:** یکی از روش های سنجش مناسب بودن مدل، مقدار احتمال (P-value) است. راه آسان کنترل هر پارامتر، مقایسه مقدار P-value ستون آخر کلیه جداول تجزیه و تحلیل های واریانس با مقدار خطای ریسک (α) است.

انجام شد. همان طور که در جدول (۹) نشان داده شده است، خطای پیش‌بینی کمتر از ۶٪ می‌باشد.

جدول (۹) نتیجه آزمایش صحنه‌گذاری برای کیفیت سطح

درصد خطا	پیش‌بینی تحلیل تاگوچی	نسبت S/N مقدار آزمایش	سطوح بهینه
۵/۱۳۶	۲/۰۸۶	۲/۲۱۴	$V_2 I_1 T_{on1} T_{off1}$

با توجه به نمودار بالا و نتایج حاصل از تحلیل واریانس (جدول ۱۰)، می‌توان دریافت اثر ولتاژ بر زبری سطح ناچیز می‌باشد و افزایش جریان پالس باعث افزایش انرژی جرقه و در نتیجه افزایش زبری سطح می‌شود. برای ولتاژ، مقدار S/N در دو سطح چندان تفاوتی ندارد، اما سطح دوم آن معادل سطح بهینه در نظر گرفته می‌شود. همچنین، سطوح اول در پارامترهای شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس به‌عنوان سطح بهینه تعیین می‌شود. دلیل آن نیز کاهش انرژی جرقه، جدا شدن ذرات کوچک‌تری از قطعه کار و نهایتاً کاهش زبری سطح است.

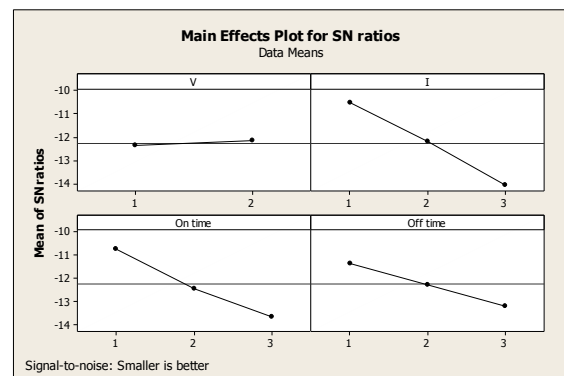
مطابق آنچه که در تحلیل نرخ برداشت براده ذکر شد، آماره P تأثیرگذار بودن پارامترهای شدت جریان و زمان روشنی پالس را تأیید می‌کند، اما ولتاژ و زمان خاموشی پالس، تأثیری بر کیفیت سطح قطعه کار ندارند. مقدار F بحرانی از جداول آماری برای پارامترهای ولتاژ $(F_{0.05,1,16})$ معادل ۴/۴۹ و برای سه پارامتر دیگر $(F_{0.05,2,15})$ برابر ۳/۶۸ است. بنابراین، این آماره نیز عدم تأثیرگذاری پارامتر ولتاژ و زمان خاموشی پالس را نشان می‌دهد. شدت جریان و ولتاژ به ترتیب بیشترین و کمترین میزان تأثیر را بر زبری سطح دارا می‌باشد. دلیل تأثیر بالای شدت جریان بر کیفیت سطح به این دلیل است که با کاهش شدت جریان، میزان انرژی جرقه تا حد زیادی کاهش یافته و در نتیجه در هر پالس، مقدار کمتری از سطح قطعه کار ذوب و تبخیر می‌شود.

تحقیق معادل ۵٪ در نظر گرفته شده است، آماره P تأثیرگذار بودن تمام پارامترها، جز ولتاژ را تأیید می‌کند.

- آماره F: این آماره باید با مقدار بحرانی خود $(F_{\alpha, k, n-k-1})$ مقایسه شود. برای تأیید تأثیرگذار بودن هر پارامتر، باید رابطه تناسبی زیر $F_0 > F_{\alpha, k, n-k-1}$ برقرار باشد. در محاسبه مقدار بحرانی، k درجه آزادی پارامتر مربوطه و n تعداد آزمایش‌ها (در اینجا ۱۸) است. از طرفی مقادیر بزرگ‌تر این آماره، مبین تأثیرگذاری بیشتر آن است. مقدار بحرانی F از جداول آماری برای پارامتر ولتاژ $(F_{0.05,1,16})$ معادل ۴/۹۴ و برای سه پارامتر دیگر $(F_{0.05,2,15})$ برابر ۳/۸۶ است. بنابراین، این آماره نیز عدم تأثیرگذاری پارامتر ولتاژ را نشان می‌دهد.

۳-۱-۲- تعیین سطوح بهینه پارامترها برای زبری سطح

با توجه به شکل (۴)، سطح دارای بالاترین مقدار متوسط S/N، معادل بهترین سطح برای پارامتر مربوطه در بهینه‌سازی کیفیت سطح است.



شکل (۴) نمودار نسبت تغییرات سیگنال به نویز برای اثر تغییرات SR

بنابراین، سطوح بهینه برای کاهش زبری سطح در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ DIN 1.2080 عبارتند از $V_2 I_1 T_{on1} T_{off1}$. برای سنجش میزان دقت پیش‌بینی در این خروجی، با توجه به سطوح بهینه، آزمایش صحنه‌گذاری

جدول (۱۰) نتایج حاصل از تحلیل واریانس داده‌های تاگوجی برای زبری سطح

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	مقدار P
ولتاژ	۱	۰/۱۸۶	۰/۱۸۶	۰/۰۹	۰/۷۶۷
شدت جریان	۲	۳۸/۱۰۷	۱۹/۰۵۴	۹/۵۰	۰/۰۰۰
زمان روشنی پالس	۲	۲۶/۲۹۷	۱۳/۱۴۹	۶/۵۶	۰/۰۰۰
زمان خاموشی پالس	۲	۱۰/۱۵۵	۵/۰۷۸	۲/۵۳	۰/۱۲۹
خطا	۱۰	۲۰/۰۵۲	۲/۰۰۵	....	....
مجموع	۱۷	....	....	....	....

تاگوجی برای تجزیه و تحلیل به کمک سایر روش‌های آماری مانند تحلیل S/N است. لذا در این بخش با استفاده از داده‌های ماتریس دترمینان بهینه، به مدل‌سازی رگرسیونی فرآیند پرداخته می‌شود. یک مدل رگرسیونی، رابطه‌ای است که تغییرات حاصل در متغیر وابسته (متغیر پاسخ) را نسبت به تغییرات در متغیرهای مستقل بر اساس یک رابطه چند جمله‌ای ریاضی بیان می‌کند. مدل رگرسیونی که مشتمل بر بیش از یک متغیر باشد، مدل رگرسیونی چند متغیره نامیده می‌شود. با توجه به تحقیقات انجام شده درباره مدل‌سازی فرآیندهای تولیدی، انواع مدل‌های رگرسیونی درجه یک (خطی)، درجه دو، درجه دو تعدیل یافته و مدل نمائی در این پژوهش به کار گرفته شده‌اند [۱۶]. شکل کلی مدل رگرسیونی خطی یا مرتبه اول که یکی از معمولی‌ترین مدل‌های رگرسیونی چند متغیره است، به صورت فرمول (۳) بیان می‌شود:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i \quad (3)$$

در رابطه فوق، X_1, X_2, \dots, X_n متغیرهای ورودی و b_i ضرایب رگرسیون هستند که با توجه به داده‌ها باید تعیین شوند. Y نیز متغیر پاسخ (خروجی) است. در برخی مدل‌های رگرسیونی چند متغیره، اثر متقابل و مراتب بالاتر متغیرهای ورودی نیز در نظر گرفته می‌شود. به این دسته مدل‌ها، رگرسیون چند جمله‌ای خطی مرتبه دوم (یا بالاتر)، اطلاق

بنابراین، عمق حفره‌های سطحی کاهش می‌یابد که خود به معنی کاهش زبری سطح است. علاوه بر دلایل گفته شده در بخش قبل، دلیل دیگر آن که تغییرات ولتاژ ممکن در مشخصه‌های ماشین کاری اثر قابل توجهی ندارد این است که ولتاژی که بر روی ماشین تنظیم می‌شود ولتاژ منبع قدرت بوده (ولتاژ مدار باز) و ولتاژ دهانه ماشین کاری که در آن اسپارک رخ می‌دهد، معمولاً ۰/۲۰ تا ۰/۲۵ این ولتاژ است. تحلیل تاگوجی می‌تواند با یک دقت خوب، سطوح بهینه پارامترهای تنظیمی را برای هر یک از خروجی‌های مدنظر تعیین کند. همچنین محاسبه میزان تأثیر پارامترهای ورودی بر مشخصه‌های کیفی فرآیند از این طریق قابل انجام است. با این وجود تحلیل تاگوجی تنها قادر است از میان سطوح داده شده در آزمایش‌ها بهترین‌ها را انتخاب کند. در صورتی که اگر متغیرها به صورت پیوسته بوده و یا دارای سطوح متعددی باشند، از تحلیل تاگوجی برای تعیین سطوح دقیق پارامترها نمی‌توان استفاده کرد. دشوار بودن بهینه‌سازی چندهدفه نیز از جمله محدودیت‌های این روش است. در مرحله بعد با استفاده از داده‌های ماتریس بهینه، به مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند پرداخته شد تا بتوان نتایج این دو روش را باهم مقایسه کرد.

۳-۲- تحلیل نتایج بر اساس داده‌های طرح دترمینان بهینه

برای مدل‌سازی رگرسیونی بهتر است از ماتریس طرح تاگوجی استفاده نشود، چراکه ماهیت طراحی آزمایشات

۳-۲-۱- مدل سازی رگرسیونی نرخ برداشت براده

در این مرحله، هریک از مدل های خطی، درجه دو، درجه دو تعدیل یافته و نمائی برازش داده شده بر داده های حاصل از اجرای طرح آزمایشات، برای متغیر خروجی نرخ برداشت براده به طور مجزا معرفی شد. برای اعتبار سنجی و اطمینان از دقت مدل های ایجاد شده، آزمایشاتی خارج از آزمایش های طراحی شده انجام شده و نتایج حاصل از آن ها، با مقادیر خروجی حاصل از مدل ها مقایسه شد (جدول ۱۱). در انتها با توجه به روش های گفته شده برای تعیین میزان دقت و تناسب مدل رگرسیونی و همچنین با بررسی میانگین خطا در هر مدل، بهترین مدل برای ارزیابی نرخ برداشت براده و زبری سطح انتخاب شد. با توجه به کمتر بودن میانگین مطلق خطا در مدل درجه ۲ تعدیل یافته، این مدل به عنوان مدل ارزیابی نرخ برداشت براده در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ DIN 1.2080 انتخاب می شود. هر چند در این مدل R-sqr نسبت به مدل درجه ۲ کمتر است، اما دقت پیش بینی در آن بسیار بهتر است. این امر به دلیل بالا بودن R-sq(pred) و R-Sq(Adj) این مدل است. بنابراین می توان نتیجه گرفت مدلی برای پیش بینی مناسب تر است که ابتدا R-sq(pred) و سپس R-Sq(Adj) آن بیشتر باشد. همان طور که قبلاً مطرح شد، در این بخش، سایر تحلیل های آماری برای مدل انتخاب شده، مورد بررسی قرار خواهند گرفت. بدین منظور از جدول کامل تحلیل واریانس مدل انتخاب شده (جدول ۱۲) و نمودارهای باقیمانده (شکل ۵) استفاده شده است.

می شود. شکل کلی مدل چند جمله ای مرتبه دوم به صورت زیر بیان می شود،

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^{2n} b_i X_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{i,j} X_i X_j \quad (4)$$

رابطه (۵) نیز شکل کلی معادله رگرسیون نمایی (توانی) را با دو متغیر ورودی و یک خروجی نشان می دهد.

$$Y = a.X_1^b.X_2^g \quad (5)$$

برای مدل فوق اگر از طرفین رابطه (۶) لگاریتم گرفته شود، مدل مفروض خطی خواهد شد،

$$\text{Log}(Y) = \text{Log}(a) + b\text{Log}(X_1) + g\text{Log}(X_2) \quad (6)$$

گاهی با حذف پارامترهایی که در مدل تأثیر چندانی ندارند، به ضرایب همبستگی بالاتری می توان دست یافت. مدل حاصله با نام مدل تعدیل یافته شناخته می شود. برای یک سیستم خاص، مدل های رگرسیونی زیادی می توان به دست آورد. انتخاب بهترین مدل از میان آن ها باید با معیارهای مناسبی انجام شود. تحقیق در اعتبار مدل بخش مهمی از فرآیند مدل سازی رگرسیونی است. برای تعیین میزان دقت و تناسب یک مدل رگرسیونی از روش های مختلفی استفاده می شود که در ذیل به چند مورد از مهم ترین آن ها اشاره می شود [۱۷]:

الف- تصادفی بودن و داشتن توزیع نرمال باقیمانده ها (با استفاده از هیستوگرام باقیمانده ها و نمودار احتمال نرمال باقیمانده ها)

ب- مستقل بودن باقیمانده ها نسبت به ترتیب اجرا (با استفاده از تحلیل نمودارها)

ج- مستقل بودن باقیمانده ها در سطوح فاکتورها (با استفاده از تحلیل نمودار به دست می آید)

د- ضریب همبستگی R-sq R-adj R-pred (نشان دهنده ی شدت ارتباط بین متغیر ورودی و خروجی)

جدول (۱۱) اعتبارسنجی مدل‌های نرخ برداشت

نوع مدل	%R-pred	%R-adj	%R-sq	پارامترهای تنظیمی				خروجی مدل	خروجی واقعی	درصد خطا	میانگین خطا
				T _{off}	T _{on}	I	V				
خطی	۶۳/۶۱	۷۱/۲۶	۷۵/۸۰	۲۵	۲۵	۱۰	۱۰۰	۰/۰۰۸۶۹	۰/۰۰۷۳۹	۱۷/۵۹۲	۷/۱۵۶
				۲۰۰	۱۰۰	۲۰	۱۰۰	۰/۰۲۷۳۷	۰/۰۲۷۸۱	۱/۵۸۸	
				۱۰۰	۲۰۰	۲۰	۲۲۰	۰/۰۴۴۰۰	۰/۰۴۳۰۲	۲/۲۸۸	
درجه ۲	۸۵/۲۳	۹۲/۸۱	۹۶/۵۵	۲۵	۲۵	۱۰	۱۰۰	۰/۰۰۶۱۶	۰/۰۰۷۳۹	۱۶/۵۹۰	۹/۲۷۳
				۲۰۰	۱۰۰	۲۰	۱۰۰	۰/۰۲۶۷۵	۰/۰۲۷۸۱	۳/۸۰۲	
				۱۰۰	۲۰۰	۲۰	۲۲۰	۰/۰۳۹۸۲	۰/۰۴۳۰۲	۷/۴۲۷	
درجه ۲ تعدیل یافته	۹۲/۳۰	۹۴/۱۶	۹۵/۷۹	۲۵	۲۵	۱۰	۱۰۰	۰/۰۰۶۷۵	۰/۰۰۷۳۹	۸/۶۷۱	۶/۰۴۲
				۲۰۰	۱۰۰	۲۰	۱۰۰	۰/۰۲۶۴۷	۰/۰۲۷۸۱	۴/۸۲۵	
				۱۰۰	۲۰۰	۲۰	۲۲۰	۰/۰۳۹۸۲	۰/۰۴۳۰۲	۴/۶۳۱	
نمایی	۷۲/۲۹	۷۸/۶۶	۸۲/۰۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۰	۱۰۰	۰/۰۰۸۵۶	۰/۰۰۷۳۹	۱۵/۷۹۶	۸/۳۰۶
				۲۰۰	۱۰۰	۲۰	۱۰۰	۰/۰۲۸۱۰	۰/۰۲۷۸۱	۱/۰۰۱	
				۱۰۰	۲۰۰	۲۰	۲۲۰	۰/۰۴۶۸۲	۰/۰۴۳۰۲	۸/۱۱۲	

جدول (۱۲) تحلیل واریانس مدل درجه ۲ تعدیل یافته نرخ برداشت براده

منبع	DF	Seq SS	MS	F	p
رگرسیون	۷	۰/۰۰۴۹۳	۰/۰۰۰۷۰	۵۸/۵۶۵۴	۰/۰۰۰۰
T _{on}	۱	۰/۰۰۰۴۲	۰/۰۰۰۱۶	۱۳/۲۵۹۱	۰/۰۰۱۹
I	۱	۰/۰۰۲۵۵	۰/۰۰۰۵۴	۴۵/۲۰۲۴	۰/۰۰۰۰
T _{on} ×T _{on}	۱	۰/۰۰۰۳۴	۰/۰۰۰۳۹	۳۲/۵۳۳۴	۰/۰۰۰۰
T _{on} ×T _{off}	۱	۰/۰۰۰۵۰	۰/۰۰۰۰۸	۶/۳۴۸۸	۰/۰۲۱۴
I×I	۱	۰/۰۰۰۳۱	۰/۰۰۰۳۳	۲۷/۳۷۰۶	۰/۰۰۰۱
I×T _{off}	۱	۰/۰۰۰۷۶	۰/۰۰۰۷۳	۶۰/۶۱۸۵	۰/۰۰۰۰
I×T _{on}	۱	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۴	۴/۶۸۴۰	۰/۰۴۰۹
خطا	۱۸	۰/۰۰۰۲۲	۰/۰۰۰۰۱		
مجموع	۲۵	۰/۰۰۵۱۵			
R-sq=95.79%		R-sq(adj)=94.16%		R-sq(pred)=92.30	

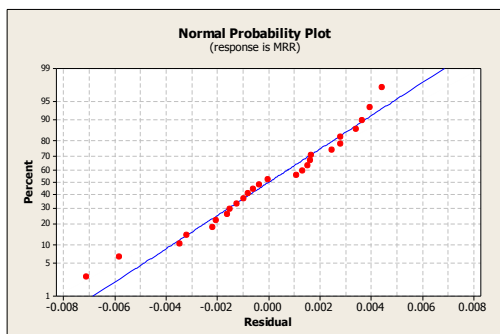
آزادی مجموع مربعات رگرسیونی (در اینجا ۷) و n تعداد آزمایش‌ها (در اینجا ۲۶) است. با استفاده از جداول آماری، F_{0.05,1,24} معادل ۲/۵۸ و F_{0.05,7,18} معادل ۴/۲۶ به دست می‌آید. با توجه به اینکه F₀ برای مدل درجه ۲ تعدیل یافته معادل ۵۸/۵۶۵۴ است و در پارامترهای ورودی نیز از حد بحرانی‌اش

آماره P: مناسب بودن این مدل و پارامترهای آن را تأیید می‌کند.

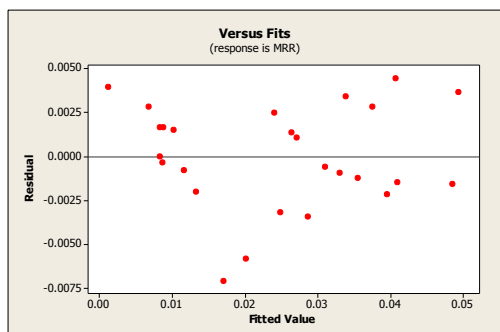
آماره F: باید با مقدار بحرانی خود (F_{α,k,n-k-1}) مقایسه شود. برای تأیید مناسب بودن مدل مورد بررسی، باید رابطه $F_0 > F_{\alpha,k,n-k-1}$ برقرار باشد. در محاسبه مقدار بحرانی، k درجه

جدول (۱۳) بهینه‌سازی نرخ برداشت براده

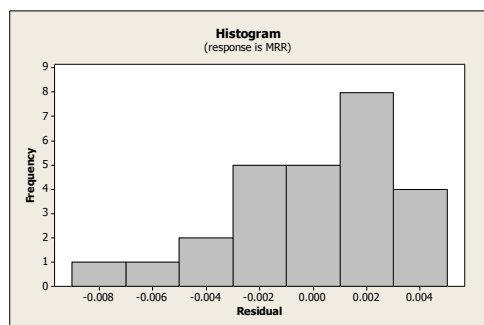
سطوح بهینه	مقدار MRR مورد آزمایش	خروجی مدل	درصد خطا
$V_1 I_3 T_{on2} T_{off1}$	۰/۰۵۲۱۷	۰/۰۴۹۳۹	۵/۳۲۸



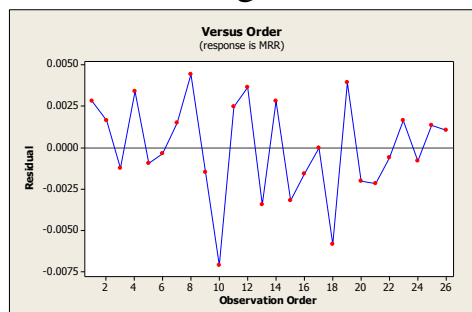
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۵) نمودارهای باقیمانده برای مدل نمائی نرخ برداشت براده

بیشتر است، پس این آماره نیز مناسب بودن مدل و ضرایب آن را تأیید می‌کند. در جداول کامل به دست آمده از مدل‌های توابع خطی، درجه ۲ و نمایی، آماره‌های P و F بی‌تأثیر بودن ولتاژ را برای نرخ برداشت براده نشان داد.

نمودارهای باقیمانده: شکل (۵) نمودارهای باقیمانده، برای تابع درجه ۲ تعدیل یافته‌ی نرخ برداشت براده را نشان می‌دهد. شکل (الف)، نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها را نشان می‌دهد. این نمودار از حالت ایده‌آلی برخوردار است زیرا به صورت یک خط مستقیم و با شیب ثابت است. در شکل (ب) این نمودار باید نسبت به نقطه صفر متقارن بوده و نقاط حول این نقطه به طور یکنواخت پراکنده شده باشند بنابراین، نمودار نرمال باقیمانده بیانگر این است که توزیع باقیمانده اتفاقی بوده و از روند خاصی پیروی نمی‌کند. شکل (ج) هیستوگرام باقیمانده‌ها را نشان می‌دهد که با توجه به شکل ایده‌آل و حالت زنگوله‌ای و همچنین ارتفاع (پهنا) آن، می‌توان در مورد وسعت پراکندگی قضاوت کرد. در نمودار زیر مشاهده می‌شود که پراکندگی نسبتاً مطلوب است و در حد قابل قبولی دارای پراکندگی نرمال است. در شکل (د) باقیمانده در طرح باید در یک الگوی تصادفی در اطراف خط وسط در نوسان باشد، بنابراین نشان می‌دهد تمام باقیمانده‌های استاندارد شده در بازه‌ی مناسبی قرار دارند.

بهینه‌سازی نرخ برداشت براده: با توجه به سطوح پارامترهای ورودی مورد استفاده در این آزمایش، با استفاده از مدل رگرسیونی به دست آمده، خروجی مدل برای تمامی حالات ممکن (برابر ۵۴ ترکیب از متغیرهای تنظیمی $(2^1 \times 3^3)$) محاسبه شده است. از آنجا که هدف بهینه‌سازی نرخ برداشت براده است، بیشترین خروجی مربوط به سطوح $T_{on2} V_1 I_3$ خواهد بود. برای صحه‌گذاری نتایج بهینه‌سازی، در انتها سطوح بهینه‌ی پیش‌بینی شده بر روی دستگاه، تنظیم و آزمایش مجدد انجام شد (جدول ۱۳).

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پیش‌بینی مدل با مقدار واقعی، کمتر از ۶٪ خطا دارد که این نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی نرخ برداشت براده در ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ DIN 1.2080 است.

۳-۲-۲- مدل سازی آماری برای زبری سطح

در این مرحله، هر یک از مدل‌های خطی، درجه دو، درجه دو تعدیل یافته و نمائی برازش داده شده بر داده‌های حاصل از اجرای طرح آزمایشات، برای متغیر خروجی زبری سطح به‌طور مجزا معرفی شد و سپس همانند مرحله قبل، با آزمایشاتی خارج از آزمایش‌های طراحی شده، هر مدل مورد اعتبارسنجی قرار گرفت (جدول ۱۴). با توجه به نتایج اعتبارسنجی، مدل درجه ۲ تعدیل یافته به‌عنوان بهترین مدل برای ارزیابی زبری سطح انتخاب می‌شود. جدول (۱۵) تحلیل واریانس مدل رگرسیونی درجه دو تعدیل یافته‌ی زبری سطح را نشان می‌دهد.

- **آماره F_0** : با استفاده از جداول آماری برای محاسبه مقدار F بحرانی، $F_{0.05,8,17}$ معادل ۲/۵۵ و $F_{0.05,1,24}$ معادل ۴/۲۶ به‌دست می‌آید. با توجه به جدول، F_0 برای مدل درجه ۲ تعدیل یافته و تمام ضرایب موجود در آن، از مقادیر بحرانی بیشتر است. پس این آماره نیز مناسب بودن مدل و ضرایب آن را تأیید می‌کند. جداول کامل به‌دست آمده از مدل‌های توابع خطی، درجه ۲ و نمایی، آماره‌های P و F بی‌تأثیر بودن ولتاژ و زمان خاموشی پالس را برای صافی سطح نشان می‌دهد.

جدول (۱۴) اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی زبری سطح

نوع مدل	%R-pred	%R-adj	%R-sq	پارامترهای تنظیمی				خروجی مدل	خروجی واقعی	درصد خطا	میانگین خطا
				T_{off}	T_{on}	I	V				
خطی	۷۸/۳۹	۸۳/۴۴	۸۶/۰۹	۲۵	۲۵	۱۰	۱۰۰	۱/۸۵۰	۲/۸۳۰	۳۴/۶۲۹	۱۷/۰۹۳
				۲۵	۱۰۰	۱۰	۲۲۰	۲/۶۸۱	۳/۱۵۵	۱۵/۰۲۴	
				۱۰۰	۲۰۰	۲۰	۲۲۰	۶/۵۶۸	۶/۴۶۳	۱/۶۲۵	
درجه ۲	۸۴/۷۲	۹۲/۵۹	۹۶/۴۵	۲۵	۲۵	۱۰	۱۰۰	۲/۴۵۶	۲/۸۳۰	۱۳/۲۱۵	۵/۸۲۵
				۲۵	۱۰۰	۱۰	۲۲۰	۳/۲۲۲	۳/۱۵۵	۲/۱۲۴	
				۱۰۰	۲۰۰	۲۰	۲۲۰	۶/۶۰۱	۶/۴۶۳	۲/۱۳۵	
درجه ۲ تعدیل یافته	۹۵/۸۵	۹۳/۹۰	۹۵/۸۵	۲۵	۲۵	۱۰	۱۰۰	۲/۶۸۸	۲/۸۳۰	۵/۰۱۸	۴/۲۸۲
				۲۵	۱۰۰	۱۰	۲۲۰	۳/۰۷۵	۳/۱۵۵	۲/۵۳۶	
				۱۰۰	۲۰۰	۲۰	۲۲۰	۶/۸۰۵	۶/۴۶۳	۵/۲۹۲	
نمایی	۸۵/۴۴	۸۸/۸۷	۹۰/۶۵	۲۵	۲۵	۱۰	۱۰۰	۲/۰۸۴	۲/۸۳۰	۲۶/۳۶۰	۱۰/۴۸۹
				۲۵	۱۰۰	۱۰	۲۲۰	۳/۱۱۰	۳/۱۵۵	۱/۴۲۶	
				۱۰۰	۲۰۰	۲۰	۲۲۰	۶/۷۰۱	۶/۴۶۳	۳/۶۸۲	

جدول (۱۵) تحلیل واریانس مدل رگرسیونی درجه دو تعدیل یافته زبری سطح

منبع	DF	Seq SS	MS	F	p
رگرسیون	۸	۵۷/۱۹۰۳	۷/۱۴۸۸	۴۹/۱۱۱۰	۰/۰۰۰۰
I	۱	۱۷/۱۳۲۰	۱/۶۲۹۰	۱۱/۱۹۱۱	۰/۰۰۳۸
T _{off}	۱	۱/۸۰۴۶	۱/۰۹۹۷	۷/۵۵۴۸	۰/۰۱۳۷
I×T _{on}	۱	۳۵/۰۰۴۴	۵/۷۸۲۵	۳۹/۷۲۵۰	۰/۰۰۰۰
T _{off} ×T _{off}	۱	۰/۴۲۱۱	۰/۵۶۴۷	۴/۸۷۹۵	۰/۰۴۵۴
V×I	۱	۰/۷۶۱۱	۰/۹۸۶۲	۶/۷۷۵۲	۰/۰۱۸۶
V×T _{off}	۱	۰/۶۷۷۷	۰/۶۳۰۲	۴/۳۲۹۴	۰/۰۴۲۹
T _{off} ×T _{on}	۱	۰/۴۴۴۶	۰/۸۰۱۹	۵/۵۰۹۱	۰/۰۳۱۳
T _{on} ×T _{on}	۱	۰/۹۴۴۹	۰/۹۴۴۹	۶/۴۹۱۴	۰/۰۲۰۸
خطا	۱۷	۲/۴۷۴۶	۰/۱۴۵۶		
مجموع	۲۵	۵۹/۶۶۴۹			
R-sq(pred)=92.30%		R-sq(adj)=94.16%		R-sq=95.79%	

روشنی پالس در سطوح اول خود و ولتاژ و زمان خاموشی پالس در سطوح دوم خود تنظیم شوند در انتها نیز به منظور صحنه گذاری مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل، آزمایشی با سطوح جدید انجام شد و مقدار خروجی مدل با خروجی واقعی آزمایشی که با این سطوح انجام شد مقایسه شد که نتیجه آن در جدول (۱۶) آمده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، خطای پیش‌بینی تنها معادل ۸ درصد است. این خطا به دلیل تأثیر عوامل محیطی و سایر پارامترهای غیرقابل کنترل بر روی ماشین‌کاری است. با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و ماهیت صنعتی آن، این مقدار خطای پیش‌بینی در حد قابل قبولی قرار دارد [۱۵].

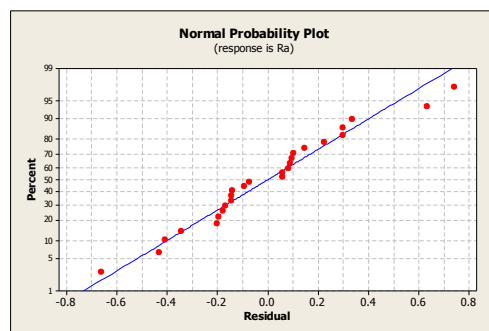
- **نمودارهای باقیمانده:** شکل (۶) نمودارهای باقیمانده برای مدل درجه ۲ تعدیل یافته، زبری سطح را نشان می‌دهد. شکل (الف)، نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها است. بر طبق آنچه در ابتدای فصل مطرح شد، این نمودار از حالت ایده‌آلی برخوردار است. شکل (ب) نیز بیانگر این است که توزیع باقیمانده اتفاقی بوده و از روند خاصی پیروی نمی‌کند. شکل (ج) هیستوگرام باقیمانده‌ها را نشان می‌دهد که با توجه به شکل ایده‌آل و حالت زنگوله‌ای، تقارن تابع احتمال حول میانگین توزیع و همچنین ارتفاع آن، می‌توان گفت که در حد قابل قبولی دارای پراکندگی نرمال است. شکل (د) نیز نشان می‌دهد تمام باقیمانده‌های استاندارد شده، در بازه مناسبی قرار دارند.

- **بهینه‌سازی زبری سطح بر اساس بهترین مدل:** به‌منظور یافتن سطوح بهینه زبری سطح ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، تمام حالات ممکن برابر با ۵۴ آزمایش، بررسی و خروجی مدل برای تمامی این حالات محاسبه شده است. از آنجا که هدف کمیته‌سازی زبری سطح است، کمترین خروجی، مربوط به آزمایشی بود که شدت جریان و زمان

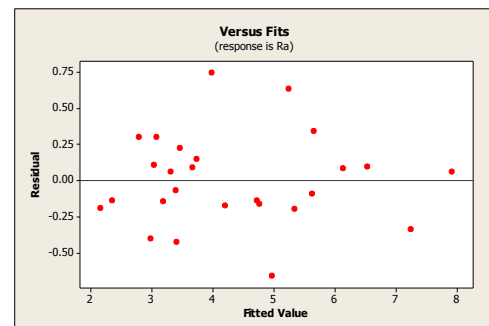
۴- نتیجه گیری

تحلیل‌های آماری انجام شده در هر دو طرح، نتایج مشابهی ارائه می‌دهند. در بررسی نرخ برداشت براده مشخص شد برای داشتن حداکثر نرخ براده برداری برای ولتاژ و زمان روشنی پالس، سطوح باید در سطح بالای خود و زمان خاموشی پالس باید در سطح پایین خود تنظیم شوند. با این کار، حداکثر انرژی تخلیه، حاصل شده و براده برداری بیشتری صورت می‌گیرد. ولتاژ در این پارامتر خروجی تأثیری ندارد، اما پارامتر شدت جریان با بیشترین درصد تأثیرگذاری، مهم‌ترین پارامتر تنظیمی است. پس از آن، زمان روشنی پالس و پارامتر زمان خاموشی پالس به ترتیب تأثیرگذارترین پارامترها هستند. همچنین، در بررسی زبری سطح، مشخص شد پارامتر ولتاژ در این خروجی نیز بی‌تأثیر است. علاوه بر آن فاکتور زمان خاموشی پالس نیز بر زبری سطح تأثیر چندانی ندارد، اما پارامتر شدت جریان و زمان روشنی پالس به ترتیب بیشترین اثرگذاری را دارند. چراکه با کاهش آن‌ها، انرژی تخلیه نیز کم شده و قدرت براده برداری جرقه کم می‌شود. بنابراین، زبری سطح کاهش می‌یابد. در بررسی نتایج آزمایشات صحه گذاری، همان‌طور که ملاحظه شد، هر دو طرح از دقت مناسبی برخوردار هستند.

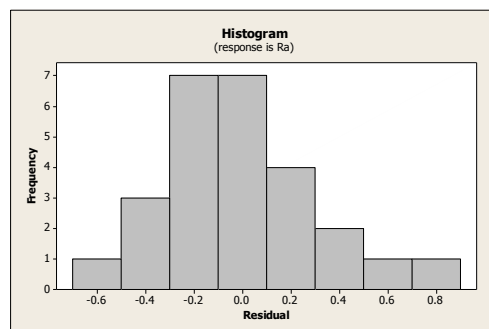
در نهایت می‌توان گفت ولتاژ کار در میزان براده برداری و به تبع آن صافی سطح، نقشی اساسی ندارد و فقط موجب می‌شود که عمل یونیزاسیون با سرعت دلخواه انجام شود. اختلاف کم نرخ براده برداری و صافی سطح در دو سطح پارامتر ولتاژ و آماره‌های P و F در جداول مختلف به دست آمده از روش‌های متفاوت، گویای این مطلب است. جریان در اسپارک به صورت خطی تغییر می‌کند و بیشترین تأثیر را بر روی دو پارامتر خروجی می‌گذارد. هرچه مقدار جریان بیشتر باشد سرعت براده برداری بیشتر و صافی سطح



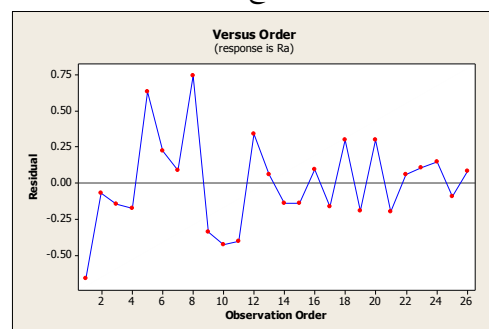
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۶) نمودارهای باقیمانده برای مدل درجه ۲ تعدیل یافته زبری سطح

جدول (۱۶) بهینه‌سازی کیفیت سطح

درصد خطا	خروجی مدل	مقدار R_a مورد آزمایش	سطوح بهینه
۵/۳۲۸	۰/۰۴۹۳۹	۰/۰۵۲۱۷	$V_2 I_1 T_{on1} T_{off2}$

میزان عمق ذوب سطحی و در پی آن نرخ برداشت براده را کاهش می‌دهد.

ماهیت دو خروجی در نظر گرفته شده باهم متفاوت است، بدین معنی که کاهش زبری سطح (افزایش کیفیت سطح) معادل با کاهش نرخ براده برداری خواهد بود (و بالعکس).

در نهایت مشخص شد هر دو طرح از دقت مناسبی برخوردارند، اما در مدل‌سازی رگرسیونی با استفاده از داده‌های ماتریس بهینه به دو دلیل شاهد دقت بالاتری هستیم. اولاً این که تعداد آزمایش‌ها در این طرح، از طرح تاگوچی بیشتر بود، ثانیاً در این روش تعامل پارامترها نیز مورد توجه قرار می‌گرفت، اما در روش تاگوچی تنها تأثیر هر پارامتر به صورت مجزا مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

مراجع

- [1] Kalpakjian S, *Manufacturing Engineering and Technology*, Addison-Wesley, 1995.
- [2] Uhlmann E., Domingosb D.C., Development and optimization of the die-sinking EDM technology for machining the nickel-based alloy MAR-M247 for turbine components, *Procedia CIRP*, Vol. 6, 2013, pp. 180 – 185.
- [3] Ayestaa, Izquierdob B., Influence of EDM parameters on slot machining in C1023 aeronautical alloy, *Procedia CIRP*, Vol. 6, 2013, pp. 129 – 134.
- [4] Gopakalannan S., Sinthelevan T., Modeling and Optimization of EDM Process parameter on Machining of AL 7075-B4 MMC using RSM, *Procedia Engineering*, Vol. 38, 2012, pp. 685 – 690.
- [5] Clijsters S., Liu K., EDM technology and strategy development for the manufacturing of complex parts in SiSiC, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, 2010, pp. 631–641.
- [6] Tzeng Y.F., Development of a flexible high-speed EDM technology with geometrical transform optimization, *journal of materials processing technology*, Vol. 203, 2008, pp. 355–364.

کمتری خواهیم داشت. افزایش شدت جریان باعث می‌شود حداکثر نرخ انرژی تخلیه شده بر سطح قطعه کار ایجاد شده و با ذوب و تبخیر احجام بزرگ‌تری از قطعه کار، MRR افزایش یابد. دلیل تأثیر بالای شدت جریان بر کیفیت سطح نیز این است که با کاهش شدت جریان، میزان انرژی جرقه تا حد زیادی کاهش یافته و در نتیجه در هر پالس، مقدار کمتری از سطح قطعه کار ذوب و تبخیر می‌شود. بنابراین، عمق حفره‌های سطحی کاهش می‌یابد که خود به معنی کاهش زبری سطح است. در رابطه با زمان روشنی و خاموشی پالس، همان‌گونه که در بخش‌های قبل توضیح داده شد On time تعیین‌کننده‌ی مدت ایجاد و حضور واقعی جرقه بین کار و الکتروود است، با افزایش این پارامتر، در هر سیکل میزان بیشتری از سطح کار کنده می‌شود و بنابراین نرخ براده برداری بیشتر و صافی سطح کمتری خواهیم داشت و البته کاهش غیرمعمول On time و یا عدم تناسب مقدار زمان on و جریان، به خوردگی شدید الکتروود، طولانی شدن کار و عدم کیفیت مطلوب منجر خواهد بود. در زمان‌های off time، جریان قطع شده و توسط مایع دی‌الکتریک ذرات کنده شده از سطح فلز، از محل دور می‌شوند. هرچه کانال off کمتر باشد، میانگین تعداد جرقه‌ها در واحد زمان بیشتر شده و سرعت براده برداری افزایش می‌یابد که نتایج تحلیل‌ها در زمینه MRR گویای این مطلب است. اما در رابطه با صافی سطح به دلیل بی‌تأثیر بودن این پارامتر سطوح متفاوتی مشخص گردید. باید توجه داشت که عدم تناسب زمان on و off منجر به افزایش و کاهش بیش از حد زمان خاموشی پالس و در نتیجه تجزیه دی‌الکتریک و ایجاد آرک و تشکیل گرافیت می‌شود و همچنین تنظیم ولتاژ زیاد بعد از یک حد بهینه، موجب افزایش میزان لقی گپ می‌شود که این امر،

[7] Rajmohan T., Prubho R., Optimization of Machining parameter in EDM of 304 Stainless Steel, *Procedia Engineering*, Vol. 38, 2012, pp. 1030 – 1036.

[8] Zarepour H., Fadaei Tehrani A., Statistical analysis on electrode wear in EDM of tool steel DIN 1.2714 used in forging dies, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187–188, 2007, pp. 708–714.

[9] Tzeng Y.F., Chen F., Multi-objective optimization of high-speed electrical discharge machining process using a Taguchi fuzzy-based approach, *Materials and Design*, Vol. 28, 2007, pp. 1159–1168.

[۱۰] صابونی ح.ر.، بررسی پارامترهای ماشین کاری EDM با ابزار گرافیتی بر روی خواص مکانیکی آلیاژهای حافظه دار NITI، دانشگاه آزاد اسلامی خمینی شهر، طرح پژوهشی، ۱۳۹۱.

[۱۱] عندلیب م.، ماشین کاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به روش تخلیه الکتریکی و بررسی تأثیر پارامترهای تنظیمی در کیفیت سطح و نرخ براده برداری قطعات تولیدی، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۹۲).

[12] www.esttoolsteel.com, (2015/2).

[13] Genichi Taguchi, Taguchi quality engineering handbook, New Jersey, 2005.

[14] www.minitab.com, 2015/3.

[15] Rajmohan T., Prubho R., optimization of Machining parameter in EDM of 304 Stainless Steel, *Procedia Engineering*, Vol. 38, 2012, pp. 1030 – 1036.

[۱۶] سمپریت، چترجی، علی اس، هادی و برترام، پرایس، ترجمه‌ی دکتر حسینعلی نیرومند؛ تحلیل رگرسیون با مثال، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ویرایش سوم، ۱۳۸۴.

[17] MINITAB 16.2.4 Manual, Minitab Inc., 2015.