



## Experimental Investigation of Laser Cutting Post Process of Additive Manufactured Parts of Poly Lactic Acid (PLA) by 3D Printers Using FDM Method

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Moradi M.\*<sup>1</sup> PhD,  
Falavandi H.<sup>1</sup> MSc,  
Karami Moghadam M.<sup>1</sup> MSc,  
Shaikh Mohammad Meiabadi M.<sup>2</sup> MSc

#### How to cite this article

Moradi M, Falavandi H, Karami Moghadam M, Shaikh Mohammad Meiabadi M. Experimental Investigation of Laser Cutting Post Process of Additive Manufactured Parts of Poly Lactic Acid (PLA) by 3D Printers Using FDM Method. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(4):999-1009.

<sup>1</sup>"Laser Material Processing Research Center" and "Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty", Malayer University, Malayer, Iran

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Quebec, Montreal, Canada

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Malayer University, Malayer, Iran.  
Postal Code: 6571995863  
Phone: +98 (81) 32225312  
Fax: -  
moradi@malayeru.ac.ir

#### Article History

Received: April 04, 2019  
Accepted: September 15, 2019  
ePublished: April 17, 2020

### ABSTRACT

3D printing technology is used in a variety of industries without auxiliary tools because it is flexible in producing and reduces the waste of material. In this paper, the laser cutting process of polylactic acid sheets has been investigated by a 3D printer. The fused deposition modeling (FDM) method was used for printing the sheets. Production of sheets with a thickness of 2.3 mm by optimal conditions was conducted (each layer was perfectly solid with a thickness of 0.27 mm, and the extruder temperature of 226.62 °C). The laser used in this paper is a CO2 low-power, continuous-wave laser. Laser input parameters including laser cutting speed, focal point position, and laser power were selected as the variables. By performing several experiments, the effective range of each parameter was evaluated. The upper and lower cut width, the angle of cone and the upper cut width ratio to the lower cut width of the process output parameters were selected. The optical microscope was used to examine the geometric characteristics of cutting kerf of the samples and then the images were measured using ImageJ software. The purpose of this paper is the laser cutting process to achieve cutting kerfs with good quality and proper setting of laser input parameters.

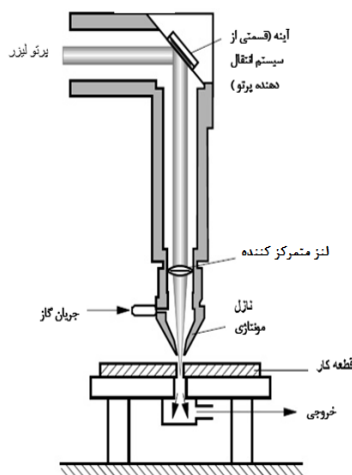
**Keywords** Laser Cutting; Fused Deposition Modeling (FDM); Post Processing; Additive Manufacturing; Poly Lactic Acid

### CITATION LINKS

[1] Additive manufacturing methods ... [2] 3D Printed parts with honeycomb ... [3] Optimization of fused deposition modeling ... [4] Laser drilling simulation of glass by using ... [5] Nd:YAG laser hardening of AISI 410 stainless ... [6] Improved laser surface hardening of AISI ... [7] Process and outcome comparison between ... [8] Experimental investigation of laser forming ... [9] A novel method for laser forming of ... [10] A novel and comprehensive method for laser ... [11] Experimental and numerical investigation of ... [12] The effects of laser pulse energy and focal point ... [13] Influence of beam polarization on laser ... [14] Experimental and parametric ... [15] Thermal and rheological properties of commercial- ... [16] Natural fibres as reinforcement in polylactic ... [17] Micro cutting of Ti-6Al-4V parts produced by ... [18] Preparation and mechanical properties of ... [19] Anisotropic material properties of fused deposition modeling ... [20] A parametric study of part distortions in fused ... [21] Modelling micro geometrical profiles in fused deposition ... [22] Fiber Bragg grating based investigation of residual strains ... [23] Mechanical properties of components fabricated with ... [24] Dieless forming of carbon fibre reinforced ... [25] Process parameter optimization for fused deposition ... [26] Fused deposition modelling (FDM) process ... [27] An investigation on distortion of PLA thin-plate part in ... [28] Finishing of fused deposition modeling parts by CNC ... [29] Dimensional and form errors of PC parts printed ... [30] Laser assisted finishing process for improved surface ... [31] Effect of thermal properties on laser cutting of ... [32] Experimental study on the picosecond pulsed laser ... [33] Heat affected zone extension in pulsed Nd:YAG ... [34] Laser cutting of carbon fibre reinforced plastics of ... [35] Experimental analysis and ANN modelling ... [36] Effect of carbon nanotubes on laser cutting of ... [37] Effect of process parameters and optimization ... [38] Numerical simulation of laser beam cutting ... [39] Fibre laser cutting of CFRP thin sheets by ... [40] Experimental evaluation of laser cut quality ... [41] Experimental study on the CO2 laser cutting of ... [42] Influence of laser cutting parameters ... [43] Dimensional analyses and surface ... [44] Evaluation of cutting quality of PMMA using ... [45] Layered laser vaporization of PMMA ... [46] Laser cutting of aluminium-alumina ... [47] Experimental investigation of the effect ... [48] Fast laser cutting of thin... [49] Modeling on surface cut quality of ... [50] Parametric analysis of process parameter .. [51] High power diode laser surface hardening ...

سه‌بعدی به روش لایه‌نشانی هم‌جوش، یک فرآیند ساخت افزودنی است که متعلق به گروه فرآیندی اکستروژن است. پرنتر سه‌بعدی فیلامنتی، با ذوب پلاستیک و اکستروژن آن، محصول سه‌بعدی را به صورت لایه به لایه خلق می‌نماید. چاپ سه‌بعدی به روش لایه‌نشانی هم‌جوش، یک چاپ سه‌بعدی ارزان به حساب می‌آید.

کاربرد لیزر در صنعت شامل موارد گسترده‌ای است [4-6]. کاربردهای پردازش مواد با لیزر، شامل برشکاری لیزر، حکاکی لیزری، جوشکاری لیزری، شکل‌دهی لیزری، سختکاری لیزری، پوشش‌دهی لیزری، سوراخکاری لیزری و ساخت افزایشی با لیزر است [7-12]. برشکاری لیزری، فرآیند ماشینکاری دوجوش است که از برداشت و حذف مواد به وسیله تمرکز پرتو لیزر با شدت بالا روی قطعه صورت می‌گیرد [13]. حرارت پرتو لیزر قطعه را در جهت ضخامت یا عمق مواد، ذوب یا تبخیر می‌کند و یک جبهه برش ایجاد می‌نماید (شکل ۱).



شکل ۱) شماتیک فرآیند برشکاری لیزری [9]

ماده مذاب از جبهه برش به وسیله فشار بالای گاز کمکی به بیرون رانده می‌شود [14]. گاز کمکی افزون بر تسهیل برداشت مواد به وسیله دفع مذاب، ممکن است به برداشت بیشتر ماده از طریق واکنش‌های شیمیایی مثل اکسایش ماده کمک نماید. برشکاری لیزری یک روش سریع، تکرارپذیر و قابل اطمینان برای طیف وسیعی از انواع مواد و ضخامت‌ها است که یک عرض برشی بسیار باریک ایجاد می‌کند. در فرآیند برشکاری لیزری، اگر شیار برش دارای عرض بریدگی بالا و پایین کم باشد، مطلوب است.

پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) یک پلی‌استر آلیفاتیک ترموپلاستی قابل تجزیه و دوست‌دار محیط زیست است که از منابع تجدیدپذیر مانند نشاسته ذرت، ریشه‌های کاجو و نیشر تولید می‌شود. پلی‌لاکتیک‌اسید در بسیاری از صنایع استفاده می‌شود و در سال ۲۰۱۰ دومین بیوپلاستیک پرمصرف در جهان بوده است که دارای قابلیت بازیافت است. این پلیمر در حال حاضر از لحاظ حجم تولید و مصرف در جهان دارای جایگاه دوم در بین مواد بیوپلاستی است [15]. جدول ۱ خواص پلی‌لاکتیک‌اسید را نشان می‌دهد [16].

## بررسی تجربی فرآیند پس‌پردازش برشکاری لیزری قطعات ساخته‌شده افزودنی از جنس پلی‌لاکتیک‌اسید به کمک چاپگرهای سه‌بعدی به روش FDM

محمود مرادی\* PhD

"مرکز تحقیقات فرآوری لیزری مواد" و "گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی"، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

حمید فلاوندی MSc

"مرکز تحقیقات فرآوری لیزری مواد" و "گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی"، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

مجتبی کرمی‌مقدم MSc

"مرکز تحقیقات فرآوری لیزری مواد" و "گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی"، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

محمد صالح شیخ‌محمد می‌آبادی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کبک، مونترال، کانادا

### چکیده

فناوری چاپ سه‌بعدی بدون نیاز به ابزارهای جانبی در صنایع مختلفی به کار می‌رود زیرا دارای انعطاف‌پذیری در تولید است و سبب کاهش اتلاف مواد می‌شود. در این مقاله به بررسی تجربی فرآیند برشکاری لیزری ورقه ساخته‌شده از پلی‌لاکتیک‌اسید توسط چاپگر سه‌بعدی پرداخته شده است. روش چاپ ورقه‌ها به کمک روش لایه‌نشانی هم‌جوش (FDM) صورت پذیرفت. تولید ورقه‌ها با ضخامت ۳/۲ میلی‌متر و با شرایط بهینه (ضخامت هر لایه ۰/۲۷ میلی‌متر، کاملاً توپر و دمای اکستروژن ۲۲۶/۲°C) چاپ شد. لیزر مورد استفاده در این مقاله، لیزر CO<sub>2</sub> کم‌توان با موج پیوسته است. پارامترهای ورودی لیزر شامل سرعت برش لیزر، موقعیت نقطه کانونی و توان لیزر به‌عنوان متغیر انتخاب شد. با انجام چند آزمایش بازه موثر هر پارامتر مورد ارزیابی قرار گرفته شد. عرض بریدگی بالایی و پایینی، زاویه مخروطی شدن و نسبت عرض بریدگی بالایی به عرض بریدگی پایینی پارامترهای خروجی فرآیند انتخاب شد. میکروسکوپ نوری برای بررسی مشخصات هندسی شیارهای برش نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته شد و سپس با استفاده از نرم‌افزار ImageJ تصاویر اندازه‌گیری شدند. هدف از انجام این مقاله فرآیند برشکاری لیزری برای دستیابی به شیارهای برش با کیفیت مناسب و تنظیمات مناسب پارامترها ورودی لیزر است.

**کلیدواژه‌ها:** برشکاری لیزری، لایه‌نشانی هم‌جوش (FDM)، پس‌پردازش، ساخت افزودنی، پلی‌لاکتیک‌اسید

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۴

\*نویسنده مسئول: moradi@malayeru.ac.ir

### ۱- مقدمه

فناوری چاپ سه‌بعدی بدون نیاز به ابزارهای جانبی در صنایع مختلفی به کار می‌رود؛ زیرا دارای انعطاف‌پذیری در تولید است و سبب کاهش اتلاف مواد می‌شود [1]. روش لایه‌نشانی هم‌جوش در مدل‌سازی و نمونه‌سازی سریع مورد استفاده قرار می‌گیرد [2]. این تکنولوژی قطعات را به صورت لایه به لایه چاپ می‌نماید که در اواخر سال ۱۹۸۰ توسط اسکات/کرامپ توسعه داده شد [3]. چاپ

توسط ماشینکاری پرداختند. رودریگز و همکاران [29]، به بررسی خطاهای ابعادی و فرمی چاپ شده از طریق لایه نشانی هم جوش پرداختند. توفیک و جین [30]، به بررسی فرآیند پس از ساخت به کمک لیزر برای بهبود سطح لایه ترکیبی قطعات ساخته شده به روش لایه نشانی هم جوش پرداختند. هدف آنها از این مقاله، فراهم آوردن بررسی عمیق از اتمام لایه پلیمری از قطعات پلیمری به وسیله فرآیند لیزری است. اجزاء کاربردی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته و تغییرات در پارامترهای زبری قبل و بعد از فرآیند لیزر بررسی شده است. هرش و همکاران [31]، اثر خواص حرارتی روی برش لیزری از کامپوزیت های پلی آمید تقویت شده با شیشه و فیبر کربن را بررسی نمودند. در این پژوهش از لیزر پالسی جهت برشکاری لیزری، دو نوع کامپوزیت ترموپلاستی تقویت شده با فیبر مورد بررسی قرار گرفته شد. هو و ژو [32] به بررسی تجربی فرآیند برشکاری لیزری پالسی بر پلاستیک تقویت شده با فیبر کربن پرداختند. در مقاله آنها به برش لیزری پلاستیک های تقویت شده با فیبر کربن با سیستم لیزر Nd:YAG پالسی پرداخته شده است. طراحی یک فاکتور تجربی برای توضیح تاثیر پارامترهای برش از قبیل قدرت لیزر، فاصله کانونی و سرعت برش در اثر متقابل لیزر پالسی مورد استفاده قرار گرفت. لئون و گنا [33] گسترش ناحیه متاثر از حرارت در برشکاری لیزری Nd:YAG مورد ارزیابی قرار دادند. در مقاله هرزوک و همکاران [34] به مطالعه برش لیزری روی CFRP با ضخامت های بالا پرداخته شده است که با استفاده از پاس های موازی لیزر توانستند CFRP با ضخامت ۱۳ میلی متر را برش دهند. تحلیل آزمایشی و مدل سازی برای منطقه متاثر از حرارت در برشکاری لیزری کامپوزیت های پلاستیکی تقویت شده با فیبر گلاسه توسط پاتلا و همکاران [35] انجام شد که هدف آن، بررسی تاثیر پارامترهای برشکاری لیزری (قدرت لیزر، سرعت برش و فشار گاز) روی منطقه متاثر از حرارت بود. همچنین بررسی پارامترهای برشکاری لیزری در میزان کیفیت منطقه مورد عملیات از اهمیت خاصی در تحقیقات بسیاری از دانشمندان مورد بحث و بررسی قرار گرفته است [36-38]. در مقاله لئون و همکاران [39]، کاربرد روش اسکن لیزر چند پاسه در برش ورق های نازک با استفاده از پالس لیزر Nd:YAG بررسی شد. نتایج آن، چگونگی انجام فرآیند سرعت برشی موثر و هندسه برشی و اندازه منطقه تحت تاثیر حرارت را تعیین می کند. تست های آزمایشگاهی با قدرت متوسط و با تعویض سرعت برش لیزر انجام می شود. در تحقیق چودهداری و چان [40]، ارزیابی کیفیت سطح برش کامپوزیت پلاستیک تقویت شده فایبرگلس توسط پرتوی لیزر مورد بررسی قرار گرفت. در آن، ارزیابی کیفیت برش در دو حالت تک پاس و دو پاس بررسی شده است. نتایج نشان داد ککه کیفیت سطح برش تولید شده توسط پرتو لیزر دو پاس بسیار بهتر از پرتو لیزر تک پاس است. ریویرو و همکاران [41]، به مطالعه تجربی برش پلاستیک کامپوزیت فیبر کربن تقویت شده با لیزر CO<sub>2</sub> پرداختند و تاثیر پارامترهای فرآیند در هر دو حالت پیوسته و پالسی در برش مطالعه شد. برش

جدول ۱) خواص ماده پلی لاکتیک اسید

ویژگی	مقدار
نقطه ذوب	۱۵۰ تا ۱۶۰ درجه سانتی گراد
دمای انتقال شیشه ای	۶۰ تا ۶۵ درجه سانتی گراد
دمای قالب گیری تزریقی	۱۷۸ تا ۲۴۰ درجه سانتی گراد
چگالی	۱/۲۱ تا ۱/۴۳ g.cm <sup>-3</sup>
فرمول شیمیایی	(C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>n</sub>
درصد تبلور	۳۷
مدول کششی	۲/۷ تا ۱۶ گیگاپاسگال

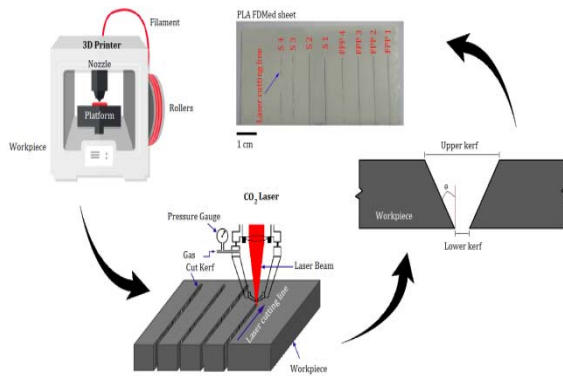
تاکونن تحقیقات بسیار گسترده ای در خصوص چاپ سه بعدی مواد مختلف همراه روش های متنوع صورت پذیرفته است [17]. بررسی خواص مکانیکی [18] و مقایسه با ساخت قطعات به روش های سنتی [19] و بررسی پارامترهای تاثیر پذیر در فرآیند چاپ مواد [20]، از مباحث جذاب جهت مطالعه پژوهشگران بوده است. بوشتو و همکاران [21] به بررسی مدل سازی پروفایل های هندسی در فرآیند لایه نشانی هم جوش پرداختند. در این پژوهش، یک روش جدید با هدف توصیف هندسی پروفیل زبری ارایه شده است. یک مدل جدید برای توصیف هندسی پروفیل زبری قسمت های FDM پیشنهاد شده است. کاتاروس و همکاران [22]، به بررسی تنش های پسماند قطعات ساخته شده از جنس ABS به روش لایه نشانی هم جوش با استفاده از یک سنسور شبکه براگ فیبری پرداختند. تیمارک و همکاران [23]، به بررسی خواص مکانیکی قطعات ساخته شده با چاپگرهای سه بعدی منبع باز تحت شرایط واقعی محیطی پرداختند. موری و همکاران [24]، در پژوهشی به ارزیابی تشکیل قطعات پلاستیکی تقویت شده با الیاف کربن با استفاده از چاپگر سه بعدی پرداختند. در این پژوهش برای افزایش استحکام نمونه، فیبر کربن ۲۸۰ با فیلامنت ABS در ورودی نازل وارد شد و الیاف با حرارت دادن هنگام عبور از نازل با پلاستیک پیوند داده شد. پنگ و همکاران [25]، به بررسی بهینه سازی پارامترهای فرآیند برای لایه نشانی هم جوش با استفاده از متدولوژی سطح پاسخ ترکیب شده با سیستم استنتاج فازی پرداختند. تمرکز روی بهینه سازی پارامتر فرآیند، مانند جریان پهنای خط، سرعت اکستروژن، سرعت پر شدن و ضخامت لایه به عنوان عوامل کنترلی و متغیرهای ورودی و خطای ابعادی، تغییر شکل پیچ و زمان ساخته شده به عنوان پاسخ های خروجی و شاخص های ارزیابی انتخاب می شوند. گریگانی و نوبولو [26] به بررسی بهینه سازی پارامتر فرآیند لایه نشانی هم جوش با استفاده از روش گروهی برای جابجایی داده ها برای تعیین رابطه کارکردی بین پارامترهای فرآیند و استحکام کششی برای فرآیند لایه نشانی هم جوش پرداختند. ژینهو و همکاران [27] به بررسی انحراف قطعات صفحه نازک پلی لاکتیک اسید در فرآیند لایه نشانی هم جوش پرداختند. در این مقاله، به منظور مشخص شدن مکانیسم اعوجاج قطعه نازک پلی لاکتیک اسید یک مدل نظری مبتنی بر تئوری صفحات نازک الاستیک ارایه شد. بوشتو و همکاران [28]، در پژوهشی به عملیات پس از ساخت قطعات ساخته شده به روش لایه نشانی هم جوش

در این مقاله، به بررسی تجربی فرآیند برشکاری لیزری ورق ساخته شده از جنس پلی لاکتیک اسید به کمک چاپگر سه بعدی به روش لایه نشانی هم جوش پرداخته شده است. ورق با ضخامت ۳/۲ میلی متر توسط چاپگر سه بعدی تولید شد. لیزر مورد استفاده، لیزر CO<sub>2</sub> کم توان با موج پیوسته است. پارامترهای ورودی فرآیند شامل سرعت برش، موقعیت نقطه کانونی لیزر و توان لیزر است که با انجام چند آزمایش جهت مشخص شدن بازه موثر هر پارامتر مورد بررسی و شناسایی قرار گرفته شد. پارامترهای خروجی فرآیند شامل عرض بریدگی بالایی و پایینی، زاویه مخروطی شدن، نسبت عرض بریدگی بالایی به عرض بریدگی پایینی در نظر گرفته شدند. پلی لاکتیک اسید یک پلی استر زیست تخریب پذیر است که از اسید لاکتیک تشکیل شده است. از آنجایی که قطعات ساخته شده به روش لایه نشانی هم جوش، دقت ابعادی پایینی را دارند، لذا نیازمند فرآیندهای پس از ساخت هستند که در این پژوهش از لیزر برای بهبود دقت ابعادی استفاده شده است.

## ۲- روش انجام آزمایش

### ۲-۱- تولید ورق پلی لاکتیک اسید با چاپگر سه بعدی

برای تولید ورق های پلی لاکتیک اسید، از تکنولوژی چاپ سه بعدی با روش لایه نشانی هم جوش که با استفاده از چاپگر سه بعدی سیزان ۳ استفاده شده است، مورد بهره برداری قرار گرفته شد. از نرم افزار Simplify برای تنظیم پارامترهای ساخت نمونه ها استفاده شد (جدول ۲؛ شکل ۲). در جدول ۳، پارامترهای ساخت لایه نشانی هم جوش را نشان می دهد.



شکل ۲) فرآیند تولید و برشکاری لیزری ورق پلی لاکتیک اسید

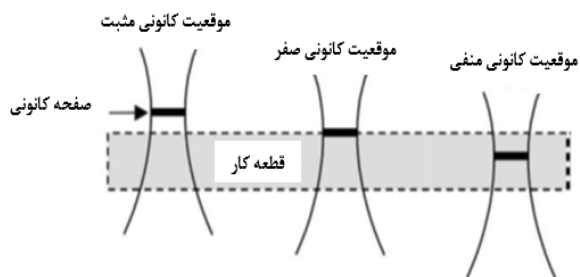
جدول ۲) مشخصات پرینتر مورد استفاده در پژوهش

پارامترهای دستگاه	محدوده پارامتر
نوع پرینتر	FDM مدل سیزان ۳
سایز پرینت	۲۰×۲۰×۲۰ سانتی متر
دقت لایه گذاری	۳۰ میکرون
قطر نازل	۰/۵ میلی متر
دمای نازل	۲۶۰ درجه سانتی گراد
دمای صفحه	۱۱۰ درجه سانتی گراد
سرعت چاپ	۳۰۰ میلی متر بر ثانیه

با حداقل منطقه متاثر از حرارت حدود ۵۴۰ میکرومتر با کیفیت پرتو بالا و کار در حالت پالسی حاصل شد. تاثیر پارامترهای برش لیزری روی کیفیت برش توسط گوکه و /املمن [42] انجام شد. کورت و همکاران [43]، به مطالعه اثرات پارامترهای فرآیند برش لیزر (فشار گاز، سرعت برش و قدرت لیزر) روی پارامترهای دقت ابعادی و صافی سطح شیار برش (تفلون و پلی اکسی متیلن) با استفاده از یک لیزر CO<sub>2</sub> پرداختند. دیویم و همکاران [44]، به بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند برش کاری لیزری (قدرت لیزر و سرعت برش) بر کیفیت برش (زبری سطح، منطقه متاثر از حرارت، دقت ابعادی) متیل متاکریلات با ضخامت ۶ میلی متر با استفاده از لیزر CO<sub>2</sub> پرداختند. برش در دو حالت خطی و پیچیده دوبعدی مورد بررسی قرار گرفته شد. نتایج به دست آمده نشان می دهد که در برش کامپلکس دوبعدی در متیل متاکریلات منطقه متاثر از حرارت ۰/۱۲، ۰/۳۷ میلی متر و زبری سطح پایین و کمتر از ۵ میکرومتر است. تبخیر لایه لایه ای لیزری متیل متاکریلات که حفره های غالب سه بعدی را به وجود می آورد توسط رومولی و همکاران [45] مورد بررسی قرار گرفته شد. استفاده از لیزر فیبر در برشکاری کامپوزیت ساخته شده جهت ارزیابی پارامترهای موثر در فرآیند برشکاری کامپوزیت های آلومینیومی مورد بررسی قرار گرفته شده است [46]. در کامپوزیت های آلومینیومی به دلیل روشن بودن سطح فلز و بازتابش پرتو از سطح قطعه، فرآیندهای پردازش مواد با لیزر را بسیار پیچیده می کند. در این موارد با ایجاد تغییرات ویژه در مقدار ضخامت، توان لیزر و سرعت برشکاری، می توان به خوبی ورقه های از جنس آلومینیوم را مورد عملیات برشکاری لیزری قرار داد [47]. یکی از موارد خیلی مهمی که مورد توجه صنعتگران است، سرعت برشکاری لیزری در ورقه های فلزی از جنس فولاد و آلومینیوم و دیگر فلزات پرمصرف است. تزیگ و همکاران [48]، با لیزر پرتو فیبر ۲ کیلو وات ورقه های فولادی و آلومینیومی را مورد بررسی قرار دادند. سرعت برشکاری در این تحقیق تا ۵۰۰ متر بر دقیقه با توان لیزر ۱۷۰ وات بالا برده شد. اگرچه در برشکاری لیزری ورقه ها مقداری نقص مشاهده شد، اما برش به صورت کامل انجام شد. برش ورقه های فولاد AISI 304 توسط لیزر CO<sub>2</sub> با استفاده از روش رویه پاسخ توسط پارتیبیان و همکاران [49] انجام شد. ۳ پارامتر ورودی شامل سرعت برشکاری، توان لیزر و گاز محافظ جهت بررسی منطقه تحت تاثیر حرارت مورد ارزیابی قرار گرفت. در نمودارهای رویه پاسخ، مشاهده شد که با کاهش سرعت برشکاری لیزری، منطقه بیشتری از فولاد آستنیتی ۳۰۴ تحت تاثیر حرارت قرار می گیرد. کوتادیا و همکاران [50]، با استفاده از روش طراحی آزمایش ها به فرآیند برشکاری لیزری فولاد آستنیتی با ضخامت ۳ میلی متر پرداختند. در این تحقیق هدف سنجش زبری و پهنای برش ورقه فولادی پس از تغییر پارامترهای سرعت برشکاری، فشار گاز و توان لیزر بود. نتایج حاکی از آن است که توان لیزر به مراتب تاثیرات چشمگیرتری در مقایسه با سرعت برشکاری و فشار گاز بر فرآیند برشکاری دارد.

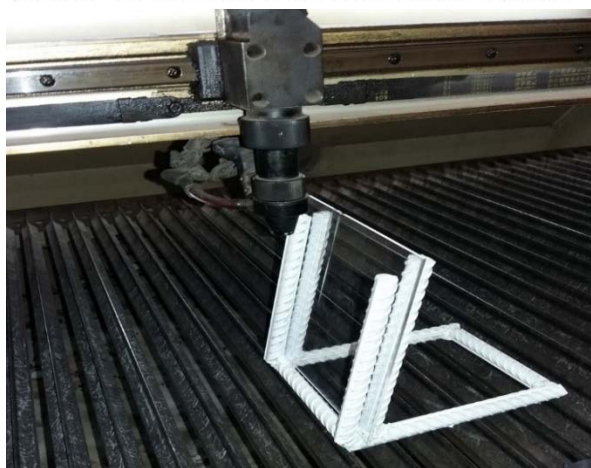
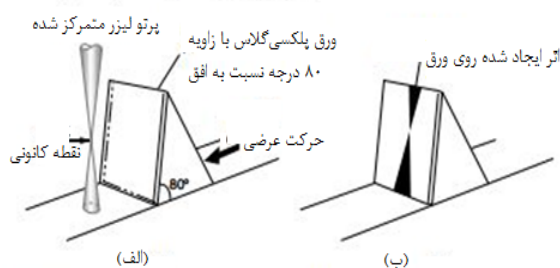


باشد، موقعیت کانونی مثبت و منفی است. در شکل ۳ از چپ به راست موقعیت کانونی لیزر مثبت، موقعیت کانونی لیزر صفر و موقعیت کانونی لیزر منفی نشان داده شده است.



شکل ۳) دیاگرام موقعیت کانونی لیزر [33]

راه‌های مختلفی برای تعیین موقعیت نقطه کانونی وجود دارد. در روشی که در این مقاله استفاده شد، یک ورق پلکسی گلس مطابق شکل ۴- الف به صورت ۸۰ درجه نسبت به افق قرار می‌گیرد و پرتوهای لیزر عمود بر مقطع از روی آن عبور می‌کنند. با توجه به اثر پرتو روی ورق، موقعیت نقطه کانونی لیزر مشخص می‌شود (شکل ۴- ب). در شکل ۴- ج، تصویر تعیین موقعیت کانونی لیزر مورد استفاده در مقاله است [14].



شکل ۴) دیاگرام موقعیت کانونی لیزر؛ (الف) تنظیم اولیه گیج، (ب) اثر ایجاد پرتو و (ج) تنظیم در محیط واقعی آزمایش

با انجام چند آزمایش برشکاری مقدماتی با تغییر هر پارامتر و ثابت‌نگه‌داشتن سایر پارامترها، محدوده کاری مشخص شد.

جدول ۳) مقادیر پارامترهای ساخت لایه‌نشانی هم‌جوش

مقدار	واحد	متغیر
۰/۴۵	mm	قطر نازل
۰/۴۵	mm	عرض اکستروژن
۶	-	لایه جامد بالا
۶	-	لایه جامد پایین
۳۶۰۰	mm/min	سرعت پیش فرض چاپ
۱۸۰۰	mm/min	سرعت بازپس‌گرفتن
۱۵	%	همپوشانی خطی

پارامترهای ضخامت لایه، درصد توپری و دمای اکسترودر هنگام ساخت ورق با شرایط بهینه متغیر هستند. با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده ورق پلی‌لاکتیک‌اسید با ابعاد  $۱۰ \times ۵$  سانتی‌متر به ضخامت  $۳/۲$  میلی‌متر تولید شد.

### ۲-۲- فرآیند برشکاری لیزری

لیزر مورد استفاده در این مقاله، لیزر دی‌اکسید کربن با بیشینه توان ۵۰ وات و ساخت کشور چین است. حالت لیزر موج پیوسته است. در جدول ۴ مشخصات لیزر مورد استفاده جهت انجام برشکاری ورق پلی‌لاکتیک‌اسید را نشان می‌دهد.

جدول ۴) مشخصات لیزر مورد استفاده در مقاله

پارامتر لیزر	محدوده پارامتر
نوع لیزر	CO <sub>2</sub>
عملکرد	CW
ماکزیمم توان	۵۰W
طول موج	۱۰۶۴nm

مشخصات هندسی برشکاری عبارت است از عرض بریدگی بالایی، عرض بریدگی پایینی و منطقه متاثر از حرارت بالایی و پایینی و نسبت عرض بریدگی بالایی به عرض بریدگی پایینی است که در شکل ۲ مشخصات هندسی در مقطع عرضی شیار برش نشان داده شده است. از میکروسکوپ نوری (مدل Hund Wetzlar با بزرگ‌نمایی ۴۰ برابر) برای بررسی مشخصات هندسی شیارهای برش نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات هندسی با نرم‌افزار Imagej اندازه‌گیری شد. زاویه مخروطی شدن را با استفاده از فرمول ۱ می‌توان محاسبه نمود [32]:

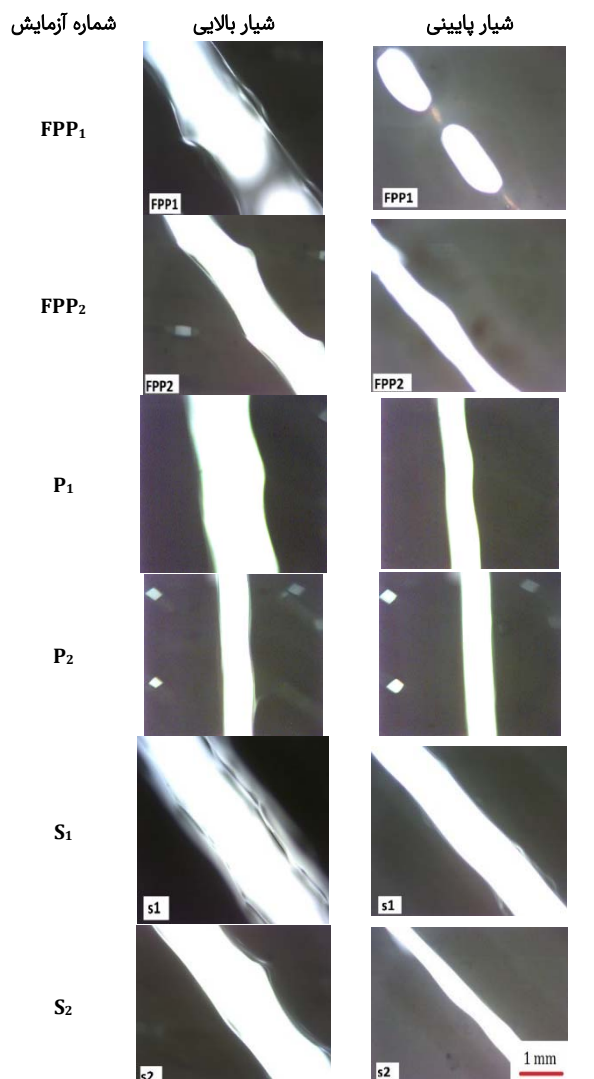
$$\alpha = \tan^{-1} \frac{W_t - W_b}{2t} \quad (1)$$

که در آن  $\alpha$  زاویه مخروطی شدن،  $W_t$  پهنای عرض بالا،  $W_b$  پهنای عرض پایینی و  $t$  ضخامت قطعه است.

سه پارامتر ورودی شامل سرعت برشکاری لیزر، موقعیت کانونی لیزر و توان لیزر به‌عنوان متغیرهای ورودی فرآیند در نظر گرفته شد. موقعیت کانونی زمانی صفر در نظر گرفته می‌شود که صفحه کانونی روی سطح ماده تنظیم شده باشد. به همین ترتیب، صفحه کانونی چنانچه در بالا یا پایین سطح قطعه‌کار قرار گرفته شده

جدول ۵) مقادیر ورودی و خروجی فرآیند برشکاری لیزری

شماره آزمایش	پارامترهای ورودی			پارامترهای خروجی			زاویه مخروطی شدن
	سرعت برش (mm/s)	توان لیزر (W)	موقعیت نقطه کانونی (mm)	عرض بریدگی بالایی (μm)	عرض بریدگی پایینی (μm)	نسبت عرض بریدگی بالایی به پایینی (μm)	
S <sub>1</sub>	۴	۴۰	-۱/۸	۱۲۱۸	۸۱۷/۷	۶۹۴/۱	۴/۴۶
S <sub>2</sub>	۸	۴۰	-۱/۸	۹۱۶/۶	۳۳۳/۳	۷۵۰/۲	۵/۲۰
S <sub>3</sub>	۱۶	۴۰	-۱/۸	۱۱۱۹	برش کامل نیست	-	-
S <sub>4</sub>	۲۰	۴۰	-۱/۸	۹۶۸/۷۵	برش کامل نیست	-	-
FPP <sub>1</sub>	۱۲	۴۰	-۱/۸	۱۱۱۷	۴۴۷/۹	۲/۴۹۳	۵/۹۶۸
FPP <sub>2</sub>	۱۲	۴۰	۰	۶۰۹/۳	۳۹۰/۶	۱/۵۵۹	۱/۹۵
FPP <sub>3</sub>	۱۲	۴۰	۱/۸	۵۸۸	۳۱۷/۷	۱/۸۵۰	۲/۴۱۸
FPP <sub>4</sub>	۱۲	۴۰	۳/۲	۱۰۸۳/۳	برش کامل نیست	-	-
P <sub>1</sub>	۷	۲۰	۰	۸۰۱/۷۲	۳۸۷/۵	۱/۰۳۶	۰/۱۲۷
P <sub>2</sub>	۷	۳۰	۰	۴۲۹/۳۱	۴۵۳/۸۷	۰/۹۴۵	-۰/۲۱۹
P <sub>3</sub>	۷	۴۰	۰	۳۸۵/۳۴	۳۶۴/۷۸	۱/۰۵۶	۰/۱۸۴



شکل ۵) تصاویر نوری از شیار برش ورودی و خروجی در تغییرات موقعیت نقطه کانونی

همان طور که در جدول ۵ دیده می‌شود، در ۴ آزمایش اول سرعت برش از ۴ تا ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه تغییر داده شد. در این آزمایش‌ها توان لیزر ۴۰ وات و موقعیت نقطه کانونی ۱/۸ میلی‌متر ثابت در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه ضخامت ماده مورد استفاده در این مقاله ۳/۲ میلی‌متر است، آزمایش‌های اولیه موقعیت نقطه کانونی ۱/۸- لحاظ شد. با توجه به شکل ظاهری برش و کامل بودن برش، سرعت ۱۲ میلی‌متر بر ثانیه به‌عنوان سرعت مناسب انتخاب شد. در این آزمایش‌ها توان ۴۰ وات به‌عنوان مناسب‌ترین توان انتخاب شد. نتایج نشان داد که هنگامی که موقعیت نقطه کانونی صفر (روی قطعه کار) قرار دارد، کیفیت برش به نسبت سایر برش‌ها بهتر است.

پس از عکس‌برداری از شیارها، تجزیه و تحلیل‌های تصاویر جهت به‌دست‌آوردن عرض بریدگی بالایی و پایینی، زاویه مخروطی شدن هر شیار برش توسط نرم‌افزار ImageJ، صورت پذیرفت. با استفاده از نرم‌افزار، مقادیر مشخصات هندسی شیارهای برش ایجاد شده حاصل شد. در این آزمایش‌ها با تغییر سرعت برش از ۴ میلی‌متر بر ثانیه تا ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه متغییر بود، در حالی که توان لیزر ۴۰ وات و موقعیت نقطه کانونی ۱/۸- ثابت در نظر گرفته شد. عکس شیار بالا و پایین آزمایش‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج اندازه‌گیری عرض بالا و پایین و زاویه مخروطی شدن در جدول ۵ مشخص شده است. در آزمایش‌ها با تغییر موقعیت نقطه کانونی از ۳/۲ تا ۱/۸- و ثابت در نظر گرفتن پارامترهای سرعت برش لیزر (۱۲ میلی‌متر بر ثانیه)، توان لیزر ۴۰ وات، مجموعاً ۴ آزمایش صورت گرفته شد.

شکل ۵ تصاویر شیار برش ورودی و خروجی آزمایش‌های ۱ تا ۴ را نشان می‌دهد. جدول ۵ آزمایش‌های انجام شده و مشخصات هندسی تغییرات موقعیت نقطه کانونی را نشان می‌دهد.

انرژی حرارتی وارد می‌نمایند که باعث افزایش عرض بریدگی پایین می‌شود. با افزایش موقعیت نقطه کانونی لیزر هنگامی که ۱/۸ بالای قطعه کار قرار می‌گیرد، فقط قسمت واگرایی عمق متمرکز به قسمت بالایی قطعه کار انرژی حرارتی وارد می‌نماید که باعث کاهش عرض بریدگی پایین می‌شود تا جایی که با افزایش موقعیت نقطه کانونی عرض بریدگی پایین به صفر می‌رسد. در نمودار ۱-ج، با کاهش موقعیت نقطه کانونی لیزر، نسبت عرض بالا به پایین افزایش پیدا می‌نماید. هنگامی که موقعیت نقطه کانونی صفر یعنی روی قطعه کار است، کمترین بریدگی عرض بالا به پایین گزارش شد که با افزایش موقعیت نقطه کانونی، عرض بالا افزایش و عرض پایین کاهش می‌یابد که در نتیجه نسبت بریدگی عرض بالا به پایین افزایش پیدا می‌کند. با کاهش موقعیت نقطه کانونی لیزر هنگامی که موقعیت نقطه کانونی در عمق قطعه کار قرار گرفته است، زاویه مخروطی شدن افزایش پیدا می‌نماید و هنگامی که موقعیت نقطه کانونی روی قطعه کار است (مقدار صفر) زاویه مخروطی شدن به شدت کاهش پیدا خواهد نمود که با افزایش موقعیت نقطه کانونی لیزر، زاویه مخروطی شدن روند افزایشی پیدا می‌نماید (نمودار ۱-د). همچنین می‌توان با توجه به فرمول ۲، این نکته را مورد بررسی قرار داد که در بعضی از موارد همچون نمونه FPP4 که برش کامل قطعه کار صورت نگرفته است، کاهش چگالی لیزر بر سطح قطعه کار دلیل این پدیده است، زیرا با افزایش موقعیت نقطه کانونی لیزر، سطح بیشتری از قطعه کار توسط پرتوی لیزر پردازش می‌شود و تمرکز پرتو در یک منطقه به خصوص کاهش یافته که در نهایت مقدار چگالی در آن منطقه کاهش می‌یابد [51].

$$\text{Beam density} = \text{Laser power} / \text{Incident beam area} \quad (2)$$

### ۳-۲- تاثیر سرعت بر عرض بریدگی بالا، پایین، نسبت بریدگی بالا به پایین و زاویه مخروطی شدن

در این بخش به بررسی تاثیر تغییرات سرعت بر پارامترهای عرض بریدگی بالایی و عرض بریدگی پایینی، نسبت بریدگی بالا به پایین و زاویه مخروطی شدن در برشکاری لیزری پلی لاکتیک اسید با سرعت‌های متغیر (۴، ۸، ۱۲ و ۲۰) انجام شد. همان‌طور که در نمودار ۲-الف مشخص است، با افزایش سرعت لیزر عرض بریدگی بالا کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه ۳، با افزایش سرعت، انرژی حرارتی که جذب قطعه کار می‌شود، کاهش پیدا می‌کند.

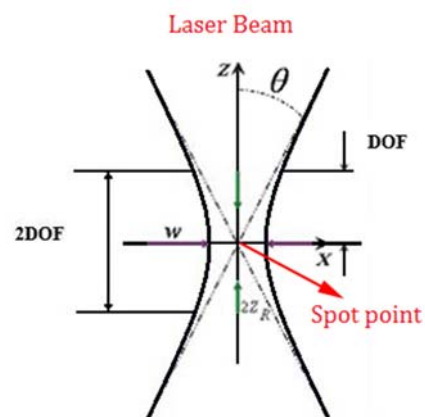
$$\text{Heat in put} = \text{laser power} / \text{speed} \quad (3)$$

با افزایش سرعت تعامل اثر پرتوی لیزر با قطعه کار کاهش پیدا نموده است و حرارت کمتری جذب قطعه کار می‌شود و پردازش مواد ممکن است به خوبی صورت نپذیرد. با افزایش سرعت برشکاری لیزر با توجه به رابطه ۳ انرژی حرارتی که جذب قطعه کار می‌شود، کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه عرض بریدگی بالا کاهش پیدا می‌کند (نمودار ۲-ب). همچنین با افزایش سرعت لیزر نسبت عرض بریدگی بالا به پایین، مطابق نمودار ۲-ج افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار ۲-د، با افزایش سرعت لیزر، زاویه مخروطی شدن

با انجام چند آزمایش برشکاری مقدماتی با تغییر هر پارامتر و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، محدوده کاری فرآیند مشخص شد. برشکاری کامل، برشکاری با ظاهری مناسب و عاری از عیوب ظاهری، پارامترهایی جهت تشخیص و تنظیم پارامتر مطلوب توان لیزر، سرعت برشکاری و موقعیت نقطه کانونی انجام شد. همان‌طور که در جدول ۵ قابل مشاهده است، در ۴ آزمایش اول سرعت برش از ۴ تا ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه تغییر داده شد. با توجه به تحقیق /طوحی و همکاران [37]، موقعیت نقطه کانونی وقتی در نیمه پایین ضخامت ماده مورد استفاده باشد، نتایج بهتری حاصل می‌شود. با توجه به اینکه ضخامت ماده مورد استفاده در این تحقیق ۳/۲ میلی‌متر است، موقعیت نقطه کانونی ۱/۸- لحاظ شد. با در نظر گرفتن شکل ظاهری برش و کامل بودن شیار برش، سرعت ۱۲ میلی‌متر بر ثانیه به عنوان سرعت مناسب انتخاب شد. در این آزمایش‌ها توان ۴۰ وات به عنوان توان مناسب انتخاب شد. نتایج نشان داد که هنگامی که موقعیت نقطه کانونی صفر (روی قطعه کار) قرار گرفته می‌شود، مناسب‌ترین شیار برش ایجاد می‌شود.

### ۳-۱- تاثیر موقعیت نقطه کانونی بر بریدگی عرض بالا و پایین، نسبت عرض بالا به پایین و زاویه مخروطی شدن

چنانچه در شکل ۶ مشاهده می‌شود، ناحیه عمق متمرکز لیزر (DOF) که به ناحیه تاثیر انرژی حرارتی لیزر نیز نامیده می‌شود، در عمق قطعه کار قرار گرفته شده است.

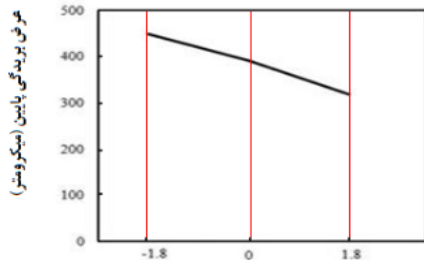


شکل ۶) عمق متمرکز لیزر DOF

همان‌طور که در نمودار ۱-الف مشخص است، با افزایش موقعیت نقطه کانونی لیزر عرض بریدگی بالا افزایش پیدا می‌کند. یعنی با افزایش موقعیت نقطه کانونی لیزر تنها قسمت واگرایی DOF بر سطح قطعه کار انرژی حرارتی وارد می‌نماید و سطح بیشتری را مورد پردازش قرار می‌دهد که سبب افزایش عرض بریدگی بالا می‌شود. در نمودار ۱-ب، با کاهش موقعیت نقطه کانونی لیزر هنگامی که موقعیت نقطه کانونی در عمق قطعه کار قرار گرفته است، قسمت همگرا و قسمت واگرا عمق متمرکز لیزر، به قطعه کار

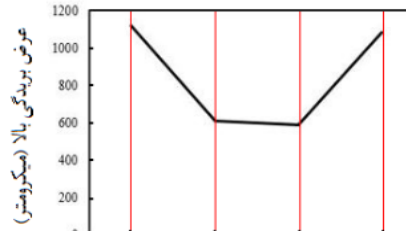
است. در این نمونه‌ها، سرعت برشکاری تا ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه به ترتیب برای نمونه‌های S3 و S4 بالا برده شد که سرعت بالایی است و برش به صورت کامل در این نمونه‌ها انجام نشد.

افزایش می‌یابد. این در حالی است که با کاهش سرعت لیزر تعامل اثر پرتوی لیزر با قطعه کار افزایش می‌یابد. در مواردی همچون نمونه‌های S3 و S4 که برش به صورت کامل نیست، به خوبی مفهوم زمان تعامل اثر پرتو لیزر با قطعه کار قابل استنتاج



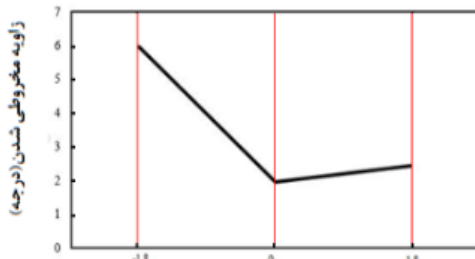
موقعیت نقطه کانونی (میلی متر)

(ب)



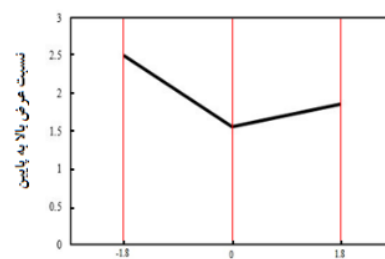
موقعیت نقطه کانونی (میلی متر)

(الف)



موقعیت نقطه کانونی (میلی متر)

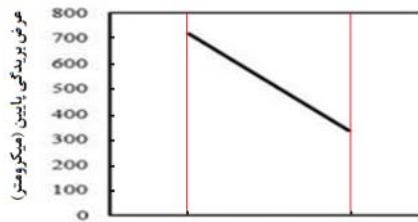
(د)



موقعیت نقطه کانونی (میلی متر)

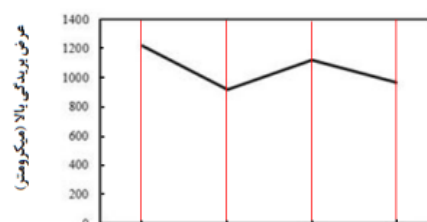
(ج)

**نمودار ۱ الف:** تاثیر موقعیت نقطه کانونی بر عرض بریدگی بالا، **ب:** تاثیر موقعیت نقطه کانونی بر عرض بریدگی پایین، **ج:** تاثیر موقعیت نقطه کانونی بر نسبت عرض بالا به پایین، **د:** تاثیر موقعیت نقطه کانونی بر زاویه مخروطی شدن



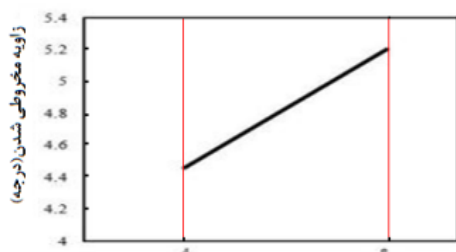
سرعت برشکاری (میلی متر بر ثانیه)

(ب)



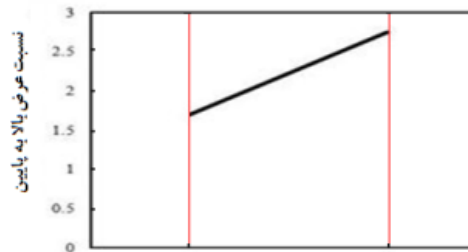
سرعت برشکاری (میلی متر بر ثانیه)

(الف)



سرعت برشکاری (میلی متر بر ثانیه)

(د)



سرعت برشکاری (میلی متر بر ثانیه)

(ج)

**نمودار ۲ الف:** تاثیر سرعت بر عرض بریدگی بالا، **ب:** تاثیر سرعت بر عرض بریدگی پایین، **ج:** تاثیر سرعت بر نسبت عرض بالا به پایین، **د:** تاثیر سرعت بر زاویه مخروطی شدن



**منابع مالی:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

#### منابع

- 1- Bikas H, Stavropoulos P, Chryssolouris G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: A critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;83:389-405.
- 2- Moradi M, Meiabadi S, Kaplan A. 3D Printed parts with honeycomb internal pattern by fused deposition modelling, experimental characterization and production optimization. *Metals and Materials International*. 2019;25:1312-1325.
- 3- Mohamed OA, Masood SH, Bhowmik JL. Optimization of fused deposition modeling process parameters: A review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*. 2015;3:42-53.
- 4- Golchin Bidgoli E, Moradi M, Shamsaei S. Laser drilling simulation of glass by using finite element method and selecting the suitable Gaussian distribution. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(20):416-420. [Persian]
- 5- Moradi M, Ghorbani D, Karami Moghadam M, Kazazi M, Rouzbahani F, et al. Nd:YAG laser hardening of AISI 410 stainless steel: Microstructural evaluation, mechanical properties, and corrosion behavior. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;795:213-222.
- 6- Moradi M, Karami Moghadam M, Kazazi M. Improved laser surface hardening of AISI 4130 low alloy steel with electrophoretically deposited carbon coating. *Optik*. 2019;178:614-622.
- 7- Moradi M, Ghoreishi M, Khorram A. Process and outcome comparison between laser, tungsten inert gas (TIG) and laser-TIG hybrid welding. *Lasers in Engineering*. 2018;39(3-6):379-391.
- 8- Safari M, Farzin M. Experimental investigation of laser forming of a saddle shape with spiral irradiating scheme. *Optics & Laser Technology*. 2015;66:146-150.
- 9- Safari M, Farzin M, Mostaan H. A novel method for laser forming of two-step bending of a dome shaped part. *Iranian Journal of Materials Forming*. 2017;4(2):1-14.
- 10- Safari M. A novel and comprehensive method for laser forming of cylindrical surfaces with arbitrary radius of curvature. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;15(12):9-16. [Persian]
- 11- Safari M, Mostaan H. Experimental and numerical investigation of laser forming of cylindrical surfaces with arbitrary radius of curvature. *Alexandria Engineering Journal*. 2016;55(3):1941-1949.
- 12- Moradi M, Karami Moghadam M, Zarei J, Ganji B. The effects of laser pulse energy and focal point position on laser surface hardening of AISI 410 stainless steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(6):311-318. [Persian]
- 13- Niziev VG, Nesterov AV. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1999;32:1455-1462.
- 14- Haddadi E, Moradi M, Karimzad Ghavidel A, Karimzad Ghavidel A, Meiabadi S. Experimental and parametric evaluation of cut quality characteristics in CO<sub>2</sub> laser cutting of polystyrene. *Optik*. 2019;184:103-114.
- 15- Dorgan JR, Lehermeier H, Mang M. Thermal and

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی فرآیند برشکاری لیزری ورق پلی‌لاکتیک‌اسید به کمک پرینتر سه‌بعدی به روش لایه‌نشانی هم‌جوش پرداخته شده است. سرعت برشکاری لیزر و موقعیت نقطه کانونی لیزر در فرآیند برشکاری متغییر در نظر گرفته شد. در ادامه به نتایج به‌دست‌آمده پرداخته می‌شود:

- با افزایش موقعیت نقطه کانونی لیزر، سطح بالایی قطعه‌کار انرژی حرارتی بیشتری دریافت می‌نماید که منجر به افزایش عرض بریدگی بالا می‌شود، گرچه عرض بریدگی پایین کاهش می‌یابد.
- با کاهش موقعیت نقطه کانونی لیزر، قسمت همگرا و واگرایی عمق متمرکز به عمق قطعه، حرارتی وارد می‌نمایند که در نتیجه عرض بالا و عرض بریدگی پایین افزایش می‌یابد. مناسب‌ترین موقعیت نقطه کانونی روی سطح قطعه‌کار است که کمترین عرض بریدگی بالا و پایین گزارش شد.
- با افزایش سرعت برشکاری لیزر، عرض بریدگی بالا و عرض بریدگی پایین کاهش می‌یابد. علت آن این است که با افزایش سرعت، انرژی حرارتی کمتری به قطعه‌کار وارد می‌شود.
- در سرعت‌های برشکاری لیزری خیلی بالا یا موقعیت‌های نقطه کانونی خیلی زیاد، برشکاری به‌صورت کامل انجام نمی‌شود. این امر بدان جهت است که در سرعت‌های برشکاری لیزری بالا، زمان تعامل اثر پرتوی لیزر با قطعه‌کار کاهش می‌یابد و پرتوی لیزر زمان کافی برای از بین بردن ناحیه مورد برشکاری ندارد و حرارت ورودی به قطعه‌کار کاهش می‌یابد. همچنین در موقعیت‌های نقطه کانونی خیلی زیاد، منطقه تحت تاثیر افزایش پیدا می‌کند که در نتیجه مقدار چگالی وارد شده به قطعه‌کار کاهش می‌یابد.
- با افزایش سرعت برشکاری لیزری نسبت عرض بالا به پایین افزایش می‌یابد و همچنین زاویه مخروطی شدن کاهش می‌یابد.
- بیشترین عرض بریدگی بالا در بیشترین سرعت و کمترین موقعیت نقطه کانونی گزارش شد و کمترین عرض بریدگی بالا در بیشترین موقعیت نقطه کانونی و کمترین سرعت ثبت شد.
- با افزایش و کاهش موقعیت نقطه کانونی عرض بریدگی پایین افزایش پیدا نمود. کمترین عرض بریدگی پایین در موقعیت نقطه کانونی نزدیک قطعه‌کار است.

**تشکر و قدردانی:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

**تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان گواهی می‌کنند که این مقاله تا کنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است.

**تعارض منافع:** نویسندگان مقاله گواهی می‌کنند که در نگارش این مقاله هیچ تعارضی در منافع نویسندگان وجود ندارند.

**سهم نویسندگان:** محمود مرادی (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۳۰٪)؛ حمید فلاوندی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ مجتبی کرمی‌مقدم (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۲۰٪)، محمدصالح

177.

- 31- Hirsch P, Bastick S, Jaeschke P, van den Aker R, Geyer A, Zscheyge M, et al. Effect of thermal properties on laser cutting of continuous glass and carbon fiber-reinforced polyamide 6 composites. *Machining Science and Technology*. 2018;23(1):1-18.
- 32- Hu J, Zhu D. Experimental study on the picosecond pulsed laser cutting of carbon fiber-reinforced plastics. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2018;37(15):993-1003.
- 33- Leone C, Genna S. Heat affected zone extension in pulsed Nd:YAG laser cutting of CFRP. *Composites Part B: Engineering*. 2018;140:174-182.
- 34- Herzog D, Schmidt-Lehr M, Oberlander M, Canisius M, Radek M, Emmelmann C. Laser cutting of carbon fibre reinforced plastics of high thickness. *Materials & Design*. 2016;92:742-749.
- 35- Patela P, Shethb S, Patelc T. Experimental analysis and ANN modelling of HAZ in laser cutting of glass fibre reinforced plastic composites. *Procedia Technology*. 2016;23:406-413.
- 36- Karimzad Ghavidel A, Azdast T, Shabgard MR, Navidfar A, Mamaghani Shishavan S. Effect of carbon nanotubes on laser cutting of multi-walled carbon nanotubes/poly methyl methacrylate Nano composite. *Optics & Laser Technology*. 2015;67:119-124.
- 37- Eltawahni HA, Olabi AG, Benyounis KY. Effect of process parameters and optimization of CO<sub>2</sub> laser cutting of ultrahigh-performance polyethylene. *Optics & Laser Technology*. 2010;31(8):4029-4038.
- 38- Ohkuboa T, Tsukamoto Y, Satob Y. Numerical simulation of laser beam cutting of carbon fiber reinforced plastics. *Physics Procedia*. 2014;56:1165-1170.
- 39- Leone C, Genna S, Tagliaferri V. Fibre laser cutting of CFRP thin sheets by multi-passes scan technique. *Optics & Lasers in Engineering*. 2014;53:43-50.
- 40- Choudhury IA, Chuan PC. Experimental evaluation of laser cut quality of glass fibre reinforced plastic composite. *Optics and Lasers in Engineering*. 2013;51(10):1125-1132.
- 41- Riveiro A, Quintero F, Lusquiños F, del Val J, Comesaña R, Boutinguiza M, Pou J. Experimental study on the CO<sub>2</sub> laser cutting of carbon fiber reinforced plastic composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2012;43(8):1400-1409.
- 42- Goeke A, Emmelmann C. Influence of laser cutting parameters on CFRP part quality. *Physics Procedia*. 2010;5 Pt 5:253-258.
- 43- Kurt M, Kaynak Y, Bagci E, Demirer H, Kurt M. Dimensional analyses and surface quality of the laser cutting process for engineering plastics. *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 2008;41:259-267.
- 44- Davim JP, Oliveira C, Barricas N, Conceição M. Evaluation of cutting quality of PMMA using CO<sub>2</sub> lasers. *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 2008;35:875-879.
- 45- Romoli L, Tantussi G, Dini G. Layered laser vaporization of PMMA manufacturing 3D mould cavities. *CIRP Annals*. 2007;56(1):209-212.
- 46- Marimuthu S, Dunleavey J, Liu Y, Antar M, Smith B. Laser cutting of aluminium-alumina metal matrix composite. *Optics & Laser Technology*. 2019;117:251-259.
- 47- Sharifi M, Akbari M. Experimental investigation of rheological properties of commercial-grade poly(lactic acid)s. *Journal of Polymers and the Environment*. 2000;8:1-9.
- 16- Oksman K, Skrifvars M, Selin JF. Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. *Composites Science and Technology*. 2003;63(9):1317-1324.
- 17- Le Coz G, Fischer M, Piquard R, D'Acunto A, Laheurte P, Dudzinski D. Micro cutting of Ti-6Al-4V parts produced by SLM process. *Procedia CIRP*. 2017;58:228-232.
- 18- Kasuga T, Ota Y, Nogami M, Abe Y. Preparation and mechanical properties of polylactic acid composites containing hydroxyapatite fibers. *Biomaterials*. 2000;22(1):19-23.
- 19- Ahn SH, Montero M, Odell D, Roundy S, Wright PK. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*. 2002;8(4):248-257.
- 20- Zhang Y, Chou K. A parametric study of part distortions in fused deposition modelling using three-dimensional finite element analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2008;222(8):959-968.
- 21- Boschetto A, Giordano V, Veniali F. Modelling micro geometrical profiles in fused deposition process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012;61(9-12):945-956.
- 22- Kantaros A, Karalekas D. Fiber Bragg grating based investigation of residual strains in ABS parts fabricated by fused deposition modeling process. *Materials & Design*. 2013;50:44-50.
- 23- Tymrak BM, Kreiger M, Pearce JM. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*. 2014;58:242-246.
- 24- Mori KI, Maeno T, Nakagawa Y. Dieless forming of carbon fibre reinforced plastic parts using 3D printer. *Procedia Engineering*. 2014;81:1595-1600.
- 25- Peng A, Xiao X, Yue R. Process parameter optimization for fused deposition modeling using response surface methodology combined with fuzzy inference system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;73:87-100.
- 26- Rayegani F, Onwubolu GC. Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;73:509-519.
- 27- Xinhua L, Shengpeng L, Zhou L, Xianhua Z, Xiaohu C, Zhongbin W. An investigation on distortion of PLA thin-plate part in the FDM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;79:1117-1126.
- 28- Boschetto A, Bottini L, Veniali F. Finishing of fused deposition modeling parts by CNC machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2016;41:92-101.
- 29- Reyes-Rodríguez A, Dorado-Vicente R, Mayor-Vicario R. Dimensional and form errors of PC parts printed via fused deposition modelling. *Procedia Manufacturing*. 2017;13:880-887.
- 30- Taufik M, Jain PK. Laser assisted finishing process for improved surface finish of fused deposition modelled parts. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017;30:161-

Proceedings. 2020;21(1):823-827.

50- Kotadiya DJ, Kapopara JM, Patel AR, Dalwadi CG, Pandya DH. Parametric analysis of process parameter for Laser cutting process on SS-304. MaterialsToday Proceedings. 2018;5(2 Pt 1):5384-5390.

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

the effect of process parameters on cutting region temperature and cutting edge quality in laser cutting of AL6061T6 alloy. Optik. 2019;184:457-463.

48- Wetzig A, Herwig P, Hauptmann J, Baumann R, Rauscher P, Schlosser M, et al. Fast laser cutting of thin metal. Procedia Manufacturing. 2019;29:369-374.

49- Parthiban A, Dhanasekaran C, Sivaganesan S, Sathish S. Modeling on surface cut quality of CO<sub>2</sub> laser cutting for Austenitic Stainless steel sheet. MaterialsToday