ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2021; 21(1):11-18

Investigation into Effective Parameters on the Kerf Width of Stainless Steel 316 with Analysis of Variance in Fiber Laser Cutting Process

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Farshidianfar A.*[1] PhD,
Marandi S.[1] BSc,
Farshidianfar M.H.[1] PhD,
Nabavi S.F.[1] MSc,

How to cite this article
Farshidianfar A, Marandi S, Farshidianfar M H, Nabavi S F. Investigation into effective parameters on the kerf width of stainless steel 316 with analysis of variance in fiber laser cutting process. Modares Mechanical Engineering. 2021; 21(1):11-18.

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

Correspondence
Address: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.
Phone: -
Fax: -
farshid@um.ac.ir

Article History
Received: October 08, 2020
Accepted: November 07, 2020
ePublished: January 18, 2021

ABSTRACT

Kerf width (cutting width) is an important quality parameter in the laser cutting process, and if it is less, means higher cutting accuracy and lower cost of materials. In this study, using a fiber laser-cutting machine, which is one of the new generation lasers, the effect of all parameters affecting the kerf width has been investigated. These parameters include laser power (450 to 750 watts), cutting speed (30 to 130 mm/s), focal point position (5 to +5 mm), nozzle standoff (0.6 to 2.5 mm) and gas pressure (1.2 to 1.8 bar), for the cut of stainless steel 316L sheet with a thickness of 0.8 mm. After measuring the kerf width with a special imaging system and analyzing the results with ANOVA, it was found that laser power and gas pressure were directly related to the kerf width and the cutting speed and nozzle standoff were inversely related to the kerf width. Laser focal point position was also determined as the most effective parameter in the formation of the kerf width, which should be on the surface to minimize the kerf width. In this study, it was shown that with the correct adjustment of the parameters, material consumption and cutting accuracy are improved up to 70%. In addition, by using linear regression, the model of kerf width changes with respect to various parameters has been obtained and by comparing its response with the experimental results, acceptable model accuracy has been observed.

Keywords Laser Cutting, Fiber Laser, Kerf Width, Stainless Steel 316L, Focal Position

CITATION LINKS

[1] Additive manufacturing of stellite 6 superalloy by direct laser metal deposition–Part 1: Effects of laser power and focal plane position. [2] Epitaxial laser deposition of single crystal Ni-based superalloys: repair of complex geometry. [3] A study on the laser tube bending process: Effects of the irradiating length and the number of irradiating passes. [4] Fabrication of saddle-shaped surfaces by a laser forming process: An experimental and statistical investigation. [5] Nd: YAG laser micro-welding of ultra-thin FeCo–V magnetic alloy: optimization of weld strength. [6] The Characteristics of Laser Welding of a Thin Aluminum Tab and Steel Battery Case for Lithium-Ion Battery. [7] A comparative study of laser surface hardening of AISI 410 and 420 martensitic stainless steels by using diode laser. [8] Laser material processing. [9] Laser processing of engineering materials... [10] Investigations into fibre laser cutting. [11] Fiber Lasers: Basics, Technology, and Applications. [12] www.esabna.com [13] Experimental investigations on fusion cutting stainless steel with fiber and CO2 laser beams. [14] Laser cutting guide for manufacturing. [15] Cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd: YAG laser. [16] Fuzzy logic based modeling of co2 laser cutting for stainless steel sheet. [17] Multi-objective optimization of Nd: YAG laser cutting of nickel-based superalloy... [18] Optimization of kerf quality during pulsed laser cutting of aluminium alloy sheet. [19] Taguchi based fuzzy logic optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of Duralumin sheet. [20] Multiple quality optimization in laser cutting of difficult-to-laser-cut material using grey–fuzzy methodology. [21] Fuzzy and regression modeling for Nd: YAG laser cutting of Ti-6Al-4V superalloy sheet. [22] Characterization of the melt removal rate in laser cutting of thick-section stainless steel. [23] Optimization of parameters for fibre laser cutting of a 10 mm stainless steel plate. [24] Experimental and parametric evaluation of cut quality characteristics in CO2 laser cutting of polystyrene. [25] The effect of low power CO2 laser cutting process parameters on polycarbonate cut quality produced by injection molding. [26] Post-Processing of FDM 3D-Printed Polylactic Acid Parts... [27] Experimental investigation, modelling and comparison of kerfwidth in laser cutting of GFRP. [28] High power diode laser surface hardening of AISI 4130; statistical modelling and optimization.

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی پارامترهای مؤثر بر عرض شیار فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ همراه با تحلیل واریانسی در فرآیند برش لیزر فایبر

انوشیروان فرشیدیان‌فر* PhD
استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
سعید مرندی BSc
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران
محمدحسین فرشیدیان‌فر PhD
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران
سیده فاطمه نبوی MSc
دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

چکیده
عرض شیار برش (عرض کِرف(Kerf)) یک پارامتر کیفی مهم در فرآیند برشکاری با لیزر به‌شمار می‌رود و کاهش آن به معنای دقت بالاتر برش و هزینه کمتر مواد مصرفی است. ازاین‌رو در این تحقیق با بهره‌گیری از دستگاه برش لیزر فایبر ۷۵۰ وات که در دسته لیزرهای نسل جدید قرار می‌گیرد، اثر تمام پارامترهای تأثیرگذار بر عرض شیار برش شامل توان لیزر (در بازه ۴۵۰ تا ۷۵۰ وات)، سرعت برش (در بازه ۳۰ تا ۱۳۰ میلی‌متر بر ثانیه)، موقعیت نقطه کانونی (در بازه ۵- تا ۵+ میلی‌متر)، فاصله نازل تا قطعه‌کار (در بازه ۰/۶ تا ۲/۵ میلی‌متر) و فشار گاز (در بازه ۱/۲ تا ۱/۸ بار)، برای برش ورق فولاد زنگ‌نزن 316L با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر بررسی شده است. پس از اندازه‌گیری عرض شیار با سیستم عکس‌برداری ویژه و تحلیل نتایج با ANOVA، مشخص شد توان لیزر و فشار گاز رابطه مستقیم با عرض شیار برش دارد و نیز سرعت برش و فاصله نازل تا قطعه کار رابطه معکوس با عرض شیار دارد. موقعیت نقطه کانونی لیزر نیز به‌عنوان تأثیرگذارترین پارامتر در شکل‌گیری عرض شیار تعیین شد که بهتر است روی سطح قرار داشته باشد تا عرض شیار کمینه شود. در این تحقیق نشان داده شد با تنظیم صحیح پارامترها، مصرف مواد و دقت برشکاری تا ۷۰ درصد بهبود می‌یابد. همچنین با بهره‌گیری از رگرسیون، مدل تغییرات عرض شیار نسبت به پارامترهای مختلف به‌دست آمد و از مقایسه پاسخ آن با نتایج آزمایشگاهی دقت قابل‌قبول مدل مشاهده شد.

کلیدواژه‌ها: برشکاری لیزر، لیزر فایبر، عرض شیار برش، فولاد زنگ‌نزن 316L ، موقعیت نقطه کانونی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۷
*نویسنده مسئول: farshid@um.ac.ir

۱- مقدمه
امروزه لیزر تبدیل به یک راه‌حل جذاب برای صنایع مختلف شده است و فرآوری مواد به کمک لیزر از علوم روز و کاربردی دنیا محسوب می‌شود. ازجمله کاربردهای این فناوری می‌توان به روکش‌کاری سطوح با سوپرآلیاژها[1]، بازسازی قطعات با ارزشی همچون پره‌های توربین گاز[2]، خم‌کاری و شکل‌دهی لوله‌ها و صفحات فلزی[3,4]، جوشکاری فلزات و آلیاژهای ویژه[5,6] و نیز افزایش سختی فلزات گوناگون از جمله فولادهای مارتنزیتی[7] اشاره کرد. بااین‌حال، برشکاری به کمک لیزر بیش از سایر فرآیندهای لیزری مورد استفاده صنعت است[8]. لیزر در عین حال که انرژی ورودی کمی به قطعه منتقل می‌کند، به دلیل قطر اشعه بسیار کوچک، از چگالی انرژی بسیار بالایی برخوردار است و این ویژگی باعث سرعت و دقت بالا و نیز HAZ بسیار کوچک این فرآیند شده است[9]. به‌طور کلی فیزیکِ پیچیده‌تر این فرآیند نسبت به دیگر فرآیندهای برش و تنوع پارامترهای آن باعث شده تا دستیابی به کیفیت مطلوب در برشکاری با لیزر به‌عنوان یک چالش مطرح شود. ازسوی دیگر لیزرها انواع گوناگونی دارند که در میان لیزرهای صنعتی موجود، لیزر فایبر به‌عنوان نسل جدید لیزرها به‌شمار می‌رود و سرعت، کیفیت و بازده بالاتری دارد[10]. برتری‌های لیزر فایبر سبب شده تا بیشترین سهم از بازار لیزرهای صنعتی را در اختیار داشته باشد[11].

یکی از پارامترهای مهم در فرآیند برش لیزر، عرض کِرف (شیار برش) است. در برش لیزر به شیار ایجاد شده در ضخامت قطعه، کِرف گفته می‌شود که در اثر حرکت نقطه کانونی لیزر روی قطعه ایجاد می‌شود و عرض آن کمی بیش از قطر اشعه است [9]. در برش لیزر همچون دیگر فرآیندهای برش از قبیل واترجت و پلاسما، سعی بر آن است که عرض شیار به حداقل برسد چرا که کم شدن عرض شیار به معنای افزایش دقت برش و کاهش مواد مصرفی است[12]. به‌طورکلی عرض شیار وابسته به پارامترهای متعددی است، به‌جز پارامترهای دستگاه برش، ویژگی‌های قطعه از جمله ضخامت نیز بر عرض برش تأثیرگذار است، به‌گونه‌ای که با افزایش ضخامت قطعه، انرژی مورد نیاز برای برش بیشتر شده و عرض شیار افزایش می‌یابد[13]. همچنین ماده‌ای که ضریب هدایت حرارتی بالاتری داشته باشد، شیار پهن‌تری خواهد داشت[14]. پژوهش‌ها نشان داده است که عرض شیار با نرخ حذف مواد متناسب است و هرچه انرژی بر واحد زمان بیشتری به قطعه داده شود، عرض شیار بیشتر می‌شود، ازاین‌رو در آزمایش‌ها مشاهده شده که با افزایش توان و یا کاهش سرعت، عرض شیار بیشتر می‌شود[15,16].

مطالعات بسیاری به بررسی، بهینه‌سازی و پیش‌بینی این پارامتر پرداخته‌اند که اکثر آن‌ها با استفاده از لیزر پالسی Nd-YAG و برای برش فلزات غیر فولادی مانند آلومینیوم، تیتانیوم و نیکل بوده‌اند[17-21]. در برش ورق سوپر آلیاژ نیکل با لیزر پالسی Nd-YAG، سرعت برش و عرض پالس به‌عنوان مؤثرترین پارامترها در شکل‌گیری شیار برش شناخته شد[17]. در آزمایش‌های دیگری که برای بهینه‌سازی عرض شیار در برش آلومینیوم با لیزر پالسی انجام گرفت، فشار گاز و فرکانس پالس به‌عنوان پارامترهای مؤثرتر معرفی شدند[18,19]. همچنین در یکی از آزمایش‌هایی که به مدل‌سازی انحراف شیار و نرخ برداشت مواد برای برش تیتانیوم با لیزر پالسی انجام گرفته است، نشان داده شده است که افزایش سرعت برش و افزایش عرض پالس، منجر به کاهش انحراف شیار می‌شود و انرژی پالس مهم‌ترین عامل در نرخ برداشت مواد حین فرآیند برش است[21]. در برخی آزمایش‌ها نیز که از لیزر فایبر

پیوسته برای برش فولاد زنگ‌نزن 316L استفاده شده است، تأثیر موقعیت نقطه کانونی بر عرض شیار بررسی شده است[16,22,23]. در یکی از آزمایش‌ها که تحقیق بر عرض شیارِ ورق فولاد زنگ‌نزن با ضخامت ۱۰ میلی‌متر در برش با لیزر فایبر را انجام داده است، نتایج نشان داده که با قرارگیری موقعیت نقطه کانونی در نزدیکی سطح زیرین ورق و نیز افزایش فشار گاز، عرض شیار و نرخ برداشت مواد افزایش می‌یابد[22]. در این تحقیق اثر تغییرات توان و فاصله نازل تا قطعه کار بررسی نشده است و صرفاً برای یک ضخامت به بررسی پارامترها پرداخته شده است. در آزمایش دیگری که مدل‌سازی فازی عرض شیار در برشِ ورق فولاد زنگ‌نزن با استفاده از لیزر CO_2 مورد توجه بوده، قرارگیری نقطه کانونی در سطح بالایی قطعه باعث کاهش عرض شیار شده است[16]. در این تحقیق تأثیر فشار گاز بر عرض شیار متغیر بوده است. همچنین تأثیر تنها دو پارامتر نوع گاز و فشار گاز برای برش فولاد زنگ‌نزن 316L با ضخامت‌های ۱ تا ۲ میلی‌متر با لیزر فایبر در تحقیق دیگری بررسی شده و بر اساس نتایج با افزایش فشار، عرض شیار افزایش یافته است[10].

تحقیقات دیگری نیز در زمینه ارزیابی مشخصه‌های کیفی برش لیزر مواد پلیمری انجام شده است. در یکی از این تحقیقات برای برش ورق پلی‌استرن به ضخامت ۳ میلی‌متر با استفاده از لیزر CO_2، نشان داده شده است که عدم استفاده از گاز حین فرآیند، باعث HAZ بزرگتر، عرض شیار بیشتر (هم شیار بالا و هم شیار پایین) و نیز پلیسه بیشتر در برش این ورق‌ها می‌شود[24]. همچنین در این تحقیق نشان داده شده که افزایش سرعت و کاهش توان، باعث کاهش عرض شیار می‌شود. در مطالعه دیگری نیز اثر دو پارامتر موقعیت نقطه کانونی و فشار گاز بر عرض شیار بالا و پایین، زاویه مخروطی برش و HAZ ایجاد شده در برش ورق پلی‌کربنات به ضخامت ۳/۲ میلی‌متر با استفاده از لیزر کم توان CO_2 بررسی شد که نتایج نشان می‌دهد، کاهش فشار گاز و قرارگیری موقعیت نقطه کانونی در سطح زیرین قطعه باعث افزایش کاهش عرض شیار برش می‌شود[25]. همین نویسنده در آزمایش‌های دیگری، تاثیر موقعیت نقطه کانونی، سرعت و توان لیزر را بر عرض شیار بالا، عرض شیار پایین و زاویه مخروطی شیار در برش صفحات پلی‌لاکتیک اسید به ضخامت ۳/۲ میلی‌متر و با لیزر کم توان CO_2 بررسی کرده است که براساس این آزمایش‌ها، قرارگیری موقعیت نقطه کانونی بر روی سطح، کمترین عرض شیار بالا و کمترین عرض شیار پایین را حاصل کرده است[26].

در تمامی مطالعات اشاره‌شده: ۱-اغلب با بررسی دو یا سه پارامتر، عرض شیار مورد ارزیابی قرار گرفته است، این امر سبب شده که دانش کافی از بررسی هم‌زمان تمام پارامترهای اثرگذار در فرآیند برش لیزر در دسترس نباشد. ۲-در برخی دیگر از مطالعات نیز، آزمایش‌ها از لیزرهایی غیرفایبر استفاده شده است که لیزرهای نسل قدیم به‌شمار می‌روند و ۳-برخی از تحقیقات نیز بر روی غیرفلزات و یا فلزاتی غیر از فولاد زنگ‌نزن 316L انجام شده است.

ازاین‌رو در تحقیق حاضر، با توجه به جایگاه ویژه لیزر فایبر در زمینه فرآوری مواد و نیز کاربرد چشمگیر فولاد زنگ‌نزن 316L در گستره‌ای از تجهیزات مورداستفاده برای صنایع هوافضا، پزشکی، غذایی، نیروگاهی و پالایشگاهی، با بهره‌گیری از دستگاه لیزر برش فایبر ۷۵۰ وات (پیوسته)، تمام پارامترهای تأثیرگذار بر عرض شیار ورق فولاد زنگ‌نزن 316L به ضخامت ۰/۸ میلی‌متر آزمایش و بررسی شده‌اند. این پارامترها عبارت‌اند از: سرعت برش، توان لیزر، فشار گاز، فاصله نازل تا قطعه‌کار و موقعیت نقطه کانونی لیزر. در پایان نیز اثر تغییر ضخامت بر عرض شیار ورق فولاد زنگ‌نزن 316L با برش ضخامت‌های ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر بررسی شده است. لازم به‌ذکر است، باتوجه به این‌که ضخامت صفحاتِ مورد استفاده در این تحقیق، کمتر از ۱ میلی‌متر است و اختلاف قابل توجهی بین عرض شیار بالا و پایین ورق مشاهده نشده است، تنها به اندازه‌گیری عرض شیار بالایی پرداخته شده است. این تحقیق علاوه بر انجام یک آزمایشِ جامع برای بررسی تمام پارامترهای اصلی، از یک سیستم عکس‌برداری ویژه برای افزایش دقت در اندازه‌گیری عرض شیار استفاده کرده و نتایج حاصل را برای مدل‌سازی عرض شیار به‌کار برده است.

در ادامه این تحقیق، ابتدا به معرفی مشخصات دستگاه برش لیزر فایبر و نیز آزمایش‌های تعیین شده برای بررسی پارامترها پرداخته شده، سپس توضیحات مربوط به سیستم اندازه‌گیری عرض شیار ارائه می‌شود. در ادامه، نتایجِ حاصل از آزمایش‌های ارائه‌شده و تأثیر هر پارامتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. درنهایت نیز به مدل‌سازی عرض شیار به کمک رگرسیون و بررسی دقت مدل حاصل پرداخته می‌شود.

۲- آزمایش‌ها

تمام آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه برشِ لیزرِ فایبرِ پیوسته که از حداکثر توان ۷۵۰ وات و بیشینه سرعت ۵۰۰ میلی‌متر بر ثانیه برخوردار است، انجام می‌شود. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، این دستگاه در راستای طول و عرض میز خود می‌تواند برشکاری صفحات را انجام دهد (با فضای کاری ۱/۵ × ۳ متر). در راستای z هم، تنها هد لیزر جابه‌جا می‌شود.

جنس ورق مورد استفاده برای برش لیزر، فولاد زنگ‌نزن 316L است که در ضخامت‌های مختلف تهیه شده است. این فولاد به دلیل

شکل ۱) دستگاه برش لیزر فایبر با توان ۷۵۰ وات

ضریب انتقال حرارت مطلوب و مقاومت در برابر زنگ‌زدگی، کاربردهای متنوعی در صنایع گوناگون ازجمله در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای دارد. امروزه سازندگان معتبر مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای از دستگاه برش لیزر برای برش پورتِ سیالِ صفحات استفاده می‌کنند تا به دقت و سرعت بالاتری در فرآیند خود دست پیدا کنند. همچنین درصد ترکیبات فولاد زنگ‌نزن 316L استفاده شده در جدول ۱ آمده است.

برای انجام آزمایش‌ها و بررسی تغییرات عرض شیار، پنج پارامتر اصلی شامل توان لیزر، سرعت برش، موقعیت نقطه کانونی نسبت به سطح قطعه‌کار، فاصله نازل تا سطح قطعه‌کار و فشار گاز انتخاب شدند. در انتخاب بازه تغییرات برای هر پارامتر سعی شده است تا علاوه بر پوشش گستره قابل توجهی از محدوده تعریف شده برای پارامترها، به مقادیر پیشنهاد شده از طرف سازندگان دستگاه نیز توجه شود. درعین‌حال نویسندگان از تجربیات خود و دیگر کارشناسان فنی که با این دستگاه در ارتباطند استفاده کردند، تا ترکیب پارامترهای مختلف، منجر به برش موفقیت‌آمیز نمونه‌ها شود. همچنین ضخامت ورق انتخابی برای بررسی پارامترهای اشاره‌شده، ۰/۸ میلی‌متر و گاز مورد استفاده حین فرآیند برش، نیتروژن است. در آخرین آزمایش نیز به‌منظور بررسی اثر افزایش ضخامت در تغییرات عرض شیار، از ورق‌های به ضخامت ۰/۵، ۰/۸ و ۱ میلی‌متر استفاده شد. مشخصات تمامی آزمایش‌ها شامل پارامترها و مقادیر انتخابی در جدول ۲ آمده است.

مجموعه آزمایش‌هایی که برای هر پارامتر در نظر گرفته‌شده، بر روی یک ورق و به‌صورت خطوط برش ۵ سانتی‌متری انجام شده است. شکل ۲ نمونه مربوط به آزمایش‌های ٤ تا ۷ که مربوط به تغییرات سرعت است را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است قبل از برش، با استفاده از الکل نمونه‌ها کاملاً تمیز شدند تا هرگونه ذرات و غبارهای آلاینده از روی سطح برداشته شود.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L

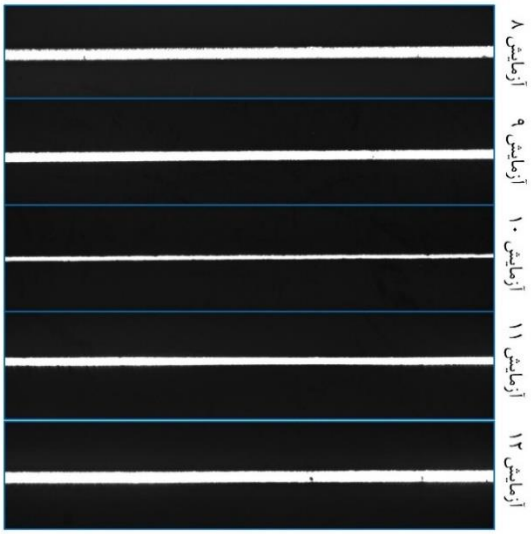
شماره UNS	درصد کربن	درصد کروم	درصد نیکل	درصد مولیبدن
S31603	۰/۰۳	۱۸-۱۶	۱۴-۱۰	۳-۲

شکل ۲) نمونه برش مربوط به آزمون‌های ۴ تا ۷ (تغییرات سرعت برش بر عرض شیار)

۳- اندازه گیری عرض شیار

پس از برش نمونه‌ها بر اساس پارامترهای تعیین‌شده، از یک سیستم عکس‌برداری ویژه برای اندازه‌گیری عرض شیار استفاده شده است. این سیستم شامل دوربین ۱۲ مگاپیکسل Blackfly مدل BFS-U3-120S4M و عدسی ۱۲ مگاپیکسل KOWA مدل LM35FC بوده که مکمل دوربین است و به جلوی آن متصل می‌شود، همچنین از یک فیکسچر برای نگهداری و تنظیم موقعیت دوربین و قطعه‌کار استفاده شده است. سیستم عکس‌برداری توصیف‌شده در شکل ۳-الف نشان داده شده است. پس از عکس‌برداری، تصاویر حاصل به کمک نرم‌افزار Vision Assistant 2018 پردازش و با ابزارهای تعبیه‌شده در این نرم‌افزار، میانگین عرض شیار محاسبه شد. در شکل ۳-ب به‌عنوان نمونه، تصاویر پردازش‌شده از خط برش آزمایش‌های ۸ تا ۱۲ که مربوط به تأثیر موقعیت نقطه کانونی بر عرض شیار است، ملاحظه می‌شود.

(الف)



(ب)

شکل ۳) (الف) سیستم عکس‌برداری و (ب) تصاویر حاصل از عرض شیار در اثر تغییرات موقعیت نقطه کانونی

جدول ۲) پارامترها و مقادیر تعیین‌شده برای آزمایش‌های تحقیق حاضر

شماره آزمایش	توان لیزر(P(W	سرعت برش(V(mm/s	موقعیت کانونی(ds(mm	فاصله نازل(dn(mm	فشار گاز pg(bar)	ضخامت(t(mm
۱	۴۵۰					
۲	۶۰۰	۸۰	-۲/۵	۰/۶	۱/۸	۰/۸
۳	۷۵۰					
۴		۳۰				
۵		۶۰				
۶	۷۵۰	۸۰	-۲/۵	۰/۶	۱/۸	۰/۸
۷		۱۳۰				
۸			-۵			
۹			-۲/۵			
۱۰	۷۵۰	۸۰	۰	۰/۶	۱/۸	۰/۸
۱۱			۲/۵			
۱۲			۵			
۱۳				۰/۶		
۱۴				۱		
۱۵	۷۵۰	۸۰	-۲/۵	۱/۵	۱/۸	۰/۸
۱۶				۲		
۱۷				۲/۵		
۱۸	۷۵۰	۸۰	-۲/۵	۰/۶	۱/۲	۰/۸
۱۹					۱/۸	
۲۰						۰/۵
۲۱	۷۵۰	۸۰	-۲/۵	۰/۶	۱/۸	۰/۸
۲۲						۱

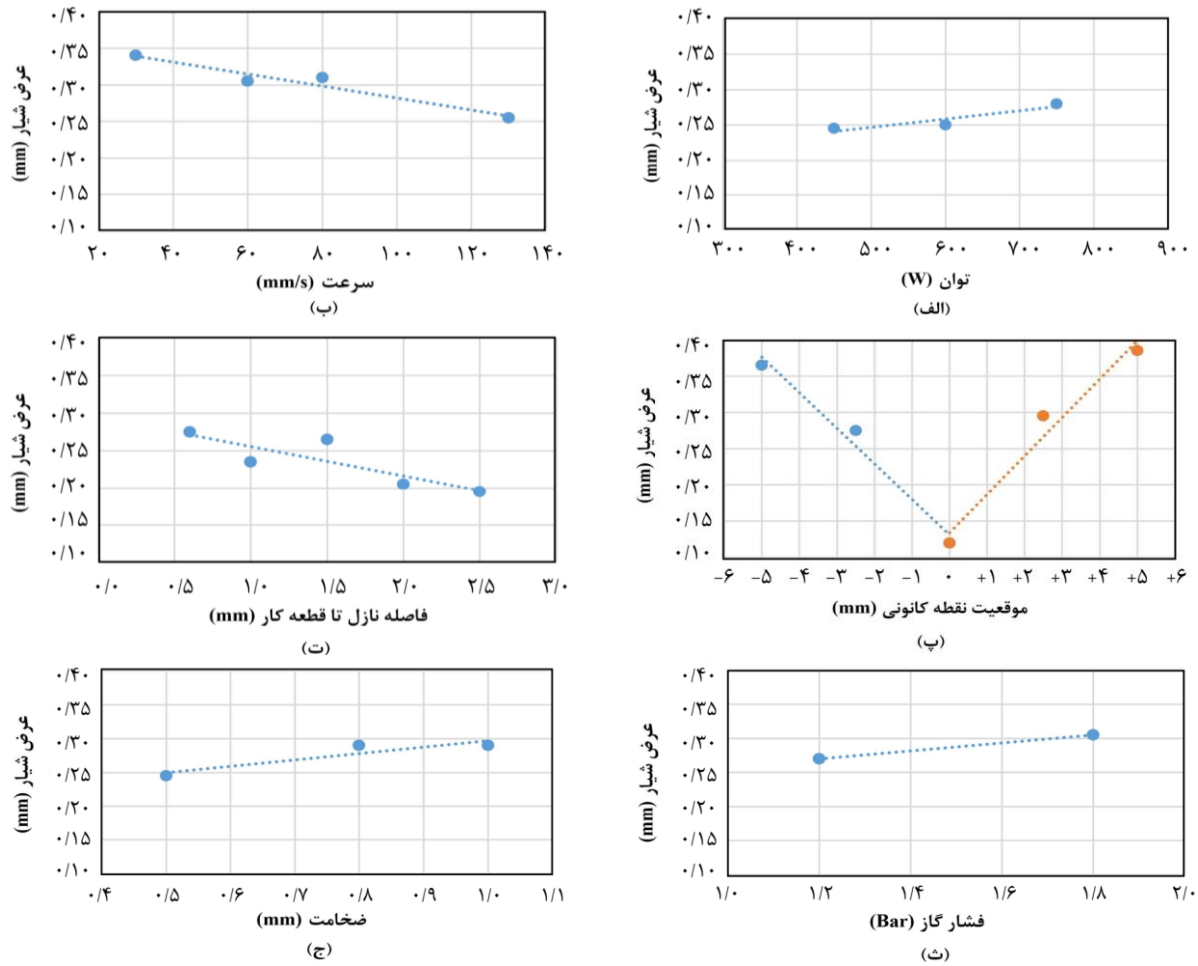
۴- بررسی نتایج

تمامی آزمون‌ها و اندازه‌گیری‌ها مطابق روش‌های اشاره شده در بخش‌های قبل انجام پذیرفت، مقادیر حاصل از عرض شیار اندازه‌گیری شده هر آزمایش، در شکل ۴ نشان داده شده است. تغییرات عرض شیار در برش لیزر فایبر فولاد زنگ‌نزن 316L نسبت به هریک از شش پارامتر: توان لیزر، سرعت برش، موقعیت نقطه کانونی، فاصله نازل تا قطعه‌کار، فشار گاز و ضخامت به ترتیب در شکل‌های ۴-الف تا ۴-ج نمایش داده شده است. در این بخش به تفسیر نتایج حاصل پرداخته می‌شود.

در شکل ۴-الف ملاحظه می‌شود که با افزایش توان، عرض شیار نیز افزایش می‌یابد. ازآنجایی‌که با افزایش توان، انرژی ورودی به قطعه بیشتر می‌شود و ناحیه بیشتری از ماده ذوب می‌شود، می‌توان انتظار داشت که عرض شیار بیشتر شود. سرعت برخلاف توان، رابطه معکوس با عرض شیار دارد. در شکل ۴-ب نشان داده شده که با افزایش سرعت، عرض شیار کاهش می‌یابد. علت آن کاهش زمان برهم‌کنش اشعه و قطعه است که باعث جذب انرژی کمتر در قطعه می‌شود. به‌طورکلی، با توجه به اهمیت زمان در تولید و سودآوری، هدف آن است که سرعت برش، بیشترین مقدار ممکن را داشته باشد. از طرف دیگر، سرعت بالا باعث کاهش ناحیه HAZ نیز می‌شود که مطلوب فرآیند برش لیزر است[8].

برای بررسی تأثیرگذاری موقعیت نقطه کانونی نسبت به سطح ابتدا باید به این نکته توجه داشت که در نقطه کانونی به دلیل حداقل بودن قطر اشعه، چگالی توان در بالاترین مقدار خود قرار دارد، در نتیجه وقتی نقطه کانونی بر روی سطح قرار داشته باشد، ناحیه تحت تأثیر انرژی بر روی سطح حداقل می‌شود و درعین‌حال قطعه با سرعت بیشتری ذوب می‌شود، این امر منجر به کاهش عرض شیار در این ناحیه می‌شود[14]. نتایج این تحقیق در شکل ۶-پ نیز این موضوع را اثبات می‌کند. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، وقتی نقطه کانونی نسبت به سطح فاصله می‌گیرد، عرض شیار نیز بیشتر می‌شود و به‌طورکلی اثر این پارامتر در تغییرات عرض شیار بسیار قابل‌توجه است. لازم به ذکر است که در نمودار شکل ۶-پ، مقادیر منفی نشانگر موقعیت نقطه کانونی پایین‌تر از سطح قطعه و مقادیر مثبت هم نشانگر موقعیت نقطه کانونی بالاتر از سطح است.

فاصله نازل تا قطعه‌کار پارامتر مهمی است که در آرایش جریانِ گاز خروجی از نازل تأثیرگذار است[9]. در این آزمایش نتیجه افزایش فاصله نازل تا قطعه‌کار، کاهش عرض شیار بوده است. هرچه فاصله نازل از قطعه‌کار بیشتر می‌شود، جریان گازی که به ناحیه برش می‌رسد از سرعت کمتری برخوردار خواهد بود، در نتیجه از نیروی کمتری برای برداشت مذاب از ناحیه برش برخوردار خواهد بود و این‌چنین می‌توان کاهش عرض شیار را همانند شکل ٤-ت توجیه کرد. برای تأثیر فشار گاز بر عرض شیار نیز می‌توان دلیل تقریباً مشابهی ذکر کرد. افزایش فشار، نرخ حذف مواد از ناحیه برش را بیشتر می‌کند[27] پس می‌توان انتظار داشت با افزایش فشار، عرض شیار افزایش یابد. در شکل ٤-ث این تغییرات مشاهده می‌شود. آخرین آزمایشی که در این تحقیق انجام گرفت، بررسی عرض شیار



شکل ۴) عرض شیار اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های طراحی‌شده

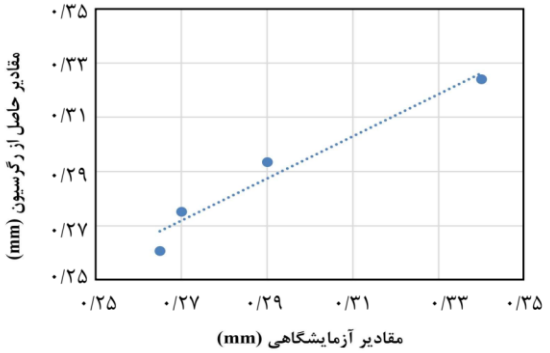
در ضخامت‌های ۰/۵ تا ۱ میلیمتر است. در شکل ٤-ج مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت ورق، عرض شیار تا حدودی بیشتر می‌شود. در اینجا به دلیل ضخامت کم ورق‌ها، بدون تغییر در پارامترهای انتخاب‌شده، امکان برش ورق‌ها وجود دارد. اما به‌طورکلی با افزایش ضخامت ورق، به دلیل افزایش حجم ماده ذوب‌شده، عرض شیار نیز افزایش می‌یابد[13].

با بررسی کلیه نمودارهای شکل ۴ مشاهده می‌شود که در میان ۲۲ آزمایش انجام‌شده این تحقیق، بیشترین و کمترین عرض شیار به ترتیب ۰/۳۶ و ۰/۱۲ میلی‌متر است. درصورتی‌که برای تنظیم پارامترها، موقعیت نقطه کانونی بر سطح قطعه باشد و از بیشترین سرعت، بیشترین فاصله نازل تا قطعه کار و کمترین فشار گاز استفاده شود، حتی به عرض شیار کمتر از ۰/۱۲ میلی‌متر هم می‌توان دست‌یافت. پس می‌توان نتیجه گرفت تنظیم صحیح پارامترها، عرض شیار را نسبت به حالت بیشینه نتایج حاضر، بیش از ۶۶% کاهش می‌دهد. این به معنای حجم مواد مصرف‌شده کمتر و دقت بسیار بالاتر فرآیند برش است.

با توجه به نتایج حاصل، از رگرسیون خطی برای مدل‌سازی عرض شیار استفاده شده است. نرم‌افزار مورد استفاده برای انجام رگرسیون Minitab 16 Statistical است. در این مدل‌سازی، عرض شیار به‌صورت تابعی از هر شش پارامتر به‌دست آمده است. معادله این تابع به‌صورت رابطه ۱ بوده که در آن k_w، عرض شیار و مقدار آن برحسب میلی‌متر است. همچنین برای این خطی‌سازی، $R^2 = 0.872$ است. بنابراین رگرسیون حاصل، برای بیش از ۸۷ درصد موارد پاسخگوی محاسبه عرض شیار است.

$$k_w = 0.000131 \times P - 0.000882 \times V - 0.049 \times d_s - 0.0451 \times d_n + 0.0157 \times p_g + 0.0957 \times t + 0 \quad (۱)$$

لازم به ذکر است در مدل‌سازی انجام‌شده، تنها از مقادیر منفی پارامتر موقعیت نقطه کانونی (d_s) استفاده شده تا مدل خطی از دقت بالاتری برخوردار باشد. همچنین برای اعتبارسنجی مدل حاصل، از مقایسه با نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، عرض شیار حاصل از رگرسیون دقت قابل قبولی در مقایسه با ۴ آزمایش انجام‌شده دارد. بنابراین می‌توان تابع حاصل از رگرسیون را برای پیش‌بینی عرض شیار در برش لیزر فایبر ورق‌های ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر فولاد زنگ‌نزن 316L به کار برد.



شکل ۵) مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر حاصل از رگرسیون

حال برای بررسی دقیق‌تر مقدار تأثیرگذاری هر پارامتر در عرض شیار، از تحلیل واریانسی یا همان ANOVA بهره گرفته شده است[19,28]. تحلیل واریانسی موردنظر که به کمک نرم‌افزار Minitab 16 Statistical انجام شده، در جدول ۳ آمده است، همچنین در این جدول مقدار سهم هر پارامتر در عرض شیار آزمایش‌های این پژوهش محاسبه شده است. بر اساس این جدول موقعیت نقطه کانونی بیشترین تأثیر را در تغییرات عرض شیار ورق فولاد زنگ‌نزن 316L در برش با لیزر فایبر دارد و حدود ۵۵% سهم تغییرات را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین اهمیت این پارامتر در تغییرات عرض شیار در پژوهش‌های دیگر نیز نشان داده شده است[22,23,25,26]. بعد از موقعیت نقطه کانونی، به ترتیب فاصله نازل تا قطعه‌کار با ۱۹/۴۵% و سرعت برش با ۸/۵۷% نیز از سهم قابل‌توجهی در اندازه عرض شیار برخوردارند.

۵- نتیجه‌گیری

عرض شیار، یک پارامتر کیفی مهم در برش لیزر محسوب می‌شود. در این تحقیق با توجه به تنوع پارامترهای قابل تنظیم در فرآیند برش لیزر، برای بررسی نقش هر پارامتر و میزان تأثیرگذاری آن بر عرض شیار ورق فولاد زنگ‌نزن 316L، آزمایش‌های جداگانه‌ای طراحی و به کمک دستگاه برشِ لیزرِ فایبر انجام گرفت که در مجموع شامل ۲۲ آزمایش برای تحلیل و مدلسازی و ٤ آزمایش برای اعتبارسنجی مدل است. پس از اندازه‌گیری عرض شیار به کمک یک سیستم عکس‌برداری ویژه، نتایج مهم زیر حاصل شد:

- با کاهش توان و افزایش سرعت، عرض شیار کمتر می‌شود. همچنین افزایش فاصله نازل تا قطعه‌کار و کاهش فشار گاز نیز باعث کاهش عرض شیار می‌شود.
- مؤثرترین پارامتر در تغییرات عرض شیار، موقعیت نقطه کانونی است و درصورتی‌که موقعیت نقطه کانونی روی سطح باشد، کمترین عرض شیار را نتیجه می‌دهد. پس‌از آن فاصله نازل تا قطعه‌کار و سرعت برش نیز از تأثیر قابل توجهی برخوردار هستند.
- تنظیم صحیح پارامترهای دستگاه باعث کاهش حدود ۷۰ درصدی حجم مواد برش و افزایش قابل توجه دقت برشکاری می‌شود. پیشنهاد این تحقیق، قرار دادن نقطه کانونی روی سطح، استفاده از توان و سرعت حداکثر و نیز افزایش فاصله نازل تا قطعه‌کار است.
- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل ایجادشده به کمک رگرسیون برای پیش‌بینی عرض شیار، حاکی از دقت مطلوب مدل مذکور دارد.
- اشاره به این نکته نیز لازم است که نتایج این تحقیق برای برش لیزر صفحات فولاد زنگ‌نزن 316L مورد استفاده در صنعت مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به کار گرفته شده است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان تحقیق حاضر، از مجموعه دانش‌بنیان طاها قالب توس که با حمایت‌های مادی و معنوی کم‌نظیر، زمینه اجرای آزمایش‌ها و پیشبرد این تحقیق را فراهم آورد، نهایت تشکر را دارند.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان متعهد می‌شوند محتویات علمی حاصل پژوهش آن‌ها بوده و نتایج ارائه‌شده در مجله دیگری چاپ نشده و یا درحال داوری نیست.

تعارض منافع: هیچ‌گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها یا اشخاص وجود ندارد.

جدول ۳) جدول **ANOVA** و میزان تأثیر هر پارامتر در عرض شیار

منبع	جمع مربعات (mm^2)	درجه آزادی	میانگین مربعات (mm^2)	مقادیر F	مقادیر P	مقدار سهم پارامتر در مدل (%)
مدل (K_w)	۰/۰۴۷۱۵۶۳	۶	۰/۰۰۷۸۵۹۴	۱۴/۷۵۶۹	۰/۰۰۰	
توان لیزر (P)	۰/۰۰۰۷۳۹۳	۱	۰/۰۰۰۷۳۹۳	۱/۳۸۸۱	۰/۰۹۷	۱/۳۷
سرعت برش (V)	۰/۰۰۴۶۳۳۲	۱	۰/۰۰۴۶۳۳۲	۸/۶۹۹۳	۰/۰۱۵	۸/۵۷
موقعیت نقطه کانونی (d_s)	۰/۰۳۰۰۱۲۵	۱	۰/۰۳۰۰۱۲۵	۵۶/۳۵۲	۰/۰۰۰	۵۵/۴۹
فاصله نازل تا قطعه‌کار (d_n)	۰/۰۱۰۵۱۶۹	۱	۰/۰۱۰۵۱۶۹	۱۹/۷۴۶۷	۰/۰۰۱	۱۹/۴۵
فشار گاز (p_g)	۰/۰۰۰۰۷۰۷	۱	۰/۰۰۰۰۷۰۷	۰/۱۳۲۷	۰/۷۰۱	۰/۱۳
ضخامت ورق (t)	۰/۰۰۱۱۸۳۷	۱	۰/۰۰۱۱۸۳۷	۲/۲۲۲۵	۰/۱۶۰	۲/۱۹
Residual	/۰۰۶۹۲۳۷	۱۳	۰/۰۰۰۵۳۲۵۹			
Lack of fit	۰/۰۰۵۷۵۲۸	۸	۰/۰۰۰۷۱۹۱	۳/۰۷۰۴	۰/۱۱۶	
Pure error	۰/۰۰۱۱۷۰۸	۵	۰/۰۰۰۲۳۴۱۶			
کل	۰/۰۵۴۰۸۰۰	۱۹				

سهم نویسندگان: انوشیروان فرشیدیان‌فر (نویسنده اول)، راهنما و پژوهشگر اصلی ۳۰% - سعید مرندی (نویسنده دوم)، پژوهشگر، نگارنده مقاله و تحلیلگر داده‌ها ۳۰% – محمدحسین فرشیدیان‌فر (نویسنده سوم)، پژوهشگر و روش‌شناس ۲۰% - سیده فاطمه نبوی (نویسنده چهارم)، پژوهشگر و نگارنده بحث ۲۰% .

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

1- Moradi M, Ashoori A, Hasani A. Additive manufacturing of stellite 6 superalloy by direct laser metal deposition–Part 1: Effects of laser power and focal plane position. Optics & Laser Technology. 2020:106328.

2- Chen H, Lu Y, Luo D, Lai J, Liu D. Epitaxial laser deposition of single crystal Ni-based superalloys: repair of complex geometry. Journal of Materials Processing Technology. 2020:116782.

3- Safari M. A study on the laser tube bending process: Effects of the irradiating length and the number of irradiating passes. Iranian Journal of Materials Forming. 2020;7(1):46-53.

4- Safari M, Alves de Sousa R, Joudaki J. Fabrication of saddle-shaped surfaces by a laser forming process: An experimental and statistical investigation. Metals. 2020;10(7):883.

5- Mostaan H, Shamanian M, Hasani S, Safari M, Szpunar JA. Nd: YAG laser micro-welding of ultra-thin FeCo–V magnetic alloy: optimization of weld strength. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2017;27(8):1735-1746.

6- Trinh LN, Lee D. The Characteristics of Laser Welding of a Thin Aluminum Tab and Steel Battery Case for Lithium-Ion Battery. Metals. 2020;10(6):842.

7- Moradi M, Arabi H, Nasab SJ, Benyounis KY. A comparative study of laser surface hardening of AISI 410 and 420 martensitic stainless steels by using diode laser. Optics & Laser Technology. 2019;111:347-357.

8- Steen WM, Mazumder J. Laser material processing. springer science & business media; 2010.

9- Ion J. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. Elsevier; 2005.

10- Hashemzadeh M. Investigations into fibre laser cutting (Doctoral dissertation, University of Nottingham).

11- Dong L, Samson B. Fiber Lasers: Basics, Technology, and Applications. Crc Press; 2016.

12- https://www.esabna.com/us/en/education/blog/what-is-cutting-kerf.cfm.

13- Stelzer S, Mahrle A, Wetzig A, Beyer E. Experimental investigations on fusion cutting stainless steel with fiber and CO2 laser beams. Physics Procedia. 2013;41:399-404.

14- Caristan CL. Laser cutting guide for manufacturing. Society of manufacturing engineers; 2004.

15- Ghany KA, Newishy M. Cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd: YAG laser. Journal of Materials Processing Technology. 2005;168(3):438-447.

16- Parthiban A, Sathish S, Chandrasekaran M. Fuzzy logic based modeling of co2 laser cutting for stainless steel sheet. ARPN journal of Engineering and Applied Science. 2017;12:1780-1784.

17- Dubey AK, Yadava V. Multi-objective optimization of Nd: YAG laser cutting of nickel-based superalloy sheet using orthogonal array with principal component analysis. Optics and Lasers in Engineering. 2008;46(2):124-132.

18- Dubey AK, Yadava V. Optimization of kerf quality during pulsed laser cutting of aluminium alloy sheet. Journal of materials processing technology. 2008;204(1-3):412-418.

19- Pandey AK, Dubey AK. Taguchi based fuzzy logic optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of Duralumin sheet. Optics and lasers in engineering. 2012;50(3):328-335.

20- Pandey AK, Dubey AK. Multiple quality optimization in laser cutting of difficult-to-laser-cut material using grey–fuzzy methodology. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013;65(1-4):421-431.

21- Rajamani D, Tamilarasan A. Fuzzy and regression modeling for Nd: YAG laser cutting of Ti-6Al-4V superalloy sheet. Journal for Manufacturing Science and Production. 2016;16(3):153-162.

22- Wandera C, Kujanpaa V. Characterization of the melt removal rate in laser cutting of thick-section stainless steel. Journal of Laser Applications. 2010;22(2):62-70.

23- Wandera C, Kujanpää V. Optimization of parameters for fibre laser cutting of a 10 mm stainless steel plate. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2011;225(5):641-649.

24- Haddadi E, Moradi M, Ghavidel AK, Ghavidel AK, Meiabadi S. Experimental and parametric evaluation of cut quality characteristics in CO2 laser cutting of polystyrene. Optik. 2019;184:103-114.

25- Moradi M, Mehrabi O, Azdast T, Benyounis KY. The effect of low power CO2 laser cutting process parameters on polycarbonate cut quality produced by injection molding. Modares Mechanical Engineering. 2017;17(2):93-100.

26- Moradi M, Karami Moghadam M, Shamsborhan M, Bodaghi M, Falavandi H. Post-Processing of FDM 3D-Printed Polylactic Acid Parts by Laser Beam Cutting. Polymers. 2020;12(3):550.

27- Patel P, Modi BS, Sheth S, Patel T. Experimental investigation, modelling and comparison of kerfwidth in laser cutting of GFRP. Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science. 2015;5(2):55-62.

28- Moradi M, KaramiMoghadam M. High power diode laser surface hardening of AISI 4130; statistical modelling and optimization. Optics & Laser Technology. 2019;111:554-570.