مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹٤، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۳۷۱-۳۷۵

مجموعه مقالات کنفرانس ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ و ۱٤ آبان ۱۳۹٤

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران
Society of Manufacturing Engineering of Iran

بررسی همزمان زبری سطح و زمان برش‌کاری در فرآیند برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی سوپر آلیاژ پایه نیکل با استفاده از مطالعات تجربی و سیستم فازی- عصبی

فرشید جعفریان[۱*]، علی موسوی[۲]، علیرضا برقک[۲]

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد الیگودرز، الیگودرز

*تهران، صندوق پستی ۴۴۶۰۰۰۷۰، farshid.jafarian@ymail.com

چکیده

زبری سطح و زمان برش‌کاری از مهمترین عوامل مورد توجه در فرآیند برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی هستند که اهمیت زیادی در ساخت و تولید دارند. آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با داشتن خواص منحصر به فرد از کاربرد گسترده‌ای در قطعات مختلف صنایع هوایی و قطعات دوار موتورهای توربینی برخوردار می‌باشد. به همین منظور بررسی وضعیت زبری سطح و زمان ماشین‌کاری در فرآیند برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی این آلیاژ بیش از سایر مواد و فرآیندهای برش‌کاری احساس می‌شود. برش این آلیاژ با استفاده از فرآیندهای سنتی دارای دشواریها و مشکلات زیادی می‌باشد. به همین دلیل لزوم بررسی و مطالعه‌ی هرچه بیشتر فرآیندهای برش‌کاری جدید احساس می‌شود. از این‌رو تحقیق به عمل آمده با هدف مرتفع نمودن نیاز مذبور صورت پذیرفته است. در ابتدا برش سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با استفاده از فرآیند تخلیه الکتریکی سیمی بررسی شده و اثر پارامترهای ورودی بر زبری سطح و زمان برش‌کاری بصورت تجربی مورد مطالعه قرار می‌گیرند. در ادامه از نتایج تجربی بدست آمده جهت مدل استنتاجی فازی- عصبی استفاده می‌گردد و سپس شبکه‌ی فازی- عصبی آموزش داده شده جهت بررسی گسترده‌ی اثر پارامترهای برش‌کاری شامل شدت جریان، ولتاژ و پالس بر میزان زبری سطح و زمان برش‌کاری استفاده شده است. نتایج بدست آمده حاکی از دقت بالای مدل ارائه شده در تخمین زبری سطح و زمان برش‌کاری در فرآیند برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی سوپر آلیاژ اینکونل۷۱۸ می‌باشد.

کلید واژگان: زبری سطح، زمان برش‌کاری، آلیاژ اینکونل۷۱۸، شبکه فازی- عصبی

Simultaneous evaluation of surface roughness and Cutting time at wire electro discharge machining (WEDM) of nickel based superalloy using experimental investigation and neural-fuzzy system

Farshid Jafarian[1*], Ali Mousavi[2], Alireza Barghak[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University Central Tehran Branch, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University Aligudarz Branch, Aligudarz, Iran
* P.O.B. 44600070 Tehran, Iran, Farshid.jafarian@ymail.com

Abstract

Surface roughness and cutting time are one of most significant factors considered in Wire Electro Discharge Machining (WEDM) process. Inconel 718 superalloy has been used widely in the different parts of aerospace industries and in the rotary parts of turbines engines because of its unique properties. Therefore, evaluation state of the Surface roughness and cutting time in wire electro discharge machining of Inconel 718 is so needed. The present study has been conducted in order to obviate the mentioned requirements. At first, the cutting process of Inconel 718 superalloy was conducted using the wire electrical discharge machining. The experiments were carried out using the design of experiments. In the following, the experimental results were used for neural-fuzzy network (ANFIS) model to study the effect of input parameters on machining outputs. In this regard, the effect of cutting parameters including voltage, current intensity and pulse rate was evaluated on the surface roughness and cutting time. The results indicated that using the neural-fuzzy network (ANFIS) model, the high accuracy predictive model was presented for estimation of surface roughness and cutting time in WEDM of Inconel 718 superalloy.

Keywords: Cutting Time, Inconel 718 Alloy, Neural-fuzzy Network (ANFIS), Surface Roughness.

۱- مقدمه

سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ دارای ویژگی‌های منحصر به فردی همچون دمای ذوب بالا، مقاومت به سایش و خوردگی بالا، عمر خستگی بالا و قابلیت حفظ استحکام در دماهای بالا دارای کاربرد گسترده‌ای می‌باشد .دلیل مقبولیت این سوپر آلیاژ، پایین بودن مقدار نیکل و کبالت در ترکیب شیمیایی این آلیاژ و همچنین تولید ارزان‌تر و دسترسی آسانتر به آن نسبت به آلیاژهای رقیب می‌باشد. در نتیجه نیاز به اینکونل ۷۱۸ افزایش یافت و تولیدکنندگان بیشتری این آلیاژ را تولید کردند و به تدریج به پرمصرف‌ترین سوپرآلیاژ پایه نیکل تبدیل شد. قیمت مناسب و در دسترس بودن این آلیاژ در کنار خواص مکانیکی عالی در دماهای بالا، آن را به یک آلیاژ پرکاربرد برای تولید محور توربین‌های گازی تبدیل کرده است. امروزه از این آلیاژ در صنایع هوا فضا و در قسمت‌های مختلف موتورهای توربینی استفاده می‌شود.

از آن‌جا که عملیات برش‌کاری با استفاده از فرآیندهای سنتی دارای دشواری‌ها و مشکلات زیادی می‌باشد. لزوم بررسی و مطالعه‌ی هرچه بیشتر

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

F. Jafarian, A. Mousavi, A. Barghak, Simultaneous evaluation of surface roughness and Cutting time at wire electro discharge machining (WEDM) of nickel based superalloy using experimental investigation and neural-fuzzy system, *Modares Mechanical Engineering*, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 371-375, 2015 (in Persian فارسی)

فرآیندهای برش‌کاری جدید احساس می‌شود [۲،۱]. در سال‌های اخیر تحقیقات گوناگونی در رابطه با فرآیند برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی صورت گرفته است. به‌طور معمول معیارهای مهم در استفاده از روش برش-کاری تخلیه الکتریکی سیمی شامل زمان ماشین‌کاری، کیفیت سطح ماشین-کاری شده، تغییرات میکروساختاری و دقت ابعادی می‌باشد. از مزیت‌های این فرآیند می‌توان به عدم تماس ابزار و قطعه‌کار، قابلیت برش قطعات سخت و دقت ابعادی مناسب اشاره نمود. البته لازم به ذکر است که فرآیند برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی داری محدودیت‌هایی از جمله زمان بالای انجام فرآیند می‌باشد. از آن‌جا که بررسی کامل پارامترهای ورودی فرآیند برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی (شامل: میزان شدت جریان، ولتاژ ،زمان خاموش پالس دستگاه، کشش سیم، نرخ پیشروی سیم، میزان جریان دی‌الکتریک) دارای مشکلات فراوانی از جمله هزینه و مدت زمان بالا انجام این کار می‌باشد، لذا می‌توان برای مرتفع ساختن این مشکلات از سیستم‌های هوشمند استفاده نمود. این روش‌ها شامل مدل‌های پیشگو و الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهت مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند می‌باشد. از این‌رو، در این تحقیق با استفاده از آزمایشات تجربی تاثیر پارامترهای ورودی در فرآیند برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی (شامل ولتاژ، شدت جریان و پالس دستگاه) بر روی زبری سطح و زمان برش‌کاری مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از سیستم‌های هوشمند فازی- عصبی به بررسی همزمان زمان ماشین‌کاری و زبری سطح پرداخته شد و نتایج بدست آمده با نتایج تجربی مقایسه شد. در سال‌های اخیر تحقیقات گوناگونی در رابطه با استفاده از سیستم‌های هوشمند در فرآیندهای ماشین‌کاری از جمله برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی انجام شده است. در ادامه به مروری بر مطالعات صورت پذیرفته در این زمینه پرداخته می‌شود.

۱-۱- مروری بر مطالعات صورت پذیرفته

با توجه به کاربرد و اهمیت سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ تاکنون مطالعاتی در خصوص قابلیت ماشین‌کاری و برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی این ماده صورت پذیرفته است. در ادامه مطالعات انجام شده در ماشین‌کاری و برش-کاری تخلیه الکتریکی سیمی این آلیاژ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در تحقیقی، لی و همکارانش با استفاده از فرآیند برشکاری تخلیه الکتریکی بر روی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ توانسته‌اند نشان دهند که توپوگرافی سطح اینکونل ۷۱۸ در انرژی تخلیه بالا دارای حفره‌های بزرگ بر روی سطح است و هر چقدر میزان انرژی تخلیه کمتر می‌شود می‌توان زبری سطح را کاهش داد در زمانی که میزان انرژی تخلیه بالا است حتما باید از دی الکتریک با دبی بالاتری استفاده کرد و در صورتی که میزان انرژی تخلیه کم شود می‌توان میزان دی الکتریک را کمتر کرد [۳]. جعفریان و همکارانش با استفاده از شبکه‌ی عصبی آموزش دیده شده توسط الگوریتم ژنتیک بطور گسترده‌ای اثر پارامترهای ماشین‌کاری شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر میزان تنش‌های پسماند سطح و زبری سطح بر روی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ استفاده کردند. نتایج بدست آمده حاکی از دقت بالای مدل ارائه شده در تخمین تنش پسماند و زبری سطح بود. در انتها نیز بهترین شرایط ماشین‌کاری جهت کاهش تنش‌های نامطلوب کششی و زبری سطح تعیین شد [۴]. کوروویلا و همکارانش با استفاده از آزمایشات تجربی و روش تاگوچی و همچنین بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک به بررسی پارامترهای مختلف برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی بر روی کیفیت سطح و نرخ براده‌برداری پرداخته‌اند، نتایج آزمایشات نشان می دهد که برای افزایش نرخ براده‌برداری باید زمان پالس روشن را افزایش داد [۵]. کایداس و همکارانش با استفاده از سیستم هوشمند فازی- عصبی و آزمایشات تجربی به یک مدل مطلوب جهت پیش‌بینی زبری سطح با تغییر پارامترهای اصلی برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی از جمله ولتاژ مدار باز، زمان پالس روشن، میزان فشار تغذیه دی-الکتریک و میزان سرعت سیم دست یافته‌اند [۶]. کونگ و همکارانش با استفاده از فرآیند برش‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی اکسید آلومینیوم با پایه کرم به بررسی تاثیر چهار پارامتر ماشین‌کاری از جمله شدت جریان، زمان پالس روشن، زمان تاخیر و سرعت سیم با استفاده از ازمایشات تجربی و مدل-های ریاضی میزان نرخ براده‌برداری و زبری سطح را با سطح اطمینان ۹۵٪ محاسبه کنند [۷]. تیان یان و همکارانش با بکارگیری منطق فازی و الگوریتم ژنتیک به روشی جهت کنترل میزان تغذیه سیم و همچنین میزان تنش ایجاد شده در فرآیند تخلیه الکتریکی سیمی دست یافته‌اند و نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که می‌توان با این روش به سریع‌ترین پاسخ با کمترین خطا برای کنترل همزمان میزان تغذیه سیم و میزان تنش ایجاد شده در سیم رسیدند [۸].

با توجه به تحقیقاتی که تاکنون صورت پذیرفته است، مشاهده می‌شود که زمان برش‌کاری و زبری سطح بوجود آمده در فرآیند ماشین‌کاری و برش-کاری تخلیه الکتریکی سیمی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ وضعیت مطلوبی نداشته است. متاسفانه مطالعات صورت پذیرفته در این خصوص کافی نبوده و همان‌طور که ذکر شد اثر پارامترهای ماشین‌کاری و برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی عمدتا بصورت جزئی مورد بررسی قرار گرفته است. دشواری-ها و هزینه‌ی بالای آزمایشات در مقایسه با سایر خروجی‌های فرآیند ماشین-کاری می‌تواند یکی از دلایل عمده‌ی این امر باشد. در این راستا استفاده از مدل‌های پیشگو به درک کامل‌تر و بهتری از فرآیند منجر شود. لذا در تحقیق حاضر با انجام مطالعات تجربی گسترده و استفاده از شبکه‌های فازی-عصبی، به بررسی اثر پارامترهای اصلی برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی شامل شدت جریان، ولتاژ و پالس بر روی زمان برش‌کاری و زبری سطح در فرآیند برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداخته شده است. در نهایت مدل مطلوب جهت شبیه‌سازی فرآیند برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ارائه می‌گردد.

۲- آزمایشات تجربی

در این بخش اقدامات صورت پذیرفته جهت بررسی زمان برش‌کاری و زبری سطح در فرآیند برش‌کاری تخلیه الکتریکی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ شامل مراحل آماده‌سازی و برش‌کاری نمونه‌ها مطرح شده است.

۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

در ابتدا با انجام آزمایش فلورسانس اشعه‌ی ایکس ترکیب شیمیایی و درصد عناصر تشکیل دهنده‌ی سوپرآلیاژ مورد نظر، مشخص شد. نتایج بدست آمده در این آزمایش در جدول ۱ گزارش شده است.

۲-۲- برش‌کاری نمونه‌ها

در این تحقیق اثر پارامترهای اصلی برش‌کاری شامل شدت جریان، ولتاژ و پالس مورد مطالعه قرار گرفت. هر یک از پارامترها در ۴ سطح در نظر گرفته شد و براساس طراحی آزمایش تاگوچی تعداد ۳۲ آزمایش برش‌کاری صورت پذیرفت. در جدول ۲ محدوده و سطوح پارامترهای مزبور نشان داده شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی و درصد عناصر سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸

عناصر تشکیل دهنده	درصد	عناصر تشکیل دهنده	درصد
نیکل	۵۳/۵۹	تیتانیوم	۱/۰۸
کروم	۱۷/۹۳	آلومینیوم	۰/۴۵
آهن	۱۹/۰۴	فسفر	۰/۰۲
ملیبیوم	۲/۷۲	سیلیکون	۰/۰۵
نیوبیوم	۵/۰۷	----	---

جدول ۲ محدوده و سطوح پارامترهای برش‌کاری مورد بررسی

پارامترهای برش‌کاری	سطوح و محدوده
شدت جریان (آمپر)	۰/۵–۱–۱/۵–۲
ولتاژ (ولت)	۸۵-۱۰۰-۱۱۵-۱۳۰
پالس (پالس در ثانیه)	۹۰- ۷۰- ۵۰- ۳۰

به منظور افزایش دقت آزمایشات برش‌کاری تمامی نمونه‌ها با شرایط یکسان در نظر گرفته شد. در شکل ۱نمایی از دستگاه و نمونه‌های برش‌کاری شده نشان داده شده است.

۲-۳- اندازه‌گیری زمان برش‌کاری و زبری سطح

زمان برش‌کاری و زبری سطح در این آزمایشات با دقت بسیار بالا محاسبه و اندازه‌گیری شد. در جدول ۳ نتایج زمان برش‌کاری و زبری سطح بدست آمده برای ۳۲ نمونه به همراه پارامترهای برش‌کاری متناظرشان نشان داده شده است.

در ادامه، با به‌کارگیری سیستم‌های هوشمند و استفاده از نتایج بدست آمده در جدول ۳ به بررسی ارتباط بین پارامترهای برش‌کاری با زمان برش-کاری و زبری سطح در فرآیند برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداخته شد.

۳- کاربرد سیستم‌های هوشمند

در سال‌های اخیر سیستم‌های هوشمند مبتنی بر مدل‌های پیشگو بطور قابل ملاحظه‌ای گسترش یافته‌اند و از مزایای آنان در علوم مختلف بهره گرفته شده است. از جمله‌ی این علوم می‌توان به فرآیندهای ساخت و تولید اشاره نمود که محققین از این روش‌ها جهت پیشبرد اهداف خود در انواع فرآیندهای تولیدی بهره برده‌اند [۹،۱۰].

شکل ۱ نمایی از دستگاه برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی و نمونه‌های برش-کاری شده

جدول ۳ نتایج تجربی اندازه‌گیری زمان ماشین‌کاری و زبری سطح

شماره آزمایش	شدت جریان (آمپر)	ولتاژ (ولت)	پالس (پالس در ثانیه)	زمان (دقیقه)	زبری سطح (میکرو متر)
۱	۰/۵	۸۵	۳۰	۴۳	۲/۱۳
۲	۰/۵	۱۰۰	۵۰	۳۸	۲/۷۵
۳	۰/۵	۱۱۵	۷۰	۳۵	۲/۷۴
۴	۰/۵	۱۳۰	۹۰	۳۹	۴/۳۳
۵	۱	۸۵	۳۰	۲۹	۳/۲۴
۶	۱	۱۰۰	۵۰	۳۱	۳/۰۹
۷	۱	۱۱۵	۷۰	۳۰	۳/۳۲
۸	۱	۱۳۰	۹۰	۳۲	۲/۸۸
۹	۱/۵	۸۵	۵۰	۲۹	۳/۰۰
۱۰	۱/۵	۱۰۰	۳۰	۲۱	۳/۵۰
۱۱	۱/۵	۱۱۵	۹۰	۲۹	۳/۰۱
۱۲	۱/۵	۱۳۰	۷۰	۲۷	۳/۹۶
۱۳	۲	۸۵	۵۰	۲۸	۳/۸۷
۱۴	۲	۱۰۰	۳۰	۲۱	۳/۹۸
۱۵	۲	۱۱۵	۹۰	۳۰	۴/۱۷
۱۶	۲	۱۳۰	۷۰	۲۳	۴/۳۲
۱۷	۰/۵	۸۵	۹۰	۵۸	۳/۱۹
۱۸	۰/۵	۱۰۰	۷۰	۵۰	۳/۴۵
۱۹	۰/۵	۱۱۵	۵۰	۴۲	۲/۶۴
۲۰	۰/۵	۱۳۰	۳۰	۳۰	۴/۰۵
۲۱	۱	۸۵	۹۰	۴۳	۳/۲۵
۲۲	۱	۱۰۰	۷۰	۲۹	۳/۸۴
۲۳	۱	۱۱۵	۵۰	۲۶	۳/۵۳
۲۴	۱	۱۳۰	۳۰	۲۱	۳/۸۸
۲۵	۱/۵	۸۵	۷۰	۳۰	۳/۴۸
۲۶	۱/۵	۱۰۰	۹۰	۳۲	۴/۳۸
۲۷	۱/۵	۱۱۵	۳۰	۱۸	۴/۱۷
۲۸	۱/۵	۱۳۰	۵۰	۱۹	۳/۵۶
۲۹	۲	۸۵	۷۰	۲۹	۳/۷۶
۳۰	۲	۱۰۰	۹۰	۳۰	۳/۸۷
۳۱	۲	۱۱۵	۳۰	۱۴	۴/۱۰
۳۲	۲	۱۳۰	۷۰	۲۰	۳/۷۴

مدل‌های پیشگو در صورت آموزش صحیح قادر می‌باشند خروجی (های) فرآیندهای تولیدی را با دقت مناسبی تخمین بزنند که این امر علاوه بر کاهش هزینه‌های آزمایشات تجربی، منجر به درک جامع‌تری از فرآیند موردنظر می‌گردد. شبکه‌های فازی- عصبی یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های پیشگو می‌باشند که بطور گسترده‌ای مورد استفاده محققین قرار گرفته است.

۱-۳- شبکه‌های فازی-عصبی

ساختار شبکه فازی- عصبی مبتنی بر استنتاج فازی و شبکه عصبی می باشد. معماری کلی شبکه فازی- عصبی براساس شبکه عصبی و منطق فازی بنا نهاده شده است. براساس ساختار شبکه فازی- عصبی هر شبکه از پنج لایه شامل لایه ورودی، لایه توابع عضویت ورودی، لایه قواعد، لایه خصوصیات خروجی و لایه خروجی تشکیل شده است. هر لایه شبکه فازی عصبی متشکل از چند گره می‌باشد که توسط تابع گره شرح داده می‌شوند. ورودی

هر لایه، نتایج به دست آمده از گره در لایه قبلی می‌باشد. شکل ۲ نمایی از یک شبکه فازی- عصبی با سه ورودی و یک خروجی نشان داده شده است.

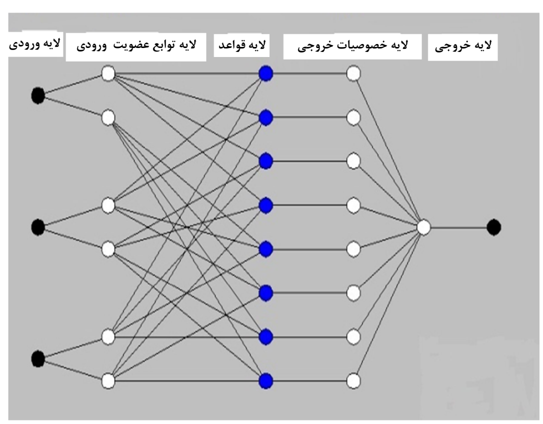
آموزش شبکه فازی- عصبی عملکردی مشابه با شبکه عصبی دارد با این تفاوت که پارامترهای تابع عضویت ورودی به گونه‌ای محاسبه می‌گردند که سیستم استنتاج فازی بر مجموع داده‌های ورودی و خروجی منطبق گردند. از مزایای استفاده از شبکه‌های فازی- عصبی این است که، مدل آموزش داده شده توسط این شبکه دارای خطای کمتری نسبت به شبکه عصبی می‌باشد. مدل آموزش داده شده توسط این شبکه به راحتی میتواند با استفاده از روش ترکیبی خروجی را براساس ورودی داده شده تخمین بزند. به همین منظور از شبکه فازی- عصبی به منظور ارائه مدل پیشگویانه از فرآیند ماشین‌کاری نقش بسیار حائز اهمیتی در صحت پیش‌بینی خروجی‌های ماشین‌کاری دارد.

٤- تحلیل نتایج تجربی

در این قسمت به منظور تخمین اثر پارامترهای برش‌کاری مورد بررسی بر زمان برش‌کاری و زبری سطح در فرآیند برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی اینکونل ۷۱۸، از شبکه‌ی فازی- عصبی به عنوان یک مدل پیشگویانه استفاده شد. لازم به ذکر است جهت پیاده‌سازی اهداف مذکور از نرم‌افزار متلب[1] بهره گرفته شد. در ادامه به بررسی نتایج به‌دست آمده پرداخته می‌شود.

۴-۱- آموزش شبکه

اولین قدم در آموزش شبکه فازی- عصبی، شناسایی بهترین ساختار شبکه می‌باشد. در این تحقیق به دلیل ساختار شبکه فازی- عصبی ۲۱ داده به عنوان داده آموزش[2]، ۶ داده به عنوان داده وارسی[3] در نظر گرفته شد. سپس شبکه با استفاده از داده‌های فوق برای هر یک از خروجی‌های زمان برش‌کاری و زبری سطح آموزش داده شد به منظور ممانعت از آموزش بیش از حد شبکه[4] و آموزش شبکه با دقت کافی و خطای کم، روند آموزش شبکه چندین بار صورت پذیرفت. در انتها آموزش شبکه با ۲۷ داده و آزمایش[5] شبکه با ۵ داده صورت پذیرفت و هر بار یکی از داده‌ها به عنوان داده‌ی آزمایش و مابقی به عنوان داده‌ی آموزش لحاظ می‌گردد. این روند ۳۲ بار (برابر با تعداد داده‌های کل) تکرار می‌شود و در نهایت میانگین قدرمطلق خطای تمامی ۳۲



1. Matlab
2. Train
3. Check
4. Over learning
5. Test

شکل ۲ نمایش ساختار یک شبکه فازی-عصبی با سه ورودی و یک خروجی

داده به عنوان معیار ارزیابی شبکه گزارش می‌گردد. ساختار شبکه‌ای که با این روش انتخاب می‌شود علاوه بر داشتن کمترین خطا، در تمامی محدوده‌ی داده‌های مورد بررسی خطای یکنواختی دارد. در جدول ۴ نتایج بدست آمده از آموزش شبکه‌ی فازی- عصبی گزارش شده است.

نتایج بدست آمده نشان دهنده آن است که شبکه آموزش داده شده توسط شبکه فازی- عصبی دارای حداقل میانگین خطای آموزش و همچنین حداقل میانگین خطای آزمایش در هر دو شبکه آموزش داده شده برای زمان برش‌کاری و زبری سطح می‌باشد.

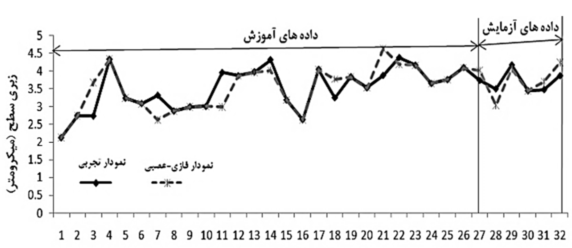
در شکل ۳ و ۴ نیز، مقایسه‌ای بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش بینی شده شامل داده‌های آموزش و داده‌های آزمایش صورت پذیرفته است.

همان‌گونه که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌گردد، اختلاف بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده توسط شبکه‌ی فازی- عصبی در مجموعه داده‌های آموزش و آزمایش نسبتا ناچیز می‌باشد و نمودار رسم شده با داده‌های پیش بینی شده توسط شبکه فازی- عصبی کاملاً با نمودار داده‌های تجربی منطبق می‌باشد، که این خود بیانگر آموزش صحیح و به اندازه‌ی شبکه‌ی فازی- عصبی می‌باشد. از این‌رو می توان شبکه فازی- عصبی آموزش داده شده را یکی از بهترین شبکه جهت تخمین زمان ماشین‌کاری و زبری سطح در فرآیند برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی معرفی کرد.

جدول ۴ نتایج بدست آمده از آموزش شبکه‌ی فازی- عصبی

شبکه فازی- عصبی	میانگین خطای آموزش	قدر مطلق خطای آزمایش	میانگین خطای آزمایش
زمان برش‌کاری	۰/۰۳	۰/۰۶۷- ۰/۰۳۳- ۰/۰۸۰ ۰/۰۳۳- ۰/۰۹۵	۰/۰۶۱
زبری سطح	۰/۰۴۹	۰/۰۹۸- ۰/۰۶۳- ۰/۰۰۰ ۰/۰۲۶- ۰/۱۳۱	۰/۰۶۴

شکل ۳ مقایسه‌ی بین نتایج تجربی و نتایج خروجی از شبکه‌ی فازی-عصبی زمان برش‌کاری



شکل ۴ مقایسه‌ی بین نتایج تجربی و نتایج خروجی از شبکه‌ی فازی- عصبی زبری سطح

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از مطالعات تجربی به بررسی زمان برش‌کاری و زبری سطح در فرآیند برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداخته شد و با استفاده از طراحی آزمایش اثر پارامترهای ماشین‌کاری شامل شدت جریان، ولتاژ و پالس مورد مطالعه قرار گرفت. در ادامه نیز با استفاده از شبکه‌ی فازی- عصبی به تخمین زمان برش‌کاری و زبری سطح پرداخته شد. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق به شرح زیر مطرح می‌گردد:

- آزمایشات تجربی بر روی۳۲ نمونه در شرایط مختلف شدت جریان، ولتاژ و پالس برش‌کاری صورت پذیرفت.
- نتایج بدست آمده از آزمایشات تجربی نشان داد که بهترین وضعیت زمان برش‌کاری در شدت جریان ۱/۵ آمپر، ولتاژ ۱۳۰ ولت و پالس ۵۰ می‌باشد و همچنین بهترین وضعیت زبری سطح در شدت جریان ۰/۵ آمپر، ولتاژ ۸۵ ولت و پالس ۳۰ می‌باشد.
- نتایج به‌دست آمده از آموزش شبکه فازی- عصبی نشان داد که میانگین خطای آموزش در زمان برش‌کاری ۰/۰۳ و در زبری سطح ۰/۰۴۹ می‌باشد که این خود حاکی از آن است که شبکه به خوبی آموزش دیده است.
- مقایسه بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی شده آزمایش نشان داد، اختلاف بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده توسط شبکه‌ی فازی- عصبی در داده‌های آزمایش نسبتا ناچیز می‌باشد که این بیانگر آموزش صحیح و به اندازه‌ی شبکه‌ی فازی-عصبی می‌باشد.
- همخوانی مناسب بین کمترین میزان پیش‌بینی شده توسط شبکه‌ی فازی- عصبی و آزمایش جدید صورت پذیرفته، حاکی از کارآمدی مدل استفاده شده در این تحقیق می‌باشد. لذا روش مذکور برای تخمین خروجی(های) سایر فرآیندهای ماشین‌کاری نیز توصیه می‌گردد.

در انتها با توجه به اهمیت شبکه‌های هوشمند نویسندگان این مقاله قصد دارند در تحقیقات بعدی خود به بررسی زمان برش‌کاری و زبری سطح با استفاده از شبکه‌های عصبی و مقایسه آن با شبکه‌های فازی- عصبی در فرآیند برش‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی اینکونل ۷۱۸ بپردازند.

۶- مراجع

[1] F. Jafarian, H. Amirabadi, M. Fatahi, Improving surface integrity in finish machining of Inconel 718 alloy using intelligent systems, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69 No 12, pp. 1-13, 2013.

[2] J. P. Davim, *Machining of Hard Material*, First Edition, New York, Springer, 2011.

[3] L. Li, Y.B. Guo, X.T. Wei, W. Li, Surface integrity characteristics in wire-EDM of inconel 718 at different discharge energy, *Seventeenth International Symposium on Electro machining*, Procedia CIRP, pp. 220–225, 2013.

[4] F. Jafarian, H. Amirabadi, J. Sadri, Simultaneous Optimizing Residual Stress and Surface Roughness in Turning of Inconel718 Superalloy, *Materials and Manufacturing Processes, Vol.* 29, pp. 337–343, 2014.

[5] N. Kuruvila, H.V. Ravindra, Parametric Infeluence and optimization of wire EDM of hot die steel, *Machining Science and Technology,* Vol. 15, pp. 47–75, 2011.

[6] U. Caydas, A. Hascalık, S. Ekici, An adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model for wire-EDM, *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, pp.6135–6139, 2009.

[7] K. Kung, K. Ta, Chiang,Modeling and Analysis of Machinability Evaluation in the Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) Process of Aluminum Oxide-Based Ceramic, *Materials and Manufacturing Processes,* Vol*.* 23, pp. 241–250, 2008.

[8] M. T, Yan, C. Fang, Application of genetic algorithm-based fuzzy logic control in wire transport system of wire-EDM machine, journal of *materials processing technology,* Vol*.* 205, pp. 128–13, 2008.

[9] H. Zare, S. Banooni, A. Ghanbarzadeh, Optimal design of plate-fin heat exchengare by a bee algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 22-29, 2012. (In Persian)

[10] S. H. Hashemi, M. Rakhshkhorshid, ANN model for investigation the effect of chemical composition on hardness and impact energy on APIX65 microalloyed steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 156-163, 2012. (In Persian)