



بهینه‌سازی نرخ براده برداری در ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر روی آلیاژ DIN 1.2080 با کمک روش شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک

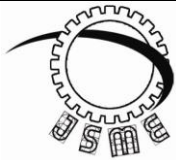
مسعود عظیمی^۱، امین کلاه دوز^{۲*}، سید علی افتخاری^۳* نویسنده مسئول: aminkolahdooz@iaukhsh.ac.ir

واژه‌های کلیدی	چکیده
ماشین کاری تخلیه الکتریکی تاگوچی دترمینان بهینه الگوریتم ژنتیک شبکه عصبی بهینه‌سازی	فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی یکی از پرکاربردترین روش‌های ماشین کاری غیر سنتی برای براده برداری قطعات هادی جریان الکتریسیته است که دستیابی به قطعه‌هایی با کیفیت سطح مناسب و نرخ براده‌برداری بالا در آن از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به کاربرد وسیع و روزافزون آلیاژ DIN 1.2080 در صنایع مختلف از جمله قالب‌سازی، ابزارهای تراشکاری، برفروزنها، خانکشی، گیوتین‌های برش و... به‌دست آوردن شرایط بهینه ماشین کاری آن حائز اهمیت است. لذا هدف اصلی در این تحقیق بررسی تأثیر پارامترهای ورودی شامل ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس بر روی نرخ براده‌برداری و بهینه‌سازی آن در ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ DIN 1.2080 است لذا جهت دستیابی به نتیجه مطلوب پس از انجام آزمایش‌های متعدد به کمک روش طراحی آزمایش تاگوچی و دترمینان بهینه به‌منظور پیش‌بینی و بهینه‌سازی نرخ برداشت براده از روش شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در ادامه بهینه‌سازی پارامترهای ورودی به‌منظور بیشینه کردن نرخ برداشت براده صورت پذیرفت. در این حالت با فرایند کاهش زمان، کاهش هزینه‌های تولید به‌دست می‌آید. پارامترهای بهینه در این آزمایش در شرایط شدت جریان ۲۰ آمپر، ولتاژ ۱۶۰ ولت، زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه و زمان خاموشی پالس ۱۲ میکروثانیه به‌دست آمد که در این صورت به میزان نرخ براده‌برداری ۰/۰۶۳ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه دست‌یافته شد. سپس با انجام آزمایش صحنه‌گذاری میزان خطا و دقت این روش سنجیده شد. با توجه به میزان خطای به‌دست آمده که حدود ۵/۱۸٪ بوده است روش استفاده شده برای الگوریتم ژنتیک مناسب ارزیابی شد.
تاریخ ارسال: ۹۴/۱۱/۲۳	
تاریخ بازنگری: ۹۵/۰۱/۱۲	
تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۳/۰۸	

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، اصفهان/خمینی شهر، ایران.

۱- استادیار، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، اصفهان/خمینی شهر، ایران.

۲- استادیار، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، اصفهان/خمینی شهر، ایران.



Journal of
Solid Mechanics
in Engineering

Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



Optimization of Material Removal Rate in Electrical Discharge Machining Alloy on DIN1.2080 with the Neural Network and Genetic Algorithm

Masoud Azimi¹, Amin kolahdooz^{2,*}, Seyyed Ali Eftekhari³

* Corresponding Author: aminkolahdooz @iaukhsh.ac.ir

Abstract:

Electrical discharge machining process is one of the most Applicable methods in Non-traditional machining for Machining chip in Conduct electricity Piece that reaching to the Pieces that have good quality and high rate of machining chip is very important. Due to the rapid and widespread use of alloy DIN1.2080 in different industry such as Molding, lathe tools, reamer, broaching, cutting guillotine, etc. Reaching to optimum condition of machining is very important. Therefore the main aim in this article is to consider the effect of input parameter such voltage, Current strength, on-time pulse and off-time pulse on the machining chip rate and optimizing this in the electrical discharge machining for alloy DIN1.2080. So to reach better result after doing some experiments to predict and optimize the rate of removing chip, neural network method and genetic algorithm are used. Then optimizing input parameters to maximize the rate of removing chip are performed. In this condition, by decreasing time, the product cost is decreased. Optimum parameters in this experiment in this condition are obtained under Current strength 20 ampere, 160 volt, on-time pulse 100 micro second and off-time pulse 12 micro second that is obtained 0.063 cm³/min as rate of machining chip. After doing experiment, surveying the level of error and its accuracy are evaluated. According to the obtained error value that is about 5.18%, used method is evaluated for genetic algorithm.

Key words:

Electrical Discharge
Machining
Taguchi
Genetic algorithm
Neural network
Optimum determinant
Optimization

2- MSc Student, Department of Mechanical engineering, Islamic Azad University, Khomeinishahr Branch, Isfahan/Khomeinishahr, Iran.

1- Assistant Professor, Young Researchers and Elite Club, Islamic Azad University, Khomeinishahr Branch, Isfahan/Khomeinishahr, Iran.

2- Assistant Professor, Young Researchers and Elite Club, Islamic Azad University, Khomeinishahr Branch, Isfahan/Khomeinishahr, Iran.

۱- مقدمه

داده شده است که افزایش شدت جریان و زمان روشنی همچنین پالس، موجب کاهش نرخ خوردگی ابزار^۴ می شود. را کاهش می دهد. جریان و ولتاژ کمتر، نرخ برداشت براده گوپالاکان و همکاران [۵]، تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی ماشین کاری تخلیه الکتریکی را بر روی نرخ^۶ بررسی برداشت براده^۵، نرخ خوردگی ابزار و زبری سطح کرده اند. در این مقاله مشخص شد شدت جریان و روشنی ترتیب که پالس بیشترین تأثیر را بر خروجی ها دارند، بدین با افزایش شدت جریان، نرخ برداشت براده ابتدا افزایش و با افزایش شدت جریان و سپس کاهش می یابد. همچنین زمان روشنی پالس، کیفیت سطح افزایش خواهد یافت. بررسی میزان نرخ براده برداری و کیفیت سطح در SiC ماشین کاری سرامیک و با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی شدت جریان، ولتاژ، زمان روشنی و خاموشی پالس در مقاله کی لیو [۶] صورت گرفت. او نشان داد تنظیمات انرژی بالا، باعث بی ثباتی ماشین کاری می شود. همچنین برای براده برداری خشن باید شدت جریان و زمان روشنی پالس بالا باشند و رسیدن به کیفیت سطح بالا به قیمت سرعت کم ماشین کاری تمام می شود. یی فونگ ژنگ [۷]، فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی را برای فولاد ابزار SKD11 بهینه سازی کرده است. تحلیل آزمایش های وی نشان می دهد 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 [۸] با در نظر گرفتن پارامترهای ولتاژ، شدت جریان و زمان روشنی و خاموشی پالس به عنوان پارامترهای اصلی، به بهینه سازی نرخ برداشت براده ی فولاد ضدزنگ ۳۰۴ پرداخته اند. مقاله ی ایشان مبین آن است که شدت جریان و زمان خاموشی پالس بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری

فرآیند ماشین کاری تخلیه ی الکتریکی^۱ که زیرمجموعه ی ماشین کاری ترموالکتریکی است، گسترده ترین روش ماشین کاری غیر سنتی فلزات و مواد رسانا است. در این روش، جرقه های الکتریکی متوالی میان الکتروود و قطعه کار در یک محیط مایع دی الکتریک EDM صورت می گیرد. از آنجا که در، از انرژی بالای حرارتی الکتریکی به جای نیروهای برشی مکانیکی استفاده می شود. با این روش می توان مواد مقاوم در برابر برش نظیر فولادهای سخت شده، کاربیدهای تنگستن و آلیاژهای با استحکام بالا و اشکال پیچیده را ماشین کاری کرد. همچنین در این روش به دلیل نبود نیروی مکانیکی، امکان 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 می شود. بنابراین مطالعات انجام شده در ماشین کاری تخلیه الکتریکی، عمدتاً بر روی تغییر و کنترل تنظیمات بهینه ی پارامترهای ماشین کاری با توجه به جنس قطعه کار متمرکز بوده است. عمده تمرکز محققان نیز بر روی استفاده از روش های آماری و به ویژه بحث طراحی آزمایش ها^۲ بوده است [۲]. استفاده از روش طراحی آزمایش ها به منظور بهینه سازی پارامترهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ MAR-274 M (پایه نیکل) موضوع پژوهش اولمن و همکاران [۳] بوده است. در این مقاله نشان داده شده است که جریان و زمان روشنی پالس، تأثیرگذارترین پارامترها هستند. همچنین افزایش ولتاژ، باعث افزایش گپ و شستشوی بهتر و در نتیجه براده برداری بیشتر می شود. آیستا و همکاران [۴] به کمک روش طراحی آزمایش ها تاگوجی و مبحث آنالیز واریانس^۳، تأثیر جریان، ولتاژ و زمان روشنی پالس را در فرآیند شیارزنی آلیاژ 1023 بررسی کرده اند. در این تحقیق نشان C

4- Tool Wear Rate (TWR)

5- Material Removal Rate (MRR)

6- Surface Roughness (SR)

1- Electrical Discharge Machining (EDM)

2- Design of Experiment (DOE)

3- Analyse of Varoance (ANOVA)

به‌دست آورد. عندلیب [۱۲] به بررسی ماشین کاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به‌روش تخلیه الکتریکی پرداخت. او پس از گردآوری داده‌های تجربی و استفاده از دو طرح تاگوچی و دترمینان بهینه در رویکرد طراحی آزمایش‌ها، به کمک دو روش تحلیل سیگنال به نویز (S/N) و مدل‌سازی ریاضی، سطوح بهینه پارامترها را به‌منظور بیشینه کردن نرخ برداشت براده و کمینه کردن زبری سطح، تعیین کرد. پارامترهای تنظیمی موردنظر، شامل ولتاژ، گپ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و فاکتور کار بود. او سپس نتایج بهینه‌سازی این تحقیق را با آزمایش‌های تجربی مقایسه کرد که تطابق خوبی برای هر دو طرح وجود داشت. در بررسی نرخ برداشت براده مشخص شد برای داشتن حداکثر نرخ براده‌برداری تمام سطوح باید در سطح بالای خود تنظیم شوند و ولتاژ در این پارامتر خروجی تأثیری ندارد. او دریافت پارامتر شدت‌جریان با بیشترین درصد تأثیرگذاری، مهم‌ترین پارامتر تنظیمی است و پس‌از 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 بی‌تأثیر است. علاوه بر آن فاکتور کار نیز بر زبری سطح تأثیر چندانی ندارد، اما پارامتر شدت‌جریان و زمان روشنی پالس به ترتیب بیشترین اثرگذاری را دارند. جوشی و همکاران [۱۳] با استفاده از روش المان محدود شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک، به بهینه‌سازی پارامترهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد قالب AISI P20 پرداخته‌اند. خطای پیش‌بینی در مدل‌سازی آن‌ها کمتر از ۷٪ بود. همچنین نتایج آزمایش آن‌ها مطابقت خوبی با نتایج آزمایش مقالات دیگر دارد. آن‌ها برای بهینه کردن و افزایش نرخ براده‌برداری ترکیب زمان روشنی پالس $420-400 \mu s$ ، دوره‌ی کاری $75-80\%$ ، شدت‌جریان $38-40 A$ و ولتاژ گپ $45-50 V$ و برای کاهش صافی سطح، ترکیب تنظیمی زمان روشنی پالس $25-30 \mu s$ ، دوره‌ی کاری $50-55\%$ ، شدت‌جریان $5-7 A$ و ولتاژ گپ $30-35 V$ را تعیین کردند.

(MRR) فولاد ضدزنگ ۳۰۴ دارند. همچنین سطوح تنظیم بهینه برای داشتن بیشترین نرخ برداشت براده، با کمک روش نسبت سیگنال به نویز محاسبه گردیده است. آنان نشان دادند با وجود تعداد کم آزمایش‌ها در روش تاگوچی، این روش نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد. زارع پور و همکاران [۹] با استفاده از روش تاگوچی به بررسی خوردگی ابزار مسی در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد ابزار DIN 1.2714 پرداخته است. آنان دریافتند شدت‌جریان بیشترین تأثیر را بر میزان خوردگی ابزار دارد. همچنین ایشان با استفاده از روش سیگنال به نویز سطوح بهینه‌ی پارامترها را مشخص کردند. ژن و همکاران [۱۰] با استفاده از منطق فازی و تاگوچی به بهینه‌سازی فرآیند تخلیه‌ی الکتریکی در ماشین کاری پرسرعت فولاد ابزار SKD11 پرداخته‌اند. در این تحقیق تأثیرگذارترین پارامترها بر روی دقت و صحت فرآیند به ترتیب زمان روشنی پالس، پارامتر کار و شدت‌جریان اعلام شده‌اند. همچنین عنوان شده است که اندازه و میزان ذرات اضافه‌شده به دی‌الکتریک تأثیر چندانی بر کیفیت ندارند. صابونی [۱۱] در طرح پژوهشی خود به بررسی پارامترهای ماشین کاری EDM با ابزار گرافیتی بر روی خواص مکانیکی آلیاژهای حافظ دار NITI پرداخته است. او در این تحقیق با استفاده از روش تاگوچی به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی ماشین کاری تخلیه‌ی الکتریکی شامل جریان پالس، زمان روشنی پالس، ولتاژ و زمان خاموشی پالس، بر پارامترهای خروجی شامل مقدار سایش ابزار، نرخ براده‌برداری و صافی سطح پرداخته است. ایشان نشان دادند که مهم‌ترین پارامتر در خروجی‌های موردبررسی برای آلیاژ حافظه‌دار NiTi، جریان پالس است که با افزایش آن، نرخ براده‌برداری و سایش ابزار، افزایش و صافی سطح کاهش می‌یابد. کمترین اثر را نیز ولتاژ دارد که با افزایش آن نرخ براده‌برداری و سایش ابزار کاهش می‌یابد و بر روی صافی سطح بی‌تأثیر است. او همچنین مقدار عددی پارامترهای زمان خاموشی و روشنی پالس را برای بهینه کردن خروجی‌های تحقیق

گپ و مقدار آن در یک فضای کاملاً پیوسته هستند الگوریتم ژنتیک می‌تواند با جست و جو در این فضای به هم پیوسته بهترین ورودی‌ها جهت اعمال به دستگاه را مشخص نماید به عبارت دیگر بهینه‌سازی فرآیند پیچیده‌ی EDM جهت ماشین‌کاری بر روی مواد سخت پایه کربنی و یا سرامیک‌های غیراکسیدی به کمک الگوریتم ژنتیک و با انتخاب یک تابع مناسب تا حد قابل توجهی امکان پذیر است. بررسی مقالات نشان می‌دهد در ماشین‌کاری EDM مواد خاص به خصوص فولاد ابزار سردکار تحقیقات اندکی صورت گرفته است. از آنجا که تأثیر پارامترهای تنظیمی و تعیین سطوح بهینه‌ی آن‌ها وابسته به جنس قطعه کار و شرایط ماشین‌کاری است، برای هر آلیاژ و ماده‌ی خاص می‌بایست آزمایش‌های عملی مجدد صورت گیرد. علی‌رغم کاربرد روزافزون آلیاژ DIN 1.2080، به خصوص در ایران، تا کنون تحقیقی در زمینه‌ی بهینه‌سازی شرایط ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی این آلیاژ به روش شبکه‌ی عصبی و الگوریتم ژنتیک و با کمک استفاده‌ی هم‌زمان از دو روش طراحی آزمایش تاگوچی و درمیان بهینه‌سازی صورت نگرفته است.

به‌طور کلی اهداف این تحقیق را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

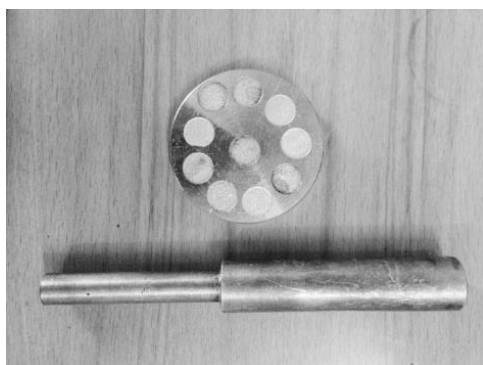
- ۱- تخمین مقادیر مختلف پارامترهای نام برده شده با دقت قابل قبول جهت کنترل بهتر فرآیند به کمک مدل شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک
- ۲- ارائه‌ی مدلی جهت پیش‌بینی و بهینه‌سازی کارآمد به‌منظور تعیین سطوح بهینه‌ی پارامترهای تنظیمی برای نیل به مشخصه خروجی بهینه‌ی فرآیند توسط شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک.

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

تسای و همکاران [۱۴] به مطابقت مدل‌های شبکه عصبی با نرخ براده‌برداری در EDM پرداختند. آن‌ها در ابتدا الگوریتم‌های مختلف آموزشی شبکه عصبی مصنوعی را برای پیش‌بینی نرخ براده‌برداری قطعات با مواد مختلف با در نظر گرفتن تغییر قطب الکتروود در میان شش شبکه عصبی مختلف و یک شبکه عصبی - فازی به صورت جداگانه مقایسه کردند. آن‌ها گزارش کردند شبکه انطباقی بر پایه سیستم استنتاجی فازی (ANFIS) بهترین شیوه برای پیش‌بینی نرخ براده‌برداری است. همچنین نشان داده شد پیش‌بینی‌ها روی نرخ براده‌برداری در شرایط تعمیم یافته به میزان خطای ۱۶/۳۳ درصد رسیده است و اگرچه فرآیند EDM به خاطر پیچیدگی و غیرقابل پیش‌بینی بودنش معروف است ولی روش ANFIS این فرآیند را با دقت مدل می‌کند. راثو و همکاران [۱۵] به توسعه مدل ترکیبی و بهینه‌سازی نرخ براده‌برداری در ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی Ti6Al4V, HE15, 15CVD6 و M-250 با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک پرداختند. این آزمایش‌ها با تغییر دادن بیشترین ولتاژ و جریان و اندازه‌گیری مقادیر مربوط به نرخ براده‌برداری انجام شدند. مشاهده شد که میانگین مربع خطا هنگامی که شبکه با الگوریتم ژنتیک توسعه یابد به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. آن‌ها اعلام کردند در ولتاژ ثابت با افزایش جریان نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد همچنین بیشترین نرخ براده‌برداری در ولتاژ ۴۰ ولت و جریان ۱۶ آمپر رخ می‌دهد. در مورد آلیاژ تیتانیوم بهترین نرخ براده‌برداری و کمترین نرخ سایش ابزار در جریان ۱۵ آمپر و ولتاژ ۴۰ ولت به دست آمد. از حساسیت تجزیه و تحلیل‌ها نتیجه‌گیری شد که نوع ماده بیشترین تأثیر را بر روی مقادیر به دست آمده دارد. ایمان ذباح و همکاران [۱۶] به بهینه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی با ارائه روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک جهت یافتن ورودی‌های بهینه‌ی دستگاه EDM پرداختند آن‌ها با ارائه این مدل نشان دادند با توجه به اینکه هر یک از پارامترهای ورودی دستگاه شامل شدت جریان، مدت زمان روشنی و خاموشی پالس، اندازه



شکل (۱) نمایی از نمونه و الکترود مورد استفاده

۲-۲- تجهیزات مورد استفاده

برای انجام آزمایش‌های طراحی شده، از دستگاه اسپارک پیشرانه مدل ۵۰۱-۵۰A (شکل ۲) استفاده شده است. از مهم‌ترین ویژگی‌های این دستگاه می‌توان به امکان تغییر اکثر پارامترهای تنظیمی، دقت بالا و سیستم شست و شوی کارآمد آن 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. برای اندازه‌گیری 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 پیشرانه مدل ۵۰۱-۵۰A

در صنایع مختلف می‌باشد که از سختی‌پذیری بسیار بالایی برخوردار است. جداول (۱) و (۲) به ترتیب، ترکیب شیمیایی و برخی از خواص مکانیکی مهم این آلیاژ را نشان می‌دهد [۱۷].

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

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

از ویژگی‌های مهم این فولاد می‌توان مقاومت سایشی بسیار زیاد، استحکام فشاری بالا و قابلیت سخت کاری عمقی اشاره کرد. امروزه از این آلیاژ در ساخت قالب‌های پولک‌زنی حاد، ابزارهای تراشکاری، قالب‌های سردکار، برقوزنها، خان‌کشی و... استفاده می‌شود. الکترود ابزار از جنس مس با خلوص ۹۹/۹٪ و قطر ۴۰ میلی‌متر انتخاب گردید. برای نصب راحت‌تر الکترود در ابزارگیر، دنباله‌ای به طول ۱۰ سانتیمتر و قطر ۱۱ میلی‌متر برای آن در نظر گرفته شد. نمونه‌ها با استفاده از ماشین اره نواری به صورت دقیق با ضخامت یکسان از یک پروفیل استوانه‌ای به قطر ۷۰ میلی‌متر برش خورده و با استفاده از ماشین تراش و سنگ مغناطیس، سطح آن‌ها با دقت پرداخت شده‌اند. سپس به منظور کنترل و ردیابی دقیق‌تر، قبل از انجام آزمایش‌ها، هر دو سمت این نمونه‌ها کدگذاری شده‌اند. شکل (۱) یکی از نمونه‌ها و الکترود مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

۳-۲- طراحی آزمایش

در این تحقیق از بین ورودی‌های موجود، اثر چهار پارامتر ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس، بر روی پارامتر خروجی نرخ برداشت ماده در ماشین‌کاری 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 و نهایتاً به دست آوردن بهترین نتیجه، جدول (۳)، به عنوان پارامترها و سطوح مورد ارزیابی تعیین شد.

جدول (۳) پارامترها و مقادیر استفاده شده

پارامترهای ورودی	واحد	سطوح				
		۱	۲	۳	۴	۵
(V)	V	۱۰۰	۱۶۰	۲۲۰
(I)	A	۵	۱۰	۱۵	۲۰
(T _{on})	μs	۱۲	۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
(T _{off})	μs	۱۲	۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰

پس از تعیین پارامترها و سطوح هر یک، باید نحوه انجام آزمایش‌ها تعیین شود. با توجه به تعداد پارامترها و سطوح انتخابی، برای انجام کامل آزمایش‌ها احتیاج به ۳۰۰ آزمایش (۳^۱×۴^۱×۵^۲) است. اما با توجه به هزینه و زمان بر بودن انجام کامل آزمایش‌ها، در این پژوهش از دو طرح کسری تاگوجی و دترمینان بهینه استفاده شده است. برای طراحی ماتریس آزمایش‌ها تاگوجی، از نرم‌افزار آماری MINITAB استفاده شد. این نرم‌افزار با یک پارامتر دوسطحی و سه پارامتر سه سطحی، سه ماتریس L18، L36 و L54 و طرح تاگوجی را پیشنهاد می‌کند. ماتریس ۳۶ تایی همان ماتریس ۱۸ تایی است که هر آزمایش دو بار تکرار می‌شود. ماتریس ۵۴ تایی نیز بنا به شرایط ذکر شده

(زمان‌بری بالا) غیرقابل انتخاب بود، بنابراین با توجه به شرایط و امکانات، از بین این سه، ماتریس L18 انتخاب شده است. بنابر این با تقسیم سطوح، دو جدول (۴) و (۵) چینش آزمایش‌ها بر اساس طرح تاگوجی L18 را با داده‌های متفاوت نشان می‌دهد. در این جداول، هر ردیف معرف یک آزمایش است. در ستون آخر خروجی اندازه‌گیری شده (نرخ برداشت براده) درج شده است.

جدول (۶) نیز ماتریس انجام آزمایش‌ها بر اساس طرح دترمینان بهینه را که با استفاده از نرم‌افزار Design Expert به دست آمده است، نشان می‌دهد. در این طرح تنها یک می‌شود. توسط نرم‌افزارهای آماری پیشنهاد L26 چینش نتایج حاصل از اندازه‌گیری خروجی‌ها در قالب ماتریس‌های طراحی آزمایش‌ها، فضای مناسبی برای تجزیه و تحلیل فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به روش شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک را فراهم می‌کند.

جدول (۴) پارامترهای ورودی و خروجی اندازه‌گیری شده در طرح

تاگوچی (۱)

پارامترهای ورودی		پارامترهای خروجی		ردیف
MRR (cm ³ /min)	T _{Off} (μs)	T _{On} (μs)	I (A)	
۰/۰۰۲۶۱	۱۲	۱۲	۵	۱
۰/۰۰۲۶۱	۵۰	۵۰	۵	۲
۰/۰۰۴۷۸	۱۰۰	۱۰۰	۵	۳
۰/۰۰۴۷۸	۱۲	۱۲	۱۰	۴
۰/۰۰۶۹۵	۵۰	۵۰	۱۰	۵
۰/۰۱۱۷۳	۱۰۰	۱۰۰	۱۰	۶
۰/۰۱۲۶۰	۵۰	۱۲	۱۵	۷
۰/۰۲۱۲۹	۱۰۰	۵۰	۱۵	۸
۰/۰۴۴۳۳	۱۲	۱۰۰	۱۵	۹
۰/۰۰۲۱۷	۱۰۰	۱۲	۵	۱۰
۰/۰۰۵۲۱	۱۲	۵۰	۵	۱۱
۰/۰۰۷۸۲	۵۰	۱۰۰	۵	۱۲
۰/۰۰۳۹۱	۵۰	۱۲	۱۰	۱۳
۰/۰۰۹۱۳	۱۰۰	۵۰	۱۰	۱۴
۰/۰۱۶۵۱	۱۲	۱۰۰	۱۰	۱۵
۰/۰۰۹۵۶	۱۰۰	۱۲	۱۵	۱۶
۰/۰۴۱۷۲	۱۲	۵۰	۱۵	۱۷
۰/۰۴۰۴۲	۵۰	۱۰۰	۱۵	۱۸

جدول (۵) پارامترهای ورودی و خروجی اندازه‌گیری شده در طرح

تاگوچی (۲)

پارامترهای ورودی		پارامترهای خروجی		ردیف
MRR (cm ³ /min)	T _{Off} (μs)	T _{On} (μs)	I (A)	
۰/۰۰۷۳۹	۲۵	۲۵	۱۰	۱
۰/۰۱۲۱۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۰	۲
۰/۰۰۸۶۹	۲۰۰	۲۰۰	۱۰	۳
۰/۰۲۵۲۱	۲۵	۲۵	۱۵	۴
۰/۰۳۷۳۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۵	۵
۰/۰۲۸۲۵	۲۰۰	۲۰۰	۱۵	۶
۰/۰۲۰۴۳	۱۰۰	۲۵	۲۰	۷
۰/۰۲۷۸۱	۲۰۰	۱۰۰	۲۰	۸
۰/۰۵۰۸۵	۲۵	۲۰۰	۲۰	۹
۰/۰۰۳۹۱	۲۰۰	۲۵	۱۰	۱۰
۰/۰۱۳۴۷	۲۵	۱۰۰	۱۰	۱۱
۰/۰۱۱۷۳	۱۰۰	۲۰۰	۱۰	۱۲
۰/۰۲۲۱۶	۱۰۰	۲۵	۱۵	۱۳
۰/۰۲۱۷۳	۲۰۰	۱۰۰	۱۵	۱۴
۰/۰۴۰۴۲	۲۵	۲۰۰	۱۵	۱۵
۰/۰۱۲۱۷	۲۰۰	۲۵	۲۰	۱۶
۰/۰۵۵۱۹	۲۵	۱۰۰	۲۰	۱۷
۰/۰۴۳۰۲	۱۰۰	۲۰۰	۲۰	۱۸

جدول (۶) پارامترهای ورودی و خروجی اندازه گیری شده در طرح

دترمیان بهینه

ردیف	پارامترهای ورودی					پارامتر خروجی
	V (V)	I (A)	T _{On} (μs)	T _{Off} (μs)	MRR (cm ³ /min)	
۱	۲۲۰	۱۵	۲۰۰	۲۵	۰/۰۴۰۴۲	
۲	۱۰۰	۱۰	۱۰۰	۲۰۰	۰/۰۰۹۹۹	
۳	۲۲۰	۲۰	۲۵	۲۵	۰/۰۳۴۳۳	
۴	۱۰۰	۱۵	۱۰۰	۱۰۰	۰/۰۳۷۳۷	
۵	۲۲۰	۱۵	۲۰۰	۱۰۰	۰/۰۳۲۱۶	
۶	۱۰۰	۲۰	۲۵	۲۰۰	۰/۰۰۸۲۶	
۷	۲۲۰	۱۰	۲۰۰	۱۰۰	۰/۰۱۱۷۳	
۸	۲۲۰	۱۵	۱۰۰	۲۵	۰/۰۴۵۱۹	
۹	۱۰۰	۲۰	۲۰۰	۱۰۰	۰/۰۳۹۵۴	
۱۰	۱۰۰	۱۰	۱۰۰	۲۵	۰/۰۰۹۹۹	
۱۱	۲۲۰	۲۰	۲۵	۱۰۰	۰/۰۲۶۵۱	
۱۲	۱۰۰	۲۰	۱۰۰	۲۵	۰/۰۵۳۰۲	
۱۳	۱۰۰	۱۵	۲۵	۲۵	۰/۰۲۵۲۱	
۱۴	۲۲۰	۱۰	۲۵	۲۵	۰/۰۰۹۵۶	
۱۵	۲۲۰	۱۵	۱۰۰	۲۰۰	۰/۰۲۱۷۳	
۱۶	۲۲۰	۲۰	۲۰۰	۲۵	۰/۰۵۸۹۴	
۱۷	۲۲۰	۱۰	۲۰۰	۲۰۰	۰/۰۰۸۲۶	
۱۸	۱۰۰	۱۵	۲۵	۱۰۰	۰/۰۱۴۳۴	
۱۹	۱۰۰	۱۰	۲۵	۱۰۰	۰/۰۰۵۲۱	
۲۰	۲۲۰	۱۰	۱۰۰	۱۰۰	۰/۰۱۱۳۰	
۲۱	۱۰۰	۲۰	۱۰۰	۱۰۰	۰/۰۳۷۳۷	
۲۲	۱۰۰	۲۰	۲۰۰	۲۰۰	۰/۰۳۰۴۲	
۲۳	۲۲۰	۱۵	۲۵	۲۰۰	۰/۰۱۰۴۳	
۲۴	۱۰۰	۱۰	۲۰۰	۲۵	۰/۰۱۰۸۶	
۲۵	۲۲۰	۲۰	۱۰۰	۲۰۰	۰/۰۲۷۸۱	
۲۶	۱۰۰	۱۵	۲۰۰	۲۰۰	۰/۰۲۸۲۵	

۳- نتایج

۳-۱- تشکیل شبکه عصبی

به کمک داده‌های به دست آمده از انجام آزمایش‌ها، شبکه عصبی به طریق مناسب آموزش داده شد. به طور کلی داده‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند. گروه اول داده‌های آموزشی^۱ که جهت آموزش و تنظیم وزن‌ها و بایاس‌های شبکه بکار می‌روند و به صورت پیش فرض ۷۰٪ از اطلاعات اولیه به این گروه اختصاص دارد. گروه دوم داده‌های ارزیابی^۲، هر بار که شبکه یک سیکل آموزشی را طی می‌کند داده‌های گروه ارزیابی وارد شبکه می‌شوند و خطای بین خروجی شبکه و مقادیر واقعی برای آن‌ها محاسبه می‌شود که به صورت پیش فرض ۱۵٪ از اطلاعات اولیه به این گروه اختصاص داده شده است. گروه سوم داده‌ها، گروه آزمایش^۳ هستند که جهت آزمایش شبکه استفاده می‌شوند و ۱۵٪ باقی مانده اطلاعات اولیه نیز به این گروه اختصاص می‌یابد [۱۸]. لازم به ذکر است که انتخاب داده‌ها برای قرار گرفتن در هر گروه به صورت تصادفی انجام می‌شود. شبکه عصبی آموزش داده شده شامل ۴ ورودی (ولتاژ، آمپر، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس) و یک خروجی (نرخ براده برداری) است.

۳-۲ ویژگی‌های شبکه عصبی استفاده شده

در این پژوهش از شبکه جلورو^۴ استفاده شده شبکه عصبی تولید شده دارای یک لایه با ۴ نرون مربوط به پارامترهای ورودی (ولتاژ، آمپر، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس) یک لایه مخفی با ۵۲ نرون و یک لایه خروجی با شبکه‌های مختلف، ارزیابی تابع خطا می‌باشد، که در اینجا از میانگین مربعات خطا (MSE) استفاده شده است. لازم

1-Train

2-Validation

3-Test

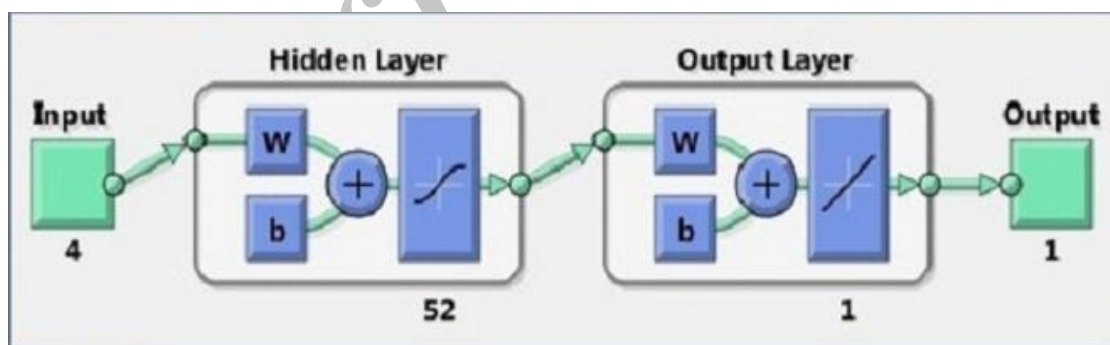
4- Feed forwrd

در شکل (۶) نمودار رگرسیون این شبکه پس از آموزش برای سه مرحله (train, validation, test) و نیز جمع هر سه مرحله نشان داده است. در این نمودارها محور افقی مربوط به مقادیر هدف (target) و محور عمودی مربوط به خروجی شبکه عصبی (output) است. هرچه خط گذرا از نقاط به خط $y = x$ نزدیک تر باشد و یا به عبارتی عدد بالای نمودار (R) به عدد یک نزدیک تر باشد یعنی مقدار هدف (target) که شبکه باید پیش بینی کند و مقدار خروجی شبکه (output) باهم بسیار مطابقت دارند و این یکی از دلایلی است که نشان می دهد شبکه عصبی مناسبی طراحی و انتخاب شده است. در شکل (۷) نموداری نمایش داده شده که نشان دهنده تاریخچه آموزش شبکه است که در آن شیب نزدیک شدن به هدف، گام های نزدیک شدن به هدف و تعداد مراتب fail شدن شبکه را نشان می دهد. نشان می دهد که مشاهده می شود روند بهبودی شبکه از تکرار هشتم به بعد از بین می رود و شبکه بهتر نمی شود در نتیجه تا هشتم مرحله کافی بوده است.

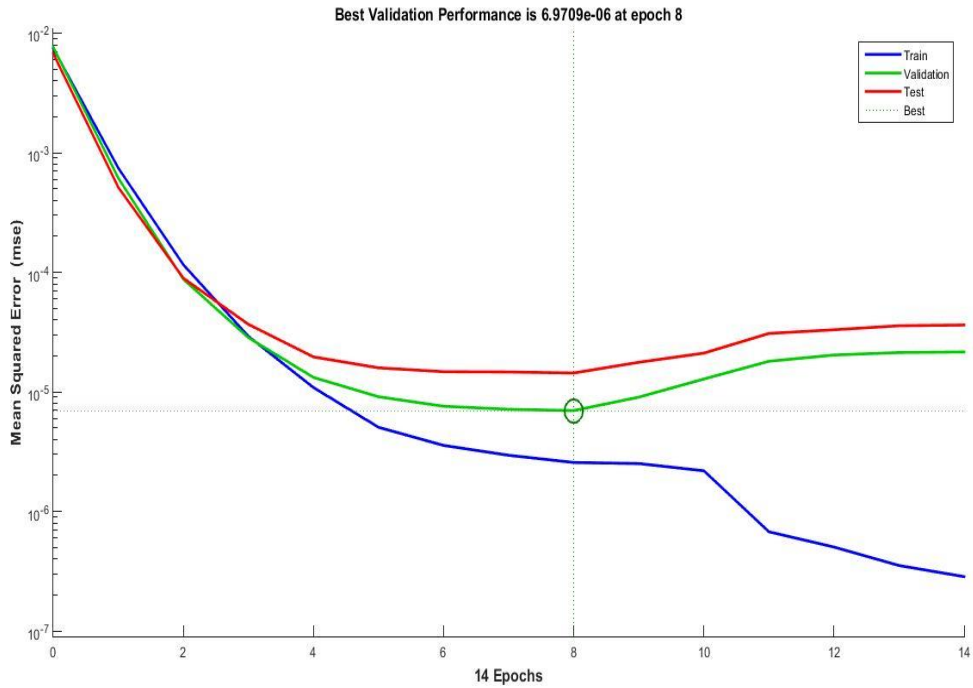
به ذکر است برای رسم منحنی خطا از داده هایی که برای ارزیابی و آزمایش در نظر گرفته شده بودند استفاده شده است. در شکل (۴) منحنی خطای شبکه انتخاب شده نمایش داده شده است. این نمودار راندمان را نشان می دهد. مقدار خطای شبکه در تکرار هشتم برابر $10^{-6} * 97/6$ می باشد.

در شکل (۵) نمودار هیستوگرام خطا داده شده است که نشان دهنده خطای سه مرحله آموزش، ارزیابی و آزمایش است. همان طور که مشاهده می گردد میانگین و خطای اغلب داده ها حدود $0/00014$ است که نزدیک به صفر و قابل قبول است و نشان دهنده انتخاب و آموزش مناسب شبکه می باشد.

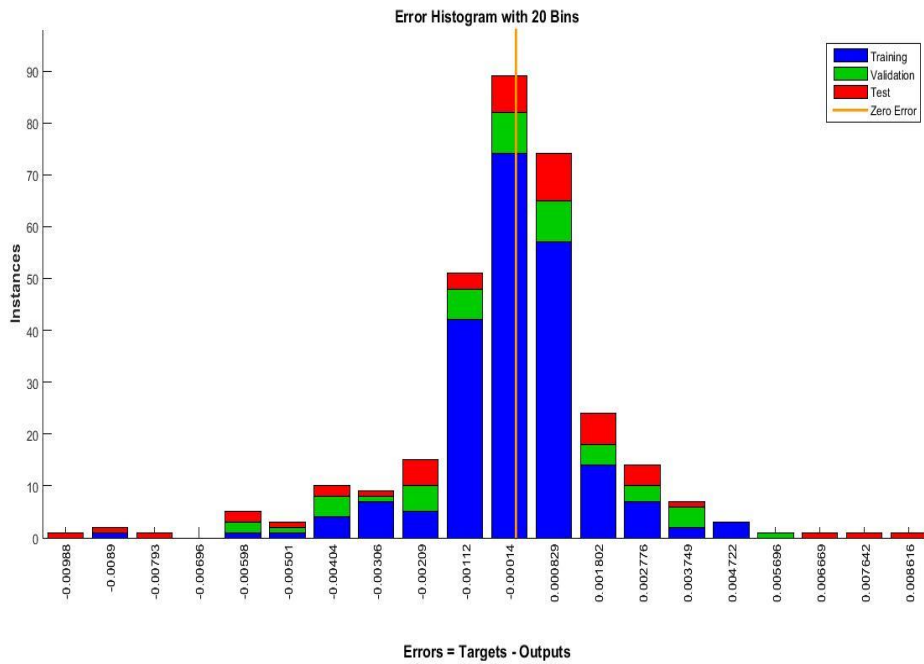
یک نرون مربوط به پارامتر خروجی (نرخ براده برداری) است. تابع تبدیل لایه مخفی اول از نوع tansig و تابع لایه خروجی از نوع pureline می باشد. شکل (۳) شماتیک شبکه عصبی استفاده شده را نشان می دهد. از آنجایی که هدف، یافتن شبکه ای است که با ارائه داده های جدید بهترین عملکرد را نشان دهد. ساده ترین راه برای مقایسه



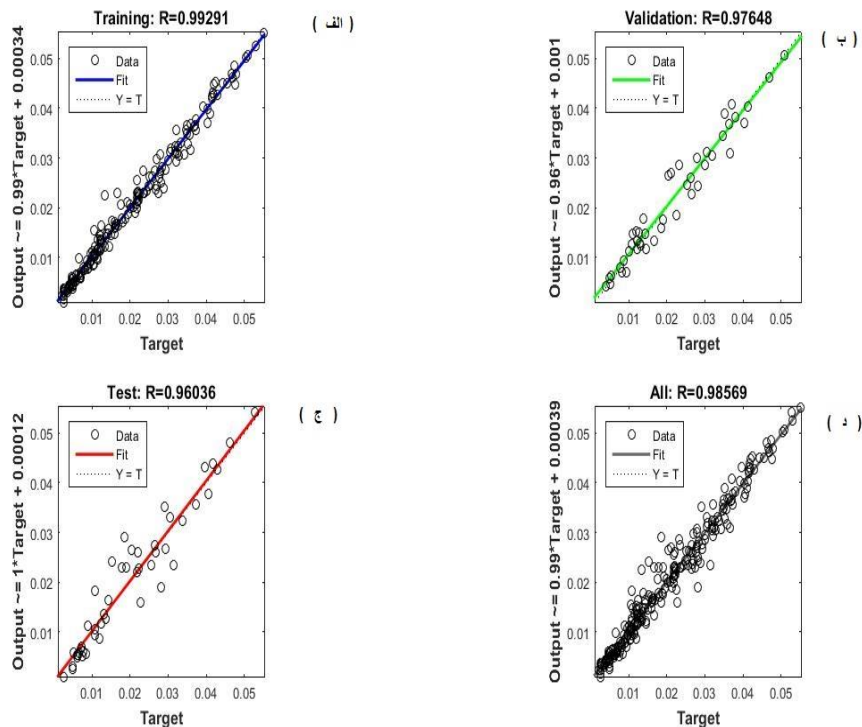
شکل (۳) شماتیک شبکه عصبی استفاده شده



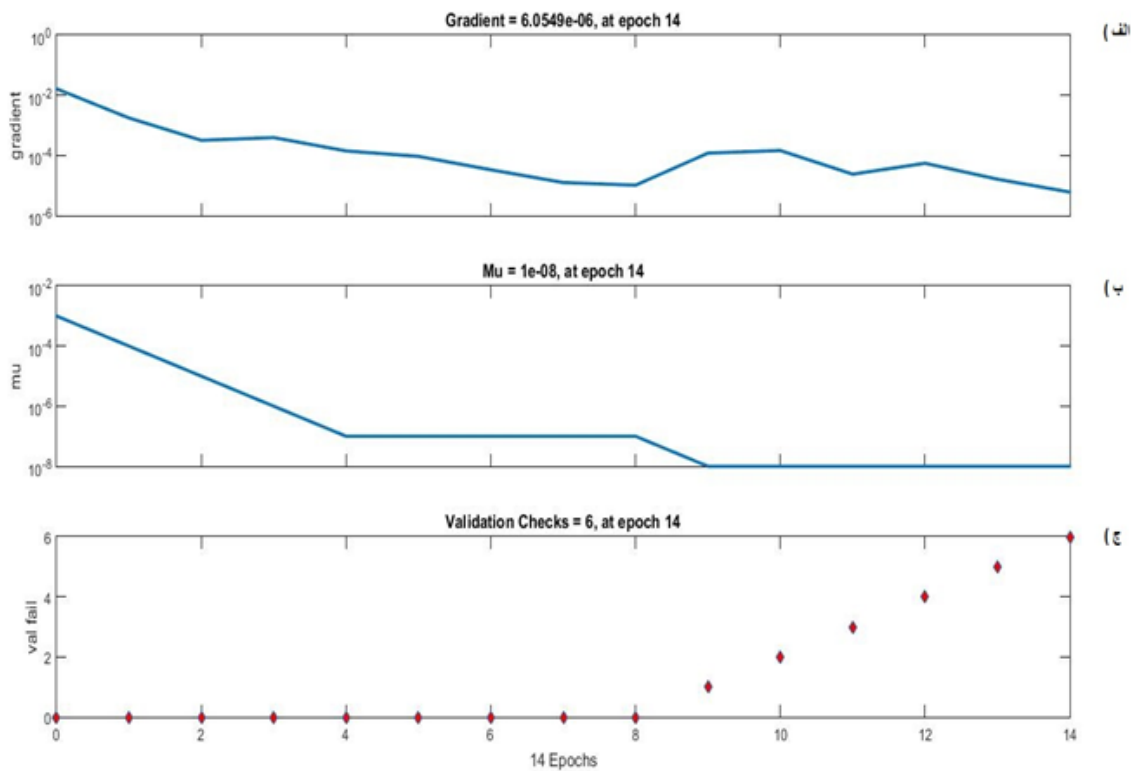
شکل (۴) منحنی خطای شبکه انتخاب شده



شکل (۵) نمودار هیستوگرام نشان دهنده خطای سه مرحله (آموزش، ارزیابی و آزمایش)



شکل (۶) نمودار رگرسیون مربوط به شبکه پس از آموزش به ازای (الف) داده‌های آموزش (ب) داده‌های ارزیابی (ج) داده‌های تست (د) کل داده‌ها (محور افقی مقادیر واقعی و محور عمودی خروجی شبکه است)



شکل (۷) تاریخچه آموزش شبکه (الف) شیب نزدیک شدن به هدف (ب) ضریب ممنوم مورد استفاده (ج) تعداد مراتب ارزیابی شبکه

محاسباتی ادامه تکرار منطقی نیست و در صورتی که با تکرار زیاد یا افزایش جمعیت جواب‌ها دستخوش تغییر زیادی گردند احتمالاً در نقطه بهینه محلی هستیم [۱۹].

۳-۴- تعیین مقادیر بهینه پارامترها برای نرخ براده‌برداری و تحلیل آن‌ها

پس از اجرای برنامه با تنظیمات فوق مقدار بهینه پارامترهای ورودی جهت دستیابی به بالاترین نرخ براده‌برداری به این ترتیب به دست می‌آیند: شدت جریان ۲۰ آمپر، ولتاژ ۱۶۰ ولت، زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه و زمان خاموشی پالس ۱۲ میکروثانیه و همچنین نرخ براده‌برداری ۰/۰۶۳ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه همان‌طور که مشاهده می‌شود شدت جریان و زمان روشنی پالس باید در سطوح بالای خود و زمان خاموشی پالس نیز باید در سطوح پایین خود تنظیم شوند و تأثیر ولتاژ هم ناچیز است.

انتخاب سطوح بالای شدت جریان باعث می‌شود حداکثر نرخ انرژی تخلیه‌شده بر سطح قطعه کار ایجاد گردیده و با ذوب و تبخیر احجام بزرگ‌تری از قطعه کار، MRR افزایش یابد. در رابطه با زمان روشنی پالس، این پارامتر 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 براده‌برداری بیشتری خواهیم داشت. در زمان خاموشی پالس، جریان قطع گردیده و توسط مایع دی‌الکتریک ذرات کنده‌شده از سطح فلز، از محل دور می‌شوند. هرچه این پارامتر کمتر باشد، میانگین تعداد جرقه‌ها در واحد زمان بیشتر شده و سرعت براده‌برداری افزایش می‌یابد. ولتاژ در میزان براده‌برداری نقشی اساسی ندارد زیرا فقط موجب می‌شود که عمل یونیزاسیون با سرعت دلخواه انجام شود. این امر کنترل سرو موتور را تسهیل می‌کند. در مرحله‌ی بعد با انجام آزمایش صحه‌گذاری، میزان دقت پیش‌بینی این روش سنجیده می‌شود. برای این کار، با توجه به مقادیر بهینه به‌دست آمده به کمک برنامه شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک، آزمایش صحه‌گذاری با دقت تمام انجام شد.

در شکل (۷) مشاهده می‌شود روند بهبودی شبکه از تکرار هشتم به بعد از بین می‌رود و شبکه بهتر نمی‌شود در نتیجه تا هشت مرحله کافی بوده است. در مجموع با توجه به شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) مشخص است که شبکه انتخاب شده قابلیت تخمین و پیش‌بینی این فرآیند را به‌خوبی دارد و می‌توان از این شبکه عصبی به‌عنوان تابع هدف در برنامه الگوریتم ژنتیک استفاده کرد.

۳-۳- ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک بکار رفته

الگوریتم ژنتیک دارای متغیرهای متعدد است که تغییر هر یک از آن‌ها بر دقت و صحت جواب مسئله تأثیر می‌گذارد. در جدول (۷) مقادیر مناسب این پارامترها که در برنامه الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند ارائه شده است. از آنجایی که الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم جستجوی تصادفی است در تکرارهای مختلف جواب‌های متفاوتی ایجاد می‌کند به همین دلیل برای بهینه‌سازی تعدادی تکرار در نظر گرفته شده است تا اطمینان حاصل شود که الگوریتم به یک جواب بهینه همگرا شده است.

جدول (۷) مقادیر پارامترهای تنظیمی الگوریتم ژنتیک

مقدار	پارامترهای تنظیمی الگوریتم ژنتیک
۵۰	اندازه جمعیت (n JAM)
۱۰	فشار انتخاب (beta)
۰/۸	احتمال تقاطع (pc)
۰/۳	احتمال جهش (pm)
۰/۰۲	نرخ جهش (mu)
۳۰	بیشترین تعداد تکرار (MaxIt)

در صورتی که در اثر این تکرار به مرحله‌ای برسیم که جواب‌ها دیگر تغییر نکند بدین معنی است که به مقدار بهینه رسیده‌ایم که در این حالت به خاطر افزایش هزینه

می‌گذارد. باید توجه داشت که عدم تناسب زمان روشنی و خاموشی پالس منجر به افزایش و کاهش بیش از حد زمان خاموشی پالس و در نتیجه تجزیه‌ی 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، میزان عمق ذوب سطحی و در پی آن نرخ برداشت براده را کاهش می‌دهد. در نهایت با بررسی نتایج بهینه‌سازی و آزمایش صحنه‌گذاری و با توجه به میزان خطای به دست آمده که حدود ۵/۱۸٪ بوده است می‌توان گفت که روش شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک روش مناسبی است و نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی از دقت بالایی برخوردار است.

مراجع

- [1] Kalpakjian S, *Manufacturing Engineering and Technology*, 1995, Addison-Wesley.
- [2] Sadr P., Kolahdooz A., Eftekhari S.A., The effect of Electrical Discharge Machining parameters on alloy DIN1.2080 using the taguchi method and optimal determinat, *Journal of Solid Mechanics in Engineering*, Vol. 8, No. 2, 2015, pp. 71-89, (In Persian).
- [3] 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.
- [4] Ayestaa, Izquierdob B., Influence of EDM parameters on slot machining in C1023 aeronautical alloy, *Procedia CIRP*, Vol. 6, 2013, pp. 129-134.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Tzeng Y.F., Development of a flexible high-speed EDM technology with geometrical transform optimization,

همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان خطای پیش‌بینی حدود ۵/۱۸٪ است جدول (۸). این خطا به دلیل تأثیر عوامل محیطی و سایر پارامترهای غیرقابل کنترل بر روی ماشین کاری است. با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در ماشین کاری تخلیه الکتریکی و ماهیت صنعتی آن، این مقدار خطای پیش‌بینی در حد قابل قبولی قرار دارد.

جدول (۸) نتیجه آزمایش صحنه‌گذاری برای نرخ براده برداری

درصد خطا	پیش‌بینی برنامه آزمایش		نتیجه مقادیر بهینه
	نتیجه	پیش‌بینی	
۵/۱۸	۰/۰۶۳۰۰	۰/۰۵۹۹۰	$V = 160$ $T_{on} = 100$ $I = 20$ $T_{off} = 12$

لازم به ذکر است در این تحقیق محدودیت‌های دستگاه ایجاب می‌کرد پارامترهای ورودی فقط در سطوح مشخصی قابل تنظیم باشند. به همین دلیل برنامه شبکه عصبی به صورت گسسته نوشته شده است تا خروجی آن اعدادی باشند که امکان تنظیم آن‌ها روی دستگاه وجود داشته باشد. در غیر این صورت انجام آزمایش صحنه‌گذاری و تنظیم اعداد بهینه روی دستگاه غیرممکن بود.

۴- نتیجه‌گیری

در بررسی نرخ برداشت براده مشخص شد برای داشتن حداکثر نرخ براده برداری شدت جریان و زمان روشنی پالس، 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 براده‌برداری بیشتری صورت می‌گیرد. ولتاژ در این پارامتر خروجی تأثیری زیادی 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. ولتاژ کار نیز در میزان براده برداری نقشی اساسی ندارد و فقط موجب می‌شود که عمل یونیزاسیون با سرعت دلخواه انجام شود. جریان در اسپارک به صورت خطی تغییر می‌نماید و بیشترین تأثیر را بر روی پارامتر خروجی

- modern writing area in computer engineering and information lat, Vol. 56, 2011, pp. 1-28.
- [17] www.esttoolsteel.com, (2015/2).
- [۱۸] کیا، سید مصطفی، شبکه‌های عصبی در متلب، انتشارات دانشگاهی کیان، ۱۳۹۰، چاپ دوم.
- [۱۹] کیا، سید مصطفی، الگوریتم‌های ژنتیک در متلب، انتشارات دانشگاهی کیان، (۱۳۹۱)، چاپ سوم.
- Journal of materials processing technology*, Vol. 203, 2008, pp. 355–364.
- [8] Rajmohan T., Prubho R., Optimization of Machining parameter in EDM of 304 Stainless Steel, *Procedia Engineering*, Vol. 38, 2012, pp. 1030 – 1036.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [۱۱] صابونی، حمیدرضا، ۱۳۹۱، طرح پژوهشی، بررسی پارامترهای ماشین کاری EDM با ابزار گرافیتی بر روی خواص مکانیکی آلیاژهای حافظ دار NITI، دانشگاه آزاد اسلامی خمینی شهر.
- [۱۲] عندلیب، مرتضی، ۱۳۹۲، پایان‌نامه، ماشین کاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به روش تخلیه الکتریکی و بررسی تأثیر پارامترهای تنظیمی در کیفیت سطح و نرخ براده برداری قطعات تولیدی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد.
- [13] Joshi S.N., Pandeb S.S., Intelligent process modeling and optimization of die-sinking electric discharge machining, *Applied Soft Computing*, Vol. 11, 2011, pp. 2743–2755.
- [14] Tsai K.M., Wang P.J., Predictions on surface finish in electrical discharge machining based upon neural network models, *International Journal of Machine Tool Manufacturing*, Vol. 41, 2001, pp. 1385–1403.
- [15] Rao G.K.M., Ganardhana G.R., Rao D.H., Rao M.S., Development of hybrid model and optimization of surface roughness in electric discharge machining using artificial neural networks and genetic algorithm, *Journal of Material Process Technology*, Vol. 209, 2009, pp. 1512–1520.
- [16] Zabab I., optimization of EDM machining process using genetic algorithm, The first