



آزمایشات تجربی به منظور بررسی کیفیت سطح و اندازه شکاف برش در فرآیند برش کاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به وسیله لیزر و بهینه سازی فرآیند

فرشید جعفریان^{۱*}، 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

سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به دلیل داشتن خواص منحصر به فردی چون سختی زیاد و نقطه ذوب بالا از جمله آلیاژهای پرکاربرد در صنایع هوایی و توربین سازی است. به دلیل همین ویژگی ها، عملیات برش اینکونل ۷۱۸ با روش های سنتی، دشوار و هزینه بر است. از این رو برش کاری با لیزر یکی از مناسب ترین روش ها برای برش آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به شمار می رود. از جمله پارامترهای بسیار مهم در فرآیند برش کاری، زبری سطح و اندازه شکاف برش می باشد. این پارامترها تاکنون در فرآیند برش کاری اینکونل ۷۱۸ با لیزر به طور گسترده مطالعه نشده اند. در این تحقیق، برش کاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با اشعه لیزر صورت پذیرفت. سپس اثر پارامترهای برش کاری لیزر شامل سرعت برش، فشار گاز نیتروژن، توان و فاصله کانونی لیزر بر روی زبری سطح و اندازه شکاف برش با استفاده از نتایج حاصل از آزمایشات تجربی و سیستم های هوشمندی چون شبکه عصبی مصنوعی مطالعه شد. نتایج به دست آمده حاکی از دقت بالای مدل ارائه شده در تخمین زبری سطح و اندازه پهنای شکاف برش بود.

کلید واژگان: اینکونل ۷۱۸، برش کاری، لیزر، شبکه عصبی مصنوعی

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

Farshid Jafarian^{1*}, Alireza Barghak²

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

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 laser 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 laser cutting of Inconel 718. In this study, Inconel 718 superalloy was cut via laser, and the effect of cutting parameters including cutting speed, nitrogen gas pressure, and the power and focal distance of the laser beam, 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: Artificial Neural Network, Inconel 718, Laser, Cutting Process

۱- مقدمه

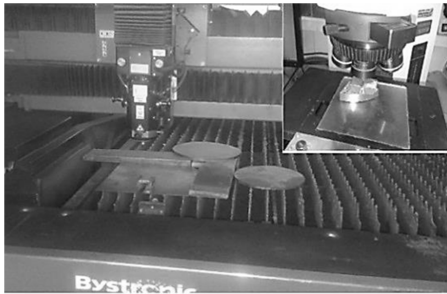
پایه آهن- نیکل هستند که محدوده وسیعی از ترکیبها و خواص را در بر می گیرند. برخی از آلیاژهای این گروه، مانند سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ که دارای فازهای رسوبی است، در گذشته جزو گروه پایه آهن- نیکل به شمار می رفتند ولی امروزه در گروه سوپرآلیاژهای پایه نیکل قرار می گیرند. سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸، یک آلیاژ رسوب سخت شده است که علاوه بر آهن و نیکل حاوی مقادیر قابل توجهی کرم، نیوبیم و مولیبدن می باشد. همچنین عناصر جزئی مانند آلومینیم و تیتانیوم در ترکیب این آلیاژ وجود دارد [۱]. سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ با داشتن ویژگی های 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 گسترده ای در صنایع هوایی، صنایع نظامی و

فرآیندهای ساخت و تولید از جمله برش کاری، از اهمیت فراوانی در فعالیت ها و عملیات صنعتی برخوردارند [۱]. امروزه با رشد صنعت و نیاز به استفاده از مواد سخت در صنایع مختلف، ضرورت ماشین کاری مواد سخت بیش از پیش احساس می شود [۲]. سختی بالای قطعه کار در فرآیند برش کاری محدودیت های زیادی را به دنبال دارد. این امر منجر به کاهش کیفیت سطح و ایجاد انحراف و شکل هندسی نامناسب می گردد. از طرف دیگر برش کاری قطعات سخت، هزینه زیادی در بر دارد. تاکنون تلاش هایی در خصوص بهبود کیفیت سطح و یکپارچگی شکل هندسی در فرآیند برش کاری مواد سخت صورت پذیرفته است [۳، ۲]. آلیاژهای اینکونل، خانواده ای از سوپرآلیاژهای

Please cite this article using:

F. Jafarian, A. Barghak, Experimental investigations in order to evaluate the kerf and surface roughness in the laser 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. 68-72, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل ۱ دستگاه لیزر مورد استفاده و اندازه گیری شکاف برش به وسیله میکروسکوپ

جدول ۲ پارامترهای موثر در برش کاری جت آب

پارامترها	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
توان	۴۱۰۰	۴۲۰۰	۴۳۰۰	۴۴۰۰
سرعت پیشروی mm/min	۸۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰
فاصله کانونی mm	۷	۸	۹	۱۰
فشار گاز bar	۱۵	۱۷	۱۹	۲۱

پس از اندازه‌گیری شکاف برش به وسیله میکروسکوپ با بزرگنمایی ۵۰، زبری سطح مقطع برشکاری شده به عنوان شاخصی از کیفیت برش، اندازه‌گیری شد.

در ادامه، با به کارگیری سیستم‌های هوشمند و استفاده از نتایج به دست آمده در جدول ۳ به بررسی ارتباط بین پارامترهای ماشین کاری و زبری سطح و اندازه پهنای برش در فرآیند برشکاری لیزر سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداخته شد.

جدول ۳ مقادیر پارامترهای ورودی و خروجی در هر آزمایش

ردیف	پارامترهای ورودی			پارامترهای خروجی		
	سرعت	فشار گاز	توان	فاصله کانونی	زبری سطح	شکاف بالا
	mm/min	bar	watt	mm	μm	mm
۱	۸۰۰	۱۵	۴۱۰۰	۷	۴/۶۵	۰/۹۲۳
۲	۹۰۰	۱۷	۴۱۰۰	۸	۳/۴۳	۰/۹۷۷
۳	۱۰۰۰	۱۹	۴۱۰۰	۹	۲/۲۱۳	۱/۲۱۳
۴	۱۱۰۰	۲۱	۴۱۰۰	۱۰	۴/۵۷	۱/۳۲
۵	۸۰۰	۱۵	۴۲۰۰	۸	۴/۸۵	۱/۱۳
۶	۹۰۰	۱۷	۴۲۰۰	۷	۳/۴۰	۰/۸۸۸
۷	۱۰۰۰	۱۹	۴۲۰۰	۱۰	۵/۹۰	۱/۳۸۵
۸	۱۱۰۰	۲۱	۴۲۰۰	۹	۵/۸۵	۱/۲۱۹
۹	۸۰۰	۱۷	۴۳۰۰	۹	۳/۴۵	۱/۱۳۶
۱۰	۹۰۰	۱۵	۴۳۰۰	۱۰	۳/۸۷	۱/۲۸۰
۱۱	۱۰۰۰	۲۱	۴۳۰۰	۷	۵/۰۸	۰/۸۸۲
۱۲	۱۱۰۰	۱۹	۴۳۰۰	۸	۳/۶۶	۱/۱۱۹
۱۳	۸۰۰	۱۷	۴۴۰۰	۱۰	۴/۲۳	۱/۳۲۴
۱۴	۹۰۰	۱۵	۴۴۰۰	۹	۳/۵۲	۱/۱۴۴
۱۵	۱۰۰۰	۲۱	۴۴۰۰	۸	۶/۰۱	۱/۰۵۴
۱۶	۱۱۰۰	۱۹	۴۴۰۰	۷	۳/۷۸	۰/۹۳۱
۱۷	۸۰۰	۲۱	۴۱۰۰	۷	۳/۶۸	۰/۹۳۴
۱۸	۹۰۰	۱۹	۴۱۰۰	۸	۴/۷۷	۱/۰۳۶
۱۹	۱۰۰۰	۱۷	۴۱۰۰	۹	۳/۵۰	۱/۱۷۶
۲۰	۱۱۰۰	۱۵	۴۱۰۰	۱۰	۳/۶۰	۱/۳۴۲
۲۱	۸۰۰	۲۱	۴۲۰۰	۸	۴/۲۳	۰/۹۰۱
۲۲	۹۰۰	۱۹	۴۲۰۰	۷	۳/۲۲	۰/۹۱۴
۲۳	۱۰۰۰	۱۷	۴۲۰۰	۱۰	۴/۶۸	۱/۴۰۳
۲۴	۱۱۰۰	۱۵	۴۲۰۰	۹	۳/۴۰	۱/۱۳۸
۲۵	۸۰۰	۱۹	۴۳۰۰	۹	۴/۵۰	۱/۱۳۳
۲۶	۹۰۰	۲۱	۴۳۰۰	۱۰	۶/۲۰	۱/۲۱۵
۲۷	۱۰۰۰	۱۵	۴۳۰۰	۷	۴/۲۲	۰/۹۱۷
۲۸	۱۱۰۰	۱۷	۴۳۰۰	۸	۴/۴۸	۰/۹۹۹
۲۹	۸۰۰	۱۹	۴۴۰۰	۱۰	۵/۶۵	۱/۲۷۳
۳۰	۹۰۰	۲۱	۴۴۰۰	۹	۴/۹۸	۱/۰۶۵
۳۱	۱۰۰۰	۱۵	۴۴۰۰	۸	۳/۵۷	۰/۸۹۶
۳۲	۱۱۰۰	۱۷	۴۴۰۰	۷	۴/۰۴	۰/۸۹۲

صنایع ساخت توربین‌های گازی دارد [۵]. به دلیل سختی بالا، قابلیت برش - کاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ از جنبه‌های مختلف دشوار بوده و با روش‌های سنتی قابل انجام نیست. در روش‌های سنتی برشکاری، ابزار درگیر است. به همین دلیل عمر ابزار کوتاه بوده و هزینه‌ی زیادی را به دنبال دارد. همچنین، ابزارهای معمولی و سنتی، دقت پایینی دارند و کیفیت سطح نامناسبی ایجاد می‌کنند. از این رو برای بهبود کیفیت و دقت برشکاری، انجام متعاقب ماشین کاری ضرورت دارد. در حال حاضر، روش‌های نوین برشکاری همچون استفاده از اشعه لیزر، با نرخ براده‌برداری بیشتر، به جای روش‌های سنتی استفاده می‌شوند [۶].

ماشین کاری با اشعه لیزر LBM، فرایند ماشین کاری پیشرفته‌ای است که مبنی بر انرژی حرارتی غیر تماسی است که تقریباً برای طیف وسیعی از مواد می‌تواند استفاده شود. همچنین برای برش سوراخ‌های بسیار ریز و اشکال هندسی پیچیده کاربرد فراوانی دارد [۷].

این پژوهش با هدف بهینه‌سازی فرآیند برشکاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به وسیله لیزر انجام شده است. تاثیر چهار پارامتر ورودی مانند: فشار گاز نیتروژن، سرعت برش، توان لیزر و فاصله کانونی بر روی دو پارامتر خروجی پهنای برش و زبری سطح در نظر گرفته شد.

۲- آزمایشات تجربی

در این بخش اقدامات صورت پذیرفته جهت بررسی زبری سطح، اندازه پهنای برش، در فرآیند برشکاری لیزر روی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸، شامل مراحل آماده‌سازی، برشکاری و اندازه‌گیری زبری سطح، پهنای برش مطرح شده است.

۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

تعداد ۳۲ قطعه از اینکونل ۷۱۸ با مشخصات جدول ۱ تهیه و جهت یکسان سازی ابعاد، تمامی نمونه‌ها، تا رسیدن به ضخامت ۱۰ میلی‌متر ماشین کاری شدند. جهت جلوگیری از خطاهای احتمالی برشکاری، یک فیکسچر مناسب ساخته شده و قطعات جهت برشکاری در فیکسچر قرار داده شدند. طول مسیر برشکاری ۱۵ میلی‌متر می‌باشد.

۲-۲- برشکاری

برشکاری به وسیله‌ی دستگاه دستگاه لیزر بایسترونیک^۱ صورت گرفت (شکل ۱). توان دستگاه ۴۴۰۰ وات؛ ابعاد دستگاه، $X=3000\text{ mm}$ ، $Y=1500\text{ mm}$ ، $Z=170\text{ mm}$ ؛ و دقت دستگاه $\pm 0.05\text{ mm}$ بوده، بیشینه ضخامت برش فولاد با گاز اکسیژن ۲۵ میلی‌متر می‌باشد.

آزمایشات به روش تاگوچی طراحی و اجرا شدند تا بهترین سطح پارامترها تعیین شوند. در این مطالعه اثر سرعت، فشار گاز نیتروژن، فاصله کانونی و توان دستگاه که از جمله تاثیرگذارترین عوامل در پهنای برش و کیفیت سطح هستند، بر پارامترهای خروجی مورد بررسی قرار گرفت. (جدول ۲) به منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها، از روش تاگوچی در چهار سطح استفاده شد.

جدول ۱ درصد عناصر تشکیل دهنده اینکونل ۷۱۸

P	Si	Al	Ti	Nb	Mo	Cr	Fe	Ni	C	B	N
۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۴۵	۱/۰۸	۵/۰۷	۲/۷۲	۱۷/۹۳	۱۹/۰۴	۵۳/۵۹			

درصد

1. Bystronic

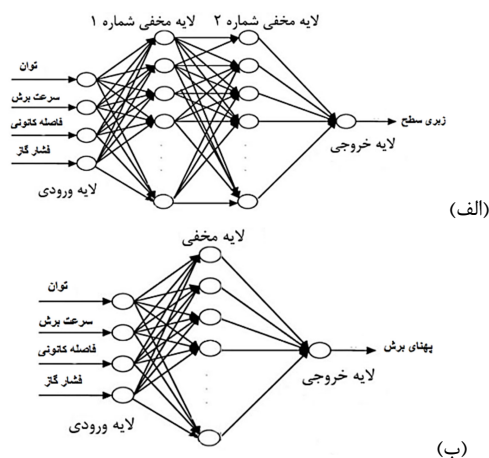
۳- کاربرد سیستم‌های هوشمند

تعیین شرایط مطلوب ماشین‌کاری به وسیله آزمون تجربی، مشکل و پرهزینه است. شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌عنوان 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 علاوه بر 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 [۸].

۴- تحلیل نتایج

در این قسمت بمنظور تخمین اثر پارامترهای برش‌کاری مورد بررسی بر کیفیت برش در فرآیند برش‌کاری اینکونل ۷۱۸، از شبکه‌ی عصبی مصنوعی به‌عنوان یک مدل پیشگویانه استفاده شد. بدین منظور نرم‌افزار متلب به‌کار رفته است. در نهایت شبکه‌های عصبی با ساختار دو لایه پنهان شامل ۷ نورون در لایه پنهان اول و ۱۰ نورون در لایه پنهان دوم برای زبری سطح (شکل ۲-الف)، و یک لایه پنهان شامل ۱۲ نورون برای پهنای برش (شکل ۲-ب)، بر مبنای کمترین خطای آزمایش^۱ انتخاب شد.

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

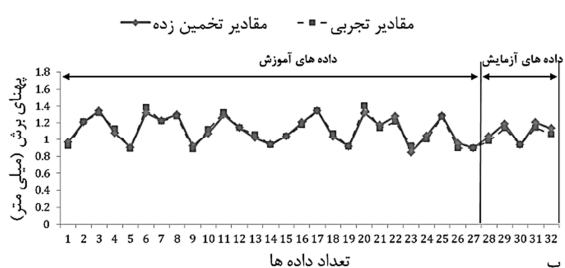


شکل ۲ ساختار شبکه عصبی مصنوعی

جدول ۴ آموزش شبکه‌ی عصبی منتخب توسط الگوریتم ژنتیک

پهنای برش	زبری سطح	تابع انتقال	تابع فعال‌سازی	مقدار مقیاس	مقدار مقیاس	مقدار مقیاس
۱-۱۲-۴	tan-log	۰/۰۰۰۷۹	۲/۲۲	۴/۱۸	۳/۶۳	۰/۱۱
برش				۴/۸۵	۴/۹۵	۳/۵۴
۱-۱۰-۷-۴	tan-tan-log	۰/۰۰۰۶۹	۵/۸۵	۱۴/۲۰	۳/۱۵	۶/۱۹
زبری سطح				۱۱/۵۱	۱/۵۷	۰/۵۳

1. Testing error
2. Tansig
3. Logsig



شکل ۳ مقایسه ی بین نتایج تجربی و نتایج خروجی از شبکه ی عصبی. الف. زبری سطح. ب. پهنای برش

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 ناچیز می‌باشد که این بیانگر آموزش صحیح و به اندازه‌ی شبکه‌ی عصبی می‌باشد.

۴-۱-۴ تخمین میزان پارامترهای خروجی

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

۴-۱-۴-۱ تخمین میزان پهنای برش

در ابتدا اثر تغییرات سرعت بر روی پهنای برش در ۴ سطح متفاوت از توان لیزر، فشار گاز، و فاصله کانونی بررسی شد.

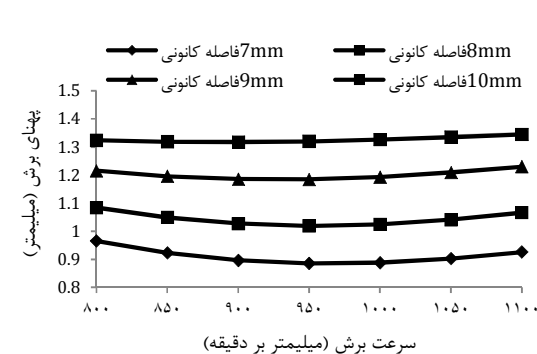
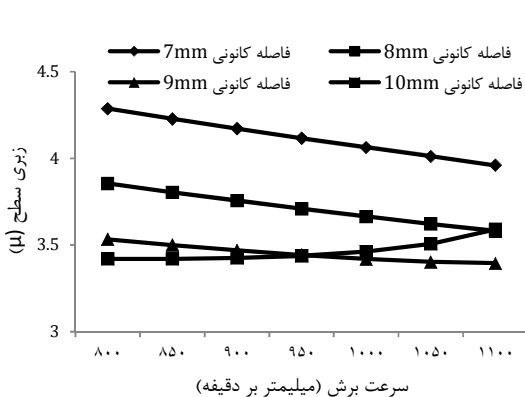
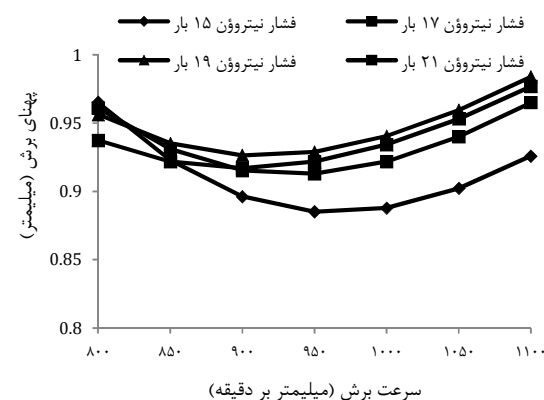
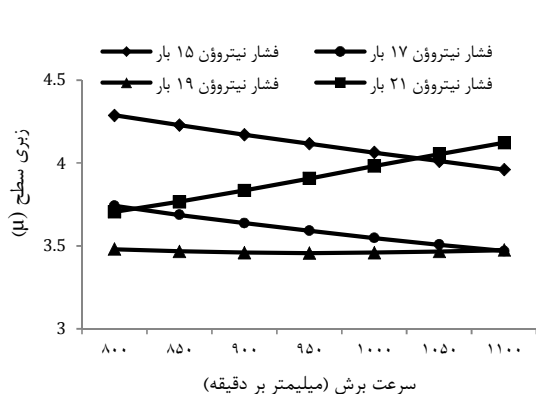
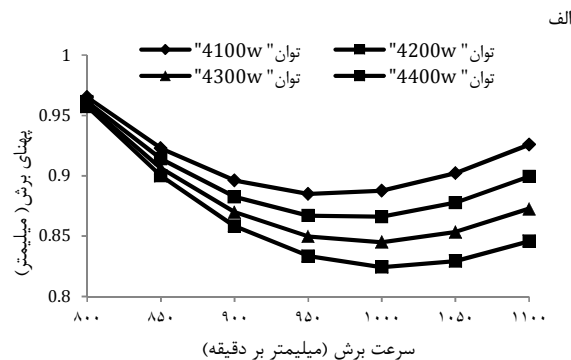
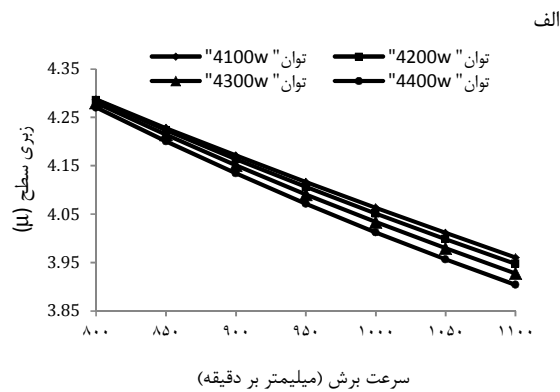
همان‌گونه که در شکل ۴-الف مشاهده می‌شود در سطوح مختلف لیزر، با افزایش سرعت خطی، پهنای برش نیز کاهش یافته و پس از رسیدن به سرعت بهینه، با افزایش سرعت، پهنای برش نیز افزایش می‌یابد. در سرعت‌های بالا تاثیر توان نیز بیشتر بوده و هر چقدر توان کمتر باشد، میزان پهنای برش نیز بیشتر خواهد بود. در حالی که در سرعت‌های پایین، توان تاثیر قابل توجهی بر پهنای برش ندارد.

این روند در مورد تاثیر فشار گاز نیتروژن نیز به همین منوال دیده می‌شود. (شکل ۴-ب)

پهنای برش با فاصله کانونی نسبت مستقیم داشته و با افزایش فاصله کانونی، افزایش می‌یابد. (شکل ۴-ج)

۴-۱-۴-۲ تخمین زبری سطح

همان‌گونه که در شکل ۵-الف مشاهده می‌گردد، زبری سطح با سرعت برش نسبت معکوس داشته و با افزایش سرعت، به صورت خطی کاهش می‌یابد.



شکل ۵ تخمین زبری سطح با تغییر سرعت الف. تاثیر توان لیزر در در فشار گاز ۱۵ بار و فاصله کانونی ۷ میلی متر ب. تاثیر تاثیر فشار گاز نیتروژن در توان و فاصله کانونی ۷ میلی متر ج. تاثیر فاصله کانونی در توان ۴۱۰۰ وات و فشار گاز ۱۵ بار

آزمایش جدید صورت پذیرفته، حاکی از کارآمدی مدل استفاده شده در این تحقیق می باشد. لذا روش مذکور برای تخمین خروجی (های) سایر فرآیندهای ماشین کاری نیز توصیه می گردد.

۲-۴-۱- بهینه سازی تک هدفه^۱

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

شکل ۴ تخمین پهنای برش با تغییر سرعت الف. تاثیر توان لیزر در در فشار گاز ۱۵ بار و فاصله کانونی ۷ میلی متر ب. تاثیر تاثیر فشار گاز نیتروژن در توان و فاصله کانونی ۷ میلی متر ج. تاثیر فاصله کانونی در توان ۴۱۰۰ وات و فشار گاز ۱۵ بار

توان های مختلف لیزر، به ویژه در سرعت های پایین، تاثیر چندانی در میزان زبری سطح نداشته اند.

با افزایش فشار گاز نیتروژن تا ۱۹ بار، میزان زبری سطح کاهش یافته است. در فشار گاز ۲۱ بار، زبری سطح با سرعت برش نسبت مستقیم پیدا کرده و با افزایش سرعت، افزایش می یابد. (شکل ۵- ب)

به طور کلی روند کاهشی زبری سطح با افزایش سرعت، در سطوح مختلف فاصله کانونی نیز دیده می شود. هم چنین با افزایش فاصله کانونی زبری سطح کاهش می یابد. (شکل ۵- ج)

۲-۴-۲- بهینه سازی

همخوانی مناسب بین کمترین میزان پیش بینی شده توسط شبکه عصبی و

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

صورت جداگانه

پارامترهای ورودی					پارامترهای خروجی
فاصله کانونی mm	توان watt	سرعت mm/min	فشار گاز نیتروژن bar	مقدار کمینه	
۷	۴۴۰۰	۱۰۰۶	۱۵	۰/۸۲۴۴	شکاف برش mm
۸/۴	۴۱۰۰	۱۱۰۰	۱۶/۱۶	۳/۳۶۳	زبری سطح

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از مطالعات تجربی به بررسی کیفیت سطح و پهنای برش در فرآیند برش کاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به وسیله لیزر پرداخته شد. با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی، اثر پارامترهای برش کاری شامل سرعت برش، فشار گاز نیتروژن، توان و فاصله کانونی لیزر مورد مطالعه قرار گرفت. در ادامه نیز با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی به تخمین میزان زبری سطح و پهنای برش پرداخته شد. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن بود که علی‌رغم پیچیدگی بالا، روش به‌کار گرفته شده از دقت و کارایی بالایی برخوردار می‌باشد و میزان خطای آموزش و آزمایش شبکه پایین گزارش شد. این امر نشان دهنده‌ی آموزش صحیح و به اندازه‌ی شبکه‌ی عصبی است.

۶- مراجع

- [1] L. P. Connor, R. O'Brien, *Welding Handbook: Welding Technology*, Amer Welding Societ, 1987.
- [2] J. P. Davim, *Machining of hard materials*, Springer Science & Business Media, 2011
- [3] F. Klocke, E. Brinksmeier, K. Weinert, Capability profile of hard cutting and grinding processes. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 2, pp. 22-45, 2005.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] H. Ding, Y. C. Shin, Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 50, pp. 106-114, 2010.
- [7] A. K. Dubey, V. Yadava, Laser beam machining—A review, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, pp. 609-628, 2008.
- [8] 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, *Modares mechanical engineering*, Vol. 13, No. 8, pp. 123-134, 2013. (in Persian)