

Optimizing the Cutting of Inconel 718 Sheets with Co2 Laser by Particle Swarm Algorithm

Said Kiani¹, *M.Sc*, Rasoul Tarkesh-Esfahani^{1,2}, *Assistant Professor*, Zahra Zojaji³, *Assistant Professor*

¹Department of Mechanical Engineering- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

²Modern Manufacturing Technologies Research Center- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

³Faculty of Computer Engineering- University of Isfahan, Isfahan, Iran
kianisaeid38@gmail.com, ra_tarkesh@pmc.iaun.ac.ir, z.zojaji@eng.ui.ac.ir

Abstract

In this paper, the impact of different operative variables on the quality of cutting of Inconel material 718 is studied. Utilizing Taguchi test design, the input variables including carbon dioxide laser power and the cutting speed for cutting three different thicknesses of Inconel 718 alloy were investigated in order to achieve the optimal conditions. After obtaining experimental test results, dataset was modeled using artificial neural networks. The neural network model is then used for evaluating candidate solutions in particle swarm optimization (PSO) algorithm which is employed for optimization of cutting conditions. The results indicated that when the laser power of is 1714 (W), the cutting speed is 1382 (mm/min) and the thickness of the material is 0.8 (mm), The best quality for cutting Inconel 718 is achieved with a carbon dioxide laser cutting machine. The results of optimal cutting parameters of Inconel alloy with carbon dioxide laser which were obtained by PSO were verified through an experimental test and similar papers. The results of this experimental test were very close to the optimal values of the PSO, which demonstrates the efficiency of neural network model in predicting the quality of cutting and the efficiency of PSO in finding optimal conditions.

Keywords: CO2 laser cutting, particle swarm optimization, Inconel 718 sheet, optimization, surface smoothness.

Received: 22 May 2021

Revised: 6 July 2021

Accepted: 22 August 2021

Corresponding Author: Dr. Rasoul Tarkesh Esfahani

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1401.13.51.7.0>

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی برش ورق‌های اینکونل ۷۱۸ با لیزر CO₂ به روش الگوریتم ازدحام ذرات

سعید کیانی^۱، دانش آموخته کارشناسی ارشد، رسول ترکش اصفهانی^{۱،۲}، استادیار، زهرا زجاجی، استادیار^۳

۱- دانشکده فنی و مهندسی- واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات فناوریهای نوین ساخت و تولید- واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۳- دانشکده مهندسی کامپیوتر- دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

kianisaeid38@gmail.com, ra_tarkesh@pmc.iaun.ac.ir, z.zojaji@eng.ui.ac.ir

چکیده: در این پژوهش متغیرهای اثر گذار بر روی کیفیت برش ورق اینکونل ۷۱۸ در فرایند برشکاری با لیزر بررسی شده است. با کمک طراحی آزمایش به روش تاگوچی، متغیرهای ورودی شامل توان لیزر دی اکسید کربن و سرعت برش برای برش سه ضخامت مختلف از آلیاژ اینکونل ۷۱۸ مورد بررسی قرار گرفت تا شرایط بهینه در نهایت به دست آید. پس از مشخص شدن داده‌های تست‌های تجربی، مجموعه داده به دست آمده به کمک الگوریتم شبکه عصبی مدل‌سازی گردید. این مدل در مرحله بعد توسط الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات (PSO) استفاده شد تا پارامترهای کاندید به دست آمده را ارزیابی کند و کیفیت برش را بر این اساس پیش‌بینی نماید. در نهایت الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات، مقدار بهینه شرایط برش را تعیین می‌کند. نتایج نشان داد که هنگامی که توان لیزر ۱۷۱۴ وات، سرعت برش ۱۳۸۲ میلی‌متر بر دقیقه و ضخامت قطعه ۰/۸ میلی‌متر باشد، بهترین کیفیت برای برش ورق سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با دستگاه برش لیزر دی اکسید کربن به دست می‌آید. نتایج به دست آمده برای مقادیر بهینه برای پارامترهای برش آلیاژ اینکونل با لیزر دی اکسید کربن با استفاده الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات توسط یک آزمایش تجربی و تحقیقات مشابه راستی آزمایی شد. نتایج این آزمایش تجربی بسیار نزدیک به مقادیر بهینه الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات است و این نشان دهنده کارایی مدل شبکه‌های عصبی در تخمین کیفیت برش و کارایی بهینه‌سازی انجام شده توسط PSO در یافتن شرایط بهینه است.

کلمات کلیدی: الگوریتم ازدحام ذرات؛ برش لیزر CO₂؛ بهینه‌سازی؛ صافی سطح؛ ورق اینکونل ۷۱۸

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۳/۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۴/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۵/۳۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر رسول ترکش اصفهانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: نجف آباد- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد- دانشکده فنی مهندسی

۱- مقدمه

امروزه با رشد صنعت و نیاز به استفاده از مواد سخت در صنایع مختلف، برشکاری فلزات به ویژه مواد سخت بیش از پیش مورد نیاز هست. برش فلزات به دو روش مدرن و سنتی انجام می‌گیرد. با پیشرفت علم و پیدایش تکنولوژی‌های جدید، روش‌های مدرن از قبیل برش با پرتوهای لیزر نسبت به روش‌های سنتی به دلیل کیفیت بالاتر و صرفه‌جویی در وقت و هزینه مورد استقبال بیشتری قرار گرفته‌اند [۱]. در یک فرآیند برشکاری با پرتوهای لیزر، پارامترهایی مانند سرعت برش، توان لیزر و ضخامت قطعه بر روی دو مشخصه خروجی پهنای برش و زبری سطح تأثیرگذار هستند. لذا در سال‌های اخیر مطالعه تأثیر این پارامترها بر کیفیت سطوح برش خورده مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۲-۷]. پاور و اینامدر در یک تحقیق، به بهینه‌سازی کیفیت برش لیزری پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که ویژگی‌های کیفی سطح محصول نهایی برش خورده به شدت به نوع گاز کمکی مورد استفاده برای برش و پارامترهای ورودی مانند توان لیزر، سرعت و نرخ برش بستگی دارد [۸]. آرگاد و آرکیمت در یک پژوهش اثر پارامترهای فرآیند برش لیزر دی اکسید کربن مانند سرعت برش، توان ورودی و فشار گاز بر کیفیت سطح ماشین‌کاری با استفاده از پرتو لیزر بر روی فولاد ضدزنگ SS 409 مورد بررسی قرار داده‌اند. در تحقیق آن‌ها، کیفیت برش از لحاظ عرض شکاف و زبری سطح اندازه‌گیری شد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که فاکتورهای تأثیرگذار بر روی زبری سطح، سرعت برش و فشار گاز است. فاکتور تأثیرگذار در عرض شکاف، توان لیزر و فشار گاز است. توان لیزر و سرعت برش باعث افزایش زبری سطح می‌شوند و همچنین با کاهش مقدار فشار گاز، زبری سطح افزایش می‌یابد [۹]. مرادی و همکاران در تحقیقی دیگر، تأثیر فشار گاز و موقعیت نقطه کانونی بر کیفیت هندسی و صافی سطح شکاف برش در برشکاری لیزری قطعات تزریقی پلی کربنات به ضخامت ۳/۲ میلی‌متر با استفاده از لیزر دی اکسید کربن پیوسته کم توان را مورد بررسی قرار دادند. تحقیق آن‌ها، فشار گاز و موقعیت نقطه کانونی پارامترهای متغیر در نظر گرفته شدند، در حالی که سایر پارامترها مانند توان لیزر و سرعت برشکاری، ثابت در نظر گرفته شده‌اند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد فشار گاز و موقعیت نقطه کانونی تأثیر بسزایی در کیفیت شکاف برش دارد. افزایش فشار گاز و موقعیت نقطه کانونی لیزر عرض شکاف را از بالا و پایین افزایش می‌دهد. همچنین نتایج حاکی از آن است که کاهش موقعیت نقطه کانونی و افزایش فشار گاز باعث کاهش منطقه متأثر از حرارت بالایی می‌شود. افزایش فشار گاز باعث کاهش زاویه مخروطی بودن شکاف برش می‌شود و کاهش موقعیت نقطه کانونی باعث کاهش صافی سطح شکاف برش می‌شود [۱۰]. در برش لیزری، کیفیت برش از اهمیت زیادی برخوردار است. اثرات غیرخطی چندگانه پارامترهای فرآیند برای پیش‌بینی کیفیت برش بسیار مشکل است. مدک و رادونویچ، از رویکرد هوش مصنوعی^۱ برای پیش‌بینی زبری سطح در برش لیزر دی اکسید کربن استفاده کردند. برای این منظور، مدل شبکه عصبی مصنوعی^۲ برای توسعه مدل زبری سطح با توجه به سرعت برش، توان لیزر و فشار گاز استفاده شد. داده‌های تجربی به‌دست آمده از آرایه متعامد تاگوچی L25 برای توسعه مدل شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند زبری سطح را با دقت خوب پیش‌بینی کند. همچنین مدل شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند به عنوان یک جایگزین خوب در تجزیه و تحلیل اثر پارامترهای برش در زبری سطح استفاده شود [۱۱].

سوپر آلیاژ 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 ویژگی‌ها، عملیات برش اینکونل ۷۱۸ با روش‌های سنتی، دشوار و هزینه‌بر است. از این رو برشکاری با لیزر یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای برش آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به شمار می‌رود. از جمله پارامترهای بسیار مهم در فرآیند برشکاری، زبری سطح و اندازه شکاف برش هست. این پارامترها تاکنون در فرآیند برشکاری اینکونل ۷۱۸ با لیزر به‌طور گسترده مطالعه نشده‌اند. در یک تحقیق توسط جعفریان و برقک، برشکاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با اشعه لیزر صورت پذیرفت. سپس اثر پارامترهای برشکاری 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 آزمایش‌ها تجربی و سیستم‌های هوشمندی چون شبکه عصبی مصنوعی مطالعه شد. نتایج به‌دست آمده مربوط به تخمین پهنای برش و زبری با تغییر سرعت حاکی از دقت بالای مدل ارائه شده در تخمین زبری سطح و اندازه پهنای شکاف^۳ برش بود [۱۲]. هاستلیک و آی، به‌طور تجربی به بررسی کیفیت برش لیزر برای برش اینکونل ۷۱۸ پایه آلومینیوم با استفاده از سیستم برش لیزر پرداختند. کیفیت برش با اندازه‌گیری نسبت سفتی

شکاف و زبری سطح نمونه‌های برش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که سرعت برش بر روی زبری سطح و نسبت سفتی شکاف بالاتر از توان لیزر بود [۱۳].

در این مقاله، در ابتدا طراحی آزمایش برای تست‌های تجربی انجام می‌گیرد. سپس بر اساس آزمایش تجربی طراحی شده، قطعات برش زده می‌شوند. آنگاه پارامترهای کیفیت سطح برای قطعات برش زده شده در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شود. تحلیل نتایج به‌منظور مشخص شدن شرایط بهینه برای برش، به کمک الگوریتم ازدحام ذرات^۴ انجام می‌شود.

۲- آزمایش تجربی

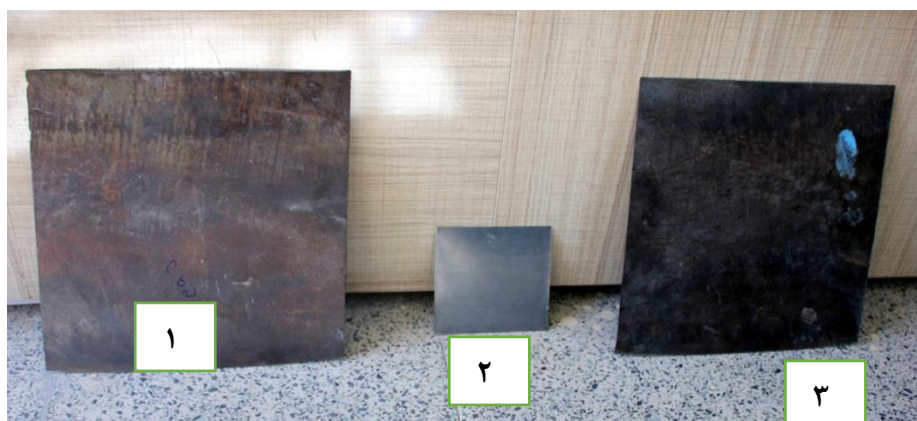
۲-۱- مواد استفاده شده برای آزمایش تجربی

سه قطعه سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در این تحقیق استفاده شده است [شکل (۱)]. ترکیب شیمیایی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در جدول (۱) آمده است. لازم به ذکر است مواردی که در جدول (۱)، دارای مقدار حداقل نیستند به معنای وجود حداکثر درصد وجود عنصر در ترکیب آلیاژ است. ابعاد این قطعات در جدول (۲) آمده است. برای اطمینان از این‌که جنس این قطعات سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ باشد، آزمایش آنالیز ترکیب شیمیایی انجام شد. گزارش آزمایش آنالیز ترکیب شیمیایی آزمایشگاه صحت جنس قطعات سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ را تأیید کرد.

Table (1): Chemical composition of Inconel 718 super alloy [14]

جدول (۱): ترکیب شیمیایی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ [۱۴]

المان	حداکثر %	حداقل %	المان	حداکثر %	حداقل %
Nb	۵/۲	۴/۸	Co	۱	-
Mo	۳/۳	۲/۸	Cu	۰/۳	-
Ni	۵۰	۵۵	Ti	۱/۱۵	۰/۸
Cr	۲۱	۱۷	V	۰/۱	-
P	۰/۰۱	-	W	-	-
S	۰/۰۱	-	Al	۰/۶	۰/۴
Mn	۰/۳۵	-	Fe	Balance	Balance
Si	۰/۳۵	-			
C	۰/۰۴۵	-			



شکل (۱): قطعات سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ استفاده شده در این پژوهش

Figure (1): Inconel 718 super alloy parts used in this research

Table (2): Dimensions of Inconel 718 super alloy parts used in this research
جدول (۲): ابعاد قطعات سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ استفاده شده در این پژوهش

قطعه	طول (میلی‌متر)	عرض (میلی‌متر)	ضخامت (میلی‌متر)
۱	۳۰۰	۳۰۰	۰/۵
۲	۱۲۰	۱۳۰	۰/۸
۳	۳۰۰	۳۰۰	۱

۲-۲- طراحی آزمایش تجربی

روش طراحی آزمایش‌ها یکی از روش‌هایی است که به‌وسیله آن می‌توان متغیرهای کلیدی که بر مشخصه کیفی مورد نظر فرآیند اثر می‌گذارد را شناسایی نمود. با به‌کارگیری این روش می‌توان عامل‌های ورودی قابل کنترل را تغییر داد و اثر آن‌ها را روی پارامترهای محصول خروجی ارزیابی نمود. روش تاگوچی^۵ بیشترین کاربرد را در چیدمان آزمایش دارد به نحوی که بیشترین و مهم‌ترین اثرات تقابل را با کمترین اجرای آزمایش در نظر می‌گیرد [۱۵]. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا طرحی ایجاد می‌شود که در آن پارامترهای مؤثر به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته می‌شوند [۱۶].

در این پژوهش، نمونه‌های طراحی آزمایش متغیرهای ورودی شامل توان لیزر، سرعت برش، ضخامت ورق، قطر پرتو و فشار گاز خنک‌کننده مختلف از آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به‌وسیله نرم‌افزار مینی‌تب با روش تاگوچی و آرایه L16 انجام شد [جدول (۳)]. همان‌طور که در جدول (۳) نشان داده شده است، تعداد ۱۶ آزمایش برش ورق سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با شرایط گوناگون انجام می‌شود برش توسط دستگاه برش لیزر دی‌اکسید کربن ساخت شرکت^۶ بیسترونیک انجام پذیرفت (شکل ۲).

در گام بعدی قطعات برش داده شده برای تعیین صافی سطح برش لبه برش، پهنای لبه برش و تعامد لبه برش در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفتند. در این بررسی، آزمایش اندازه‌گیری زبری سطح بر اساس استاندارد (DIN EN ISO 4287 (2010) و آزمایش کنترل ابعادی با دستگاه اندازه‌گیری ابعادی ویدئویی^۷ انجام پذیرفت. نتایج به‌دست آمده از این آزمایش‌ها در جدول (۵) نشان داده شده است. مقادیر زوایای α و β که در جدول (۴) آمده است، در شکل (۳) به‌صورت شماتیک نشان داده شده است.

Table (3): Experimental test instructions used in this research
جدول (۳): دستورالعمل آزمایش تجربی استفاده شده در این پژوهش

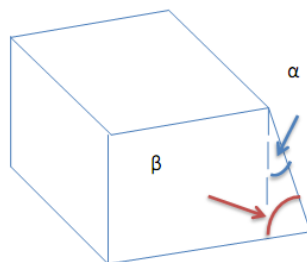
شماره	توان (وات)	سرعت (میلی‌متر بر دقیقه)	ضخامت (میلی‌متر)	فشار گاز	قطر پرتو (میلی‌متر)
۱	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۰/۵	روشن	۱
۲	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۰/۸	روشن	۱
۳	۱۰۰۰	۱۸۰۰	۱	خاموش	۲
۴	۱۰۰۰	۲۱۰۰	۱	خاموش	۲
۵	۱۵۰۰	۱۲۰۰	۰/۸	خاموش	۲
۶	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۰/۵	خاموش	۲
۷	۱۵۰۰	۱۸۰۰	۱	روشن	۱
۸	۱۵۰۰	۲۱۰۰	۱	روشن	۱
۹	۲۰۰۰	۱۲۰۰	۱	روشن	۲
۱۰	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۱	روشن	۲
۱۱	۲۰۰۰	۱۸۰۰	۰/۵	خاموش	۱
۱۲	۲۰۰۰	۲۱۰۰	۰/۸	خاموش	۱
۱۳	۲۵۰۰	۱۲۰۰	۱	خاموش	۱
۱۴	۲۵۰۰	۱۵۰۰	۱	خاموش	۱
۱۵	۲۵۰۰	۱۸۰۰	۰/۵	روشن	۲
۱۶	۲۵۰۰	۲۱۰۰	۰/۸	روشن	۲



شکل (۲): دستگاه برش لیزری دی اکسید کربن استفاده شده در این پژوهش

Figure (2): Carbon dioxide laser cutting machine used in this research

زوایای الف و بتا مربوط به دو سطح برش بوده که در حین برش ایده ال ۹۰ درجه هستند ولی به سبب پرتو لیزر دارای انحراف می‌شوند. زاویه الف زاویه بین سطح بالایی قطعه برش با دیوار شیب‌دار طولی و زاویه بتا زاویه بین سطح پایین برش با دیواره شیب‌دار طولی هستند. لازم به ذکر است زوایای آلفا و بتا دو زاویه فضای سه بعدی بوده و متمم یکدیگر نیستند.



شکل (۳): شماتیک زوایای α و β که در جدول ۴ آمده است

Figure (3): Schematic of the angles α and β shown in Table 4

۲-۳- تحلیل نتایج به استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات

روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک روش سراسری کمینه‌سازی است که با استفاده از آن می‌توان با مسائلی که جواب آن‌ها یک نقطه یا سطح در فضای n بعدی هست، برخورد نمود [۱۷،۱۸]. در این چنین فضایی، فرضیاتی مطرح می‌شود و یک سرعت ابتدایی به آن‌ها اختصاص داده می‌شود، همچنین کانال‌های ارتباطی بین ذرات در نظر گرفته می‌شود. سپس این ذرات در فضای پاسخ حرکت می‌کنند و نتایج حاصله بر مبنای یک «ملاک شایستگی» پس از هر بازه زمانی محاسبه می‌شود. با گذشت زمان، ذرات به سمت ذراتی که دارای ملاک شایستگی بالاتری هستند و در گروه ارتباطی یکسانی قرار دارند، شتاب می‌گیرند [۱۹،۲۰]. علی‌رغم اینکه هر روش در محدوده‌ای از مسائل به خوبی کار می‌کند، این روش در حل مسائل بهینه‌سازی پیوسته موفقیت بسیاری از خود نشان داده است [۲۱،۲۲].

در این مقاله برای به دست آوردن مقدار بهینه از الگوریتم ازدحام ذرات پیوسته استفاده شد. ابتدا با توجه به اینکه انجام تست‌های تجربی برای تمام داده‌های موجود در بازه مورد مطالعه ممکن نیست، مقادیری از این بازه‌ها به روش طراحی آزمایش تاگوشی انتخاب و تست شدند. و به‌ازای ورودی‌های مسئله شامل توان، سرعت، ضخامت، فشار گاز و قطر پرتو، مقادیر خروجی شامل زبری و اندازه زوایای برش اندازه‌گیری شد. سپس برای یافتن تابع حاکم بر رابطه ورودی و خروجی از مدل شبکه‌های عصبی بهره برده شد تا با دقت قابل قبول مدلی برای پیش‌بینی مقادیر خروجی با داشتن ورودی‌ها فراهم آید.

Table (4): Experimental test results

جدول (۴): نتایج آزمایش تجربی

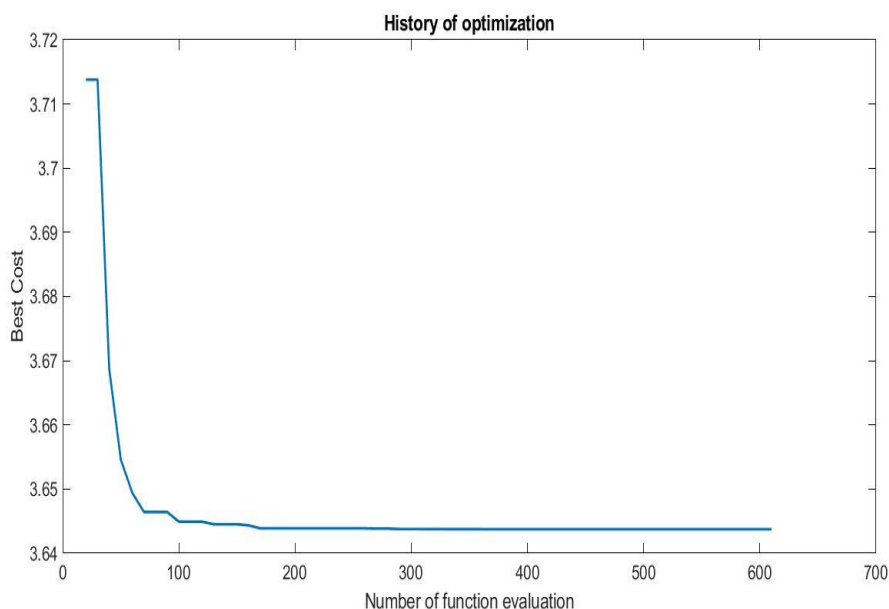
شماره	دستگاه اندازه گیری ویدئو (VMM)		آزمون اندازه‌گیری زبری سطح				درجه	موقعیت	وضعیت	L _t mm	R _z μm	R _a μm						
	درجه	موقعیت	وضعیت	L _t mm	R _z μm	R _a μm												
۱	۸۶	α1	طولی	۴	۳/۲۸	۰/۴۵۷	۹	طولی	۴	۲/۷۵	۰/۴۲۷	۱۱۹	α1	طولی	۴	۲/۷۵	۰/۴۲۷	
												۸۶	B1					
	۸۲	α1	عرضی	۴	۳/۸۸	۰/۵۴۲	۹	عرضی	۴	۲/۹۳	۰/۴۹۱	۱۰۷	α1	عرضی	۴	۲/۹۳	۰/۴۹۱	
												۸۸	B1					
۲	۹۴	α1	طولی	۴	۱/۳	۰/۲۲	۱۰	طولی	۴	۲/۸۵	۰/۴۰۸	۱۰۷	α1	طولی	۴	۲/۸۵	۰/۴۰۸	
												۹۴	B1					
	۹۰	α1	عرضی	۴	۱/۳۵	۰/۱۵۸	۰/۳۵۵	۱۰	عرضی	۴	۲/۴۸	۰/۳۵۵	۱۱۴	α1	عرضی	۴	۲/۴۸	۰/۳۵۵
													۸۲	B1				
۳	۹۵	α1	طولی	۴	۴/۷۵	۰/۷۵۹	۱۱	طولی	۴	۳/۵۲	۰/۵۸۸	۱۰۸	α1	طولی	۴	۳/۵۲	۰/۵۸۸	
												۹۵	B1					
	۹۲	α1	عرضی	۴	۴/۴۶	۰/۵۴۹	۰/۳۶۶	۱۱	عرضی	۴	۲/۱۹	۰/۳۶۶	۱۰۲	α1	عرضی	۴	۲/۱۹	۰/۳۶۶
													۸۶	B1				
۴	۸۵	α1	طولی	۴	۳/۷۴	۰/۵۳۷	۱۲	طولی	۴	۱/۱۵	۰/۱۵۸	۹۳	α1	طولی	۴	۱/۱۵	۰/۱۵۸	
												۸۵	B1					
	۷۳	α1	عرضی	۴	۴/۴۱	۰/۵۰۴	۰/۳۲۷	۱۲	عرضی	۴	۲/۱۳	۰/۳۲۷	۹۷	α1	عرضی	۴	۲/۱۳	۰/۳۲۷
													۱۱۴	B1				
۵	۸۲	α1	طولی	۴	۱/۲۷	۰/۱۸۵	۱۳	طولی	۴	۲/۷۶	۰/۴۰۳	۹۷	α1	طولی	۴	۲/۷۶	۰/۴۰۳	
												۸۲	B1					
	۹۳	α1	عرضی	۴	۱/۷۱	۰/۲۴۹	۰/۴۶۵	۱۳	عرضی	۴	۳/۱۴	۰/۴۶۵	۸۹	α1	عرضی	۴	۳/۱۴	۰/۴۶۵
													۹۳	B1				
۶	۷۸	α1	طولی	۴	۴/۲۲	۰/۴۷	۱۴	طولی	۴	۳/۹۷	۰/۹۰۸	۹۲	α1	طولی	۴	۳/۹۷	۰/۹۰۸	
												۷۸	B1					
	۸۶	α1	عرضی	۴	۲/۴۹	۰/۳۴	۰/۴۴۴	۱۴	عرضی	۴	۳/۱۲	۰/۴۴۴	۹۳	α1	عرضی	۴	۳/۱۲	۰/۴۴۴
													۸۶	B1				
۷	۸۵	α1	طولی	۴	۴/۰۲	۰/۴۴۳	۱۵	طولی	۴	۱/۱۴	۰/۱۳۵	۹۱	α1	طولی	۴	۱/۱۴	۰/۱۳۵	
												۸۵	B1					
	۹۳	α1	عرضی	۴	۲/۷۲	۰/۳۶۵	۰/۲۴۷	۱۵	عرضی	۴	۱/۵۸	۰/۲۴۷	۹۹	α1	عرضی	۴	۱/۵۸	۰/۲۴۷
													۹۳	B1				
۸	۹۱	α1	طولی	۴	۳/۹۲	۰/۵۰۴	۱۶	طولی	۴	۲/۵۹	۰/۴۰۲	۱۱۰	α1	طولی	۴	۲/۵۹	۰/۴۰۲	
												۹۱	B1					
	۸۵	α1	عرضی	۴	۳/۲۴	۰/۴۸۱	۰/۴۶۹	۱۶	عرضی	۴	۲/۸۳	۰/۴۶۹	۹۶	α1	عرضی	۴	۲/۸۳	۰/۴۶۹
													۸۵	B1				

سپس این مدل برای محاسبه تابع هدف در بهینه‌سازی الگوریتم ذرات به کار گرفته می‌شود تا بر اساس پیش‌بینی آن، بهترین مقادیر ورودی‌ها تعیین گردد. در ادامه با استفاده از مقادیر جدول (۴) و بیش از ۶۰۰ بار تکرار، مقادیر بهینه پارامترهای توان، سرعت، ضخامت، α_1 ، α_2 ، β_1 ، β_2 ، R_a و R_z برای برش سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به کمک لیزر دی اکسید کربن به دست آمد [شکل (۴)]. مقادیر برای پارامترهای برش آلیاژ اینکونل با لیزر دی اکسید کربن در جدول (۵) آمده است. نتایج نشان داد که

هنگامی که توان لیزر ۱۷۱۴/۲ وات، سرعت برش ۱۳۸۲/۹ میلی‌متر بر دقیقه و ضخامت قطعه ۰/۸ میلی‌متر باشد، بهترین کیفیت برای برش ورق سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با دستگاه برش لیزر دی اکسیدکربن به‌دست می‌آید. تابع بهینه‌سازی به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$\text{objective_function} = \sum_{\theta \in \{\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2\}} \left| \theta - \frac{\pi}{2} \right| + (R_{z_1} + R_{z_2} + R_{\alpha_1} + R_{\alpha_2}) \quad (1)$$

هدف از بهینه‌سازی، مینیمم‌سازی مقدار تابع هدف هست که به‌صورت مجموع اختلاف زوایای α_1 ، α_2 ، β_1 و β_2 از $\pi/2$ برحسب رادیان و مقادیر معیارهای زبری شامل R_a و R_z طولی و عرضی تعریف شده است. با توجه به این که روش بهینه‌سازی ذرات تضمینی برای کشف بهینه سراسری ندارد و احتمال همگرا شدن در بهینه‌های محلی نیز در آن وجود دارد نمی‌توان به‌طور قطع ادعا کرد که در مسئله پیش‌رو بهینه سراسری به‌دست آمده است اما با توجه به محدودیت‌های اعمال شده بر روی بازه‌های مقادیر ورودی (توان و فشار و ...) و با توجه به اینکه این الگوریتم مبتنی بر جمعیت است شانس قابل توجهی در فرار از بهینه محلی و دستیابی به بهینه سراسری دارد، امید است که تابع هدف در این بازه‌های معنی‌دار محب باشد و الگوریتم بهینه‌سازی ذرات به بهینه سراسری همگرا شده باشد.



شکل (۴): محاسبه مقدار بهینه با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات پیوسته

Figure (4): Calculation of the optimal value using the continuous particle swarm algorithm

Table (5): Optimal results of parameter values using continuous particle swarm algorithm for cutting Inconel 718 super alloy sheet with carbon dioxide laser cutting machine

جدول (۵): نتایج بهینه مقادیر پارامترها با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات پیوسته برای برش ورق سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با دستگاه برش لیزر دی اکسید کربن

توان (W)	سرعت (mm/min)	ضخامت (mm)	دستگاه اندازه‌گیری ویدئو (VMM)		آزمون اندازه‌گیری زبری سطح		
			موقعیت	درجه	Zone	R_a μm	R_z μm
۱۷۱۴/۲	۱۳۸۲/۹	۰/۸	طولی	α_1	۱۰۰	۰/۱۳۱	۱/۰۲
				β_1			
			عرضی	α_2	۹۷	۰/۳۱۵	۱/۸۱
				β_2			

۴-۲- راستی آزمایشی نتایج به دست آمده از الگوریتم ازدحام ذرات پیوسته

به منظور راستی آزمایشی نتایج به دست آمده برای مقادیر بهینه برای پارامترهای برش آلیاژ اینکونل با لیزر دی اکسید کربن با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات پیوسته، یک نمونه با مقادیر به دست آمده در جدول (۴) برش داده شد و سپس کنترل ابعادی شد. نتایج این آزمایش تجربی بسیار نزدیک به مقادیر بهینه از الگوریتم ازدحام ذرات پیوسته است [جدول (۶)].

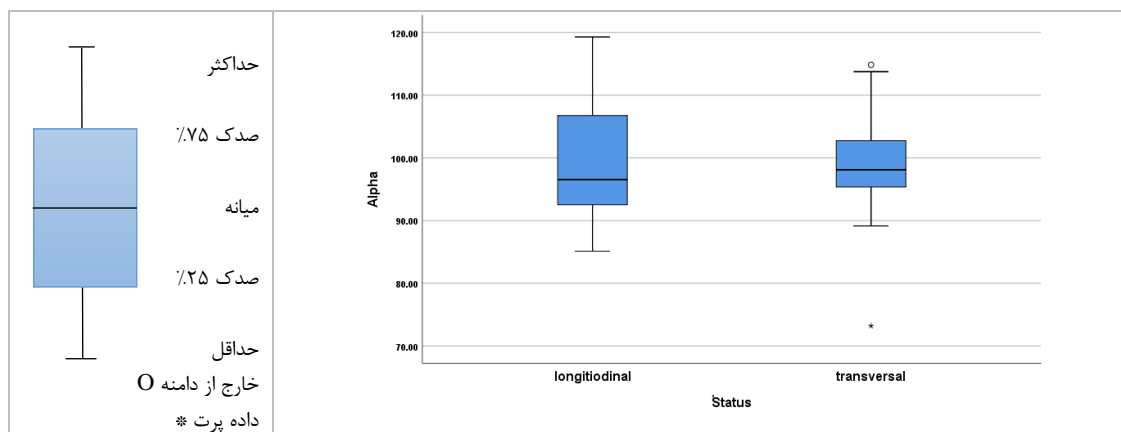
Table (6): Results of parameter values Optimal values obtained from the continuous particle swarm algorithm for the sample sent for verification

جدول (۶): نتایج مقادیر پارامترها مقادیر بهینه به دست آمده از الگوریتم ازدحام ذرات پیوسته برای نمونه ارسال شده برای راستی آزمایشی

توان (W)	سرعت (mm/min)	ضخامت (mm)	دستگاه اندازه گیری ویدئو (VMM)		آزمون اندازه گیری زبری سطح		
			موقعیت	درجه	Zone	R _a μm	R _z μm
۱۷۱۴/۲	۱۳۸۲/۹	۰/۸	α _۱	۱۰۱	طولی	۰/۱۳۸	۱/۰۷
			β _۱	۸۵			
			α _۲	۹۹	عرضی	۰/۲۷۵	۱/۷۶
			β _۲	۹۳			

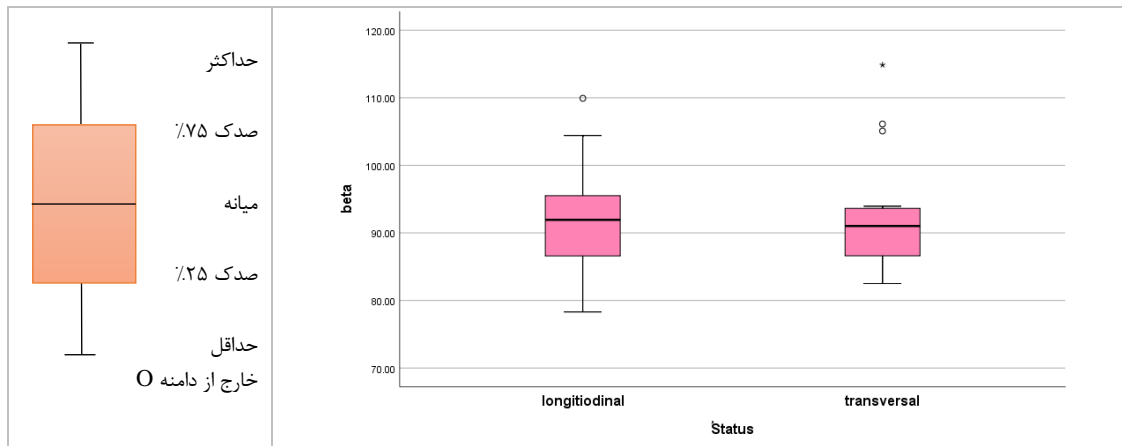
۵-۲- تحلیل آماری نتایج

در این مطالعه ۱۶ نمونه در دو حالت برش طولی و عرضی مورد مطالعه قرار گرفت. متغیرهای آلفا و بتا با توان ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ وات تحت اندازه گیری قرار گرفتند. در حالت کلی، میانگین متغیر آلفا در دو حالت طولی و عرضی به ترتیب ۹/۴۴ ± ۹۸/۷۷ و ۹/۷۲ ± ۹۸/۷۴ بوده و طبق آزمون T-test، تفاوت معنی دار میانگین آلفا در حال طولی و عرضی اختلاف معنی دار نداشت (P=۰/۹۹) [شکل (۵)]. میانگین متغیر بتا در دو حالت طولی و عرضی به ترتیب ۷/۹۷ ± ۹۸/۷۴ بوده و برابر آزمون مذکور، تفاوت آلفا در دو حالت برش اختلاف معنی دار نداشت (P=۰/۸۷) [شکل (۶)].



شکل (۵): میانه، دامنه و صدک ۲۵-۷۵ درصد متغیر آلفا در دو حالت برش طولی و عرضی

Figure (5): Middle, amplitude and percentile of 25-25% of alpha variable in both longitudinal and transversal shear modes



شکل (۶): دامنه و صدک ۷۵-۲۵ درصد متغیر بتا در دو حالت برش طولی و عرضی

Figure (6): Mean, amplitude and percentile of 25-75% of beta variable in both longitudinal and transverse shear modes

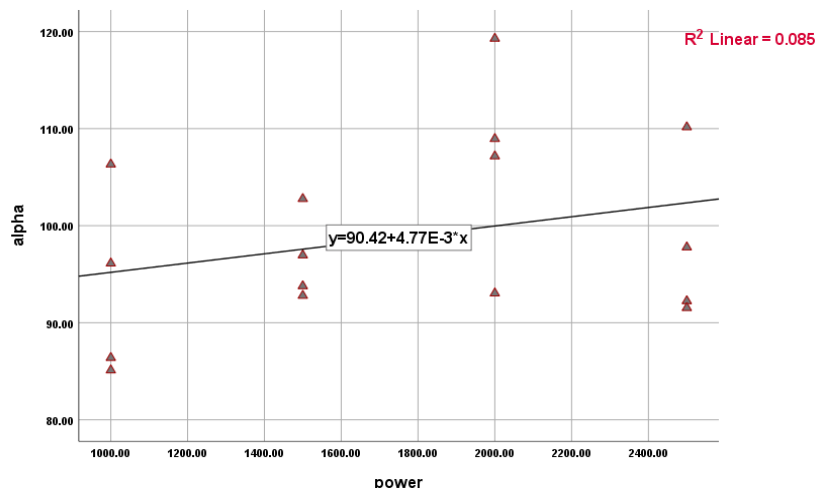
۲-۵-۱- تغییرات آلفا و بتا با تغییرات توان در دو حالت برش طولی و عرضی

در جدول (۷)، میانگین و انحراف معیار دو متغیر آلفا و بتا در سطح توان ورودی ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ وات نشان داده شده است. برابر جدول مذکور، در حالت برش طولی، متغیر آلفا با افزایش توان تا سطح ۲۰۰۰ وات افزایش یافت ولی در سطح توان ورودی ۲۵۰۰ وات مقدار آلفا نسبت به قبل کاهش داشت ولی تغییرات متغیر آلفا بر حسب توان ورودی تفاوت معنی‌دار پیدا نکرد ($P=0/204$). ولی متغیر بتا با افزایش توان ورودی به‌طور معنی‌دار افزایش پیدا کرد ($P=0/026$). در حالت برش عرضی، با افزایش توان ورودی، متغیر بتا تا توان ۲۰۰۰ وات افزایش و در سطح توان ۲۵۰۰ کاهش یافته و تغییرات متغیر آلفا بر حسب توان ورودی اختلاف معنی‌دار پیدا نکرد ($P=0/043$). متغیر بتا نیز در سطح برش عرضی با افزایش توان ورودی از ۱۰۰۰ وات به ۱۵۰۰ وات کاهش یافته و سپس با افزایش توان به ۲۰۰۰ وات و ۲۵۰۰ وات مقدار این متغیر نیز افزایش پیدا کرد ولی تغییرات زاویه مذکور بر حسب توان ورودی تفاوت معنی‌دار پیدا نکرد ($P=0/44$). بررسی تغییرات دو متغیر آلفا و بتا با افزایش توان ورودی نشان داد در برش عرضی، بین توان ورودی و متغیر آلفا یک همبستگی مستقیم به میزان $0/29$ وجود دارد ولی این همبستگی طبق آزمون همبستگی پیرسون معنی‌دار نبود ($P=0/27$) [شکل‌های (۷) و (۸)]. در حالت برش عرضی بین افزایش توان و تغییرات متغیر آلفا یک همبستگی مستقیم به میزان $0/04$ مشاهده شد که از نظر آماری معنی‌دار نبود ($P=0/88$) [شکل (۹)]. برابر نتایج حاصله، در حالت برش طولی بین توان ورودی و تغییرات متغیر بتا یک همبستگی مستقیم به میزان $0/22$ مشاهده شد ولی طبق آزمون مذکور، معنی‌دار نبود ($P=0/42$). همچنین بین توان ورودی و تغییرات متغیر بتا یک همبستگی مستقیم به میزان $0/43$ مشاهده شد ولی معنی‌دار نبود ($P=0/094$) [شکل (۱۰)].

Table (7): Mean and standard deviation of two alpha and beta variables in both longitudinal and transverse shear modes with increasing power

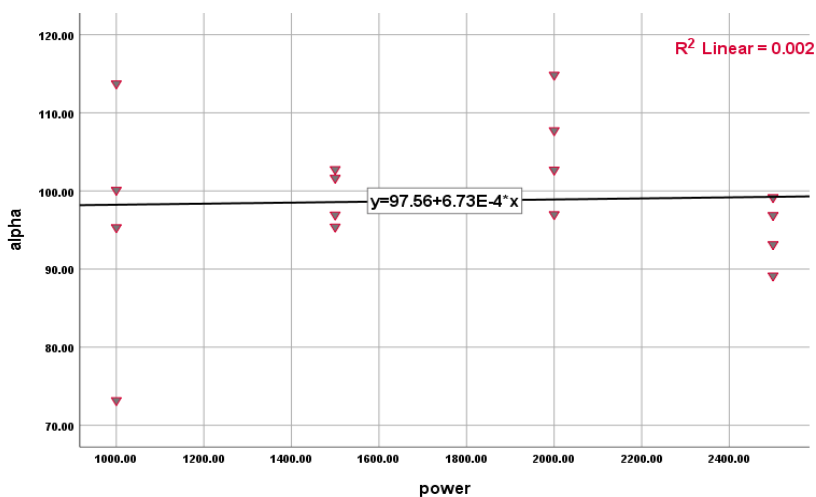
جدول (۷): میانگین و انحراف معیار دو متغیر آلفا و بتا در دو حالت برش طولی و عرضی با افزایش توان

حالت برش	توان (W)	متغیر آلفا		متغیر بتا	
		میانگین	P	میانگین	P
طولی	۱۰۰۰	$93/49 \pm 9/87$	0/204	$95/72 \pm 2/88$	0/026
	۱۵۰۰	$96/57 \pm 4/49$		$84/46 \pm 5/41$	
	۲۰۰۰	$107/1 \pm 10/8$		$89/67 \pm 4/09$	
	۲۵۰۰	$97/93 \pm 6/18$		$99 \pm 9/84$	
عرضی	۱۰۰۰	$95/6 \pm 16/85$	0/403	$88/16 \pm 4/61$	0/44
	۱۵۰۰	$99/2 \pm 3/57$		$61 \pm 3/42$	
	۲۰۰۰	$105/58 \pm 7/85$		$93/11 \pm 14/68$	
	۲۵۰۰	$94/59 \pm 3/4$		$98/59 \pm 8/34$	



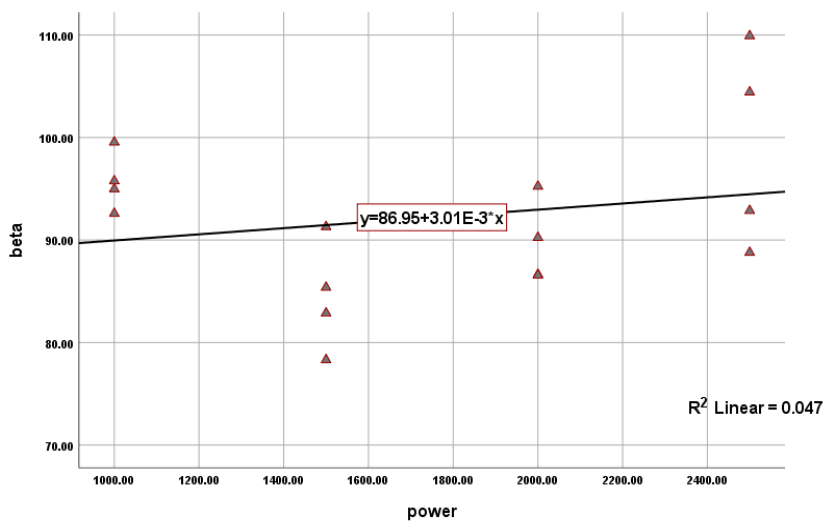
شکل (۷): همبستگی بین توان ورودی (وات) و متغیر آلفا در حالت برش طولی

Figure (7): Correlation between input power (watts) and alpha variable in longitudinal shear mode



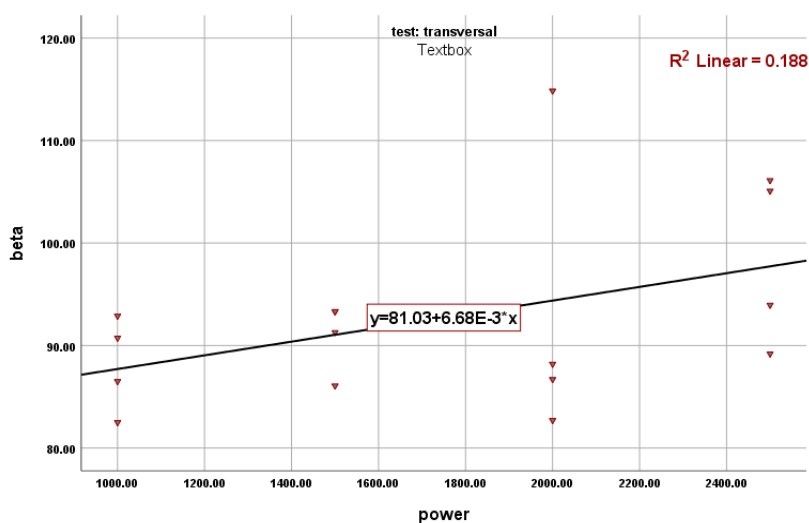
شکل (۸): همبستگی بین توان ورودی (وات) و متغیر آلفا در حالت برش عرضی

Figure (8): Correlation between input power (watts) and alpha variable in cross section



شکل (۹): همبستگی بین توان ورودی (وات) و متغیر بتا در حالت برش طولی

Figure (9): Correlation between input power (watts) and beta variable in longitudinal shear mode



شکل (۱۰): همبستگی بین توان ورودی (وات) و تغییرات متغیر بتا در حالت برش عرضی
Figure (10): Correlation between input power (watts) and changes in beta variable in cross-section

۲-۶- پژوهش‌های مشابه

در سال ۲۰۱۸ کومار و همکاران [۲۳] به کمک آنالیز رگرسیون خطی و بهینه سازی ازدحام ذرات به ارزیابی کیفی هندسه برش‌های لیزر ND:YAG پرداختند. نتایج ایشان نشان می‌دهد بهترین کیفیت در مقادیر پایین مقدار لیزر اتفاق می‌افتد. در سال ۲۰۱۹ کومار و همکاران [۲۴] در تحقیق جداگانه به بررسی و تخمین مقادیر بهینه اینکونل ۷۱۸ به کمک الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک پرداختند که رنج مناسب متغیرها در لیزرهای برش ND:YAG با حداکثر توان ۳۰۰ وات برای ضخامت‌های یک میلی‌متر ارائه نمودند. مقایسه آماری نتایج مقاله‌های ارائه شده با نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد پاسخ‌های به‌دست آمده در رنج پژوهش‌های مقاله‌های مشابه است. همچنین ترکش و همکاران در مرجع [۲۵] بهینه‌سازی مدل المان محدود و در مرجع [۲۶] بهینه‌سازی پارامترهای لیزر را به روش مشابه با استفاده از مدل‌سازی با شبکه عصبی و بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک انجام دادند که نتایج نزدیکی نسبت به آزمایشات عملی در برداشت.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تعداد ۱۶ عدد ورق سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ که مشخصات آنها در جدول (۳) آمده است، با لیزر دی اکسید کربن برش داده شد. آزمایش اندازه‌گیری زبری سطح بر اساس استاندارد (2010) DIN EN ISO 4287 و آزمایش کنترل ابعادی با دستگاه اندازه‌گیری ابعادی ویدئویی انجام پذیرفت. در این بررسی در گام بعدی شرایط بهینه برای برش به کمک الگوریتم ازدحام ذرات به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده برای مقادیر بهینه برای پارامترهای برش آلیاژ اینکونل با لیزر دی اکسید کربن با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات پیوسته توسط یک آزمایش تجربی راستی آزمایی شد. نتایج این آزمایش تجربی بسیار نزدیک به مقادیر بهینه از الگوریتم ازدحام ذرات پیوسته سیار است. نتایج نشان داد که هنگامی که توان لیزر ۱۷۱۴/۲ وات، سرعت برش ۱۳۸۲/۹ میلی‌متر بر دقیقه و ضخامت قطعه ۰/۸ میلی‌متر باشد، بهترین کیفیت برای برش ورق سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با دستگاه برش لیزر دی اکسید کربن به‌دست می‌آید. این نتایج می‌تواند برای صنعتگران و پژوهشگرانی که در زمینه برشکاری با لیزر فعالیت می‌کنند، مفید واقع شود.

جدول نمادهای لاتین			
انحراف میانگین حسابی پروفیل ارزیابی شده (μm)	R_a	درجه (زاویه)	Degree
حداکثر ارتفاع پروفیل (μm)	R_z	توان (W)	Power
طول ارزیابی (μm)	L_t	سرعت (mm/min)	Velocity
متغیر زاویه	β و α	ضخامت (mm)	Thickness

References

مراجع

- [1] P. Mahadeo, U. Shanker, "Metal forming and machining processes", Modeling of Metal Forming and Machining Processes, Part of the Engineering Materials and Processes book series, pp. 1-32, 2008 (doi: 10.1007/978-1-84800-189-3_1).
- [2] J.M. Patel, D.M. Patel, "Parametric investigation in co2 laser cutting quality of hardox-400 materials", International Journal of Engineering Science and Technology, vol. 3 no. 7, pp. 5979-5984, July 2011.
- [3] M.J. Grepl, R. Petru, L. Cep, L. Petrkovska, T. Zlamal, "The effect of process parameters on result quality of cut during laser cutting of material", Annals of DAAAM for 2012 & proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium: Zadar, 2012 - 10 - 24/27 vol. 23041382, no. 1 of Annals of DAAAM & Proceedings, ISSN 2304-1382, pp. 1035-1038, 2012.
- [4] A. Mavi, S. Ozden, G. Uzu, "Optimization and predictive modelling on cutting force of duplex stainless steel using artificial neural network", International Journal of Mechanical And Production Engineering, vol. 5, no. 7, pp. 81-85, 2017.
- [5] B.S. Yilbas, "The laser cutting process; Analysis and applications", 1st Edition, Elsevier, 2017 (ISBN: 9780128129821).
- [6] S. Genna, E. Menna, G. Rubino, V. Tagliaferri, "Experimental investigation of industrial laser cutting: The effect of the material selection and the process parameters on the kerf quality", Applied Sciences, vol. 10, no. 14, Article Number: 4956, 2020 (doi:10.3390/app10144956).
- [7] M. Madić, P. Janković, M. Radovanović, D. Petković, "Analysis and optimization of surface roughness in co2 laser cutting of P265GH steel", vol. 1, no. 1, pp. 436-439, 2019 (doi: 10.24874/PES01.01.057).
- [8] Y.D. Pawar, K.H. Inamdar, "Optimization of quality characteristics of laser cutting", Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, vol. 2, no. 6, pp. 1959-1963, 2015.
- [9] P.V. Argade, R.R. Arakerimath, "Parametric investigations on CO2 laser cutting of AISI 409 to optimize process parameters by taguchi method", International Journal of Engineering Trends and Technology, vol. 37, no. 6, pp. 3311-316, 2016.
- [10] M. Moradi, O. Mehrabi, T. Azdast, K.Y. Benyounis, "The effect of low power co2 laser cutting process parameters on polycarbonate cut quality produced by injection molding", Modares Mechanical Engineering, vol. 17, no. 2, pp. 93-100, 2017 (In Persian).
- [11] M. Madić, M.M. Radovanović, "An artificial intelligence approach for the prediction of surface roughness in CO2 laser cutting", Journal of Engineering Science and Technology, vol. 7, no. 6, pp. 679 – 689, 2012.
- [12] 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, vol. 15, no. 13, pp. 68-72, 2016 (In Persian).
- [13] A. Hascalik, M. Ay, "CO2 laser cut quality of Inconel 718 nickel- based superalloy", Optics and Laser Technology, vol. 48, pp.554-564, 2013 (doi: 10.1016/j.optlastec.2012.11.003).
- [14] A.A. Khar'kov, A.V. Shakhmatov, E.L. Gyulikhandanov, E. Alekseeva, "Comparative analysis of corrosion-resistant alloys inconel 718 and ÉP718", Chemical and Petroleum Engineering, vol. 54, no. 10, pp. 44-48, 2018 (doi: 10.1007/s10556-019-00546-4).
- [15] B.T.H.T. Baharudin, M.R. Ibrahim, N. Ismail, Z. Leman, M.K.A. Ariffin, D.L. Majid, "Experimental investigation of HSS face milling to AL6061 using taguchi method", Procedia Engineering, vol. 50, pp.933 – 941, 2012 (doi: 10.1016/j.proeng.2012.10.101).
- [16] Z. Wang, D. Zhou, Q. Deng, G. Chen, W. Xie, "The microstructure and mechanical properties of inconel 718 fine grain ring forging", Proceeding of the Superalloy 718 and Derivatives, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, Oct. 2010.(doi: 10.1002/9781118495223.CH26).
- [17] M. Lotfi-Forushani, B. Karimi, G. Shahgholian, "Optimal PID controller tuning for multivariable aircraft longitudinal autopilot based on particle swarm optimization algorithm", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 3, no. 9, pp. 41-50, June 2012 (in Persian).

- [18] S. Nabavi, N. Osati-Eraghi, J. Akbari-Torkestani, "Wireless sensor networks routing using clustering based on multi-objective particle swarm optimization algorithm", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 12, no. 47, pp. 29-47, Dec. 2021 (doi: 20.1001.1.23223871.1400.12.3.3.3).
- [19] M. Nazarpour, N. Nezafati, S. Shokuhyar, "Detection of attacks and anomalies in the internet of things system using neural networks based on training with PSO and TLBO algorithms", *Signal Processing and Renewable Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 81-94, Autumn 2020.
- [20] G. Shahgholian, M. Mahdavian, M. Noorani-Kalteh, M. Janghorbani, "Design of a new IPFC-based damping neurocontrol for enhancing stability of a power system using particle swarm optimization", *International Journal of Smart Electrical Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 73-78, Spring 2014.
- [21] I. Koochi, G.Z. Voicu, "Optimizing particle swarm optimization algorithm", *Proceeding of the IEEE/CCECE-E*, pp. 1-5, Toronto, ON, Canada, May 2014 (doi: 10.1109/CCECE.2014.6901057).
- [22] E. García-Gonzalo, J.L. Fernández-Martínez, "A brief historical review of particle swarm optimization (PSO)", *Journal of Bioinformatics and intelligent Control*, vol. 1, no. 1, pp. 3-16, June 2012 (doi: 10.11-66/jbic.2012.1002).
- [23] R.K. Shrivastava, A.K. Pandey, "Geometrical quality evaluation in laser cutting of Inconel-718 sheet by using Taguchi based regression analysis and particle swarm optimization", *Infrared Physics and Technology*, vol. 89, pp. 369-380, Mar. 2018 (doi: 10.1016/j.infrared.2018.01.028).
- [24] P.K. Shrivastava, B. Singh, Y. Shrivastava, "Prediction of optimal cut quality characteristic of Inconel 718 sheet by genetic algorithm and particle swarm optimization", *Journal of Laser Applications*, vol. 31, no. 2, Article Number: 022016, 2019 (doi: 10.2351/1.5090154).
- [25] R. Tarkesh-Esfahani, S. Golabi, Z. Zojaji, "Optimization of finite element model of laser forming in circular path using genetic algorithms and ANFIS", *Soft Computing*, vol. 20, no. 5, pp. 2031-2045, 2016 (doi: 10.1007/S00500-015-1622-8).
- [26] R. Tarkesh-Esfahani, S. Golabi, Z. Zojaji, "Optimization of laser forming parameters using genetic algorithms", *Journal of Advanced Materials and Processing*, vol. 7, no. 1, pp. 52-60, Winter 2019.

زیر نویس‌ها

1. Artificial intelligence
2. Artificial neural networks
3. Kerf taper ratio
4. Particle swarm algorithm
5. Taguchi method
6. <https://www.bystronic.com/en/>
7. Video measuring machines