



چگونگی تأثیر پارامترهای فرایند برش کاری لیزری دیاکسید کربن کم توان بر کیفیت برش قطعات پلی کربنات تولید شده به روش قالب‌گیری تزدیقی

محمود مرادی^{۱*}، امید مهرابی^۲، طاهر ازدست^۳، خالد بن یونیس^۴

۱- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

۲- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۴- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه دوبلین، دوبلین، ایرلند

* ملایر، صندوق پستی ۶۵۷۱۹-۹۵۸۶۳ moradi@malayeru.ac.ir

چکیده

در این پژوهش تأثیر فشار گاز و موقعیت نقطه کانونی بر کیفیت هندسی و صافی سطح شیار برش در برش کاری لیزری قطعات تزدیقی پلی-کربنات به ضخامت ۳.۲ میلی‌متر با استفاده از لیزر دیاکسید کربن پیوسته کم‌توان مورد بررسی قرار گرفته شده است. فشار گاز و موقعیت نقطه کانونی پارامترهای متغیر در تحقیق می‌باشد، در حالی که سایر پارامترها (توان لیزر و سرعت برش کاری) ثابت در نظر گرفته شده‌اند. آزمایش‌های فشار گاز با تغییر فشار گاز از ۰.۵ تا ۳.۵ بار و آزمایش‌های موقعیت نقطه کانونی با تغییر موقعیت نقطه کانونی از ۰ تا ۴ میلی‌متر صورت پذیرفت. کیفیت هندسی برش (عرض بریدگی بالایی، عرض بریدگی پایینی، میزان مخروطی بودن شیار برش و منطقه متأثر از حرارت بالایی) و صافی سطح شیار برش به عنوان پارامتر خروجی فرایند در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد فشار گاز و موقعیت نقطه کانونی تأثیر بسزایی در کیفیت درز برش دارد. افزایش فشار گاز و موقعیت نقطه کانونی لیزر عرض بالایی و پایینی را افزایش می‌دهند. 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 شیار برش می‌شود و کاهش موقعیت نقطه کانونی باعث کاهش صافی سطح شیار برش می‌شود. مشاهدات نشان داد که قرارگرفتن موقعیت نقطه کانونی لیزر در عمق قطعه کیفیت برش لیزری را افزایش می‌دهد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۸ دی ۱۳۹۵

پذیرش: ۱۰ دی ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۱۰ بهمن ۱۳۹۵

کلید واژگان:

برش کاری لیزری

قالب‌گیری تزدیقی

پلی‌کربنات

موقعیت نقطه کانونی

فشار گاز

The effect of low power CO₂ laser cutting process parameters on polycarbonate cut quality produced by injection molding

Mahmoud Moradi^{1*}, Omid Mehrabi¹, Taher Azdast², Khaled Y. Benyounis³

1- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

3- School of Mechanical & Manufacturing Engineering, Dublin City University, Dublin, Ireland

* P.O.B. 65719-95863, Malayer, Iran, moradi@malayeru.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 28 December 2016

Accepted 30 December 2016

Available Online 29 January 2017

Keywords:
Laser cutting
Injection molding
Polycarbonate
Focal plane position
Gas pressure

ABSTRACT

In the present study, the effect of gas pressure and laser beam focal plane position (FPP) on the geometry and roughness of kerf quality of the injected polycarbonate with the thickness of 3.2 mm in laser cutting by using low power continuous CO₂ laser is investigated. Gas pressure and FPP were variable parameters in this research, while other processing parameters (i.e. laser power and cutting speed) are considered constant. Gas pressure experiments were carried out by varying the gas pressure from 0.5 to 3.5 bars and the FPP experiments were performed in FPP=0 to FPP= -4mm. Kerf geometry quality (upper and lower kerf width, kerf taper, upper heat affected zone) and surface roughness of the kerf wall were also considered as the responses. Results show that gas pressure and FPP has a significant effect on the kerf quality. Increasing the gas pressure and the position of the laser beam focal point increases the upper and lower kerf width. Results also reveal that upper heat affected zone value decreases by reduction in FPP and increases the gas pressure. Increasing the gas pressure will reduce the kerf taper angle and reduction in the FPP reduces the surface roughness of the kerf wall. Observations indicated that by locating the laser spot point in the depth of the workpiece the laser cutting quality increases.

کند و یک جبهه برش ایجاد می‌نماید و ماده مذاب از جبهه برش به وسیله‌ی

فشار بالای گاز کمکی به بیرون رانده می‌شود. برش ماده به وسیله‌ی حرکت

جهبه برش در ماده صورت می‌گیرد [1].

پلی‌کربنات‌ها که گستره‌ای از پلیمرهای ترمoplastیک هستند، به خاطر

۱- مقدمه

برش کاری لیزری، فرایند ماشین‌کاری دو بعدی است که از برداشت و حذف

مواد به وسیله‌ی تمرکز پرتویی با شدت بالا بر روی قطعه کار صورت می‌گیرد.

حرارت پرتو لیزر قطعه را در جهت ضخامت یا عمق مواد، ذوب یا تبخیر می-

Please cite this article using:

M. Moradi, O. Mehrabi, T. Azdast, Kh. 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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

و صافی سطح شیار برش، برش لیزری پلی کربنات به ضخامت ۳.۲ میلی‌متر با استفاده از لیزر دی اکسید کربن پیوسته کم‌توان مورد بررسی قرار گرفته شده است. در بیشتر تحقیقات قبلی از لیزرهای برتون برای برش کاری استفاده شده است، در حالی که در این پژوهش استفاده از یک لیزر کم‌توان ۵۰ وات که بیشتر در در دسترس صنایع می‌باشد و قیمت کمتری دارد، برای برش ورق پلی کربنات استفاده شد. در آزمایش‌های فشار گاز با تغییر فشار گاز از ۰.۵ تا ۳.۵ بار و در آزمایش‌های با تغییر موقعیت نقطه کانونی از ۰ تا ۴ و بررسی تأثیر آن بر روی کیفیت هندسی برش (عرض بریدگی بالایی و پایینی و میزان مخروطی بودن شیار برش، منطقه متأثر از حرارت بالایی) و صافی سطح شیار برش پرداخته شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با افزایش فشار گاز و موقعیت نقطه کانونی عرض بریدگی بالایی و پایینی افزایش پیدا می‌کند. همچنین کاهش موقعیت نقطه کانونی و افزایش فشار گاز باعث کاهش منطقه متأثر از حرارت بالایی می‌شود. افزایش فشار گاز باعث کاهش میزان مخروطی بودن شیار برش می‌شود و کاهش موقعیت نقطه کانونی باعث کاهش صافی سطح شیار برش می‌شود.

۲- تحقیقات آزمایشگاهی

در این تحقیق نمونه‌های مورد آزمایش از پلی کربنات بی‌رنگ^۴ ساخت شرکت کره‌ای^۵ با استفاده از روش قالب‌گیری تزریق پلاستیک توسط دستگاه تزریق پلاستیک^۶ محصول شرکت نکو بهینه ماشین در قالبی به ابعاد $175 \times 80 \times 80$ میلی‌متر و ضخامت ۳.۲ میلی‌متر تولید شدند. شکل ۱ دستگاه تزریق و شکل ۲ قالب استفاده شده برای تولید نمونه‌ها را نشان می‌دهد، و همچنین شرایطی فرایندی قالب گیری تزریقی نمونه‌ها جدول ۱ آورده شده است.

در ادامه برای برش کاری لیزری نمونه‌ها از دستگاه لیزر دی اکسید کربن رایت HX-1290SE در حالت پیوسته با حداکثر توان ۶۰ وات استفاده گردید. موقعیت نقطه کانونی لیزر یکی از پارامترهای متغیر فرایند برش لیزری می‌باشد. روش تعیین موقعیت نقطه کانونی لیزر مورد استفاده بدین گونه می‌باشد که یک ورق پلگسی گلس (اکرلیک) به صورت ۸۰ درجه نسبت به افق توسط پایه‌ای که در شکل ۳ دیده می‌شود نصب شد و پرتو لیزر به صورت عمود بر سطح افق از روی آن عبور داده شد. اثر پرتو بر روی ورق می‌افتد و بدین صورت می‌توان موقعیت نقطه کانونی را اندازه‌گیری کرد [15].



Fig. 1 Injection molding machine used in the research

شکل ۱ دستگاه تزریق استفاده شده در تحقیق

⁴ Hopelex PC-1100U

⁵ Lotte Chemical

⁶ NBMH XF-128

داشتن خواصی مانند خواص شیمیایی، مقاومت در برابر ضربه و خراش، مقاومت در برابر کشش و خمش، عایق حرارتی، در صنایع اتومبیل جهت تزئینات داخلی خودرو، ساخت داشبورد و متعلقات آن، ساخت سپر و پانل‌های داخلی و شیشه‌های چراغ اتومبیل‌های مدرن، در صنایع بهداشتی و پزشکی جهت ساخت بطری‌های شفاف برای بسته‌بندی مواد غذایی و داروئی، ساخت انواع عینک‌های طبی و صنعتی، در صنایع برق و کامپیوتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [2].

فرآوری لیزری مواد اخیراً برای کارهای مختلف صنعتی (جوشکاری، سوراخکاری، سختکاری و غیره) مورد استفاده قرار می‌گیرد [3-7]. اخیراً برش لیزری یک فرایند ساخت شناخته شده است که مکرراً برای برش مواد مختلف مانند پلاستیک‌های گرم‌نمایی به کار می‌رود [8]. در مطالعه بررسی اثر پارامترهای فرایند و بهینه‌سازی پارامترها در برش کاری لیزر پلی‌متیل با عملکرد فوق العاده بالا با استفاده از یک لیزر دی اکسید کربن که توسط الطوحنی و همکاران [9] انجام شد، نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش سرعت برش و موقعیت نقطه کانونی^۱، بریدگی بالایی کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش قدرت لیزر، بریدگی بالایی افزایش پیدا می‌کند. موقعیت نقطه کانونی اثر بسزایی در بریدگی بالایی دارد. با افزایش سرعت برش صافی سطح شیار برش افزایش می‌یابد و با افزایش قدرت لیزر صافی سطح شیار برش کاهش می‌یابد. در تحقیق ریبورو و همکارانش [10] مطالعه تجربی روی برش پلاستیک کامپوزیت فیبر کربن تقویت شده با لیزر دی اکسید کربن انجام شد. در این تحقیق تأثیر پارامتر های فرایند در هر دو حالت پیوسته و پالسی در برش مطالعه قرار گرفت. برش با حداقل منطقه متأثر از حرارت حدود ۵۴۰ میکرومتر با کیفیت پرتو بالا و کار در حالت پالسی بدست امد. علاوه بر این در این مطالعه به بررسی سیستم تزریق گاز کمکی در دو حالت با استفاده از نازل مافوق صوت و نازل معمولی گاز کمکی پرداخته شده است. در مطالعه آنالیز نظری و آزمایشی برش مواد غیرفلزی با لیزر کم‌توان دی اکسید کربن توسط بای هوژو و همکاران [11] انجام شد. پانلولو دیویم و همکارانش [12] به بررسی تأثیر پارامترهای فرایند برش کاری لیزری (قدرت لیزر و سرعت برش) بر کیفیت برش (زبری سطح، منطقه متأثر از حرارت^۲، دقت ابعادی) مตیل ماتکریلات با ضخامت ۶ میلی‌متر با استفاده از لیزر دی اکسید کربن پرداخته‌اند. برش در دو حالت خطی و پیچیده دو بعدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در برش کامپلکس دو بعدی در متنیل ماتکریلات منطقه متأثر از حرارت ۰.۱۲-۰.۳۷ میلی‌تر و زبری سطح پایین و کمتر از ۱ میکرومتر است. تحلیل آزمایشی و مدل‌سازی^۳ برای منطقه متأثر از حرارت در برش کاری لیزری کامپوزیت‌های پلاستیکی تقویت شده با فیبر گلاسه توسط پادل و همکاران [13] صورت گرفت. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر پارامترهای برش لیزری یعنی قدرت لیزر، سرعت برش و فشار گاز روی منطقه متأثر از حرارت می‌باشد. در تحقیق درک هرزتارک و همکاران [14] به مطالعه برش لیزری بر روی فیبر کربنی تقویت شده پلاستیک با ضخامت های بالا انجام شده است و روش جدیدی که با استفاده از پاس‌ها موازی لیزر توансنتد فیبر کربنی تقویت شده پلاستیک با ضخامت ۱۳ میلی‌متر را برش دهنده.

در این مطالعه تأثیر فشار گاز و موقعیت نقطه کانونی بر کیفیت هندسی

¹ Focal Plane Position (FPP)

² Heat Affected Zone (HAZ)

³ Artificial Neural Network

موقعیت نقطه کانونی زمانی صفر در نظر گرفته می‌شود که صفحه کانونی بر روی سطح ماده تنظیم شده باشد به همین ترتیب صفحه کانونی چنانچه در بالا یا پایین سطح قطعه کار باشد موقعیت کانونی لیزر به ترتیب مثبت و منفی است. در شکل ۴ از چهار راست موقعیت کانونی لیزر مثبت، موقعیت کانونی لیزر صفر و موقعیت کانونی لیزر منفی نشان داده است.

برای بررسی تأثیر پارامتر فشار گاز و موقعیت نقطه کانونی بر پارامترهای خروجی مجموعاً هفت آزمایش با در نظر گرفتن فشار گاز متغیر (۰.۵ تا ۳.۵ میلی متر بر ثانیه)، توان لیزر ۲۵ وات و موقعیت نقطه کانونی -۳- ثابت انجام شد. با توجه به تحقیقات نویسندهان [17] پارامترهای سرعت برش کاری و توان لیزر که در تنظیمات آزمایش‌های ۷ تا ۱۲ ارائه شده است نسبت به آزمایش‌های اولیه تغییرات فشار گاز، تغییر داده شده است. سرعت برش کاری ۶ میلی متر بر ثانیه و توان لیزر ۳۵ وات یکی از مناسب‌ترین تنظیمات دستگاه برازی این دو متغیر بوده است [17]. آزمایش موقعیت نقطه کانونی با تغییر موقعیت نقطه کانونی از ۰ تا -۴ میلی متر و ثابت در نظر گرفتن پارامترهای سرعت برش لیزر ۶ میلی متر بر ثانیه، توان لیزر ۳۵ وات، فشار گاز ۳ بار مجموعاً ۵ آزمایش انجام شد. جدول ۲ تنظیمات آزمایشگاهی و مقادیر پاسخ‌های خروجی تحقیق را نشان می‌دهد. چنانچه در جدول ۲ دیده می‌شود ۷ آزمایش نخست مربوط به تغییرات فشار گاز و ۵ آزمایش بعد مربوط به آزمایش‌های موقعیت نقطه کانونی می‌باشد.

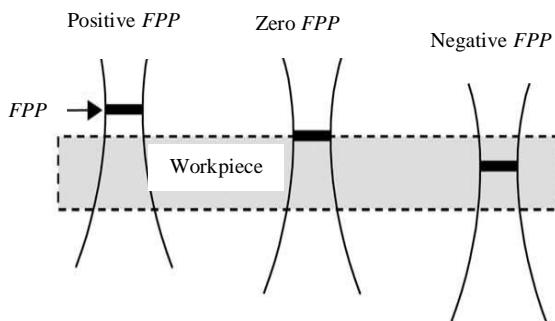


Fig. 4 Variation of focal Plane position on the work piece [16]

شکل ۴ تغییرات موقعیت نقطه کانونی روی قطعه کار [16]

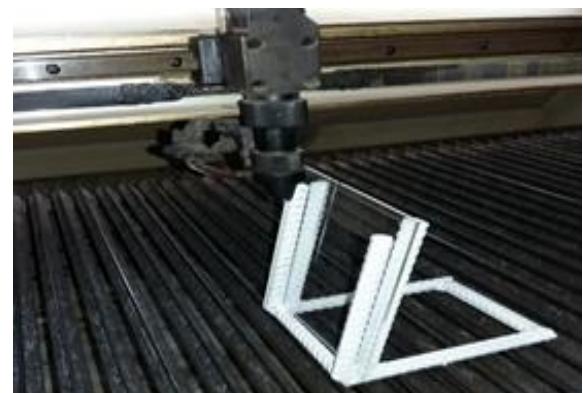


شکل ۲ قالب استفاده شده برای تولید نمونه‌ها

جدول ۱ شرایط فرایندی قالب گیری تزریقی نمونه‌ها

Table 1 process conditions injection molding specimens

شرطی فرایندی	قالب گیری فرایند قالب گیری تزریقی	اندازه هر یک از شرایط واحد
درجه سانتی گراد	270, 290, 320, 320	دماهی نواحی سینلندر تزریقی
بار	85	فشار نگهداری
ثانیه	2	زمان اعمال فشار نگهداری
بار	110	فشار تزریق



شکل ۳ تعیین موقعیت نقطه کانونی لیزر CO2 مورد استفاده در آزمایش‌ها

جدول ۲ تنظیمات آزمایشگاهی و مقادیر پاسخ‌های خروجی تحقیق

Table 2 Experimental layout and multi-performance results

شماره آزمایش	سرعت برش (میلی‌متر بر ثانیه)	توان لیزر (وات)	موقعیت نقطه کانونی (میلی‌متر)	فشار گاز (بار)	عرض بریدگی بالایی (میکرومتر)	عرض بریدگی پایینی (میکرومتر)	میزان مخروطی بودن شیار برش (میکرومتر)	حرارت بالایی (میکرومتر)	منطقه متأثر از صافی سطح	شیار برش (میکرومتر)
4.57	534.69	27.11	40.82	214.29	0.5	-3	25	10	1	
4.6	416.22	25.51	40.82	204.08	1	-3	25	10	2	
4.8	518.37	29.97	61.22	253.06	1.5	-3	25	10	3	
4.2	408.16	22.12	122.22	265.30	2	-3	25	10	4	
4.6	351.02	23.28	126.53	275.51	2.5	-3	25	10	5	
4	322.45	22.64	130.61	275.52	3	-3	25	10	6	
3.9	255.10	20.73	132.65	265.32	3.5	-3	25	10	7	
9.38	346.94	28.70	428.57	612.25	3	0	35	6	8	
9.74	330.61	24.23	363.26	518.37	3	-1	35	6	9	
3.95	289.79	18.49	306.12	424.49	3	-2	35	6	10	
3.22	265.30	15.94	163.26	265.31	3	-3	35	6	11	
5.6	265.30	12.75	204.08	285.71	3	-4	35	6	12	

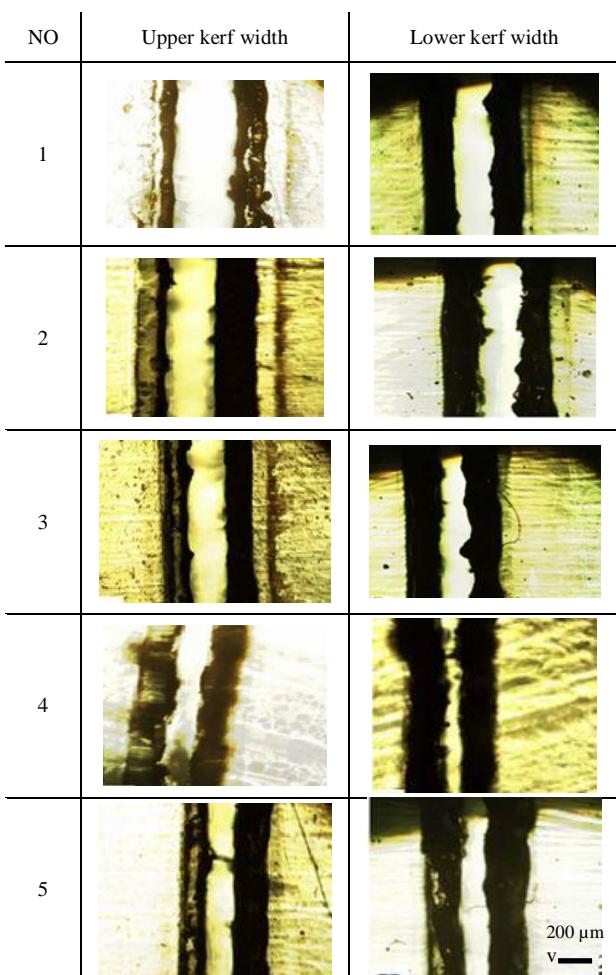


Fig. 7 Kerf width pictures of focal plane position tests

شکل 7 تصویر گرفته از شیار برش آزمایش‌های موقعیت نقطه کانونی

اندازه‌گیری صافی سطح شیار برش از روش تماسی استفاده شده برای اندازه‌گیری صافی سطح شیار برش نمونه‌ها در سه ناحیه از سطح نمونه صافی سطح شیار برش آن اندازه‌گیری شد و مقدار میانگین آن به عنوان صافی سطح شیار برش میانگین در نظر گرفته شد. برای انجام این آزمایش‌های سطح شیار برش میانگین در نظر گرفته شد. برای انجام این آزمایش‌های سطح شیار برش ISO 4287/1 تنظیم شد [19]. شکل 8 دیاگرام صافی سطح شیار برش مربوط به دستگاه زبری سنج مورد استفاده در این مطالعه می‌باشد.

$$R_a = \int_0^L |Y(x)| dx \quad (2)$$

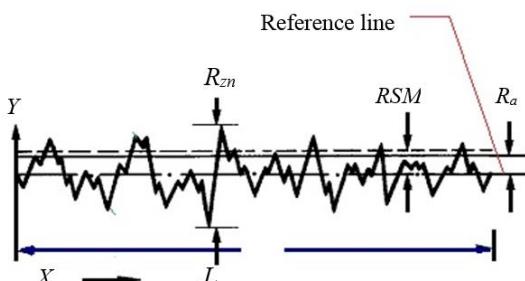


Fig. 8 Surface roughness profile of the kerf wall [18]

شکل 8 دیاگرام صافی سطح شیار برش [18]

به منظور تجزیه تحلیل کیفیت هندسه برش در این تحقیق عرض بردگی بالایی (ورودی)، عرض بردگی پایینی (خروجی)، میزان مخروطی بودن شیار برش و منطقه متأثر از حرارت بالایی مورد بررسی قرار گرفت. شکل 5 مشخصات هندسی مقطع عرضی برش را نشان می‌دهد.

میزان مخروطی بودن شیار برش با استفاده از رابطه 1 بدست می‌آید:

$$\text{taper} = \frac{\text{Upper kerf width} - \text{Lower kerf width}}{2(t)} \quad (1)$$

شکل 6 عکس گرفته شده توسط مکروسکوپ نوری از شیار برش تست‌های فشار گاز 4 و 7 می‌باشد که عکس‌های 7L و 4L تصویر گرفته شده از عرض بردگی پایینی می‌باشد و همچنین عکس‌های 7U و 4U تصویر گرفته شده از عرض بردگی بالایی می‌باشد. همچنین شکل 7 تصویر گرفته شده از شیارهای برش بالایی و پایینی آزمایش‌های موقعیت نقطه کانونی را نشان می‌دهد.

روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری صافی سطح شیار برشی وجود دارد که به دو دسته تکنیک‌های تماسی و غیر تماسی قابل تقسیم می‌شوند. در روش تماسی، که اساس کار دستگاه پروفایلومتر (زبری سنج) است، دستگاه زبری سنج برای محاسبه صافی سطح شیار برش همانطور که در رابطه (2) دیده می‌شود، مجموع کل مساحت پروفیل سطحی ($\int Y(x) dx$) را بر یک طول معین L تقسیم می‌کند و بدین صورت میانگین صافی سطح شیار برش نمونه‌ها بدست می‌آید. صافی سطح شیار برش با حرکت دادن نوک حسگر زبری سنج در طول سطح اندازه‌گیری می‌شود [18]. در این تحقیق نیز برای

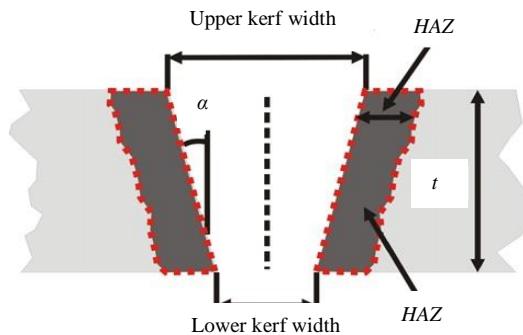


Fig. 5 Geometrical features of cross-section of the kerf [10]

شکل 5 نمایش مشخصات هندسی در مقطع عرضی برش [10]

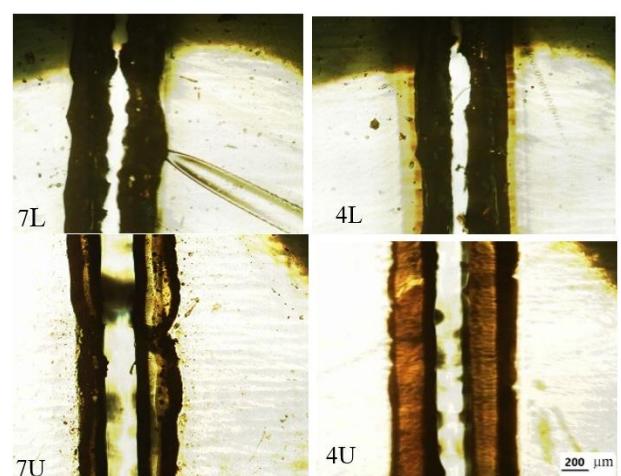


Fig. 6 Kerf pictures of gas pressure tests

شکل 6 تصویر گرفته شده از شیار برش آزمایش‌های فشار

موقعیت نقطه کانونی با قرار گیری نقطه کانونی لیزر در عمق قطعه کار عرض بریدگی بالایی کاهش پیدا می‌کند. دلیل این امر این می‌باشد که با توجه به اینکه انرژی پرتو لیزر در نقطه کانونی متتمرکز شده می‌باشد. در نتیجه زمانی که موقعیت نقطه کانونی در سطح قطعه کار قرار دارد با توجه به انرژی بالای پرتو لیزر باعث افزایش عرض بریدگی بالایی می‌شود و هرچه موقعیت نقطه کانونی از سطح نمونه به زیر سطح می‌رود چنانچه در شکل 15 دیده می‌شود ناجیه عمق متتمرکز لیزر¹ در عمق قطعه کار قرار می‌گیرد. این امر منجر به حرارت دیدن قطعه کار به صورت متتمرکز و عدم گسترش حرارت می‌شود و در پی آن شیار برش کاهش پیدا می‌کند.



شکل 9 زیر سنج مورد استفاده برای اندازه گیری صافی سطح شیار برش

3- نتایج و بحث

1- تحلیل آزمایش‌های فشار گاز

شکل 10-الف نمودار تأثیر فشار گاز بر عرض بریدگی بالایی و شکل 10-ب نمودار تأثیر فشار گاز بر عرض بریدگی پایینی را نشان می‌دهد چنانچه دیده می‌شود، با افزایش فشار گاز عرض بریدگی بالایی و پایینی افزایش پیدا می‌کند این امر می‌باشد که با فشار گاز زیاد مواد مذاب شیار برش به بیرون زدوده می‌شود و درنتیجه عرض بریدگی را افزایش می‌دهد، ولی این امر تا فشار 2 بار می‌باشد و بعد از آن تقریباً اندازه عرض بریدگی بالایی ثابت می‌باشد. اثر فشار گاز در افزایش اندازه عرض بریدگی پایینی چشم گیرتر از عرض بریدگی بالایی می‌باشد که دلیل این رخ داد این می‌باشد که با افزایش فشار گاز، مذاب تشکیل شده به مقدار بیشتری از بریدگی پایینی خارج می‌شود و اندازه آن افزایش پیدا می‌کند. مواد مذاب در شیار بالایی در اثر افزایش فشار راحتتر زدوده می‌شود چون در مععرض مستقیم فشار گاز می‌باشد. اما زدوده شدن مواد مذاب در شیار پایینی به راحتی شیار بالایی نمی‌باشد، چون اثر فشار در عرض قطعه رفتہ کمتر می‌شود. بنابراین چنانچه دیده می‌شود تأثیر افزایش فشار گاز در افزایش عرض بریدگی پایینی بسیار بیشتر و چشمگیرتر از عرض بریدگی بالایی می‌باشد.

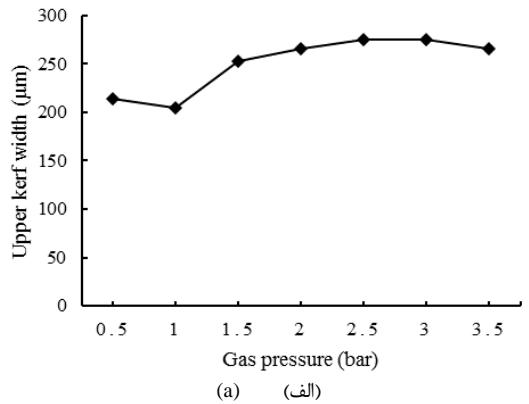
نمودار شکل 11 تأثیر افزایش فشار گاز بر میزان مخروطی بودن شیار برش نیز بدین صورت می‌باشد با افزایش فشار گاز مقدار مخروطی بودن شیار برش کاهش پیدا می‌کند که دلیل این کاهش این می‌باشد که افزایش فشار گاز تأثیر بیشتری در افزایش عرض بریدگی پایینی نسبت به عرض بریدگی بالایی دارد و با افزایش فشار گاز ماده مذاب به بیرون زدوده باشد.

نمودار شکل 12 تأثیر فشار گاز بر منطقه متأثر از حرارت بالایی را نشان می‌دهد. چنانچه دیده می‌شود، با افزایش فشار گاز منطقه متأثر از حرارت بالایی کاهش پیدا می‌کند دلیل این پدیده این است که با افزایش فشار گاز باعث خنک شدن سریعتر شیار برش و جلوگیری از نفوذ بیشتر حرارت به قطعه کار می‌شود.

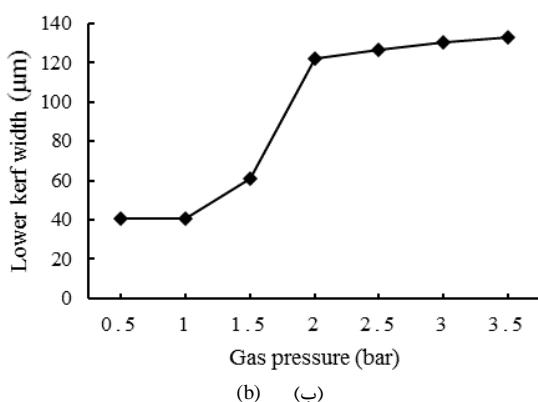
نمودار شکل 13 تأثیر فشار گاز بر صافی سطح شیار برش را نشان می‌دهد چنانچه دیده می‌شود فشار گاز تأثیر بسیار ناچیزی در صافی سطح شیار برش دارد و تقریباً با تغییر فشار گاز صافی سطح شیار برش ثابت می‌باشد.

2- تحلیل آزمایش‌های موقعیت نقطه کانونی

در نمودار شکل 14-الف تأثیر موقعیت نقطه کانونی بر عرض بریدگی‌های بالایی داده شده است. در این گراف واضح است که موقعیت نقطه کانونی تأثیر زیادی بر عرض بریدگی بالایی دارد. نتایج نشان می‌دهد با کاهش مقدار



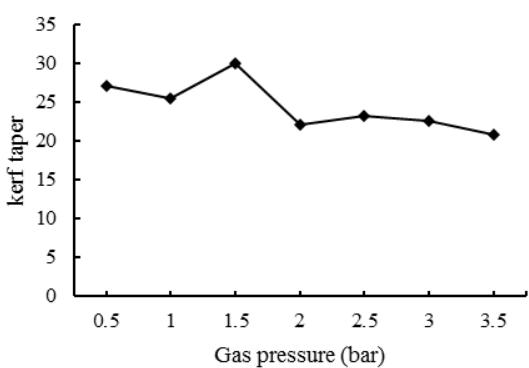
(الف)



(ب)

شکل 10 a) Effect of the gas pressure on Upper kerf width, b) Effect of gas pressure on Lower kerf width

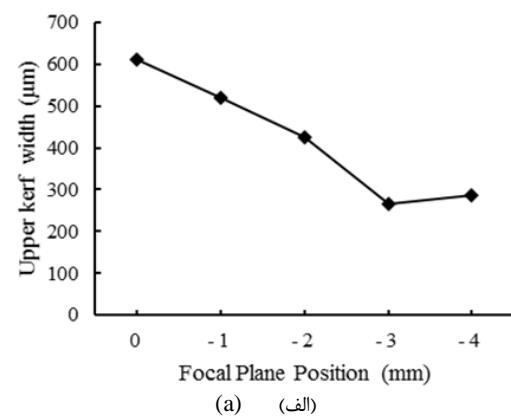
شکل 10 (الف) تأثیر فشار گاز بر عرض بریدگی بالایی (ب) تأثیر فشار گاز بر عرض بریدگی پایینی



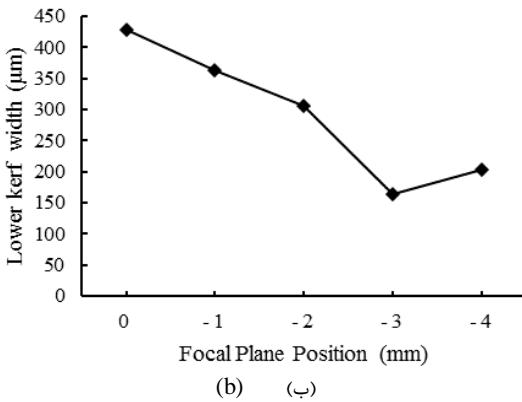
شکل 11 The effect of gas pressure on kerf taper

شکل 11 تأثیر افزایش فشار گاز بر میزان مخروطی بودن شیار برش

¹ Depth Of Focus (DOF)

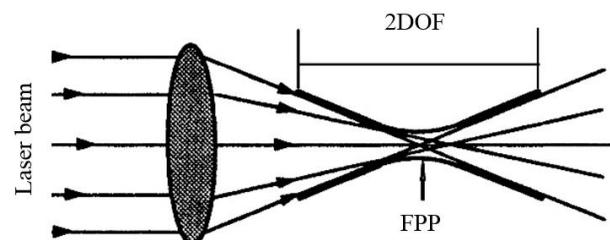


(الف)



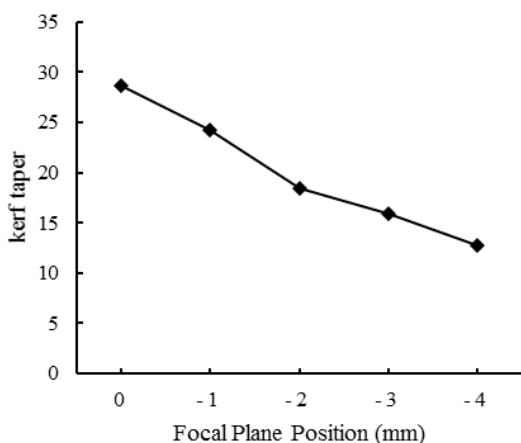
(ب)

شکل 14 a) تأثیر کاهش موقعیت کانونی بر عرض بریدگی بالایی، b) تأثیر کاهش موقعیت کانونی بر عرض بریدگی بالایی و پایینی

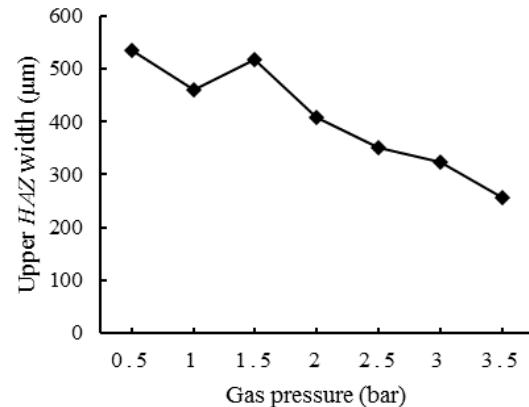


شکل 15 laser Depth of Focus schematic [20]

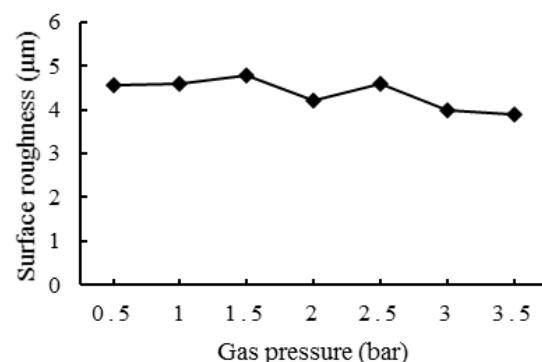
شکل 15 شماتیکی از عمق متمرکز لیزر [20]



شکل 16 تأثیر کاهش موقعیت نقطه کانونی بر میزان مخروطی برش شیار برش



شکل 12 تأثیر فشار گاز بر منطقه متأثر از حرارت بالایی



شکل 13 تأثیر فشار گاز بر صافی سطح شیار برش

نمودار شکل 14- ب تأثیر موقعیت نقطه کانونی بر عرض بریدگی پایینی را نشان می‌دهد آنچه از نمودار مشخص است موقعیت نقطه کانونی تأثیر بسزایی در عرض بریدگی پایینی نیز دارد. با کاهش موقعیت نقطه کانونی عرض بریدگی پایینی کاهش پیدا می‌کند و دلیل این پدیده نیز دلیل است که برای عرض بریدگی بالایی ذکر گردید.

در نمودار شکل 16 که تأثیر موقعیت نقطه کانونی بر میزان مخروطی بدن شیار برش را نشان می‌دهد. آنچه مشخص است با توجه کاهش موقعیت نقطه کانونی از 0 تا 4- میلی‌متر باعث کاهش عرض بریدگی بالایی و پایینی می‌شود و این که میزان مخروطی بدن شیار برش نیز وابسته به عرض بریدگی بالایی و پایینی می‌باشد. به همین دلیل با کاهش موقعیت نقطه کانونی از 0 تا 4- میلی‌متر میزان مخروطی بدن شیار برش کاهش پیدا می‌کند.

نمودار شکل 17 تأثیر موقعیت نقطه کانونی بر منطقه متأثر از حرارت بالایی را نشان می‌دهد. آنچه مشخص است با کاهش موقعیت نقطه کانونی از 0 به -4- باعث کاهش منطقه متأثر از حرارت بالایی می‌شود، دلیل این اتفاق این است که با توجه به این که بیشترین انرژی پرتو لیزر در محل نقطه کانونی لیزر می‌باشد وقتی موقعیت نقطه کانونی در سطح قطعه کار قرار دارد با توجه به انرژی بیشتر پرتو منطقه بیشتری تحت تأثیر حرارت قرار می‌گیرد و هرچه موقعیت نقطه کانونی از سطح دور تر می‌شود منطقه متأثر از حرارت بالایی کاهش پیدا می‌کند.

- با افزایش فشار گاز عرض بریدگی بالایی و پایینی افزایش پیدا می کند، ولی این امر تا فشار گاز 2 بار می باشد و بعد از آن اندازه عرض بریدگی بالایی و پایینی تقریباً ثابت می ماند. مواد مذاب در شیار بالایی در اثر افزایش فشار راحتتر زدوده می شود چون در معرض مستقیم فشار گاز می باشد. اما زدوده شدن مواد مذاب در شیار پایینی به راحتی شیار بالایی نمی باشد چون اثر فشار در عرض قطعه رفتہ کمتر می شود. بنابراین تأثیر افزایش فشار گاز در افزایش عرض بریدگی پایینی بسیار بیشتر و چشمگیرتر از عرض بریدگی بالایی می باشد.
- با افزایش فشار گاز میزان مخروطی بودن شیار برش و منطقه متاثر از حرارت بالایی کاهش پیدا می کند و در فشار گاز 3.5 بار، کمترین مقدار منطقه متاثر از حرارت 265.3 میکرومتر بدست می آید.
- با کاهش موقعیت نقطه کانونی از 0 تا -4 میلی متر عرض بریدگی بالایی و پایینی کاهش پیدا می کند ولی این کاهش تا موقعیت نقطه کانونی -3 می باشد بعد از آن با کاهش بیشتر موقعیت نقطه کانونی عرض بریدگی بالایی و پایینی افزایش پیدا می کند. علت این امر نحوه توزیع انرژی پرتو لیزر در قطعه می باشد.
- کمترین مقدار منطقه متاثر از حرارت و میزان مخروطی بودن شیار برش به ترتیب 12.75 و 265.30 میکرومتر، در موقعیت نقطه کانونی -4 بدست آمدند.
- کاهش موقعیت نقطه کانونی باعث کاهش صافی سطح شیار برش می گردد و مناسب ترین صافی سطح شیار برش مربوط به موقعیت نقطه کانونی -3 میلی متر با مقدار 3.22 میکرومتر می باشد.
- با توجه به ابعاد هندسی مطلوب و صافی سطح مناسب، موقعیت نقطه کانونی -3 میلی متر و فشار گاز 3 بار به عنوان مناسب ترین پارامترها برای برش کاری لیزری ورق پلی کربنات شناخته شدند.

5- مراجع

- [1] E. Kannatey, Jr. Asibu, *Principles of Laser Materials Processing*, pp. 415-416, New Jersey: Published by John Wiley and Sons, 2009.
- [2] B. Happer, A. Charles, *Handbook of Plastics Elastomers Composites and Plastics Engineering*, Fourth Edition, pp. 212-213, New York City: department university of Massachusetts of Lowell, 2004.
- [3] M. Moradi, M. Ghoreishi, M. Torkamany, J. Sabbaghzadeh, M.J. Hamed, An Investigation on the effect of pulsed Nd:YAG laser welding parameters of stainless steel 1.4418, *Advanced Materials Research*, Vol. 383, No. 24, pp. 6247-6251, 2012.
- [4] A. Khorram, M. Ghoreishi, M. Moradi, Using ANN approach to investigate the weld geometry of Ti 6Al 4V Titanium Alloy, *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 2, No. 5, pp. 213-220, 2010.
- [5] M. Moradi, M. Ghoreishi, Influences of laser welding parameters on the geometric profile of Ni-base super alloy Rene 80 weld-bead, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 1, pp. 205-215, 2011.
- [6] M. Moradi, N. Salimi, M. Ghoreishi, H. Abdollahi, M. Shamsborhan, T. Ilar, A. Kaplan, Parameter dependencies in laser hybrid arc welding by design of experiments and by a mass balance, *Journal of Laser Applications*, Vol. 26, No. 2, pp. 022004-1-9, 2014.
- [7] M. Moradi, M. Ghoreishi, M. Torkamany, Modeling and optimization of Nd:YAG laser-TIG hybrid welding of stainless steel, *Lasers in Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 211-230, 2014.
- [8] K. F. Tamrin, Y. Nukman, I. A. Choudhury, M. Shirley, Multiple-objective optimization in precision laser cutting of different thermoplastics, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 67, No. 8, pp. 57-65, 2015.
- [9] H. A. Eltawahni, A. G. Olabi, K. Y. Benyounis, Effect of process parameters and optimization of CO₂ laser cutting of ultrahigh-

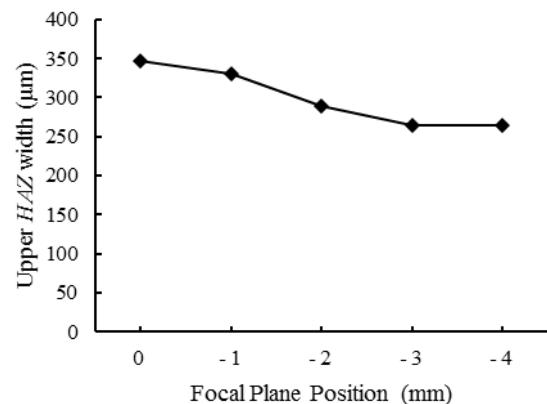


Fig. 17 The effect of Focal Plane Position on Upper HAZ

شکل 17 تأثیر کاهش موقعیت نقطه کانونی بر منطقه متاثر از حرارت بالایی

نمودار شکل 18 تأثیر موقعیت نقطه کانونی بر زبری سطح نمونه ها را نشان می دهد، آنچه مشخص است با کاهش موقعیت نقطه کانونی صافی سطح شیار برش کاهش پیدا می کند. هرچه موقعیت نقطه کانونی به سمت مرکز قطعه می رود، انرژی متمرکزتر لیزر با ماده در ارتباط است (با توجه به مفهوم DOF) و منجر به باریکت شدن درز برش می شود. با بالا رفتن کیفیت درز برش فاصله قله تا دره در بحث صافی سطح هم کمتر می شود و بنابراین صافی سطح بهبود می پابد. با قرار گیری FPP=-4 mm ناحیه تعامل اثر پرتو لیزر با ماده بیشتر می شود و حجم ناحیه مذاب نیز افزایش می پابد. در نتیجه صافی سطح نسبت به FPP=-3 mm بدتر می شود. نتایج بدست آمده نشان می دهد بهترین کیفیت سطح مربوط به موقعیت نقطه کانونی -3 (زبری سطح 3.52 میکرومتر) می باشد.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش برش کاری لیزری قطعات تزریقی پلی کربنات با ضخامت 3.2 میلی متر به منظور بررسی اثر فشار گاز (فشار گاز 0.5 تا 3.5 بار) و موقعیت نقطه کانونی (0 تا -4 میلی متر) بر روی کیفیت هندسی برش (عرض بریدگی بالایی و پایینی، میزان مخروطی بودن شیار برش و منطقه متاثر از حرارت بالایی) و صافی سطح شیار برش انجام شد. نتایج زیر را می توان از تحقیق انجام شده عنوان کرد:

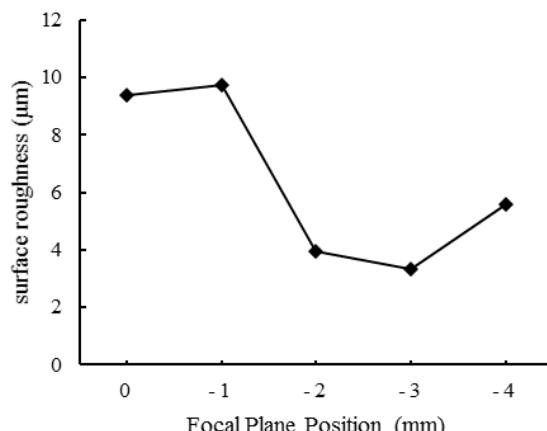


Fig. 18 The effect of Focal Plane Position on surface roughness

شکل 18 تأثیر کاهش موقعیت نقطه کانونی بر صافی سطح شیار برش

- Techniques And Testing*, pp. 138-140, New York City, British Maritime Technology, 1985.
- [16] M. Ghoreishi, D. K. Y Low, Comparative statistical analysis of hole taper and circularity in laser percussion drilling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, No. 9, pp. 985-995, 2002.
- [17] M. Moradi, O. Mehrabi, T. Azdast, K. Y. Benyounis, Effect of the focal point position on CO₂ laser beam cutting of injection molded polycarbonate sheets, *Second International Seminar on Photonics, Optics, and Its Applications*, Vol. 10150, No. 1, pp. 101500F-1-10, 2016.
- [18] M. Dashtizadeh, F.R. Biglari, *surface metrology and contact roughness measurement*, Second Edition. 170-173, Tehran: Amirkabir University of Technology, 2005. (in Persian) (فارسی)
- [19] S. Assarzadeh, M. Ghoreishi, Statistical investigation into the effects of electro-discharge machining parameters on WC/6%Co composite Modeling through Response Surface Methodology, *Advanced Materials Manufacturing and Characterization*, Vol. 3, No. 2, pp. 213-222, 2013.
- [20] W.Z. Wei, J. Rou Sze, J.L. Chern, Designs for optimizing depth of focus and spot size for UV laser ablation, *Applied Physics A Materials Science and Processing*, Vol. 101, No. 12, pp. 411-416, 2010.
- performance polyethylene, *Optics and Laser Technology*, Vol. 31, No. 4, pp. 4029-4038, 2010.
- [10] A. Riveiro, F. Quintero, F. Lusquiños, F.J. delval, R. Comesaña, M. Boutinguiza, J. Pou, J, Experimental study on the CO₂ laser cutting of carbon fiber reinforced plastic composite, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 8, pp. 1400-1409, 2012.
- [11] B. H. Zhou, S. M. Mahdavian, Experimental and theoretical analyses of cutting nonmetallic materials by low power, *Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 3, pp. 188-192, 2004.
- [12] J.P. Davim, T. Oliveira, N. Barricas, M. Conceição, Evaluation of cutting quality of PMMA using CO₂ lasers, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 35, No. 9-10, pp. 875-879, 2008.
- [13] P. Patela, S. Shethb, T. Patelc, Experimental Analysis and ANN Modelling of HAZ in Laser Cutting of Glass Fibre Reinforced Plastic Composites, *3rd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering*, Vol. 23, No. 1, pp. 406-413, 2016.
- [14] D. Herzog, M. Schmidt-Lehr, M. Oberlander, M. Canisius, M. Radek, C. Emmelmann, Laser cutting of carbon fibre reinforced plastics of high thickness, *Materials and Design*, Vol. 92, No. 1, pp. 742-749, 2016.
- [15] M. N. Watson, P. J. Oakley, C. J. Dawes, *Laser Welding*