بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی فرآیند برش لیزری آکریلیک گلاس با لیزر گازکربنیک

مهدی رجایی جعفرآبادی، علیرضا کاریان، محمدرضا حاذق شنوا، سعید طالش علیخانی و ایرج مشایخی اصل

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، تهران

چکیده - برش ظریف یکی از مهمترین کاربردهای برش لیزری است و از آنجا که در اکثر موارد، قطعه کار ممکن است بسیار گران‌قیمت باشد، لذا پیش‌بینی شرایط برش یکی از اولویت‌های کار در برش لیزری ظریف است. در این مطالعه سعی شده تا با یک شبیه‌سازی عددی، شرایط بعد از برش را در یک قطعه کار پیش‌بینی کنیم. بدین منظور ابتدا با معادلات انرژی عرض ناحیه برش بدست آمده و در ادامه در یک آزمایش تجربی درستی این شبیه‌سازی سنجیده شده است. در نهایت نتایج آماری آزمایش تجربی با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی مقایسه شدند.

کلید واژه- آکریلیک گلاس، برش لیزری، عرض ناحیه برش، لیزر گازکربنیک، مدلسازی عددی.

Comparison of experimental and simulated results in CO_2 laser cutting of PMMA

Mahdi Rajaei Jafarabadi, AliReza Karian, MohammadReza Hazegh Shenava, Saeed Talesh Alikhani and Iraj Mashayekhi Asl

Iranian National Center for Laser Science and Technology (INLC), Tehran

Abstract- Fine cutting is one of the most important applications of laser cutting and because most workpieces are expensive, so prediction of cutting conditions in fine laser cutting are upmost importance. In this study, we tried to predict post cutting conditions with a numerical simulation model. First, we calculated theoretical Kerf width with energy balance equations and then with an experimental setup, tested our findings of simulation. Theoretical and experimental results compare statistically.

Keywords: CO_2 lasers, Kerf width, Laser cutting, Numerical simulation, PMMA.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]

۱. مقدمه

لیزر به دلیل انعطاف‌پذیری فوق‌العاده در شرایط برش، دقت بالای عمل، به دست آوردن محصول نهایی با کیفیت بالا، راه‌اندازی سریع، تماس غیرمکانیکی بین قطعه کار و ابزار و اندازه کوچک منطقه متأثر از حرارت، به طور گسترده‌ای در صنعت به عنوان ابزار برش استفاده می‌شود. در برش لیزری ظریف، انتخاب مناسب لیزر و خصوصیات قطعه کار (پارامترهای برش) بهره‌وری برش لیزری را افزایش می‌دهد و باعث بهبود کیفیت محصول نهایی خواهد شد.

علاوه بر این، آهنگ بالای برداشت ماده، دقت بالای ابعادی، محصول نهایی با کیفیت بالا و دقت تکرارپذیری در تیراژ بالای عملیات خواسته‌هایی هستند که استفاده از لیزر را مناسب جلوه می‌دهند. همچنین با استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری جدید، برش اشکال پیچیده نیز فراهم شده است[۱]. در نتیجه، بررسی بازده ترمودینامیکی (بازده قانون اول و دوم ترمودینامیک) و ارزیابی کیفیت نهایی محصول در ماشینکاری لیزری ضروری به نظر می‌رسد.

به همین منظور یکی از روش‌های محاسبات بازده لیزری شبیه‌سازی یا مدل‌سازی فرآیند برش لیزری قبل از انجام عملیات اصلی است. مدل‌سازی فرآیند برش لیزری دید بهتری از اتفاقات فیزیکی رخ داده شده در طی فرآیند به دست می‌دهد.

مطالعات زیادی در زمینه فرآیند برداشت ماده در برش لیزری انجام شده است. مدل‌های حرارتی در این مطالعات را می‌توان به سه دسته تحلیلی، عددی و تجربی تقسیم کرد[۲].

در مطالعه حاضر، محاسبات عددی برای شناسایی تأثیر پارامترهای برش در عرض ناحیه برش به کار گرفته شده است. درستی نتایج این شبیه‌سازی با آزمایش تجربی برش بر روی یکی از مواد پرکاربرد در برش لیزری (آکریلیک گلاس) مورد آزمون قرار گرفته است. آکریلیک گلاس هدایت حرارتی کم و خاصیت جذب لیزر بالایی دارد و به همین سبب می‌توان از آن در پژوهش‌های مربوط به لیزر استفاده کرد.

۲. مدلسازی ریاضی:

موازنه انرژی بین انرژی جذب شده از لیزر در واحد عمق و انتقال و همرفت حرارت در ناحیه زیر تشعشع، تغییر فاز و سهم انرژی شیمیایی وجود دارد. با نوشتن معادلات مربوط به این عبارت‌ها و برقراری توازن در آن‌ها در نهایت معادلات زیر را به دست می‌آوریم:

رابطه بین توان و سرعت و عرض ناحیه برش را می‌توان بصورت فرمول شماره (۱) تعریف کرد[۳]. در این رابطه یک سری ثوابت و نیز ضخامت ماده و دمای ذوب و همچنین گرمای نهان ذوب و تبخیر به هم مربوط می‌شود[۴] .

$$\frac{P}{d}=\frac{vw_k+A_3\sqrt{vw_k}}{A_0} \qquad (۱)$$

که در آن d ضخامت ماده به متر، v سرعت پیشروی لیزر به متر بر ثانیه، w_k عرض ناحیه برش به متر است همچنین P برابر توان ورودی به ماده است که بصورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$P=P_0+\dot{q}_L \qquad (۲)$$

که در این رابطه P_0 توان خروجی لیزر به وات و q_L نرخ انتقال حرارت بر مبنای واکنش‌های شیمیایی است.

$$A_0=\frac{A}{a_0} \qquad (۳)$$

در این رابطه A فاکتور کوپل انرژی است.

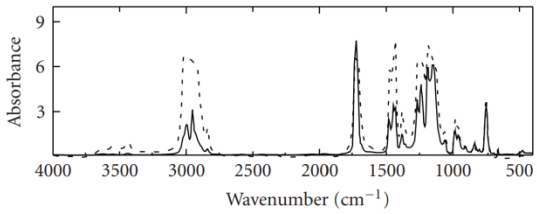
$$A_3=\frac{1}{a_0}\frac{w_k+2wK(T_m-T_0)}{2\sqrt{\alpha w w_k}} \qquad (۴)$$

در این معادله α ضریب پخش حرارتی به متر مربع بر ثانیه، w قطر پرتو بر روی قطعه کار به متر و K ضریب هدایت حرارتی به وات بر متر -کلوین، T_m دمای ذوب به کلوین و T_0 دمای محیط به کلوین است.

$$a_0=\rho[C_p(T_m-T_0)+L_m+\beta L_b] \qquad (۵)$$

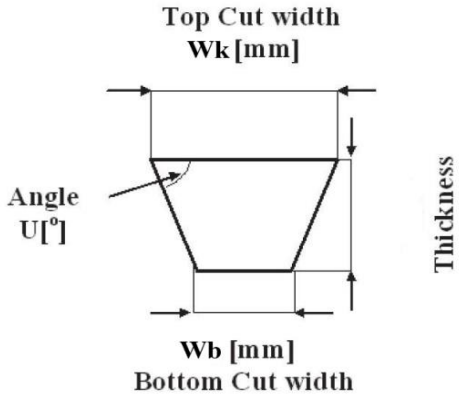
C_p حرارت مخصوص به ژول بر کیلوگرم کلوین، ρ چگالی ماده به کیلوگرم بر مترمکعب، L_b گرمای نهان تبخیر به ژول بر کیلوگرم، L_m گرمای نهان ذوب و β کسر مشارکت تبخیر است. محاسبات با استفاده از نرم افزار Matlab و با برنامه نویسی در چهار توان ۶ و ۸ و ۱۰ و ۱۲ وات با سرعت پیشروی ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلیمتر بر دقیقه بر روی آکریلیک گلاس انجام شد. در شکل شماره ۱ طیف جذبی آکریلیک گلاس آورده شده است [۵].

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]



شکل شماره ۱- طیف جذبی آکریلیک گلاس

در فرآیند انتقال پرتو لیزر و همچنین در اثر هدایت حرارتی قطعه کار مقداری از توان لیزر تلف می‌شود[۶]. این تلفات در حالت کلی به دو شکل اولیه و ثانویه تقسیم-بندی می‌شوند: تلفات اولیه وقتی اتفاق می‌افتد که لیزر به قطعه کار برخورد کرده و از آن می‌گذرد. این توان در قطعه کار اثری به جا نمی‌گذارد و اگر زیر قطعه کار اصلی قطعه کار دیگری بگذاریم، اثر این توان لیزری تلف شده بر روی آن مشاهده می‌شود. تلفات ثانویه تلفات توانی هستند که بعد از تحول و دگرگونی حرارتی قطعه کار اتفاق می-افتد[۷]. در حالت کلی محاسبه میزان این تلفات بسیار مشکل است. در مطالعه حاضر سعی شده تا با بررسی مقطع برش آکریلیک گلاس مدلی برای محاسبه این تلفات محاسبه شود؛ بدین شکل که مقطع برش همان‌گونه که در شکل شماره ۲ نشان داده شده است، در نظر گرفته شده و با ادامه فرضی مقطع برش و انجام محاسبات بر مبنای تشابه مثلثات مقدار نهایی عمق به وجود آمده توسط هر توان و سرعت لیزر به دست می‌آید. حال با مقایسه این ضخامت با ضخامت اصلی قطعه کار می‌توان توان اصلی که قابلیت برش به میزان مشاهده شده را دارد، به دست آورد. در این مرحله این مقدار جدید توان، به جای توان قبلی در فرمول شماره (۱)، جایگذاری می‌شوند و مقادیر جدید عرض ناحیه برش به دست می‌آید.



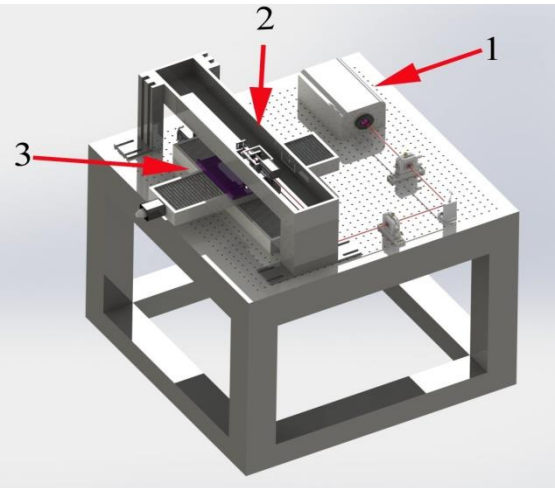
شکل شماره ۲ - مقطع عرضی منطقه برش

۳. نتایج تجربی:

آزمایش تجربی بر روی یک لیزر برش CO_2 با توان متغیر 12-0.1 وات، بر روی نمونه‌هایی از جنس آکریلیک گلاس شفاف به ضخامت 0.8mm، با سرعت و توان‌های مختلف انجام پذیرفت. تکرارپذیری فرآیند برش با انتخاب یک الگوی برش ساده و کانونی کردن لیزر توسط یک عدسی ZnSe با قطر 28 mm و فاصله کانونی 127mm انجام شد. قطر پرتو لیزر قبل از عدسی 7mm است. با توجه به اینکه لیزر فوق از دسته لیزرهای گازی با توان پایین بوده و فاکتور کیفیت آن حدود 1.05 می‌باشد، لذا برای محاسبه قطر لکه در کانون از رابطه ذیل استفاده شده است.

$$W \approx \frac{4\lambda}{\pi}\frac{f}{D} \qquad (۶)$$

در این فرمول λ طول موج لیزر CO_2، f فاصله کانونی لنز ZnSe و D قطر باریکه قبل از عدسی است.

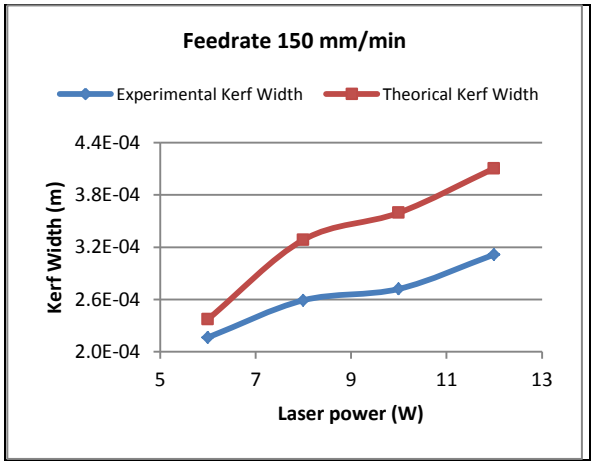


شکل شماره ۳- نمای دستگاه استفاده شده در آزمایش تجربی- ۱) چشمه لیزری ۲) سیستم تنظیم نقطه کانونی ۳) میز متحرک دو محوره

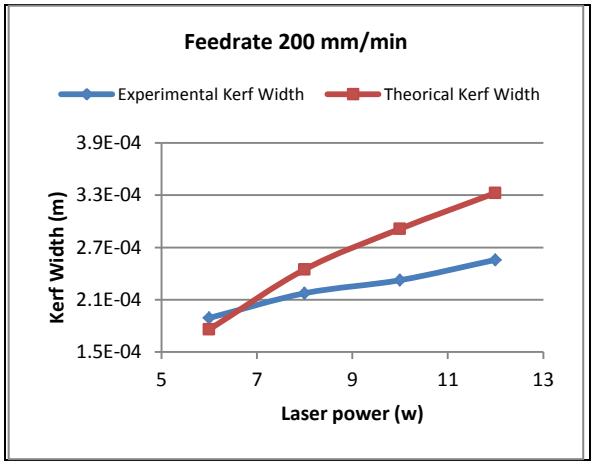
نمونه‌های برش به دست آمده با استفاده از یک میکروسکوپ با توان بزرگنمایی ۱۰۰ برابر بررسی شده و اندازه عرض ناحیه برش در بالا و پایین قطعه کار بدست آمد.

مقایسه یافته‌های تجربی و شبیه سازی عددی در شکل-های ۴ تا ۶ نشان داده شده است. این مقایسه بر مبنای سرعت پیشروی تقسیم‌بندی شده است.

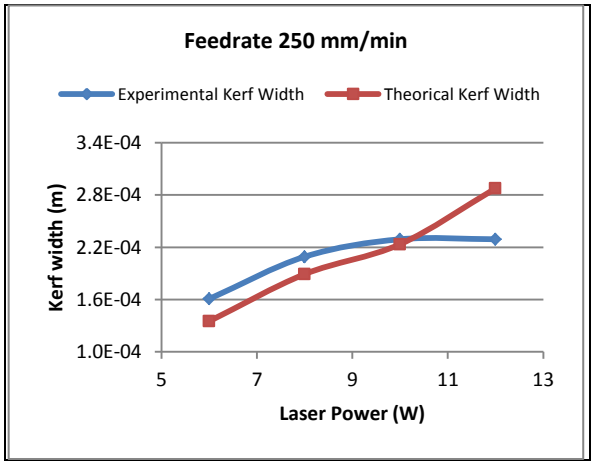
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]



شکل شماره ۴- مقایسه عرض ناحیه برش بر اساس توان لیزر در دو مدل تجربی و عددی در سرعت پیشروی ۱۵۰ میلیمتر بر دقیقه



شکل شماره ۵- مقایسه عرض ناحیه برش بر اساس توان لیزر در دو مدل تجربی و عددی در سرعت پیشروی ۲۰۰ میلیمتر بر دقیقه



شکل شماره ۶- مقایسه عرض ناحیه برش بر اساس توان لیزر در دو مدل تجربی و عددی در سرعت پیشروی ۲۵۰ میلیمتر بر دقیقه

همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، مقادیر شبیه‌سازی مطابقت زیادی با اعداد بدست آمده از آزمایشات تجربی دارد. این مسئله با توجه به اینکه فرمول-های عددی بر اساس هر جنسی از ماده تعریف شده است، می‌توان امیدوار بود که این مدل شبیه‌سازی برای مواد دیگر مورد استفاده در برش لیزری نیز قابل تعمیم باشد. هرچند آزمایشات تجربی بیشتری در این زمینه لازم است.

۴. نتیجه گیری:

در این مطالعه سعی شد تا با یک شبیه سازی عددی برای عرض ناحیه برش، مدلی طراحی شود تا با پیش‌بینی شرایط بعد از برش در قطعه کارهای گرانقیمت، از اتلاف اقتصادی جلوگیری کند. به همین منظور، درستی این مدل ریاضی با یک آزمایش تجربی شامل یک لیزر برش گازکربنیک و قطعه کار آکریلیک گلاس به عنوان یکی از پرکاربردترین مواد در برش لیزری مورد آزمون قرار گرفت. این مقایسه بر مبنای توان‌ها و سرعت‌های پیشروی مختلف انجام شده و نتایج این مقایسه بر مبنای سرعت پیشروی برای هر دو مدل عددی و تجربی در نمودارهای مربوط ارائه گردید. مشاهده می‌شود که یافته‌های آزمایش تجربی علی‌الخصوص در توان‌های پایین مطابقت زیادی با نتایج شبیه‌سازی عددی دارد. از آن‌جا که فرمولاسیون ریاضی شامل مشخصات ماده تحت برش است، لذا می‌توان نتایج این آزمایش را به سایر مواد تحت برش لیزری تعمیم داد. مطالعات تجربی بیشتری در این زمینه مورد نیاز است.

منابع:

[1] Nukman, Y. et al. "*Optimization of prediction error in CO_2 laser cutting process by Taguchi artificial neural network hybrid with genetic algorithm*", **Appl. Math. Inf. Sci**. 7, No.1, 2013, 363-370

[2] Kim, M.J., "*Transient evaporative laser cutting with moving laser by boundary element method*", **Applied Mathematical Modeling**, 28, 2004, 891-910

[3] Kar, A. Rothenflue, A. Latham, P., "*Scaling law for thick-section cutting with a chemical oxygen-iodine laser*", **J.Laser Appl**, 9, 1997, 279-286

[4]Yilbas, B.S., "*Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis*", **Journal of material processing technology**, 155-156, 2004, 2106-2115

[5] Ahmed, R.M., "*Optical study on Poly(methyl methacrylate)/ Poly(vinil acetate) blends*", **International journal of photoenergy**, Vol,2009, Article ID 150389, 7pages, 2009

[6] Yilbas, B.S. et al.,"*Laser cutting of thin aluminum and silicon alloy: Influence of laser power on Kerf width*", **Advanced materials research**, 445, 2012, 442-447

[7] Tani, G. et al., "*Prediction of melt geometry in laser cutting*", **Applied surface science**, 208-209, 2003, 142-147

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]