



تجزیه و تحلیل آماری و بهینه سازی چند هدفه فرآیند وایرکات آلیاژ کاربید تنگستن با استفاده از روش های تاگوچی و الگوریتم ژنتیک

حسین نوری^۱

^۱ استادیار، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵

چکیده

از جمله اهداف مهم در فرآیندهای برش می‌توان به کاهش هزینه ها، افزایش سرعت تولید و ایجاد صافی سطح مطلوب اشاره کرد. فرآیند برش توسط سیم با استفاده از تخلیه الکتریکی (وایرکات) (WEDM) یکی از روش‌های تولید قطعات کاربید تنگستن است که برش آن با روش‌های سنتی به دلیل قابلیت برش ضعیف آن دشوار است. نرخ براده برداری و زبری سطح از مهمترین مشخصه‌های خروجی فرآیند وایرکات است. در این تحقیق، فرآیند برش وایرکات بر روی آلیاژ کاربید تنگستن مدل‌سازی و بهینه سازی شده است. در این راستا، ابتدا داده‌های لازم با انجام آزمایش تجربی، طرح ریزی شده با تکنیک طراحی آزمایشات (DOE) به روش تاگوچی، جمع آوری گردیده است. سپس انواع توابع رگرسیونی شامل خطی و مرتبه دوم برای این داده‌ها برازش داده شده است. در مرحله بعد، اعتبار این مدل‌ها به کمک آزمون‌های فرض آماری و تحلیل واریانس مورد سنجش قرار گرفته است. بعد از تعیین مدل‌های مناسب، با استفاده از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب (NSGA-II) بهینه سازی فرآیند انجام شده و جدول بهینه‌ها برای ترکیب پارامترهای ورودی ارائه شده است. در نهایت یک آزمایش تأیید با یکی از ترکیبات جدول بهینه‌های بدست آمده، انجام شده و نتایج حاصل از این آزمایش با نتایج به دست آمده از طریق بهینه سازی مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهند که شدت جریان و زمان روشنی پالس پارامترهای تأثیر گذار در نرخ براده برداری و زبری سطح هستند و ولتاژ گپ و کشش سیم پارامترهای بی اثر بر این خروجی ها به حساب می‌آیند.

کلمات کلیدی: وایرکات؛ نرخ برش؛ زبری سطح؛ مدل‌سازی؛ بهینه سازی

Statistical analysis and multi-objective optimization of tungsten carbide alloy wirecut process using Taguchi method and genetic algorithm

H. Nouri¹

¹ Asst. Prof., Mech. Eng., Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran

Abstract

Wire electrical discharge machining (WEDM) is one of the methods of producing tungsten carbide parts, which due to its poor machinability; optimal cutting with traditional methods is not possible. Material removal rate and surface roughness are the most important output indicators of the wire cut process. In this research, the Wire cut electrical discharge cutting process on tungsten carbide alloy has modeled and optimized. In this regard, first, the necessary data collected by conducting an experiment, designed by the Design of experiments (DOE) by Taguchi method. Then the types of regression functions including linear and second order fitted for this data. In the next step, the validity of these models has been assessed using statistical hypothesis tests and analysis of variance. After determining the appropriate models, the process optimization is performed using the genetic algorithm based on non-dominated sorting (NSGA-II) and the optimal combination of input parameters table is presented. Finally, a validation experiment performed with one of the compositions of the optimal table and the results of this experiment compared with the results obtained through optimization. The results show that the current intensity and pulse on time are the parameters affecting the material removal rate and surface roughness and, the gap voltage and wire tension are ineffective parameters on these output characteristics.

Keywords: Wire cut; Material Removal Rate; surface Roughness; Modeling; Optimization.

۱- مقدمه

خواص برجسته‌ای از کاربید تنگستن مانند سختی بالا و مقاومت در برابر سایش، خوردگی و اکسیداسیون، استحکام کششی بالا، مقاومت خستگی بالا علت اصلی استفاده گسترده از کاربید تنگستن است. برش کاربید تنگستن در حداقل زمان و با حداکثر کیفیت یک موضوع قابل توجه در همه زمینه های استفاده از آن در ساخت وسایل برش، پوشش مواد مقاوم در برابر سائیدگی، ابزارهای حفاری در حفاری‌های معدنی، نفت و آب است. در طول دهه‌های گذشته استفاده از کاربید تنگستن با توجه به توسعه روش‌های جدید مانند برش وایرکات گسترش یافته است [۱].

اثر تخلیه الکتریکی در فرسایش مواد توسط جوزف پرستلی^۱ در سال ۱۷۷۰ مورد مطالعه قرار گرفت، اما از این روش در ماشینکاری فلزات تا سال ۱۹۳۰ استفاده نشد. دو دانشمند روسی به نامهای بی. آر. لازرنکو^۲ و ان. آی. لازرنکو^۳ در سال ۱۹۴۳ فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی (EDM) را اختراع کردند [۲]. فرآیندهای EDM متعددی وجود دارند که در شکل ۱ نشان داده شده اند. این طبقه بندی EDM به سه دسته اصلی توسط پانندی^۴ و شان^۵ معرفی شده است [۳]. گاهی اوقات فرآیند برش توسط سیم با استفاده از تخلیه الکتریکی (وایرکات) تنها روش ممکن برای برش هندسه های پیچیده است. یک شماتیک از فرآیند وایرکات در شکل ۲ نشان داده شده است که در آن سیم و قطعه کار در یک مایع دی الکتریک غوطه ور است. محققان زیادی مانند پاتیل و برهمنکار^۶ [۵]، راثو^۷ [۶]، گلشن^۸ [۷]، موخرجی^۹ [۸]، پاتیل و پاتل^{۱۰} [۹] و طهماسبی [۱۰] برای بهبود ویژگی‌های فرآیند وایرکات مانند نرخ برش، زبری سطح و دقت ابعادی تلاش کردند؛ اما استفاده از پتانسیل کامل این فرآیند به دلیل پیچیدگی و طبیعت تصادفی آن و همچنین به دلیل درگیر بودن تعداد زیادی پارامتر ورودی در آن، به طور کامل حل

نشده است. محققینی مانند راگونات^{۱۱} [۱۱]، پراسات^{۱۲} [۱۲]، گویالا^{۱۳} [۱۳]، المهالوی^{۱۴} [۱۴] و کومار^{۱۵} [۱۵] بهینه سازی پارامترهای فرآیند وایرکات فولاد نرم و فولاد ضد زنگ را مورد بررسی قرار داده‌اند. نرخ براده برداری و زبری سطح، در برابر پارامترهای فرآیند وایرکات مانند زمان روشنی پالس، ولتاژ و نرخ تغذیه سیم مورد مطالعه قرار گرفته است. یک مدل رگرسیون برای نرخ براده برداری و زبری سطح به دست آمده و بنابراین، پارامترهای ماشینکاری برای دستیابی به اهداف ترکیبی از نرخ بالاتر براده برداری و مقدار زبری سطح پایین تر در این کار بهینه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تحلیل طراحی قوی تاگوچی یک تکنیک مؤثر برای بهینه‌سازی پارامترهای ماشینکاری برای فرآیند وایرکات است. علاوه بر آن کومار [۱۵] همچنین روش رویه پاسخ همراه با "روش تحلیلی رابطه خاکستری"^{۱۶} را برای بهینه سازی پارامترهای ماشینکاری WEDM پیشنهاد داده است. بومیک و مایتی^{۱۷} [۱۶] و فان^{۱۸} [۱۷] نیز در زمینه بهینه سازی چند هدفه ماشینکاری وایرکات بر روی آلیاژ تیتانیوم به روش تحلیلی طراحی خاکستری پرداخته‌اند.

چادھاری^{۱۹} [۱۸] اثر پارامترهای فرآیند WEDM بر مورفولوژی سطح آلیاژ نیکل - تیتانیوم با استفاده از تجزیه و تحلیل سطح سه بعدی را مورد مطالعه قرار داده است. نتایج تحلیل سطح سه بعدی نشان داده است که مقدار زبری سطح بیشتر در بالای سطح کار و زبری سطح کمتر در قسمت پایین سطح کار وجود می‌آید. مورفولوژی سطح نمونه ماشینکاری شده به دست آمده در پارامترهای بهینه، کاهش ریزترک ها را در مقایسه با سطح ماشینکاری شده به دست آمده در سطح انرژی تخلیه بالا نشان داد. الدورابی^{۲۰} [۱۹] و اقبال^{۲۱} [۲۰] مدلی از شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک برای پیش بینی و بهینه سازی نرخ براده برداری و صافی

¹¹ Ragunath

¹² Prasath

¹³ Goyala

¹⁴ El-Mahalawy

¹⁵ Kumar

¹⁶ Grey relation analysis

¹⁷ Bhaumik and Maity

¹⁸ Phan

¹⁹ Chaudhari

²⁰ Alduroobi

²¹ Iqbal

¹ Joseph Priestley

² B. R. Lazarenko

³ N. I. Lazarenko

⁴ Pandey

⁵ Shan

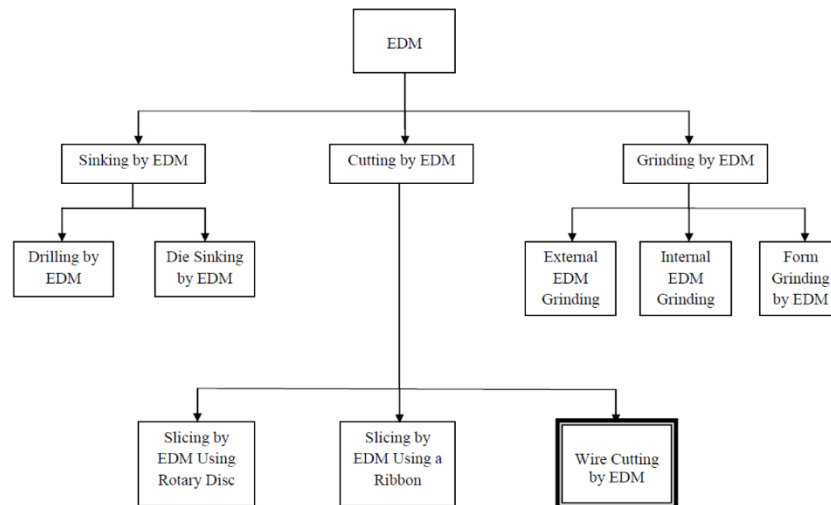
⁶ Patil, and Brahmankar

⁷ Rao

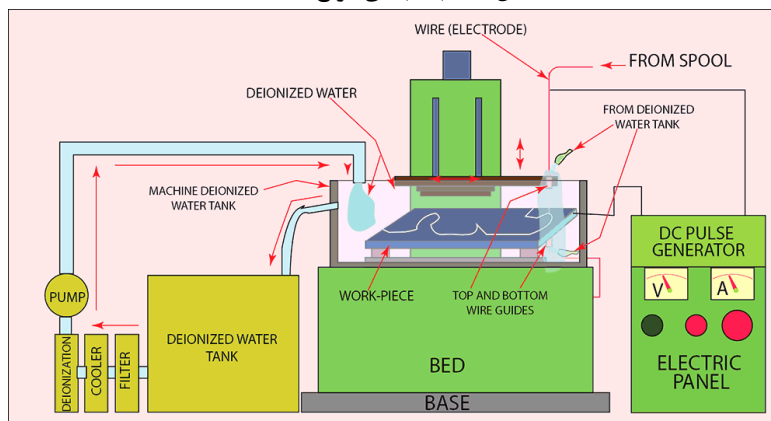
⁸ Golshan

⁹ Mukherjee

¹⁰ Patela and Patel



شکل ۱- طبقه بندی انواع EDM [۳]



شکل ۲- شماتیک فرآیند WEDM [۳]

توجه قرار گرفته و بطور ویژه بر روی کاربرد تنگستن انجام نشده است.

از طرفی برش کاربرد تنگستن با صافی سطح بالا هدف بسیاری از صنایع و محققان است. علاوه بر این نرخ برش یکی دیگر از عوامل مورد نیاز برای بهره وری است؛ چون در روش وایرکات پارامترهای زیادی در مشخصه های خروجی نرخ براده برداری و زبری سطح دخیل هستند و از طرفی در غالب دستگاه‌های موجود وایرکات، جدول تکنولوژی برای تنظیم پارامترهای برش آلیاژ تنگستن کاربرد وجود ندارد. در تحقیقاتی هم که تا به حال انجام شده است، شرایط بهینه معرفی شده متأثر از جنس قطعه و شرایط برش است و نمی‌توان آنها را برای سایر مواد و یا شرایط تولید مختلف مورد استفاده قرار داد؛ بنابراین ضرورت شناسایی و تحت

سطح در فرایند ماشین کاری وایرکات فولاد AISI 1045 و AISI 201 به ترتیب بنا نهادند. در این تحقیقات از روش تاگوچی و تحلیل واریانس برای پیدا نمودن مدل تحقیق استفاده شده است.

مدل‌های ریاضی مختلفی مانند RSM و شبکه‌های عصبی و غیره برای پیش بینی نرخ براده برداری و زبری سطح قطعات ماشینکاری شده به وسیله وایرکات ارائه شده است. محققان به این نتیجه رسیده‌اند که ترکیب واحدی از پارامترهای مختلف برای شرایط بهینه در موقعیت‌های مختلف وجود ندارد. بررسی متون نشان می‌دهد که محققان بیشتر کار توسعه، نظارت و کنترل وایرکات را انجام داده‌اند و کارهای محدودی در زمینه بهینه سازی خروجی‌های فرآیند انجام شده است. مخصوصاً بهینه سازی چند هدفه کمتر مورد

عنوان مرجعی برای تنظیم پارامترها در برش کاربرد تنگستن با وایرکات باشد.

۲- روش تحقیق

به منظور شناسایی پارامترهای فرآیند که ممکن است بر خصوصیات قطعات برش شده با وایرکات تاثیر داشته باشد، یک نمودار علت و معلولی ایشیکاوا رسم شد که در شکل ۳ نشان داده شده است. در این تحقیق در مورد پارامترهای ورودی و خروجی فرآیند وایرکات، مطابق شکل ۴ پارامتر شدت جریان، زمان روشنی پالس، ولتاژ گپ و کشش سیم را که با توجه به ادبیات موضوع از مهمترین پارامترها میباشند، به عنوان ورودی‌های فرآیند در نظر گرفته و مشخصه‌های نرخ برش و زبری سطح به عنوان خروجی در نظر گرفته شده‌اند. برای انجام آزمایشها، در این تحقیق یک دستگاه برش توسط سیم با استفاده از تخلیه الکتریکی (وایرکات) پنج محوره مدل AF300 shape well ARD مستقر در یک کارگاه قالبسازی مورد استفاده قرار گرفته است. دستگاه وایرکات ARD AF300 به اپراتور اجازه می‌دهد که پارامترهای ورودی را انتخاب کرده و سطوح آنها را در حین برش تغییر دهد. این دستگاه سرعت برش و زمان برش را محاسبه کرده و مقدار آنها را در روی صفحه نمایش نشان می‌دهد. مشخصات دستگاه وایرکات استفاده شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

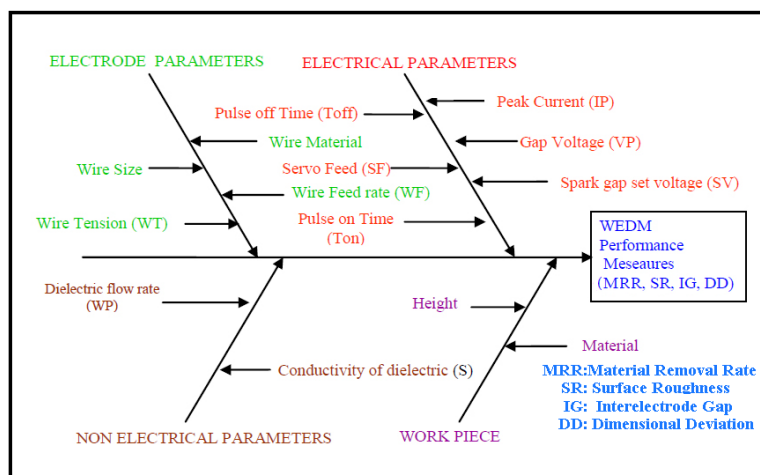
کنترل در آوردن پارامترهای موثر بر نرخ براده برداری و زبری سطح در برش آلیاز کاربرد تنگستن بوسیله وایرکات، جهت بدست آوردن ترکیب بهینه برای دو مشخصه خروجی مزبور احساس می‌شود [۱].

بنابراین اهدافی که این تحقیق دنبال می‌کند:

- بررسی تاثیر پارامترهای ورودی روی پاسخ‌های خروجی برش وایرکات است. در این تحقیق با بررسی پارامترهای ورودی و ارتباط آنها با پاسخ‌های خروجی فرآیند (نرخ براده برداری و زبری سطح)، پارامترهایی که بیشترین تاثیر را در خروجی دارند تعیین شده و درصد تأثیر گذاری آنها هم مشخص می‌شود؛ همچنین برهم کنش بین پارامترهای ورودی و تاثیر آنها بر پاسخ‌های خروجی هم مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

- با استفاده از روش مدل سازی رگرسیونی، برای تعیین نحوه ارتباط پارامترهای ورودی با پاسخ‌های خروجی، معادله رگرسیون پاسخ‌های خروجی بدست خواهد آمد. کفایت این معادله‌ها با روش‌های مختلفی مورد تأیید قرار خواهد گرفت.

- بهینه سازی چند هدفه پارامترهای برش در طول فرآیند وایرکات کاربرد تنگستن و بدست آوردن ترکیب بهینه پارامترها است. پارامترها باید به گونه‌ای بهینه سازی شوند که پاسخ‌های خروجی همزمان بهبود یابند. جدول ترکیب‌های بهینه‌ای که به دست خواهد آمد، می‌تواند به



شکل ۳- نمودار علت و معلولی ایشیکاوا برای تحلیل پارامترهای موثر بر عملکرد وایرکات [۲۱]

جدول ۱- مشخصات دستگاه وایرکات استفاده شده

کورس محورهای Z و Y, X	ماکزیمم وزن قطعه کار	ماکزیمم ارتفاع قطعه کار	طراحی ماشین
به ترتیب ۳۰۰ و ۳۰۰، ۵۰۰ میلیمتر	۲۰۰ کیلوگرم	۳۰۰ میلیمتر	میز ثابت ستون متحرک
مابع دی الکترونیک	قطر الکتروود سیم	برق ورودی	
آب دی یونیزه	۲۵، میلیمتر	سه فاز ۳۸۰~۴۴۰ ولت	



شکل ۴- پارامترهای فرآیند و مشخصه های خروجی

جدول ۲- ترکیب شیمیایی-خواص مکانیکی و فیزیکی

کاربید تنگستن مورد استفاده [۳۴]

ترکیب شیمیایی			
اجزاء	C	W	Fe
%	۶/۲	۹۳/۴۹	<۰/۰۳
خواص مکانیکی			
سختی Vickers(VH)	نسبت پواسون	استحکام تسلیم MPa	استحکام کششی GPa
۱۷۳۰	۰/۲ - ۰/۲۲	۵۳۰	۰/۳۴۴۸
خواص فیزیکی			
هدایت گرمایی	دمای ذوب	مدول الاستیکی	دانشسته kg/m ³
۲۸-۸۸ W/m.K	۳۰۰۰- ۳۱۹۳	۶۶۸/۳۵- ۷۱۳/۸۲	۱۵۸۰۰

در این تحقیق برای اطمینان بیشتر طول برش (۱۰ میلیمتر) بر زمان سپری شده برای هر برش که در صفحه نمایش دستگاه وایرکات ثبت می شود، تقسیم شده و بدین ترتیب سرعت برش برای هر مسیر برش بر حسب میلیمتر بر دقیقه بدست می آید.

الکتروود مورد استفاده در دستگاه وایرکات ARD AF300 از جنس برنج بدون پوشش است که قطر آن ۲۵، میلیمتر است. این الکتروود از نوع مصرفی بوده و پس از یک بار استفاده کردن دور ریخته می شود.

برای آنالیز شیمیایی قطعه کار مورد استفاده از یک دستگاه کوانتومتر پرتابل مدل Thermo Scientific Niton XL2 استفاده شده است. خروجی زبری سطح هم توسط یک زبری سنج بدست آمده است. نتایج حاصل از آزمایش کوانتومتری برای تعیین درصد عناصر تشکیل دهنده کاربید تنگستن مورد استفاده، در جدول ۲ نشان داده شده است.

شمشی از کاربید تنگستن به طول ۲۳۰ میلیمتر با سطح مقطع ۲۰×۳۰ میلیمتر روی ماشین وایرکات ARD AF300 بسته شد و نمونه ها به ابعاد ۱۰×۱۰×۳۰ بریده شدند. نمای نزدیکی از قطعه مورد استفاده برای بریدن نمونه ها که روی دستگاه وایرکات نصب شده است، در شکل ۵ دیده می شود.

برای اندازه گیری نرخ برش یک برش مستقیم به طول ۱۰ میلیمتر و ارتفاع درگیری سیم با قطعه کار (ارتفاع نمونه ها) به اندازه ۳۰ میلیمتر ایجاد شده است. در حین این کار دستگاه وایرکات در صفحه نمایش خود سرعت برش و زمان برش را نشان می دهد.

وقتی که الکتروود سیمی به ۵۰ درصد مسیر برش رسید، سیم و عمل برش در حالت پایدارتری است و می توانیم سرعت برش را از صفحه نمایش دستگاه وایرکات ثبت کنیم.

گیری زبری سطوح از لبه های قطعه کار حدوداً به اندازه ۲ میلیمتر افست در نظر گرفته شده است. مسیر حرکت قلم در هر اندازه گیری ۵/۶ میلیمتر است که نمونه گیری زبری در ۱/۷۵ میلی متر از مسیر حرکت صورت گرفته است. میانگین سه اندازه بدست آمده برای هر سطح به عنوان زبری آن سطح در نظر گرفته شده است.



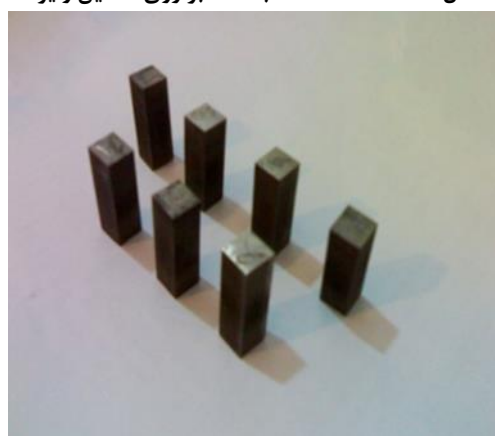
شکل ۵- الف - قطعه نصب شده بر روی ماشین وایرکات



شکل ۶ - تصویری از زبری سنج Mahr Perthometer M1

۲-۱- طراحی آزمایشات و بهینه سازی

برای انجام کارآمد آزمایشها، یک رویکرد علمی مؤثر برای طراحی آزمایشها (DOE) لازم است. در این تحقیق، بوسیله طراحی آماری، فرآیند طراحی آزمایشها به روش تاگوچی انجام گرفته است. سپس داده های مورد نظر جمع آوری و با روشهای آماری تجزیه و تحلیل شده است. تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) یک راه حل آماری است که اغلب برای مشخص کردن درصد سهم هر پارامتر به ازای یک سطح قابل اعتماد، بر روی نتایج آزمایشها اعمال می شود [۲۲] و [۲۳]. مطالعه جدول واریانس برای تجزیه و تحلیل داده ها کمک می کند تا مشخص شود که کدام یک از پارامترها نیاز به کنترل دارند [۲۴]. با استفاده از روش تاگوچی می توان تابع های گوناگون پاسخ را برحسب فاکتورهای مشخص شده تخمین زد [۲۵] و [۲۶]. نتایج تخمین زده شده محقق را در به دست آوردن عواملی که به بهترین نتایج برای آزمایش مدنظر منجر می شود، یاری می کند. با اجرای آزمایشها در سطوح بهینه فاکتورها و مقایسه نتایج واقعی با مقدار تخمین زده شده، دقت طراحی انجام شده مشخص می شود. روش تاگوچی در مقایسه با روشهای عاملی مزایایی چون کمتر بودن تعداد آزمایشها و در نتیجه کمتر بودن هزینه و زمان آزمایش، قابلیت بررسی اثرهای متقابل و انجام دادن



شکل ۵- ب - مجموعه ای از نمونه های بریده شده

معمولاً پارامتری که بیشتر برای اندازه گیری زبری سطح مورد استفاده قرار می گیرد، Ra است. در این روش زبری سطح میانگین با مقایسه دره ها و قله ها با خط میانگین در طول مسیر نمونه گیری زبری، اندازه گرفته می شود. طول مسیر نمونه گیری زبری (Cut-off) مسیری است که سوزن زبری سنج روی سطح کشیده می شود. در این تحقیق زبری سنج مدل Mahr Perthometer M1 برای اندازه گیری زبری سطح قطعات بریده شده استفاده شده است که در شکل ۶ مشاهده می شود.

نمونه ها در زیر قلم زبری سنج قرار داده می شوند و سوزن زبری سنج در روی سطح نمونه ها حرکت کرده و با جابجا شدن در طول آثار بی نظمی، زبری سطوح روی صفحه نمایش نشان داده می شود. در این تحقیق اندازه گیری زبری برای هر سطح در سه راستا در جهت برش صورت گرفته است. به دلیل ناپایداری فرآیند برش در شروع کار، در اندازه

$$+ \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

از روی نمودارهای مختلف می‌توان کفایت مدل ارائه شده و به طور کلی میزان سندیت آزمایشات را بررسی کرد. به طور کلی اگر تعداد آزمایشات کم باشد، مهمترین نمودارها برای بررسی کفایت مدل و تصادفی بودن آزمایشات نمودارهای احتمال نرمال، باقیمانده‌ها بر حسب زمان و باقیمانده‌ها بر حسب مقادیر برازش شده می‌باشند. مهمترین مقدار برای بررسی کفایت مدل میزان باقیمانده‌ها است. منظور از باقیمانده‌ها تفاوت مقادیر اصلی با مقادیر ارائه شده در مدل است. برای بررسی میزان کفایت مدل ارائه شده در این تحقیق، جدول آنالیز واریانس برای کل مدل و نمودارهای باقیمانده‌ها بررسی شده است. مسئله دیگر فهم چگونگی تغییر پاسخ‌ها با تنظیم پارامترهای ورودی است. به همین منظور از منحنی‌های رویه‌ای در RSM^۴ نیز استفاده می‌گردد [۲۸]. اساس روش رویه پاسخ بر طراحی آزمایش‌ها و بهینه سازی آماری استوار است. این روش می‌تواند نمودارهای خروجی مناسبی را جهت مشخص کردن نقطه بهینه در میان چندین پارامتر به محقق ارائه دهد؛ همچنین این روش این قابلیت را دارد که رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک آزمایش را مدل سازی نموده و آن را به صورت یک معادله ریاضی ارائه نماید [۲۹].

۲-۲- بهینه سازی

روشهای بهینه سازی چند هدفه مبتنی بر پارتو، در مقایسه با روشهای بهینه سازی تک هدفه دارای مزایایی می‌باشند. اول اینکه ترکیبات بهینه پارتو در بردارنده مجموعه‌ای از پاسخ‌ها است که می‌تواند شامل پاسخ‌هایی که شامل نقض قید میباشند نیز باشد؛ بنابراین یک پاسخ با نقض قید مجاز، اگر ارزش تابع هدف بالایی داشته باشد، می‌تواند به عنوان جواب بهینه در نظر گرفته شود. دوم اینکه با تجهیز مسئله اصلی به چندین مسئله، اهداف مختلف انعطاف پذیری

آزمایش‌ها به صورت موازی و در نهایت پیش بینی پاسخ بهینه را دارد. به طور کلی، این روش تعداد آزمایش‌های لازم برای بهینه سازی را کاهش می‌دهد و بر دقت نتایج می‌افزاید. در این روش، از مزیت هر دو روش تک عاملی و فاکتوریل استفاده شده است و فاقد عیب‌های آنها است؛ به این معنا که از تعداد آزمایش‌های کمتری استفاده شده و اثر متقابل بین فاکتورها را نیز مطالعه می‌کند. به طور کلی می‌توان مزایای روش تاگوچی را به صورت زیر برشمرد:

- کاهش تعداد آزمایش‌ها و هزینه‌ها
- امکان بررسی فاکتورهای گسسته
- تعیین سهم فاکتورها
- امکان تخمین نتایج در شرایط بهینه
- امکان تخمین نتایج در سطوح دلخواه
- تعیین سهم خطا
- تعیین سهم اثرات متقابل در نظر گرفته شده
- امکان بدست آوردن همزمان شرایط بهینه برای چندین پاسخ
- امکان بررسی فاکتورهایی با سطوح مختلف
- بررسی تعداد فاکتورهای نامحدود

تاگوچی دو راه مختلف را برای انجام تجزیه و تحلیل کامل، پیشنهاد می‌کند. اول روش استاندارد است که در آن نتایج اجرای آزمایش‌ها و یا میانگین نتایج به دست آمده از تکرارهای آزمایش‌ها به وسیله ANOVA^۱ پردازش می‌شوند و روش دوم استفاده از نسبت سیگنال به نویز (S/N)^۲ است [۲۷]. در این تحقیق تجزیه و تحلیل داده‌های خام با روش ANOVA انجام شده است و اثر پارامترهای انتخاب شده فرآیند وایرکات بر ویژگی‌های کیفی انتخاب شده با استفاده از نمودارهای اثرات اصلی، مورد مطالعه قرار گرفته است برای مدل سازی رگرسیونی از تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) و مدل زیر مطابق رابطه شماره (۱) استفاده شده است:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^q \beta_j x_j + \sum_{j=1}^q \beta_{jj} x_j^2 + \quad (1)$$

³ Residuals

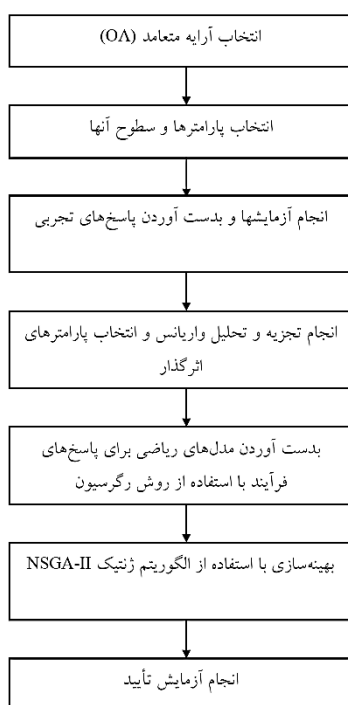
⁴ Response Surface Method

¹ Analysis Of Variance

² Signal- to- Noise ratio

۳-۱- انتخاب پارامترها و آرایه متعامد

پارامترهای فرآیند باید حداقل در سه سطح باشند تا بتوانند منعکس کننده رفتار واقعی مشخصه های خروجی فرآیند باشند. پارامترهای برش و سطوح آنها بر اساس بررسی و مطالعه ادبیات موضوع و تجربه انتخاب شده اند. به غیر از پارامترهای ذکر شده در جدول ۳، سایر پارامترهای برش در طول آزمایش ها ثابت نگه داشته شده اند. جدول ۴ پارامترهای ثابت برش را نشان می دهد. با توجه به روش طراحی آزمایش ناگوچی، طرح آرایه متعامد شانزده تایی (L16) برای طراحی آزمایش ها مطابق جدول ۵ انتخاب شده است که در آن چهار فاکتور با چهار سطح در نظر گرفته شده اند؛ بنابراین درجه آزادی برای پارامترها ۳ است و در نتیجه برای کل پارامترها ۱۲ درجه آزادی وجود دارد.



شکل ۷- روند کلی انجام مراحل طراحی و تجزیه و تحلیل

آزمایشها

بیشتری در جستجوی فضای پاسخ خواهند داشت. یکی از الگوریتم های قدرتمند و جامع که توسط دب^۱ معرفی شده است، الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب (NSGA^۲-II) است [۳۰].

در این پژوهش کد نویسی الگوریتم در محیط برنامه MATLAB انجام گرفت. در الگوریتم کدنویسی شده برای توابع هدف از معادله های (۲) و (۳) که در بخش بعدی با استفاده از مدلسازی استخراج و تأیید شد، به ترتیب برای نرخ براده برداری و زبری سطح استفاده شده است. مقدار جمعیت اولیه ۱۰۰ در نظر گرفته شده است و سعی شده ۴۰ ترکیب از جواب های بهینه پارتو به عنوان ترکیب های مناسب پارامترهای ورودی، برای مراحل مختلف برش گزارش شود. در این الگوریتم در تولید جمعیت های ثانویه یا همان فرزندان، برای نرخ تقاطع مقدار ۰/۷ و برای نرخ جهش مقدار ۰/۴ در نظر گرفته شده است. تعداد تکرار در نظر گرفته شده هم ۱۰۰ است که معیاری برای توقف الگوریتم است.

۳- نتایج تجربی و تجزیه و تحلیل

همانطور که در بخش های قبلی توضیح داده شد، در این تحقیق قطعاتی از جنس کاربید تنگستن توسط روش وایرکات برش شده و مشخصه خروجی نرخ براده برداری و زبری سطح در حین برش اندازه گرفته شده است. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر پارامترهای ورودی روی مشخصه های خروجی نرخ براده برداری و زبری سطح و نهایتاً تنظیم متغیرهای ورودی جهت بهینه سازی مشخصه های خروجی است. در این تحقیق روند کلی انجام مراحل طراحی و تجزیه و تحلیل آزمایش ها به صورت نمودار نشان داده شده در شکل ۷ انجام گرفته است.

^۱ Deb

^۲ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

ابتدا سعی شده از مدل مرتبه اول برای این منظور استفاده شود، ولی با توجه به میزان خطای بیش از حد از میزان در نظر گرفته شده ۰/۰۵، مدل مرتبه اول برای این منظور مناسب تشخیص داده نشده و به همین جهت مدل‌های رگرسیونی مرتبه دوم برای مشخصه‌های خروجی برازش داده شده‌اند.

جدول ۶- تحلیل واریانس برای مقادیر ضرایب در مدل مرتبه دوم نرخ براده برداری

سطح معناداری P-Value	آماره t	خطای استاندارد	ضریب	پارامتر
۰/۰۱۳	۸/۵۸۲	۰/۰۶۵۷	۰/۵۶۴۰۶	Constant
۰/۰۰۱	۲۷/۹۹۵	۰/۰۴۸۲	۱/۳۵۰۰۰	IP
۰/۰۰۶	۱۳/۲۷۲	۰/۰۱۳۶	۰/۱۸۱۵۲	Ton
۰/۳۵۴	۱/۱۹۶	۰/۰۱۳۴	۰/۰۱۶۰۹	SV
۰/۱۹۹	۱/۸۹۳	۰/۰۰۹۸	۰/۰۱۸۶۵	WT
۰/۰۰۴	۱۶/۶۰۸	۰/۱۱۱۲	۱/۸۴۷۸۱	IP*IP
۰/۲۲۴	۱/۷۴۲	۰/۱۱۲۹	۰/۰۱۹۶۹	Ton*Ton
۰/۰۰۴	۱۵/۵۸۵	۰/۰۵۶۴	۰/۸۸۰۳۱	SV*SV
۰/۰۰۳	-	۰/۰۵۲۹	-	WT*WT
۰/۰۳۸	۴/۹۶۶	۰/۰۲۳۳	۰/۱۱۵۸۳	IP*Ton
۰/۴۰۰	-۱/۰۶۰	۰/۰۲۰۴	۰/۰۲۱۷۱	IP*SV
۰/۴۳۷	۰/۹۶۴	۰/۰۱۳۹	۰/۰۱۳۴۸	IP*WT
۰/۰۰۴	۱۶/۲۹۸	۰/۱۰۳۵	۱/۶۸۷۵۰	Ton*SV
۰/۰۰۴	-	۰/۱۱۰۶	-	Ton*WT
	۱۵/۸۵۶		۱/۷۵۵۰۰	

آنالیز واریانس برای ضرایب متغیرها و کل مدل انجام گرفته است که توضیح داده خواهند شد. نهایتاً نیز کفایت مدل‌های ارائه شده با توجه به نمودارهای باقیمانده‌ها بررسی خواهد شد. بر اساس ضرایب بدست آمده مدل منتخب همراه با میزان کفایت این ضرایب و با توجه به جدول آنالیز واریانس

جدول ۳- پارامترهای برش مورد نظر در طراحی آزمایش تاگوچی و سطوح آنها

نماد	پارامتر	سطح
		L۴ L۳ L۲ L۱
IP	شدت جریان (آمپر)	۱۵ ۱۳ ۱۱ ۹
Ton	زمان روشنی پالس (میکروثانیه)	۲۱ ۱۸ ۱۵ ۱۲
SV	ولتاژ گپ (ولت)	۶۰ ۵۰ ۴۰ ۳۰
WT	کشش سیم (گرم)	۱۵ ۱۲ ۹ ۶

جدول ۴- پارامترهای برشی ثابت

نماد	پارامتر	مقدار
Toff	زمان خاموشی پالس (میکروثانیه)	۱۵
Servo	سرعت سرو (میلی متر بر دقیقه)	۱۳
WF	سرعت سیم (میلی متر بر ده ثانیه)	۸
WP	فشار دی الکتریک (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)	۷

همچنین خطاهای باقیمانده دارای درجه آزادی ۳

هستند. در نهایت کل درجه آزادی برای عوامل و خطا، ۱۵ درجه خواهد بود. شانزده آزمایش با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی انجام گرفته که برای اطمینان از حصول نتایج صحیح، هر کدام از آزمایش‌ها دو بار تکرار و میانگین آنها برای پاسخ‌ها در نظر گرفته شده است. در این مطالعه تمامی مراحل طراحی آزمایش‌ها، رسم نمودارها و آنالیزها با استفاده از نرم افزار آماری مینی تب (Minitab) انجام شده است. آزمایش‌های انجام گرفته به منظور مطالعه اثر پارامترهای فرآیند روی پاسخ‌های خروجی، همراه با سطوح پارامترهای فرآیند در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. جدول تحلیل واریانس برای مقادیر ضرایب در مدل مرتبه دوم نرخ براده برداری و زبری سطح به ترتیب در جدول ۶ و جدول ۷ نشان داده شده است.

با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته، در این بخش مدل‌های مناسب با ضریب اطمینان ۹۵٪ جهت تخمین مشخصه‌های خروجی از روی مقادیر ورودی ارائه شده است.

جدول ۷- تحلیل واریانس برای مقادیر ضرایب در مدل مرتبه دوم زبری سطح

سطح معناداری P-Value	آماره t	خطای استاندارد	ضریب	پارامتر
۰/۰۰۱	۲۶/۳۶۶	۰/۰۹۲۹۱	۲/۴۴۹۵۸	Constant
۰/۰۰۶	۱۲/۵۲۶	۰/۰۶۸۱۸	-۰/۸۵۳۹۷	IP
۰/۰۰۶	۱۳/۰۳۴	۰/۰۹۳۳۴	-۰/۲۵۲۰۲	Ton
۰/۰۳۲	-۵/۴۹۷	۰/۰۱۹۰۳	-۰/۱۰۴۰۶	SV
۰/۳۵۴	-۱/۱۹۸	۰/۰۱۳۹۳	-۰/۰۱۶۶۹	WT
۰/۰۴۱	۴/۷۷۵	۰/۱۵۷۳۰	۰/۷۵۱۰۸	IP*IP
۰/۴۲۵	۰/۹۵۵	۰/۰۱۵۹۷	۰/۰۱۵۸۹	Ton*Ton
۰/۰۳۲	۵/۴۸۲	۰/۰۷۹۸۶	۰/۴۳۷۷۷	SV*SV
۰/۰۵۱	-۴/۳۴۲	۰/۰۷۴۹۱	-۰/۳۱۷۸۱	WT*WT
۰/۲۹۷	-۱/۳۹۸	۰/۰۳۲۹۷	-۰/۰۴۶۱۰	IP*Ton
۰/۰۲۰	۶/۹۳۵	۰/۰۲۸۹۶	۰/۲۰۰۸۱	IP*SV
۰/۱۳۳	-۲/۴۶۵	۰/۰۱۹۷۸	-۰/۰۴۸۷۵	IP*WT
۰/۰۳۸	۴/۹۵۵	۰/۱۴۶۳۸	۰/۷۲۵۳۴	Ton*SV
۰/۰۳۲	-۵/۴۲۸	۰/۱۵۶۴۹	-۰/۸۴۹۳۷	Ton*WT

مدل ارائه شده برای داده‌های نرمالیز شده نرخ براده برداری و زبری سطح به ترتیب به صورت زیر خواهد بود:

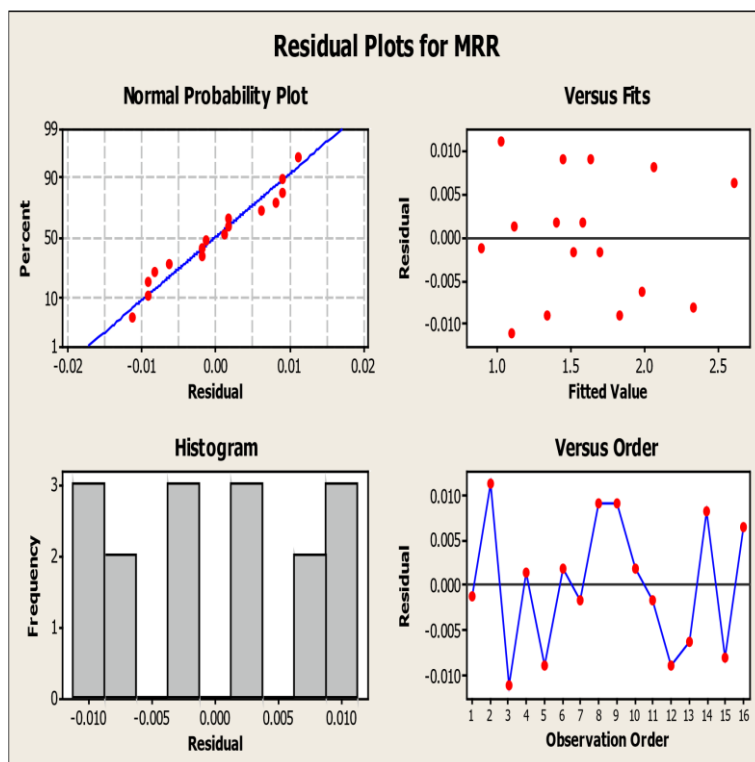
$$MRR = 0.56406 + 1.35000IP + 0.18152Ton + 1.84781IP^2 + 0.88031SV^2 - 0.89437WT^2 + 0.11583IP \times Ton + 1.68750Ton \times SV - 1.75500Ton \times WT \quad (2)$$

$$SR = 2.44958 + 0.85397IP + 0.25202Ton - 0.10460SV + 0.75108IP^2 + 0.43777SV^2 - 0.20081IP \times SV + 0.72534Ton \times SV - 0.84937Ton \times WT \quad (3)$$

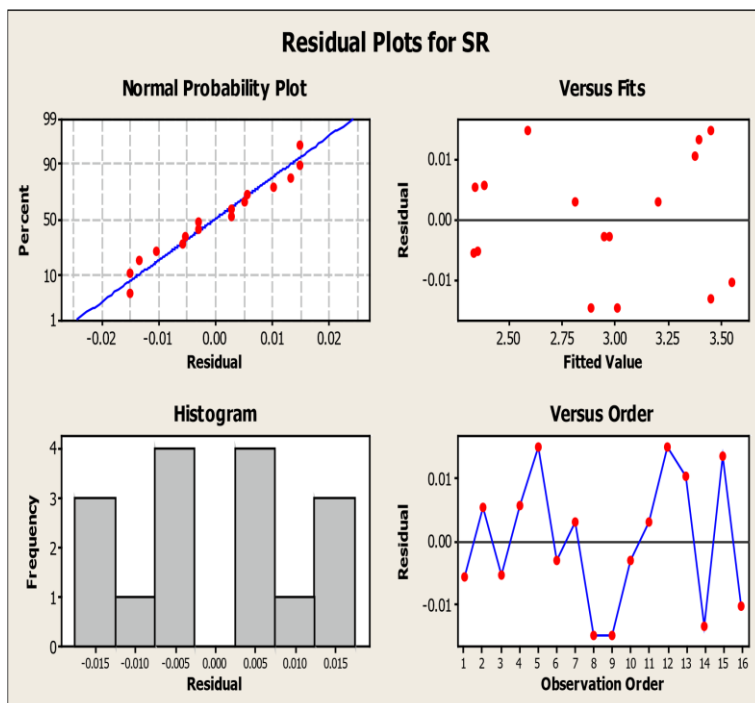
برای اثبات کفایت مدل و آزمایش‌ها، بررسی نمودارهای باقیمانده‌ها نیز الزامی است. شکل ۸، نمودارهای باقیمانده‌ها را برای نرخ براده برداری و شکل ۹ برای زبری سطح نشان می‌دهد.

جدول ۵- نتایج آزمایش‌ها برای طرح L16 ناگوچی

شماره آزمایش	جریان آمپر	زمان روشنایی پالس میکروثانیه	ولتاژ گپ ولت	کشش سیم گرم	نرخ براده برداری میلیمتر بر دقیقه	زبری سطح میکرون
۱	۹	۱۲	۳۰	۶	۰/۸۹	۲/۳۲۸
۲	۹	۱۵	۴۰	۹	۱/۰۳	۲/۳۴۵
۳	۹	۱۸	۵۰	۱۲	۱/۰۸	۲/۳۵۱
۴	۹	۲۱	۶۰	۱۵	۱/۱۱	۲/۳۸۹
۵	۱۱	۱۲	۴۰	۱۲	۱/۳۴	۲/۶۰۷
۶	۱۱	۱۵	۳۰	۱۵	۱/۴	۲/۹۷۴
۷	۱۱	۱۸	۶۰	۶	۱/۵۱	۲/۸۱۶
۸	۱۱	۲۱	۵۰	۹	۱/۶۴	۲/۹۹۸
۹	۱۳	۱۲	۵۰	۱۵	۱/۴۵	۲/۸۷۵
۱۰	۱۳	۱۵	۶۰	۱۲	۱/۵۸	۲/۹۴۴
۱۱	۱۳	۱۸	۳۰	۹	۱/۶۹	۳/۲۰۵
۱۲	۱۳	۲۱	۴۰	۶	۱/۸۲	۳/۴۶۹
۱۳	۱۵	۱۲	۶۰	۹	۱/۹۷	۳/۳۸۷
۱۴	۱۵	۱۵	۵۰	۶	۲/۰۷	۳/۴۳۹
۱۵	۱۵	۱۸	۴۰	۱۵	۲/۳۲	۳/۴۰۸
۱۶	۱۵	۲۱	۳۰	۱۲	۲/۶۱	۳/۵۴۲



شکل ۸ - نمودار باقیمانده های مدل رگرسیونی برای نرخ براده برداری



شکل ۹ - نمودار باقیمانده های مدل رگرسیونی برای زبری سطح

نمودار شکل ۱۰ که نشان دهنده میانگین نرخ براده برداری در هر یک از سطوح پارامترها است نیز نشان دهنده مشابه بودن مقادیر نرخ براده برداری در سطوح پارامتر جریان و زمان روشنی پالس است. در این نمودار که آن را نمودار اثرات اصلی یا اثرات خطی هم می نامند، پارامتر IP معرف جریان است که با افزایش آن، انرژی جرقه ها افزایش یافته و دمای منطقه تخلیه الکتریکی که به مقدار زیادی بستگی به شدت جریان دارد افزایش می یابد؛ در نتیجه حجم دانه های آتشفشانی ایجاد شده در سطح قطعه کار زیاد و با هر جرقه مواد زیادی از منطقه تخلیه تبخیر و جدا می شود. هر جرقه دمای موضعی زیادی در حدود ۱۲۰۰۰ درجه سانتیگراد در مجاورت خود ایجاد می کند [۳۱].

همانطوری که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، با افزایش زمان روشنی پالس، نرخ براده برداری به طور پیوسته افزایش می یابد. در توضیح علت افزایش نرخ براده برداری با افزایش زمان روشنی پالس (Ton) هم می توان گفت که بالا رفتن زمان روشنی پالس، به معنی استفاده از درجه حرارت معین برای مدت زمان زیادی است. این امر منجر به نرخ تبخیر بالا و در نتیجه باعث حذف حجم زیادی از مواد ذوب شده خواهد شد [۳۲].

در حقیقت با افزایش Ton، تعداد جرقه ها افزایش پیدا کرده و منطقه برش زمان زیادتری تحت تاثیر این جرقه ها قرار گرفته و فرصت بیشتری برای عمل تبخیر و ذوب مواد فراهم می شود؛ در نتیجه افزایش زمان روشنی پالس هم همانند جریان باعث افزایش نرخ براده برداری مواد خواهد شد. باید توجه داشت، افزایش بیش از حد زمان روشنی پالس باعث پارگی سیم خواهد شد و نمی توان برای بدست آوردن نرخ برش زیاد، زمان روشنی را بی محابا افزایش داد.

ولتاژ گپ (SV) مقدار فاصله بین سیم و قطعه کار را مشخص می کند که در مقادیر بالای سرو، گپ تخلیه بزرگتر شده، زمان یونیزاسیون طولانیتر می شود و نرخ براده برداری کاهش خواهد یافت. در مقادیر پائین، فاصله بین سیم و قطعه کار کم میشود و یونیزاسیون راحت تر انجام گرفته و نرخ براده برداری افزایش پیدا می کند.

پارامتر WT، معرف کشش سیم است که این پارامتر تأثیر چندانی بر روی نرخ براده برداری ندارد، چون رفتار واحدی از خود نشان نمی دهد. همانطور که در شکل ۱۰ می بینیم، افزایش این پارامتر از سطح اول تا سوم باعث بالا رفتن

نمودار احتمال نرمال باقیمانده ها نشان می دهد که توزیع باقیمانده ها نرمال به صورت خط راست بوده و پراکندگی باقیمانده ها در مقادیر مختلف است که ثابت می کند تصادفی سازی به خوبی صورت گرفته و ارتباط خاصی بین باقیمانده ها وجود ندارد.

رسم داده ها برحسب ترتیب زمانی آنها می تواند در شناسایی همبستگی بین باقیمانده ها مفید واقع شود. وجود تسلسل های مثبت و منفی بیانگر همبستگی مثبت بین باقیمانده ها و به معنای نقض فرض استقلال خطاها است. این مسئله یک مشکل جدی بالقوه محسوب می شود؛ بنابراین باید سعی شود تا در زمان جمع آوری داده ها از بروز چنین مشکلاتی پیشگیری به عمل آید. تصادفی سازی مناسب آزمایش ها میتواند گام مهمی جهت دستیابی به استقلال مشاهدات باشد.

برای تشخیص میزان تصادفی سازی آزمایشات از نمودار باقیمانده ها برحسب زمان (ترتیب آزمایشات^۱) استفاده می شود. بدیهی است هر چه نقاط در این نمودار بیشتر پراکنده باشند، نشان از صحت و تصادفی بودن داده ها دارد. در شکل ۸ و شکل ۹ سمت راست پایین، یک نمونه از این نمودارها نشان داده شده است.

از طرفی نمودار باقیمانده ها بر حسب زمان نیز بار دیگر دلیلی بر قابل استناد بودن مدل و آزمایشات دارد. چرا که تسلسل های مثبت و منفی بین باقیمانده ها وجود ندارد و باقیمانده ها کاملا پراکنده میباشند. بافت نگار برای باقیمانده ها نیز نشان از قابل استناد بودن نسبی آزمایشات دارد؛ بنابراین براساس موارد ذکر شده مدل کفایت لازم را دارد.

۳-۲- بررسی تاثیر پارامترهای ورودی روی مشخصه های خروجی

در این قسمت تأثیر پارامترهای ورودی شدت جریان، زمان روشنی پالس، ولتاژ گپ و کشش سیم روی مشخصه های خروجی نرخ براده برداری و زبری سطح به طور کامل همراه با علل این تأثیرگذاری ها مورد بررسی قرار گرفت.

^۱ Observation Order

آمدن زبری سطح و بهبود صافی آن موثر واقع گردد [۶]؛ ولی در اینجا هم به دلیل احتمال پارگی، نمی‌توانیم کشش سیم را بیش از اندازه بالا ببریم. در کل می‌توان گفت که کشش سیم اثرگذاری ناچیزی بر زبری سطح دارد.

به منظور بررسی متقابل پارامترهای ورودی بر پارامترهای خروجی نمودار رویه‌ای رسم شد. همانطور که نمودارهای رویه‌ای شکل ۱۲ نشان می‌دهد، اثر متقابل پارامتر جریان با هر یک از دو پارامتر ولتاژ گپ و کشش سیم قابل اغماض است؛ زیرا در این نمودارها پیچش‌های رویه در امتداد هر محور نشان دهنده وجود اثرات متقابل بین پارامترها است و آنگاه می‌توان اثر متقابل پارامترهای مربوطه در آن نمودار را لحاظ نمود و بیان می‌شود که با تغییر مقادیر هر دو پارامتر مقدار متغیر وابسته تغییر می‌کند و لذا نسبت به هر دوی آنها حساسیت دارد. در نمودار نیز مشاهده می‌شود که پارامتر جریان (IP) با هیچ یک از دو پارامتر کشش سیم (WT) و ولتاژ گپ (SV) اثر متقابل نشان نداده است، ولی با پارامتر زمان روشنی پالس (Ton) اثر متقابل جزئی نشان داده است. با همین روش استناد، مشاهده می‌شود که بین پارامترهای زمان روشنی پالس (Ton) و ولتاژ گپ (SV) و همچنین زمان روشنی پالس و کشش سیم (WT) اثر متقابل وجود داشته است. به عبارت دیگر، زمان روشنی پالس، اثرات هر یک از پارامترهای ولتاژ گپ و کشش سیم را بر روی نرخ براده برداری تعدیل نموده است. در نمودار رویه‌ای شکل ۱۳ با توجه به جهت پیچش نمودارها در امتداد محورها، مشاهده می‌شود که پارامترهای جریان و ولتاژ گپ با یکدیگر و پارامتر زمان روشنی پالس هم با ولتاژ گپ و کشش سیم دارای اثر متقابل می‌باشند؛ اما سایر اثرات متقابل پارامترها به طور شهودی، قابل توجه به نظر نمی‌رسد.

۳-۳- نتایج بهینه سازی فرآیند

در مورد برش وایرکات، سطوح بهینه پارامترهای تنظیمی میبایست به گونه‌ای تعیین شوند که نرخ براده برداری یا صافی سطح مشخصی بدست آید. لازم به ذکر است که دو خروجی فرآیند (نرخ براده برداری و زبری سطح) در جهت عکس یکدیگر بوده و بهبود یکی باعث تنزل دیگری خواهد شد. برخی از روش‌های بهینه سازی از جمله روش تاگوچی برای این کار فقط یک ترکیب بهینه برای پارامترهای ورودی ارائه می‌دهند؛ ولی روش‌های بهینه سازی که بر اساس

نرخ براده برداری می‌شود، در حالی که از سطح سوم تا چهارم، نرخ براده برداری را کاهش می‌دهد. نمودار شکل ۱۱ که نشان دهنده میانگین زبری سطح در هر یک از سطوح پارامترها است نیز نشان دهنده مشابه بودن مقادیر زبری سطح در سطوح پارامترهای جریان، زمان روشنی پالس، ولتاژ گپ و کشش سیم است. در این نمودار پارامتر IP معرف جریان است که با افزایش آن، همانطوری که در بخش نرخ برش هم ذکر شد، دمای نقطه تخلیه افزایش می‌یابد و در این نقطه یک استخر بسیار گرم از مواد مذاب تشکیل می‌شود؛ در نتیجه تبخیر مواد مذاب، دانه‌هایی در سطح قطعه کار شکل می‌گیرد. تخلیه‌های پی در پی باعث ایجاد هر چه بیشتر این دانه‌ها و بوجود آمدن قله‌ها و دره‌هایی در سطح قطعه خواهد شد که ماهیت تصادفی دارند [۳۲]. با افزایش عمق و وسعت چاله‌های حاصل از جرقه‌های شدید، زبری سطح افزایش یافته و به اصطلاح صافی سطح خرابتر شده است.

با افزایش زمان روشنی پالس انرژی جرقه‌ها زیادتر شده و به هر چه عمیقتر و بزرگتر شدن گودال‌های حاصل از جرقه‌ها کمک می‌کند [۳۳]. در این حالت مواد سطح قطعه هر چه بیشتر دچار ذوب و انجماد دوباره می‌شود و در نتیجه افزایش زمان روشنی پالس منجر به افزایش هر چه بیشتر زبری سطح می‌شود.

در اثر افزایش پارامتر ولتاژ گپ (SV)، اندازه گپ بین سیم و قطعه کار افزایش پیدا می‌کند و در این حالت دی الکتریک راحت تر در گپ برش جریان پیدا کرده و بهتر می‌تواند عمل شستشوی موضع برش را انجام دهد. با افزایش گپ و گردش بهتر دی الکتریک در شکاف برش، خروج گویچه‌های فلزی از شکاف برش راحت تر صورت گرفته و احتمال بوجود آمدن اتصال کوتاه توسط این گویچه‌ها کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه زبری سطح با افزایش ولتاژ گپ کاهش پیدا می‌کند.

پارامتر کشش سیم (WT) در این تحقیق اثر قابل ملاحظه‌ای بر زبری سطح از خود نشان نداده و با افزایش این پارامتر از سطح اول تا سوم زبری سطح کاهش می‌یابد، در حالی که از سطح سوم تا چهارم باعث افزایش زبری و خرابتر شدن صافی سطح می‌شود؛ اما در بعضی از منابع این طور عنوان شده است که با افزایش کشش سیم، ارتعاشات آن کاهش پیدا کرده و این امر تا حدودی می‌تواند در پایین

براده برداری روند صعودی داشته و به مقدار ۲/۴۳۰۶ رسیده است. این مسئله حاکی از بهبود عملکرد فرآیند، با مقادیر جدید بدست آمده برای سطوح پارامترها است.

۴-۳- آزمایش تأیید

منظور از آزمایش تأیید^۱ اعتبار بخشیدن به نتایج و بحث‌های انجام گرفته در قسمت تجزیه و تحلیل است. در آزمایش تأیید، یک آزمون با استفاده از ترکیب خاصی از پارامترها و سطوح آنها که از طریق بهینه سازی بدست آمده، انجام شده و نتایج تجربی حاصل از آن با مقادیر بدست آمده از طریق بهینه سازی مقایسه می‌شود. در این تحقیق، پس از مشخص شدن شرایط بهینه و پیش‌بینی پاسخ تحت این شرایط، آزمایش جدیدی تحت شرایط بهینه سطوح و پارامترهای برش طرح انجام می‌شود. برای این منظور از ترکیب منتخبی برای سطوح پارامترها استفاده کرده و آزمایش جدیدی انجام داده می‌شود. طبق شرایط قبلی، ضخامت قطعه کار ۳۰ میلیمتر و طول برش هم ۱۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است. به همان شرایطی که قبلاً گفته شد، نرخ براده برداری و زبری سطح برای نمونه‌های جدید اندازه گرفته می‌شود. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۶ به همراه نتایج حاصل از بهینه سازی مشاهده می‌شود. همانطور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از آزمایش تأیید، خطای زیر ۰/۰۵ نسبت به پاسخ‌های حاصل از بهینه سازی دارند و با توجه به اینکه ضریب اطمینان ۰/۹۵ بود، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب پارامترهای حاصل از بهینه سازی به خوبی با نتایج تجربی همخوانی دارد.

جواب‌های پارتو کار می‌کنند این امکان را می‌دهند که به جای یک جواب، یک مجموعه جواب را داشته باشیم و بر حسب نیاز از ترکیب مناسب برای رسیدن به خروجی مورد نظر استفاده کنیم. به همین دلیل در این تحقیق سعی شده است تا از روش بهینه سازی مبتنی بر الگوریتم (NSGA-II) استفاده شود.

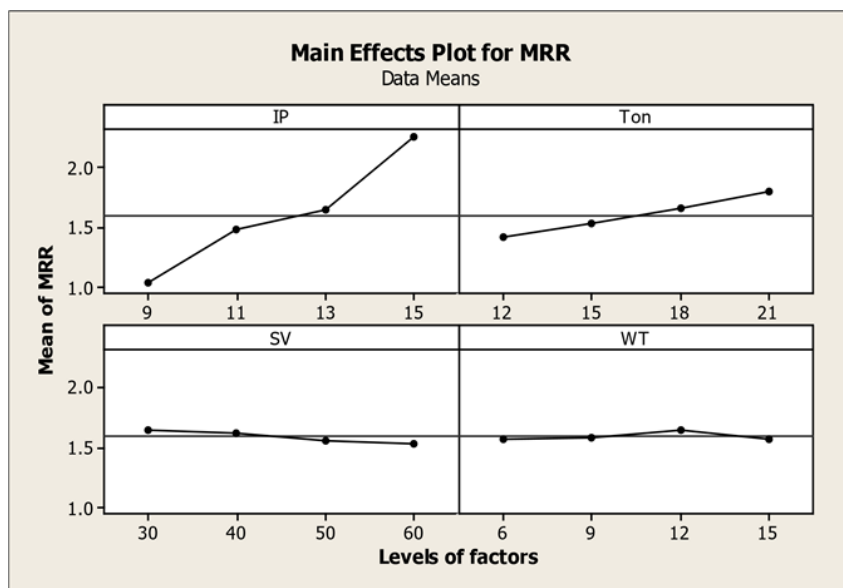
در الگوریتم کدنویسی شده برای توابع هدف از معادله های (۲) و (۳) که در بخش قبل با استفاده از مدلسازی استخراج و تأیید شد، به ترتیب برای نرخ براده برداری و زبری سطح استفاده شده است و سعی شده ۴۰ ترکیب از جواب‌های بهینه پارتو به عنوان ترکیب‌های مناسب پارامترهای ورودی برای مراحل مختلف برش گزارش شود. نمودار پارتوی حاصل از پیاده سازی الگوریتم NSGA-II در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. در این نمودار محور افقی تابع هدف نرخ براده برداری است و محور عمودی هم تابع هدف زبری سطح است. باید توجه داشت که هر یک از جواب‌های بدست آمده نسبت به یکدیگر دارای برتری نیستند و در اصطلاح پارتو می‌باشند و با توجه به مقدار تابع هدف مورد نظر می‌توان از ترکیب مناسب در جدول فوق استفاده کرد. برای مقایسه نتایج حاصل از بهینه سازی با مقادیر تجربی بدست آمده می‌توان به عنوان مثال پاسخ‌های خروجی یکی از آزمایشات را با پاسخ‌های خروجی ترکیب بهینه پارتو با شرایط یکسان مقایسه کرد

جدول ۶ - نتایج حاصل از آزمایش تأیید

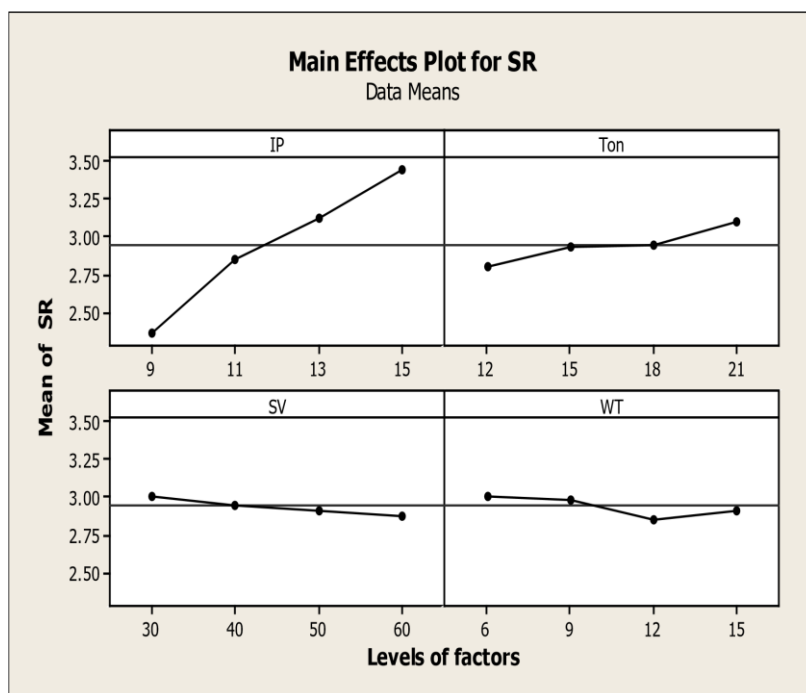
مقادیر پیشنهادی بینی شده از بهینه سازی	مقادیر حاصل آزمایش تأیید	سطوح پارامترهای حاصل از ترکیب منتخب بهینه سازی	
		پاسخ خروجی	مقادیر پارامترهای حاصل از ترکیب منتخب بهینه سازی
۲/۴۳۰۶	۲/۳۸۹۴	نرخ براده	IP=۱۵
		بردارای (MRR)	Ton=۲۰
۳/۰۹۶۷	۳/۱۲۷۵	زبری سطح	SV=۵۸
		(SR)	WT=۶

. با مقایسه این دو ترکیب از پارامترها مشاهده می‌شود، در حالی که در آزمایش تجربی، نرخ براده برداری ۱/۶۹ و زبری سطح ۳/۲۰۵ هستند، در جدول پارتو بهینه همچنان که زبری سطح به اندازه ۰/۱۰۸۳ میکرومتر کاهش یافته، نرخ

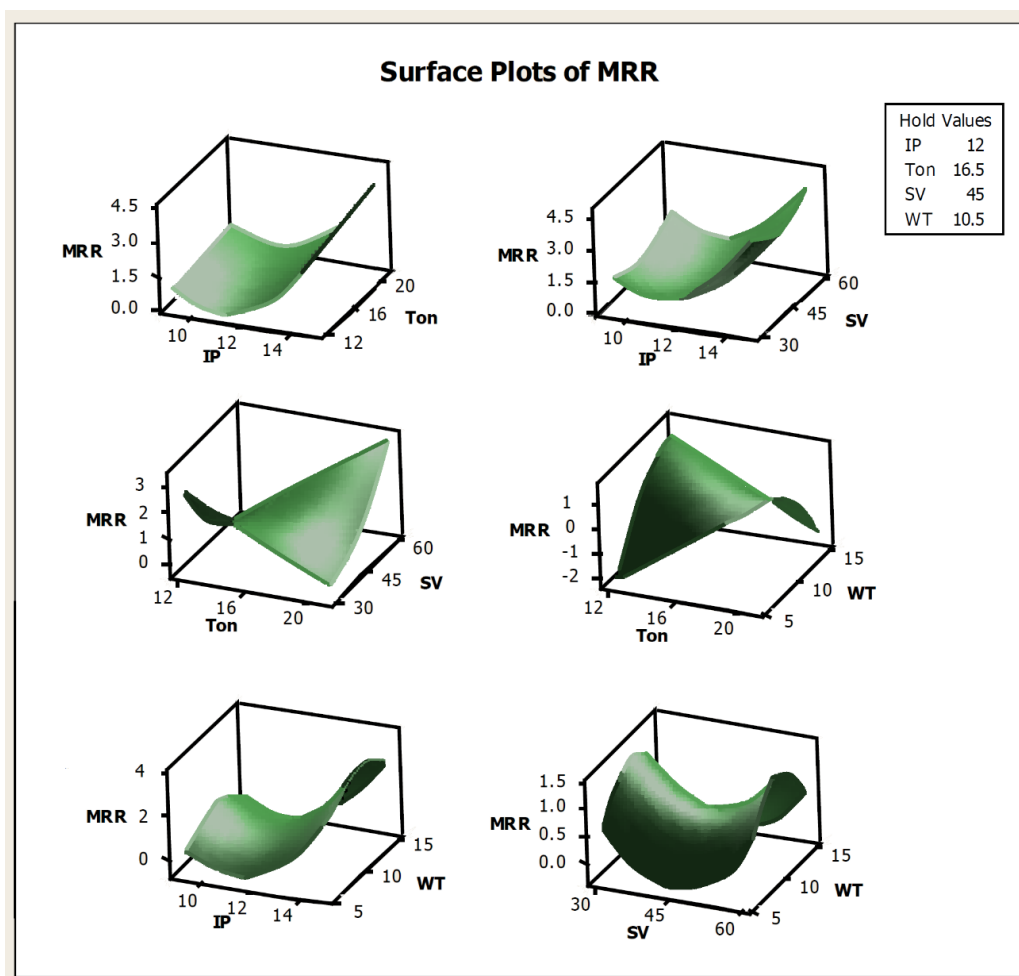
¹ Confirmation experiment



شکل ۱۰ - میانگین نرخ براده برداری به تفکیک سطوح پارامترها



شکل ۱۱ - میانگین زبری سطح به تفکیک سطوح پارامترها



شکل ۱۲- نمودار رویه ای اثرات متقابل پارامترها برای نرخ براده برداری (واحد پارامترها مطابق جدول ۵ است).

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی تاثیر پارامترهای برش وایرکات، بر روی مشخصه های خروجی فرآیند نرخ براده برداری و زبری سطح پرداخته شد و نتایج زیر بدست آمد:

- شدت جریان و زمان روشنی پالس پارامترهای تاثیر گذار در نرخ براده برداری هستند و ولتاژ گپ و کشش سیم پارامترهای بی اثر بر این خروجی به حساب می آیند .

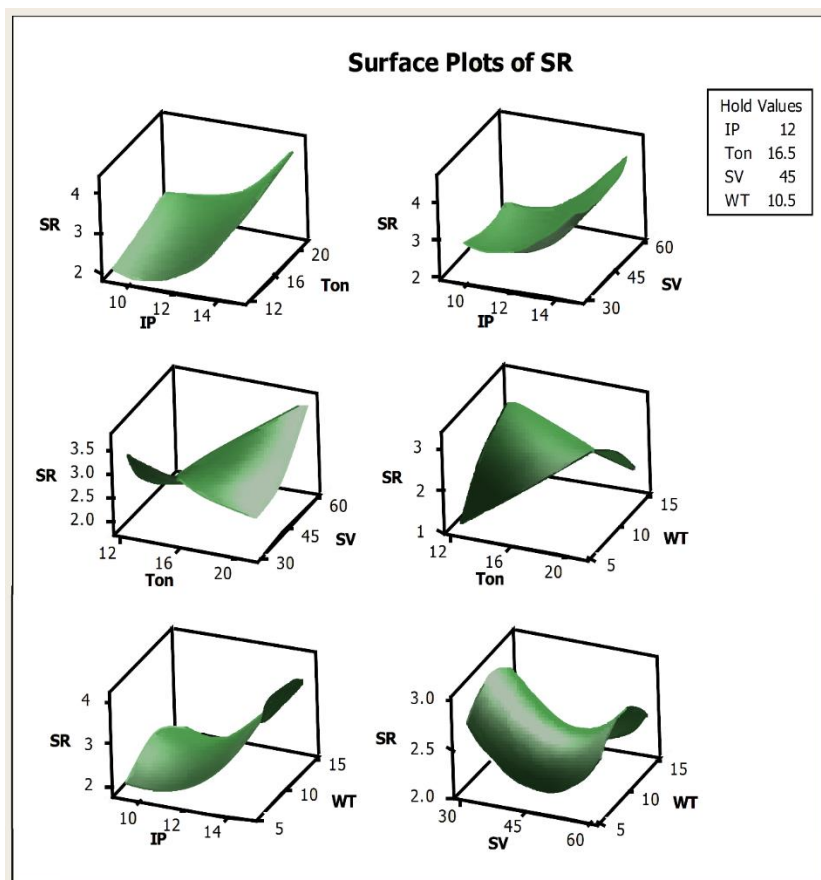
- برای عملکرد نرخ براده برداری، برهم کنشی بین شدت جریان با پارامتر ورودی زمان روشنی پالس دیده می شود و همچنین برهم کنش بین زمان روشنی پالس و ولتاژ گپ و کشش سیم قابل توجه است .

- پارامترهای شدت جریان و زمان روشنی پالس بر عملکرد زبری سطح تأثیر گذار بوده و پارامترهای ولتاژ گپ و کشش سیم، اثر گذار شناخته نمی شوند.

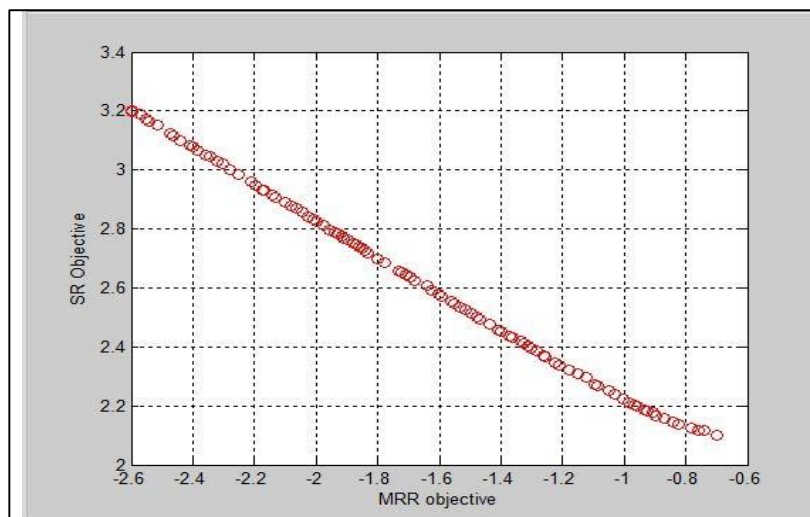
- در عملکرد زبری سطح، شدت جریان تنها با پارامتر ولتاژ گپ برهم کنش قابل توجه دارد و برای زمان روشنی پالس هم برهم کنش با ولتاژ گپ و کشش سیم قابل توجه است. بقیه برهم کنشها قابل اغماض است.

- برای نرخ براده برداری و زبری سطح مدل سازی ریاضی با مدل های مرتبه دوم به خوبی بر روی داده های حاصل از آزمایش برازش پیدا کرده و با روش های تأیید کفایت مدل، صحت گذاری شده است.

- بررسی جواب های بدست آمده حاصل از بهینه سازی نشان از بهبود پاسخ های خروجی در اثر بهینه سازی با الگوریتم NSGA-II دارد.



شکل ۱۳- نمودار رویه ای اثرات متقابل پارامترها برای زبری سطح (واحد پارامترها مطابق جدول ۵ می باشد).



شکل ۱۴ - نمودار پاراتو حاصل از پیاده سازی

مراجع

- [14] El-Mahalawy, M. M., SAMUEL, M., Fouda, N., El-Bahloul, S. A., 2021, Investigating the Effect of Wire Electrical Discharge Machining Factors for Ductile Cast Iron (ASTM A536), IJIEPR, Vol. 32, No. 2: 1-10.
- [15] Kumar .A, Tarun Soot. T, Kumar. J, 2018, Optimisation of wire-cut EDM process parameter by Grey-based response surface methodology, J. Ind. Eng. Int. 14:821-829.
- [16] Bhaumik, M. and Maity, K., 2020, Multi response optimization of EDM parameters using grey relational analysis (GRA) for Ti-5Al-2.5Sn titanium alloy", World. J. Eng, <https://doi.org/10.1108/WJE-06-2020-0210>.
- [17] Phan-NguyenHuu, 2020, Multi-objective optimization in titanium powder mixed electrical discharge machining process parameters for die steels, Alex. Eng. J., doi.org/10.1016/j.aej.2020.07.012.
- [18] Chaudhari. R, Vora. J, Patel. V, Lopez de Lacalle L. N., Parikh D. M., 2020, Effect of WEDM Process Parameters on Surface Morphology of Nitinol Shape Memory Alloy. MATEG9, 13, 4943; [doi:10.3390/ma13214943](https://doi.org/10.3390/ma13214943).
- [19] Alduroobi, A.A.A., Ubaid, A.M., Tawfiq, M.A. et al., 2020, Wire EDM process optimization for machining AISI 1045 steel by use of Taguchi method, artificial neural network and analysis of variances. Int. J. Syst. Assur. <https://doi.org/10.1007/s13198-020-00990-z>.
- [20] Iqbal, M. W., S.A., Khan. Y. A., Muhammad, T., 2021, Analysis and Multi-Objective Optimization of Wire Cut Process Parameters for Efficient Cutting of Tapered Carbon Steels Using Wire EDM, J. Eng. Res., DOI : 10.36909/jer.11965.
- [21] Tarnq, Y.S., Ma, S.C., Chung, L.K., 1995, Determination Of optimal cutting parameters in wire electrical discharge machining, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 35, 1693-1701.
- [22] Vahdati, M. (2020). Statistical analysis and optimization of parameters affecting the hardness of butt joint cross-section of Al7075 produced by FSW and SFSW using RSM and desirability approach. J. Solid Mech., 10(4), 165-180. [doi: 10.22044/jsfm.2020.9476.3136](https://doi.org/10.22044/jsfm.2020.9476.3136).
- [23] Vahdati, M., Moradi, M. (2021). Statistical analysis and optimization of tensile strength of Al7075 butt joint produced by friction stir welding and submerged friction stir welding via response surface methodology and desirability approach. AJME, 53(Issue 4 (Special Issue)), 18-18. [doi: 10.22060/mej.2020.18104.6735](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18104.6735).
- [24] Ross, P.J., 1988, Taguchi techniques for quality engineering, McGraw-HillBook Company, New York.
- [1] Bhadauria. G., Jha S.K., Roy B.N., Dhakry, N. S., 2018, Electrical-Discharge Machining of Tungsten Carbide (WC) and its composites- A Review ,Materials Today: Proceedings, Vol 5, Issue 11, Part 3 ,201. 24760-24769.
- [2] Mishra. P.K., 2005, Non-conventional Machining, Narosa Publishing House.
- [3] Pandey, P.C.; Shan, H.S. Modern Machining Process. Tata McGraw- Hill Publishing Company Ltd 1999, 84-113.
- [4] Wire EDM: Complete Guide to Wire-Cut Machine, Process, Uses and Advantages, 2021, <https://finemetalworking.com/wire-edm>.
- [5] Patil, N.G., Brahmankar, P.K., 2010, Some Studies into Wire Electro Discharge Machining of Alumina Particulate-Reinforced Aluminum Matrix Composites, ADV MATER RES-SWITZ, Vol. 48, 537-555.
- [6] Rao, P.S., Ramji, K., Satyanarayana, B., 2011, Effect of WEDM Condition on Surface Roughness: A Parametric Optimization Using Taguchi Method , Int J Eng Adv Technol, Vol. 6, 041-48.
- [7] Golshan, A., Gohari, S., Ayob, A., 2011, Computational Intelligence in Optimization of Wire Electrical Discharge Machining of Cold-Work Steel 2601, IJMME-IJENS, Vol. 11.
- [8] Mukherjee, R., Chakraborty, S., Samanta, S., 2012, Selection of wire electrical discharge machining process parameters using non-traditional optimization algorithms, Appl. Soft Comput. , 12(8):2506-2516.
- [9] Patela, A.J., Patel, S.P., 2013, Parametric Optimization of Wire Cut EDM Machine on Hard - Steel Alloy with Multiple Quality, IJAET/Vol. IV/ Issue II/April-June, 2013/74-77
- [10] Tahmasbi, Vahid, Majid Ghoreishi, Moein Taheri., 2016, Sensitivity analysis of material removal rate in dry electro-discharge machining process., Mme Modares 15.13: 382-386.
- [11] Ragunath .L, Vignesh .D, 2018, optimization of Wire-Cut EDM process parameters for SS304 using design of experiment, IJMPERD, ISSN (P): 2249-6890 Vol. 8, Issue 2, 709-714.
- [12] Prasath. K, R.Prasanna, Milon D.Selvam, 2018, optimization of process parameters in wire Cut EDM of mild steel and stainless steel using robust design, ChemTech Research, Vol.11 No.01, pp 83-91.
- [13] Goyal. S, Yadwinder Sharmab. Y, Jindalb. A, Singhb. S, 2019, Optimization of Process Parameters of Wire Cut EDM for Stainless Steel-316, International J. surf. eng. mater. adv. technol, Vol.9, No. 1.

- [30] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, April 2002, doi: 10.1109/4235.996017.
- [31] Boothroyd, G., Knight, W.A., 1989, *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, Second Edition, Marcel Dekker.
- [32] Guitrau, E.B., 1997, *The EDM Handbook*, Hanser Gardner Publications, Cincinnati.
- [33] Mahto, D., & Singh, N. (2017). Experimental Study of Process Parameters through Dissimilar Form of Electrodes in EDM Machining. SSRN. DOI:10.2139/SSRN.2947443
- [34] MatWeb, 2014, Tungsten Carbide, WC, www.matweb.com.
- [25] Negarestani, A., Abolbashari, M. (2017). Optimization of End milling process for minimizing surface roughness with combined artificial Neural Network and Genetic Algorithm. *J. Solid Mech.*, 7(2), 81-91. doi: 10.22044 /jsfm.2017.4559.2174.
- [26] Rostamiyan, Y. (2017). Investigation and optimization of the mechanical properties of epoxy based Hybrid Nano-composites reinforced by carbon-fiber: Using Taguchi method. *J. Solid Mech.*, 7(3), 97-112. doi: 10.22044 /jsfm.2017.5623.2386.
- [27] Roy, R.K., 1990, *A primer on Taguchi method*, Van Nostrand Reinhold, NewYork , 48.
- [28] Bradley, N., 2007, *The Response Surface Methodology*, Department of Mathematical Science Indiana University of South Bend.
- [29] Taheri, M., and Tahmasbi V., 2016, The effect of various parameters on material removal rate in brass drilling operations using statistical sensitivity analysis, *IJME*, Vol 3:60-65.