



آزمایشات تجربی به منظور بررسی کیفیت سطح و شکاف برش در فرآیند برش کاری جت آب روی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ و بهینه‌سازی فرآیند

علیرضا برقک^۱، فرشید جعفریان^{۲*}

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

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

* تهران، صندوق پستی ۴۴۶۰۰۷۰، farshid.jafarian@gmail.com

چکیده

آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با داشتن خواص منحصر به فردی چون سختی زیاد و نقطه ذوب بالا، کاربرد گسترده‌ای در صنایع هوایی و توربین‌سازی یافته است. به دلیل همین ویژگی‌ها، عملیات برش اینکونل ۷۱۸ با روش‌های سنتی، دشوار و هزینه بر است. یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای برش آلیاژ اینکونل ۷۱۸، برش کاری با جت آب می‌باشد. زبری سطح و مشخصات هندسی شکاف برش، از پارامترهای بسیار مهم در فرآیند برش کاری به شمار می‌آیند. این پارامترها تاکنون در فرآیند برش کاری اینکونل ۷۱۸ با جت آب به طور گسترده مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. در این تحقیق برش آلیاژ اینکونل ۷۱۸ توسط عملیات برش جت آب صورت پذیرفت و سپس اثر پارامترهای برش کاری جت آب شامل سرعت برش، فشار آب، و مقدار ریزش مواد ساینده بر روی زبری سطح و مشخصات هندسی شکاف برش، با استفاده از آزمایشات تجربی و سیستم‌های هوشمندی چون شبکه عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده حاکی از دقت بالای مدل ارائه شده در تخمین زبری سطح، مشخصات هندسی و پهنای شکاف برش بود.

کلید واژگان: اینکونل ۷۱۸، جت آب، برش کاری، شبکه عصبی مصنوعی

Experimental investigations in order to evaluate the kerf and surface roughness in the water jet cutting process of Inconel 718 superalloy and process optimization

Alireza Barghak¹, Farshid Jafarian^{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@gmail.com

ABSTRACT

Having unique properties such as high melting point and hardness, Inconel 718 superalloy has been found a widespread application in turbines and aerospace industries. Due to these properties, Inconel 718 superalloy cutting with traditional methods is difficult and costly. Therefore, novel cutting methods such as waterjet cutting have been considered. Geometrical characteristics of the cutting kerf and the surface roughness are important factors in the cutting process. These parameters have not been widely investigated in the water jet cutting of Inconel 718. In this study, Inconel 718 superalloy was cut via water jet, and the effect of cutting parameters including cutting speed, water pressure, and the abrasive flow rate on the cutting kerf width and surface roughness was investigated through experimental investigations and artificial neural network. The results implied the high precision of the model in the estimation of kerf width and surface roughness.

Keywords: Inconel 718, water jet, cutting process, artificial neural network.

سنتی قابل انجام نیست.

۱- مقدمه

برش با جت آب همراه با ذرات ساینده، فرآیندی نوین در برش کاری محسوب شده و یکی از سریع‌ترین فرآیندهای در حال توسعه می‌باشد [۳]. فناوری جت آب، با محیط زیست سازگار بوده، و طیف وسیعی از مواد، قابلیت ماشین‌کاری با این روش را دارند. بسیاری از صنایع، از اتومبیل‌سازی و صنایع هوا- فضا گرفته تا صنایع دارویی و غذایی، از این فرآیند استفاده می‌کنند [۴]. در این فرآیند، با استفاده از فشار زیاد، جریان سریعی از آب ایجاد می‌شود. جت آب به وجود آمده هنگامی که با ذرات ساینده مخلوط شود قابلیت برش گسترده وسیعی از مواد دارای سختی‌های متفاوت را پیدا می‌کند [۵]. برخی از این ویژگی‌ها عبارتند از: عدم تنش یا تغییر شکل حرارتی در قطعه کار، سرعت بالای برش کاری، امکان برش محدوده وسیعی از ضخامت‌ها

آلیاژهای اینکونل، خانواده‌ای از سوپرآلیاژهای پایه آهن- نیکل هستند که محدوده وسیعی از ترکیب‌ها و خواص را در بر می‌گیرند. سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸، یک آلیاژ رسوب سخت شونده است که علاوه بر آهن و نیکل حاوی مقادیر قابل توجهی کرم، نیوبیم و مولیبدن می‌باشد. همچنین عناصر جزئی مانند آلومینیم و تیتانیوم در ترکیب این آلیاژ وجود دارد [۱]. سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با داشتن ویژگی‌های منحصر به فردی همچون دمای ذوب بالا، مقاومت بالا در برابر سایش و خوردگی، عمر بالای خستگی و قابلیت حفظ استحکام در دماهای بالا، کاربرد گسترده‌ای در صنایع هوایی، صنایع نظامی و صنایع ساخت توربین‌های گازی دارد [۲]. به دلیل سختی بالا قابلیت برش- کاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ از جنبه‌های مختلف دشوار بوده و با روش‌های

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Barghak, F. Jafarian, Experimental investigations in order to evaluate the kerf and surface roughness in the water jet cutting process of Inconel 718 superalloy and process optimization, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 421-425, 2015 (in Persian فارسی)

تعداد ۳۲ قطعه استوانه‌ای شکل از اینکونل ۷۱۸ با مشخصات جدول ۱ تهیه و جهت یکسان‌سازی ابعاد، تمامی نمونه‌ها، تا رسیدن به قطر ۳۴ میلی‌متر، ماشین‌کاری شدند. جهت جلوگیری از خطاهای احتمالی برش‌کاری، یک فیکسچر مناسب ساخته شده و قطعات جهت برش‌کاری در فیکسچر قرار داده شدند.

۲-۲- برش کاری

برش‌کاری به وسیله‌ی دستگاه جت‌آب با قطر اریفیس نازل ۰/۳۵ میلی‌متر، طول نازل ۷۶ میلی‌متر و ذرات ساینده با مش ۸۰ صورت پذیرفت (شکل ۱). طول مسیر برش‌کاری ۲۰ میلی‌متر، عمود بر قطر، در نظر گرفته شد.

آزمایشات به روش تاگوچی طراحی و اجرا شدند تا بهترین سطح پارامترها تعیین شوند. از عوامل مهم و موثر در شکل‌دهی و کیفیت سطح، با توجه به مطالعات پیشین، سه پارامتر سرعت، فشار و مقدار ریزش مواد ساینده بیشترین اثر را در تغییر شکل هندسی و کیفیت سطح دارا می‌باشد. در این مطالعه اثر سرعت و فشار آب و نرخ ریزش مواد ساینده همان‌گونه که در جدول شماره ۲ مشاهده می‌گردد بر پارامترهای خروجی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها، از روش تاگوچی در چهار سطح استفاده شد. روش تاگوچی روشی معمول برای کاهش تعداد و هزینه‌ی آزمایشات تجربی است.

پهنای شکاف برش به وسیله میکروسکوپ با بزرگنمایی ۵۰ اندازه‌گیری شد. اختلاف اندازه پهنای بالا و پایین شکاف جهت تعیین اندازه انحراف شکاف محاسبه گردید (شکل ۲). تغییر اندازه انحراف موجب تغییر هندسه برش می‌شود.

در این پژوهش، زبری سطح به عنوان شاخصی از کیفیت برش مورد مطالعه قرار گرفت. پس از اندازه‌گیری شکاف برش، زبری سطح مقطع برش-کاری شده اندازه‌گیری شد. در ادامه، با بکارگیری سیستم‌های هوشمند و استفاده از نتایج به‌دست آمده در جدول ۳ به بررسی ارتباط بین پارامترهای ماشین‌کاری و زبری سطح، اندازه پهنای برش و انحراف برش در فرآیند برش-کاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداخته شد.

جدول ۱ درصد عناصر تشکیل دهنده اینکونل ۷۱۸

عناصر تشکیل دهنده	P	Si	Al	Ti	Nb	Mo	Cr	Fe	Ni
درصد	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۴۵	۱/۰۸	۵/۰۷	۲/۷۲	۱۷/۹۳	۱۹/۰۴	۵۳/۵۹

جدول ۲ پارامترهای موثر در برش‌کاری جت آب

پارامترها	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
فشار جت‌آب (bar)	۲۸۰۰	۳۰۰۰	۳۲۰۰	۳۴۰۰
سرعت پیش‌روی (mm/min)	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
نرخ ریزش ذرات ساینده (gr/min)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰



شکل ۱ دستگاه جت‌آب مورد استفاده

با تolerانس قابل قبول، کنترل راحت، قابلیت تبدیل به سیستم خودکار، برنامه‌ریزی و تنظیم فوق‌العاده سریع دستگاه و عدم نیاز به گیره‌بندی حین برش‌کاری [۷،۶].

برای دستیابی به پارامترهای خروجی مناسب، در طی فرآیند برش‌کاری جت‌آب همراه با ذرات ساینده، تنظیم پارامترهای ورودی ضروری است. کارایی فرآیند برش‌کاری جت‌آب همراه با ذرات ساینده اغلب براساس عمق برش، مشخصات شکاف برش^۱ و مشخصات سطح براده‌برداری ارزیابی می‌شود. کیفیت سطح در بسیاری از فرآیندهای ماشین‌کاری به‌عنوان یکی از مشخصه‌های بارز در نظر گرفته می‌شود [۳]. در برش‌کاری جت‌آب همراه با ذرات ساینده چندین پارامتر بر روی کیفیت سطح موثراند، که از این میان فشار جت‌آب، سرعت پیش‌روی، و نرخ ریزش ذرات ساینده، جزء پارامترهای قابل کنترل محسوب می‌شوند، که امکان کنترل دقیق آن‌ها وجود دارد [۸،۳].

پژوهش حاضر، در راستای بهبود مشخصات هندسی شکاف برش و کاهش ماشین‌کاری ثانویه در فرآیند برش با جت‌آب همراه با ذرات ساینده، بر روی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ صورت گرفته است. در این پژوهش، مشخصات هندسه شکاف برش، شامل عرض بالا و اختلاف اندازه عرض بالا و پایین (انحراف)، به‌عنوان عوامل تعیین‌کننده در کیفیت برش در فرآیند برش‌کاری جت‌آب همراه با ذرات ساینده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. همچنین فشار آب، سرعت پیش‌روی و نرخ ریزش ذرات ساینده بعنوان پارامترهای قابل کنترل موثر بر روی مشخصات هندسه شکاف در نظر گرفته شده‌اند.

در سال‌های اخیر مطالعاتی به‌منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند ماشین‌کاری بر روی اینکونل ۷۱۸ صورت گرفته است [۱۱]. کایداس و هاسکالیک از شبکه عصبی مصنوعی و مدل رگرسیون برای پیش‌بینی زبری سطح در فرآیند ماشین‌کاری با جت‌آب ساینده استفاده کردند [۹]. حسین و همکارانش برای بررسی و پیش‌بینی ارتباط بین پارامترهای ماشین‌کاری و زبری سطح در حین فرزکاری اینکونل ۷۱۸ از شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند. آن‌ها گزارش کردند که عملکرد شبکه عصبی از لحاظ همخوانی با داده‌های تجربی خوب بوده است. در نهایت چنین نتیجه گرفته‌اند که این مدل می‌تواند برای آنالیز و پیش‌بینی ارتباط پیچیده بین شرایط برش‌کاری و زبری سطح در عملیات برش‌کاری فلزات و برای بهینه‌سازی زبری سطح جهت تولید کارآمد و به‌صرفه به‌کار رود [۱۲]. با این وجود، بیشتر این مطالعات محدود به برخی شرایط خاص و یا دارای محاسبات پیچیده هستند. در مطالعه پیش‌رو، با استفاده از جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی و بهینه‌سازی آن با استفاده از یک روش ساده اما کارآمد برای به‌دست آوردن شرایط بهینه برش‌کاری برای رسیدن به کیفیت سطح و شکل هندسی مناسب ارایه شده است.

۲- آزمایشات تجربی

در این بخش اقدامات صورت پذیرفته جهت بررسی زبری سطح، اندازه پهنای برش، و انحراف برش در فرآیند برش‌کاری جت‌آب روی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸، شامل مراحل آماده‌سازی، برش‌کاری و اندازه‌گیری زبری سطح، پهنای برش و انحراف برش، که اختلاف بین بیشترین اندازه پهنای برش با کمترین اندازه پهنای همان برش است مطرح شده است.

۲-۱- آماده سازی نمونه ها

کیفیت برش در فرآیند برش کاری اینکونل ۷۱۸، از شبکه‌ی عصبی مصنوعی به عنوان یک مدل پیشگویانه استفاده شد. بدین منظور نرم‌افزار مطلب به کار گرفته شد.

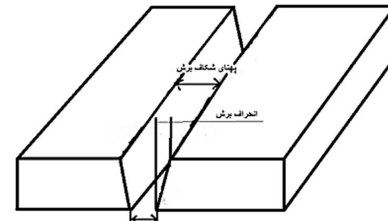
در نهایت شبکه‌های عصبی با ساختار دو لایه پنهان شامل ۵ نورون در لایه پنهان اول و ۴ نورون در لایه پنهان دوم برای پهنای شکاف، دو لایه پنهان شامل ۷ نورون در لایه پنهان اول و ۵ نورون در لایه پنهان دوم برای انحراف، و یک لایه پنهان شامل ۱۹ نورون برای زبری سطح، برمیانی کمترین خطای آزمایش^۱ انتخاب شد.

همچنین تابع انتقال تنسیگ^۲، تنسیگ، لگسیگ^۳ برای پهنای برش و انحراف و تابع انتقال تنسیگ، لگسیگ برای زبری سطح انتخاب شد. (جدول ۴)

در شکل ۳ نیز، مقایسه‌ای بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی شده شامل داده‌های آموزش و داده‌های آزمایش صورت پذیرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، اختلاف بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده توسط شبکه‌ی عصبی در مجموعه داده‌های آموزش و آزمایش نسبتاً ناچیزی می‌باشد که این بیانگر آموزش صحیح و به اندازه‌ی شبکه‌ی عصبی می‌باشد.

۴-۱- تخمین میزان پارامترهای خروجی

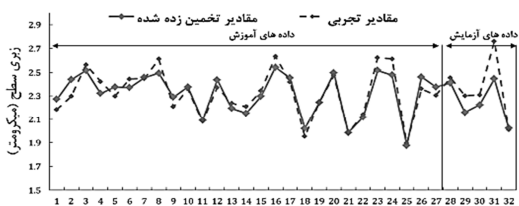
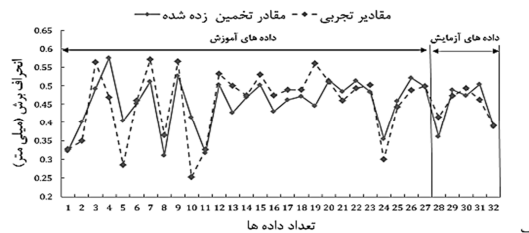
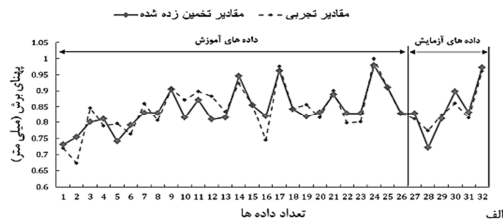
بعد از ارائه‌ی یک مدل پیشگویانه‌ی مناسب از فرآیند، با استفاده از شبکه‌ی عصبی به بررسی تاثیر پارامترهای برش کاری بر میزان پارامترهای خروجی در فرآیند برش کاری اینکونل ۷۱۸ شامل پهنای برش، انحراف و زبری سطح پرداخته شد.



شکل ۲ مشخصات هندسی شکاف برش

جدول ۳ مقادیر پارامترهای ورودی و خروجی در هر آزمایش

پارامترهای ورودی		پارامترهای خروجی		سرعت	فشار	
انحراف	زبری سطح	شکاف برش	نرخ ریزش ذرات	mm/min	Bar	
mm	μm	mm	gr/min	ساینده		
۰/۳۲۶	۲/۱۸	۱/۵۱۶	۱۰۰	۱۰	۲۸۰۰	۱
۰/۳۴۹	۲/۴۵	۱/۴۱۸	۲۰۰	۱۵	۲۸۰۰	۲
۰/۵۶۳	۲/۲۹	۱/۷۸۳	۳۰۰	۲۰	۲۸۰۰	۳
۰/۴۶۸	۲/۵۶	۱/۶۶۰	۴۰۰	۲۵	۲۸۰۰	۴
۰/۴۱۴	۲/۴۲	۱/۶۳۰	۱۰۰	۱۰	۳۰۰۰	۵
۰/۲۸۵	۲/۳	۱/۶۷۶	۲۰۰	۱۵	۳۰۰۰	۶
۰/۴۶۰	۲/۴۴	۱/۶۰۸	۳۰۰	۲۰	۳۰۰۰	۷
۰/۵۷۱	۲/۴۴	۱/۸۱۰	۴۰۰	۲۵	۳۰۰۰	۸
۰/۳۶۴	۲/۳۰	۱/۶۹۶	۲۰۰	۱۰	۳۲۰۰	۹
۰/۴۷۳	۲/۶۱	۱/۷۳۳	۱۰۰	۱۵	۳۲۰۰	۱۰
۰/۵۶۶	۲/۲۱	۱/۹۰۸	۴۰۰	۲۰	۳۲۰۰	۱۱
۰/۲۵۲	۲/۳۶	۱/۸۳۶	۳۰۰	۲۵	۳۲۰۰	۱۲
۰/۳۲۶	۲/۰۸	۱/۸۹۲	۲۰۰	۱۰	۳۴۰۰	۱۳
۰/۵۳۲	۲/۳۷	۱/۸۶۰	۱۰۰	۱۵	۳۴۰۰	۱۴
۰/۴۹۳	۲/۲۴	۱/۸۱۴	۴۰۰	۲۰	۳۴۰۰	۱۵
۰/۴۹۹	۲/۳۱	۱/۷۵۷	۳۰۰	۲۵	۳۴۰۰	۱۶
۰/۴۷۳	۲/۲۱	۱/۹۴۴	۴۰۰	۱۰	۲۸۰۰	۱۷
۰/۵۳۰	۲/۳۴	۱/۷۹۹	۳۰۰	۱۵	۲۸۰۰	۱۸
۰/۴۷۳	۲/۶۲	۱/۵۶۸	۲۰۰	۲۰	۲۸۰۰	۱۹
۰/۴۶۱	۲/۴۱	۱/۷۱۴	۱۰۰	۲۵	۲۸۰۰	۲۰
۰/۴۸۸	۱/۹۵	۲/۰۵۶	۴۰۰	۱۰	۳۰۰۰	۲۱
۰/۴۸۸	۲/۲۴	۱/۷۷۸	۳۰۰	۱۵	۳۰۰۰	۲۲
۰/۵۶۰	۲/۴۷	۱/۸۰۳	۲۰۰	۲۰	۳۰۰۰	۲۳
۰/۵۱۰	۲/۷۶	۱/۷۱۶	۱۰۰	۲۵	۳۰۰۰	۲۴
۰/۳۹۰	۱/۹۵	۲/۰۲۵	۳۰۰	۱۰	۳۲۰۰	۲۵
۰/۴۵۹	۲/۱۴	۱/۸۹۶	۴۰۰	۱۵	۳۲۰۰	۲۶
۰/۴۹۲	۲/۶۲	۱/۶۸۰	۱۰۰	۲۰	۳۲۰۰	۲۷
۰/۵۰۱	۲/۶۱	۱/۶۸۷	۲۰۰	۲۵	۳۲۰۰	۲۸
۰/۳۰۰	۱/۸۹	۲/۱۰۷	۳۰۰	۱۰	۳۴۰۰	۲۹
۰/۴۴۲	۲/۰۱	۱/۹۱۲	۴۰۰	۱۵	۳۴۰۰	۳۰
۰/۴۸۸	۲/۳۶	۱/۷۴۲	۱۰۰	۲۰	۳۴۰۰	۳۱
۰/۴۹۸	۲/۳۰	۱/۷۰۶	۲۰۰	۲۵	۳۴۰۰	۳۲



شکل ۳ مقایسه‌ی بین نتایج تجربی و نتایج خروجی از شبکه‌ی عصبی. الف. پهنای برش ب. انحراف برش ج. زبری سطح

۳- کاربرد سیستم‌های هوشمند

تعیین شرایط مطلوب ماشین‌کاری به وسیله‌ی آزمون تجربی، مشکل و پرهزینه است. شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان یکی از مهمترین مدل‌های پیشگو، به‌طور گسترده‌ای برای بررسی و برآورد خروجی فرآیند ماشین‌کاری در محدوده پارامترهای ورودی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مدل‌های پیشگو در صورت آموزش صحیح قادر هستند خروجی‌های فرآیندهای تولیدی را با دقت مناسبی تخمین بزنند، که این امر علاوه‌بر کاهش هزینه‌های آزمایشات تجربی، منجر به درک جامع‌تری از فرآیند موردنظر می‌گردد. شبکه‌های عصبی مصنوعی یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های پیشگو هستند که به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده محققین قرار گرفته‌اند [۱۶].

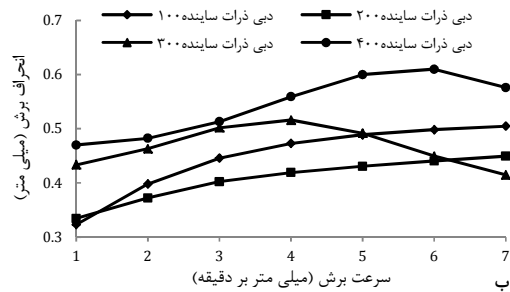
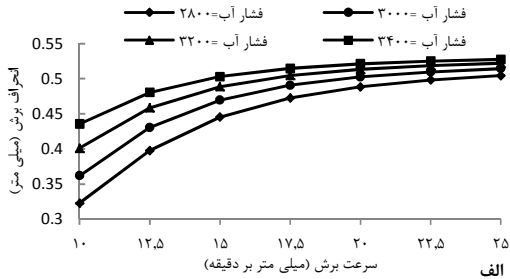
۴- تحلیل نتایج

در این قسمت به منظور تخمین اثر پارامترهای برش کاری مورد بررسی بر

1. Testing error
2. Tansig
3. Logsig

جدول ۴ آموزش شبکه‌ی عصبی منتخب توسط الگوریتم ژنتیک

پارامترها	تعداد لایه‌ها	تابع انتقال	بهترین برازندگی	میانگین خطای آموزش	مقدار مطلق خطای آزمون	میانگین خطای آزمون
شکاف برش	۳-۵-۱	tan-tan-log	۰/۰۰۱۲۹	۲/۸۰	-۵/۲۳، -۱/۰۸، ۳/۶۶، ۱/۸۲، ۱/۱۵	۲/۵۹
انحراف	۳-۷-۱	tan-tan-log	۰/۰۰۵۹۲	۵/۳۷	-۷/۷۴، -۴/۹۲، ۵/۶۷، ۱/۵۵، ۵/۰۹	۵
زبری سطح	۳-۱۹-۱	tan-log	۰/۰۰۰۶۹	۲/۲۱	-۱/۵۸، -۵/۱۰، -۳/۰۴، ۱/۴۳، ۰/۵۱	۴/۳۳

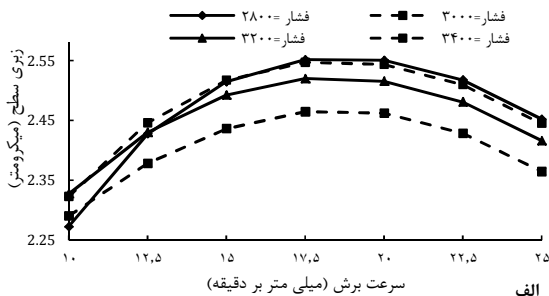


شکل ۵ تخمین انحراف با تغییر سرعت. الف. تاثیر سطوح مختلف فشار آب در پایین ترین دبی (۱۰۰ گرم بر دقیقه) ب. تاثیر مقادیر مختلف ریزش مواد ساینده در پایین ترین فشار (۲۸۰۰ بار)

متفاوت از مقدار ریزش مواد ساینده این بار بر روی زبری سطح بررسی شد. همان گونه که در شکل ۶ الف مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت خطی در فشارهای مختلف، زبری سطح ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. در فشار ثابت (۲۸۰۰ بار)، هرچه میزان ریزش مواد ساینده افزایش می‌یابد، روند کاهش نمودار کمتر می‌شود (شکل ۶ ب).

۴-۲- بهینه سازی

همخوانی مناسب بین کمترین میزان پیش‌بینی شده توسط شبکه‌ی 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 ماشین کاری نیز توصیه می‌گردد.



۴-۱-۱- تخمین میزان پهنای برش

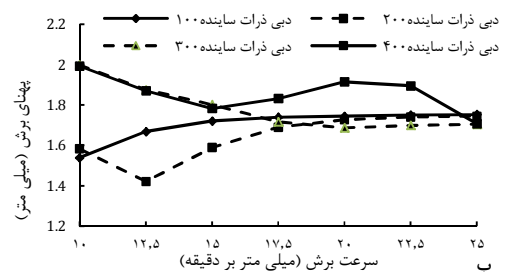
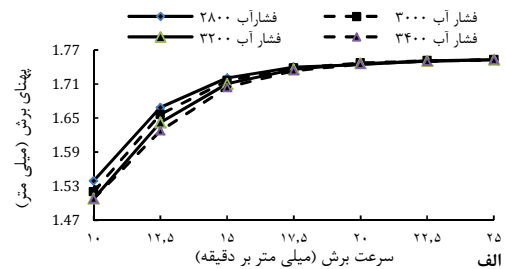
در ابتدا اثر تغییرات سرعت بر روی پهنای برش در ۴ سطح متفاوت از فشار آب و ۴ سطح متفاوت از مقدار ریزش مواد ساینده (دبی) بررسی شد. همان گونه که در شکل ۴ الف مشاهده می‌شود، افزایش سرعت در محدوده مورد بررسی (با توجه به پایین بودن محدوده) به حد کاهش پهنای برش نرسیده است. از طرف دیگر به دلیل سخت و شکننده بودن جنس قطعه، افزایش سرعت موجب شیوع و گسترش ترک در قسمت بالای پهنای برش و در نتیجه افزایش پهنای برش می‌گردد. با افزایش سرعت، اثر فشار کاهش می‌یابد تا جایی که در سرعت‌های بالا، تغییر فشار تاثیری بر پهنای برش ندارد. شکل ۴ ب تاثیر مقدار ریزش مواد ساینده را نشان می‌دهد. در دبی‌های پایین (۱۰۰ و ۲۰۰ گرم بر دقیقه) با افزایش سرعت خطی، پهنای برش به طور کلی افزایش و در دبی‌های بالاتر (۳۰۰ و ۴۰۰ گرم بر دقیقه) کاهش می‌یابد.

۴-۱-۲- تخمین میزان انحراف

در این جا نیز اثر تغییرات سرعت بر روی انحراف در ۴ سطح متفاوت از فشار آب و ۴ سطح متفاوت از مقدار ریزش مواد ساینده بررسی شد. همان گونه که در شکل ۵ الف مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت خطی، عمق نفوذ جت‌آب، کاهش و در نتیجه، انحراف افزایش یافته است. همچنین با افزایش سرعت، تاثیر فشار بر انحراف افزایش می‌یابد. در مقادیر مختلف ریزش مواد ساینده، با افزایش سرعت، انحراف ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد (شکل ۵ ب).

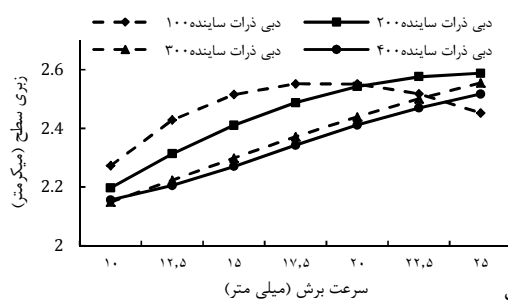
۴-۱-۳- تخمین میزان زبری سطح

بار دیگر اثر تغییرات سرعت در ۴ سطح متفاوت از فشار آب و ۴ سطح



شکل ۴ تخمین پهنای برش با تغییر سرعت. الف. تاثیر سطوح مختلف فشار آب در پایین ترین دبی (۱۰۰ گرم بر دقیقه) ب. تاثیر مقادیر مختلف ریزش مواد ساینده در پایین ترین فشار (۲۸۰۰ بار)

- [6] A. Kharagpur, Non conventional machining, lesson 37, *water jet and abrasive water jet machining*, Available at works. bepress. com, 2012.
- [7] *ASM Handbook*, ASM International, 14, pp. 745-755, 2005
- [8] M. Hashish, Optimization factors in abrasive-water jet machining, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 113, NO. 1, pp. 29-37, 1991.
- [9] E. O. Ezugwu, D. A. Fadare, J. Bonney, R.B. Da Silva, W.F. Sales, Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 12-13, pp. 1375-1385, 2005.
- [10] U. Çaydaş, A. Haşcahık, A study on surface roughness in abrasive water jet machining process using artificial neural networks and regression analysis method. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 202, No. 1-3, pp. 574-582, 2008.
- [11] M. I. Hossain, A. K. M. Amin, A. U. Patwari, Development of an artificial neural network algorithm for predicting the surface roughness in end milling of Inconel 718 alloy, *Computer and Communication Engineering. ICCCE 2008*.
- [12] H. Amirabadi, K. Khalili, A. Foorginejad, J. Ashoori, Modeling of abrasive water-jet cutting of glass using artificial neural network and optimization of surface roughness using firefly algorithm, *Modaresh mechanical engineering*, Vol. 13, No. 8, pp. 123-134, 2013. (in Persian)



شکل ۶ تخمین زبری سطح با تغییر سرعت. الف. تاثیر سطوح مختلف فشار آب در پایین ترین دبی (۱۰۰ گرم بر دقیقه) ب. تاثیر مقدار ریزش مواد ساینده در پایین ترین (فشار ۲۸۰۰ بار)

جدول ۵ بهینه‌سازی تک هدفه برای به دست آوردن کمینه‌ی پارامترهای خروجی به صورت جداگانه

پارامترهای ورودی		پارامترهای خروجی	
سرعت mm/min	نرخ ریزش مواد ساینده g/min	مقدار کمینه bar	مقدار کمینه g/min
۱۰/۳۹	۱۶۷	۲۸۰۰	۱/۳۸
۱۰	۱۴۴/۷	۲۸۰۰	۰/۲۹۹
۱۰	۴۰۰	۳۴۰۰	۱/۷۲

۴-۲-۱- بهینه‌سازی تک هدفه^۱

برای رسیدن به کمترین مقدار هر یک از پارامترهای خروجی شامل زبری سطح، انحراف و پهنای برش، بهینه‌سازی پارامترهای ورودی به طور جداگانه توسط شبکه عصبی مصنوعی آموزش دیده انجام شد (جدول ۵).

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از مطالعات تجربی به بررسی کیفیت سطح و مشخصات هندسی شامل انحراف و پهنای برش در فرآیند برشکاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به وسیله جت‌آب پرداخته شد. با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی، اثر پارامترهای برشکاری شامل فشار آب، نرخ ریزش مواد ساینده و سرعت مورد مطالعه قرار گرفت. در ادامه نیز با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی به تخمین میزان زبری سطح، انحراف و پهنای برش پرداخته شد. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که علی‌رغم پیچیدگی بالا، روش به‌کار گرفته شده از دقت و کارایی بالایی برخوردار بوده و میزان خطای آموزش و آزمایش پایینی دارد. این امر نشان دهنده‌ی آموزش صحیح و به اندازه‌ی شبکه‌ی عصبی می‌باشد.

۶- مراجع

- [1] I. Choudhury, M. El-Baradie, Machinability of nickel-base super alloys: a general review, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 77, No. 1, pp. 278-284, 1998.
- [2] D. Ulutan, T. Ozel, Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 51, No. 3, pp. 250-280, 2011.
- [3] J. J. R. Jegaraj, N. R. Babu, A soft computing approach for controlling the quality of cut with abrasive water jet cutting system experiencing orifice and focusing tube wear, *Journal of materials processing technology*, Vol. 185, No. 1, pp. 217-227, 2007.
- [4] M. Hashish, Abrasive water jet machining of composites. *WJTA (water jet technology association) jet news*, Dec, 2008.
- [5] L. P. Connor and R. O'Brien, *Welding Handbook: Welding Technology*, Amer Welding Society, 1987.

1. Single objective optimization