



## چگونگی تأثیر پارامترهای فرایند برش کاری لیزری دی اکسید کربن کم توان بر کیفیت برش قطعات پلی کربنات تولید شده به روش قالب گیری تزریقی

محمود مرادی<sup>1\*</sup>، امید مهربانی<sup>2</sup>، طاهر ازدست<sup>3</sup>، خالد بن یونیس<sup>4</sup>

1- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

2- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

3- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

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

\* ملایر، صندوق پستی 65719-95863، moradi@malayeru.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 08 دی 1395

پذیرش: 10 دی 1395

ارائه در سایت: 10 بهمن 1395

کلید واژگان:

برش کاری لیزری

قالب گیری تزریقی

پلی کربنات

موقعیت نقطه کانونی

فشار گاز

### چکیده

در این پژوهش تأثیر فشار گاز و موقعیت نقطه کانونی بر کیفیت هندسی و صافی سطح شیار برش در برش کاری لیزری قطعات تزریقی پلی-کربنات به ضخامت 3.2 میلی متر با استفاده از لیزر دی اکسید کربن پیوسته کم توان مورد بررسی قرار گرفته شده است. فشار گاز و موقعیت نقطه کانونی پارامترهای متغیر در تحقیق می باشند، در حالی که سایر پارامترها (توان لیزر و سرعت برش کاری) ثابت در نظر گرفته شده اند. آزمایش های فشار گاز با تغییر فشار گاز از 0.5 تا 3.5 بار و آزمایش های موقعیت نقطه کانونی با تغییر موقعیت نقطه کانونی از 0 تا 4 میلی متر 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 می دهد فشار گاز و موقعیت نقطه کانونی تأثیر بسزایی در کیفیت درز برش دارد. افزایش فشار گاز و افزایش فشار گاز و کاهش منطقه متأثر از حرارت بالایی و همچنین نتایج حاکی از آن است که کاهش موقعیت نقطه کانونی و افزایش فشار گاز باعث کاهش منطقه متأثر از حرارت بالایی می شود. افزایش فشار گاز باعث کاهش زاویه مخروطی بودن شیار برش می شود و کاهش موقعیت نقطه کانونی باعث کاهش صافی سطح شیار برش می شود. مشاهدات نشان داد که قرارگرفتن موقعیت نقطه کانونی لیزر در عمق قطعه کیفیت برش لیزری را افزایش می دهد.

## The effect of low power CO<sub>2</sub> laser cutting process parameters on polycarbonate cut quality produced by injection molding

Mahmoud Moradi<sup>1\*</sup>, Omid Mehrabi<sup>1</sup>, Taher Azdast<sup>2</sup>, Khaled Y. Benyounis<sup>3</sup>

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 CO<sub>2</sub> 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.

### 1- مقدمه

کند و یک جبهه برش ایجاد می نماید و ماده مذاب از جبهه برش به وسیله فشار بالای گاز کمکی به بیرون رانده می شود. برش ماده به وسیله حرکت جبهه برش در ماده صورت می گیرد [1]. پلی کربنات ها که گستره ای از پلیمرهای ترموپلاستیک هستند، به خاطر

برش کاری لیزری، فرایند ماشین کاری دو بعدی است که از برداشت و حذف مواد به وسیله تمرکز پرتویی با شدت بالا بر روی قطعه کار صورت می گیرد. 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 CO<sub>2</sub> 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 پلی‌کربنات به ضخامت 3.2 میلی‌متر با استفاده از لیزر دی‌اکسید کربن پیوسته کم‌توان مورد بررسی قرار گرفته شده است. در بیشتر تحقیقات قبلی از لیزرهای پرتوان برای برش کاری استفاده شده است، در حالی که در این پژوهش استفاده از یک لیزر کم توان 50 وات که بیشتر در دسترس صنایع می‌باشد و قیمت کمتری دارد، برای برش ورق پلی‌کربنات استفاده شد. در آزمایش‌های فشار گاز با تغییر فشار گاز از 0.5 تا 3.5 بار و در آزمایش‌های با تغییر موقعیت نقطه کانونی از 0 تا 4- 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.

## 2- تحقیقات آزمایشگاهی

در این تحقیق نمونه‌های مورد آزمایش از پلی‌کربنات بی‌رنگ<sup>4</sup> ساخت شرکت کرهای<sup>5</sup> با استفاده از روش قالب‌گیری تزریق پلاستیک توسط دستگاه تزریق پلاستیک<sup>6</sup> محصول شرکت نکو بهینه ماشین در قالبی به ابعاد 80×175 میلی‌متر و ضخامت 3.2 میلی‌متر تولید شدند. شکل 1 دستگاه تزریق و شکل 2 قالب استفاده شده برای تولید نمونه‌ها را نشان می‌دهد، و همچنین شرایطی فرایندی قالب‌گیری تزریقی نمونه‌ها جدول 1 آورده شده است.

در ادامه برای برش کاری لیزری نمونه‌ها از دستگاه لیزر دی‌اکسید کربن رابیت HX-1290SE در حالت پیوسته با حداکثر توان 60 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(اکریلیک) به صورت 80 درجه نسبت به افق توسط پایه‌ای که در شکل 3 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 1 دستگاه تزریق استفاده شده در تحقیق

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 دارویی، 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 گرماترم 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 دی‌اکسید کربن که توسط الطوحنی و همکاران [9] انجام شد، نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش سرعت برش و موقعیت نقطه کانونی، 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 ریویرو و همکارانش [10] مطالعه تجربی روی برش پلاستیک کامپوزیت فیبر کربن تقویت شده با لیزر دی‌اکسید کربن انجام شد. در این تحقیق تأثیر پارامترهای فرایند در هر دو حالت پیوسته و پالسی در برش مورد مطالعه قرار گرفت. برش با حداقل منطقه متأثر از حرارت حدود 540 میکرومتر با کیفیت پرتو بالا و کار در حالت پالسی بدست آمد. 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 دی‌اکسید کربن توسط بای هوژو و همکاران [11] انجام شد. پائولو دیویوم 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<sup>1</sup>، دقت ابعادی) متیل متاکریلات با ضخامت 6 میلی‌متر با استفاده از لیزر دی‌اکسید کربن پرداخته‌اند. برش در دو حالت خطی و پیچیده دوبعدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در برش کامپلکس دوعبده در متیل متاکریلات منطقه متأثر از حرارت 0.12، 0.37 میلی‌تر و زبری سطح پایین و کمتر از 1 میکرومتر است. تحلیل آزمایشی و مدل‌سازی<sup>3</sup> 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 هرزتزاک و همکاران [14] به مطالعه برش لیزری بر روی فیبر کربنی تقویت شده پلاستیک با ضخامت‌های بالا انجام شده است و روش جدیدی که با استفاده از پاس‌ها موازی لیزر توانستند فیبر کربنی تقویت شده پلاستیک با ضخامت 13 میلی‌متر را برش دهند.

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

<sup>4</sup> Hopelex PC-1100U

<sup>5</sup> Lotte Chemical

<sup>6</sup> NBMHXF-128

<sup>1</sup> Focal Plane Position (FPP)

<sup>2</sup> Heat Affected Zone (HAZ)

<sup>3</sup> 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 4 از چپ به راست موقعیت کانونی لیزر مثبت، موقعیت کانونی لیزر صفر و موقعیت کانونی لیزر منفی نشان داده شده است.

برای بررسی تأثیر پارامتر فشار گاز و موقعیت نقطه کانونی بر پارامترهای خروجی مجموعاً هفت آزمایش با در نظر گرفتن فشار گاز متغییر (0.5 تا 3.5 بار) و سرعت برش 10 میلی‌متر بر ثانیه، توان لیزر 25 وات و موقعیت نقطه کانونی -3 ثابت انجام شد. با توجه به تحقیقات نویسندگان [17] پارامترهای سرعت برش کاری و توان لیزر که در تنظیمات آزمایش‌های 7 تا 12 ارائه شده است نسبت به آزمایش‌های اولیه تغییرات فشار گاز، تغییر داده شده است. سرعت برش کاری 6 میلی‌متر بر ثانیه و توان لیزر 35 وات یکی از مناسب‌ترین تنظیمات دستگاه برای این دو متغیر بوده است [17]. آزمایش موقعیت نقطه کانونی با تغییر موقعیت نقطه کانونی از 0 تا -4 میلی‌متر و ثابت در نظر گرفتن پارامترهای سرعت برش لیزر 6 میلی‌متر بر ثانیه، توان لیزر 35 وات، فشار گاز 3 بار مجموعاً 5 آزمایش انجام شد. جدول 2 تنظیمات آزمایشگاهی و مقادیر پاسخ‌های خروجی تحقیق را نشان می‌دهد. چنانچه در جدول 2 دیده می‌شود 7 آزمایش نخست مربوط به تغییرات فشار گاز و 5 آزمایش بعد مربوط به آزمایش‌های موقعیت نقطه کانونی می‌باشد.

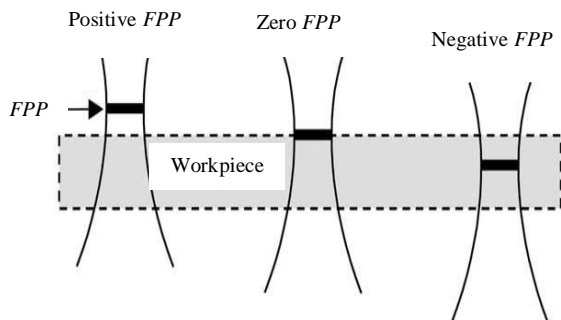


Fig. 4 Variation of focal Plane position on the work piece [16]

شکل 4 تغییرات موقعیت نقطه کانونی روی قطعه کار [16]



Fig. 2 used mold for producing the specimens

شکل 2 قالب استفاده شده برای تولید نمونه‌ها

جدول 1 شرایط فرایندی قالب‌گیری تزریقی نمونه‌ها

Table 1 process conditions injection molding specimens

شرایط تزریقی	اندازه هر یک از شرایط فرایند قالب‌گیری تزریقی	واحد
دمای نواحی سیلندر تزریق	270, 290, 320, 320	درجه سانتی‌گراد
فشار نگهداری	85	بار
زمان اعمال فشار نگهداری	2	ثانیه
فشار تزریق	110	بار



Fig. 3 Experimental determining of the focal plane position of the used CO<sub>2</sub> laser machine

شکل 3 تعیین موقعیت نقطه کانونی لیزر CO<sub>2</sub> مورد استفاده در آزمایش‌ها

جدول 2 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	منطقه متأثر از حرارت بالایی (میکرومتر)	صافی سطح شیار برش (میکرومتر)
1	10	25	-3	0.5	214.29	40.82	27.11	534.69	4.57
2	10	25	-3	1	204.08	40.82	25.51	416.22	4.6
3	10	25	-3	1.5	253.06	61.22	29.97	518.37	4.8
4	10	25	-3	2	265.30	122.22	22.12	408.16	4.2
5	10	25	-3	2.5	275.51	126.53	23.28	351.02	4.6
6	10	25	-3	3	275.52	130.61	22.64	322.45	4
7	10	25	-3	3.5	265.32	132.65	20.73	255.10	3.9
8	6	35	0	3	612.25	428.57	28.70	346.94	9.38
9	6	35	-1	3	518.37	363.26	24.23	330.61	9.74
10	6	35	-2	3	424.49	306.12	18.49	289.79	3.95
11	6	35	-3	3	265.31	163.26	15.94	265.30	3.22
12	6	35	-4	3	285.71	204.08	12.75	265.30	5.6

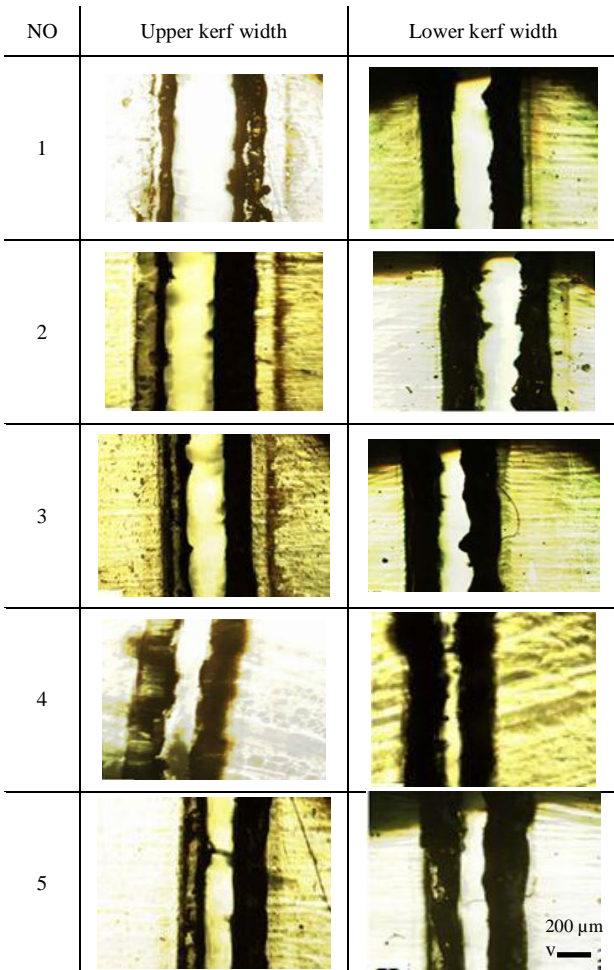


Fig. 7 Kerf width pictures of focal plane position tests  
 شکل 7 تصویر گرفته از شیار برش آزمایش های موقعیت نقطه کانونی

اندازه گیری صافی سطح شیار برش از روش تماسی استفاده شده برای اندازه گیری صافی سطح شیار برش نمونه ها در سه ناحیه از سطح نمونه صافی سطح شیار برش آن اندازه گیری شد و مقدار میانگین آن به عنوان صافی سطح شیار برش میانگین در نظر گرفته شد. برای انجام این آزمایش های مقدار  $L=0.8$  و طول ارزیابی 4 میلی متر (5 × 0.8 میلی متر) در واحد بر اساس استاندارد ISO 4287/1 تنظیم شد [19]. شکل 8 دیاگرام صافی سطح شیار برش را نشان می دهد و شکل 9 مربوط به دستگاه زبری سنج مورد استفاده در این مطالعه می باشد.

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

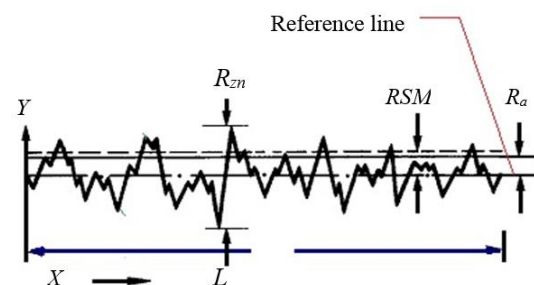


Fig. 8 Surface roughness profile of the kerf wall [18]  
 شکل 8 دیاگرام صافی سطح شیار برش [18]

به منظور تجزیه تحلیل کیفیت هندسه برش در این تحقیق عرض بریدگی بالایی (ورودی)، عرض بریدگی 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 می دهد.

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

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

شکل 6 عکس گرفته شده توسط میکروسکوپ نوری از شیار برش تست های فشار گاز 4 و 7 می باشد که عکس های 4L و 7L تصویر گرفته شده از عرض بریدگی پایینی می باشد و همچنین عکس های 4U و 7U تصویر گرفته شده از عرض بریدگی بالایی می باشد. همچنین شکل 7 تصویر گرفته شده از شیارهای برش بالایی و پایینی آزمایش های موقعیت نقطه کانونی را نشان می دهد.

روش های متعددی برای اندازه گیری صافی سطح شیار برشی وجود دارد که به دو دسته تکنیک های تماسی و غیر تماسی قابل تقسیم می شوند. در روش تماسی، که اساس کار دستگاه پروفیلومتر (زبری سنج) است، دستگاه زبری سنج برای محاسبه صافی سطح شیار برش همانطور که در رابطه (2) دیده می شود، مجموع کل مساحت پروفیل سطحی  $(Y(x)/dx)$  را بر یک طول معین  $L$  تقسیم می کند و بدین صورت میانگین صافی سطح شیار برش نمونه ها بدست می آید. صافی سطح شیار برش با حرکت دادن نوک حسگر زبری سنج در طول سطح اندازه گیری می شود [18]. در این تحقیق نیز برای

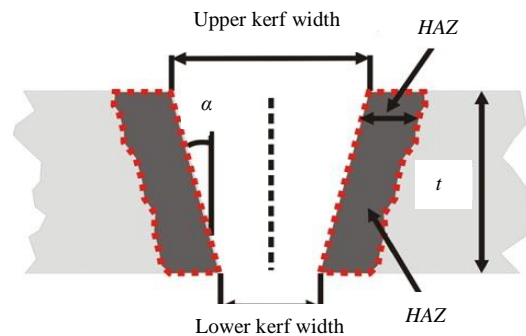


Fig. 5 Geometrical features of cross-section of the kerf [10]  
 شکل 5 نمایش مشخصات هندسی در مقطع عرضی برش [10]

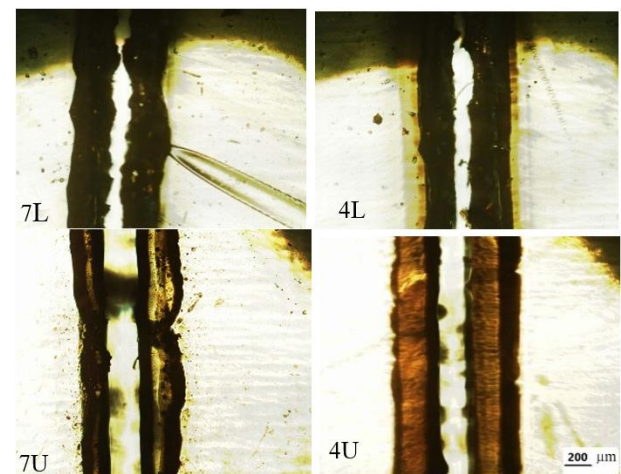


Fig. 6 Kerf pictures of gas pressure tests  
 شکل 6 تصویر گرفته شده از شیار برش آزمایش های فشار

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 متمرکز 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 ناحیه عمق متمرکز لیزر<sup>1</sup> در عمق قطعه کار قرار می‌گیرد. این امر منجر به حرارت دیدن قطعه کار به صورت متمرکز و عدم گسترش حرارت می‌شود و در پی آن شیار برش کاهش پیدا می‌کند.



Fig. 9 Mahr-PS1 surface roughness measuring unit

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

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- 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 دلیل این امر این می‌باشد که با فشار گاز زیاد مواد مذاب شیار برش به بیرون زده می‌شود و در نتیجه 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 زده می‌شود چون در معرض مستقیم فشار گاز می‌باشد. اما زده شدن مواد مذاب در شیار پایینی به راحتی شیار بالایی نمی‌باشد، چون اثر فشار در عرض قطعه رفته رفته کمتر می‌شود. بنابراین چنانچه دیده می‌شود تأثیر افزایش فشار گاز در افزایش عرض بریدگی پایینی بسیار بیشتر و چشمگیرتر از عرض بریدگی بالایی می‌باشد.

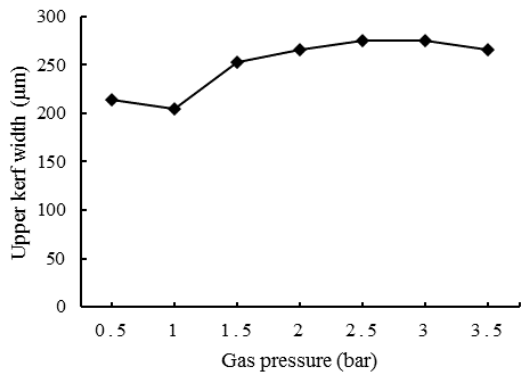
نمودار شکل 11 تأثیر افزایش فشار گاز بر میزان مخروطی بودن شیار برش نیز بدین صورت می‌باشد با افزایش فشار گاز مقدار مخروطی بودن شیار برش کاهش پیدا می‌کند که دلیل این کاهش این می‌باشد که افزایش فشار گاز تأثیر بیشتری در افزایش عرض بریدگی پایینی نسبت به عرض بریدگی بالایی دارد و با افزایش فشار گاز ماده مذاب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

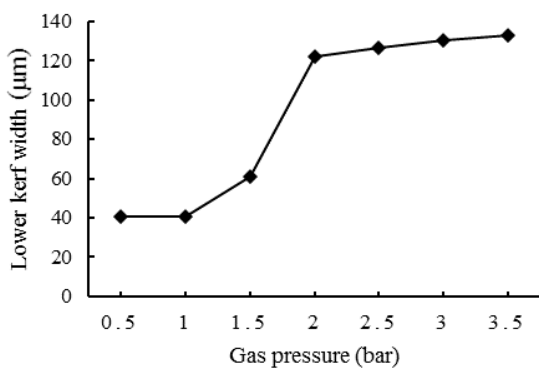
نمودار شکل 13 تأثیر فشار گاز بر صافی سطح شیار برش را نشان می‌دهد چنانچه دیده می‌شود فشار گاز تأثیر بسیار ناچیزی در صافی سطح شیار برش دارد و تقریباً با تغییر فشار گاز صافی سطح شیار برش ثابت می‌باشد.

#### 3-2- 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) (a)



(ب) (b)

Fig. 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 پایینی (ب) تأثیر فشار گاز بر عرض بریدگی بالایی

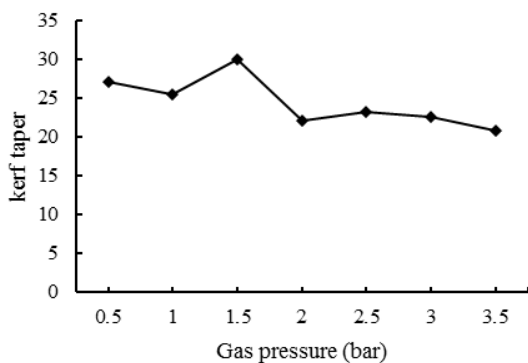
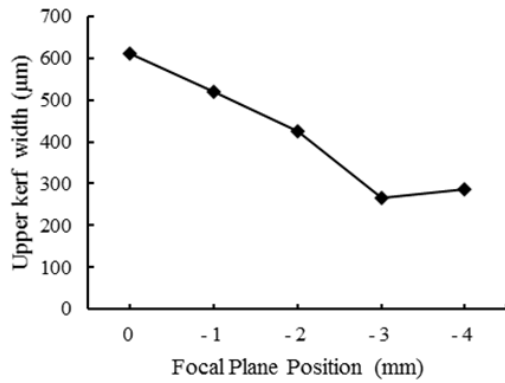


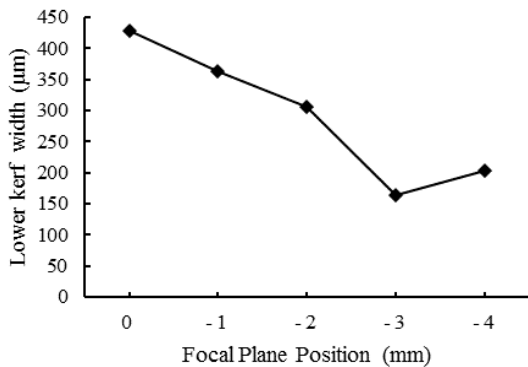
Fig. 11 The effect of gas pressure on kerf taper

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

<sup>1</sup> Depth Of Focus (DOF)



(الف) (a)



(ب) (b)

Fig. 14 a) Effect of Focal Plane Position on Upper kerf width, b) Effect of Focal Plane Position on Lower kerf width

شکل 14 الف) تأثیر کاهش موقعیت کانونی بر عرض بریدگی بالایی، ب) تأثیر کاهش موقعیت کانونی بر عرض بریدگی بالایی و پایینی

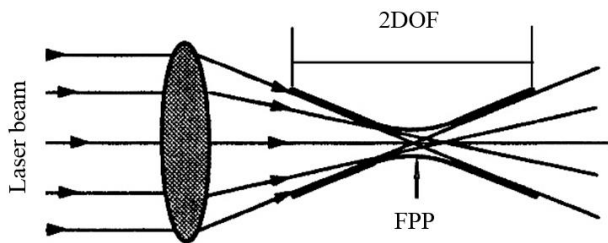


Fig. 15 laser Depth of Focus schematic [20]

شکل 15 شماتیکی از عمق متمرکز لیزر [20]

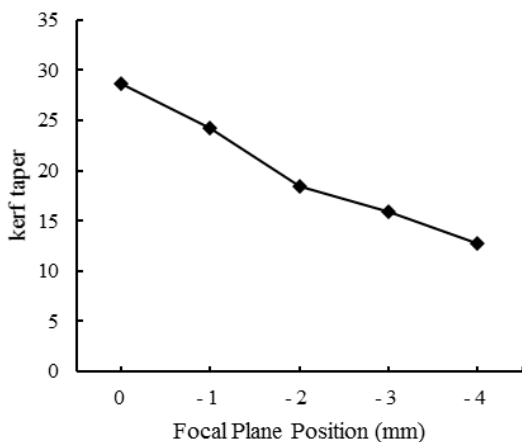


Fig. 16 The effect of Focal Plane Position on kerf taper

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

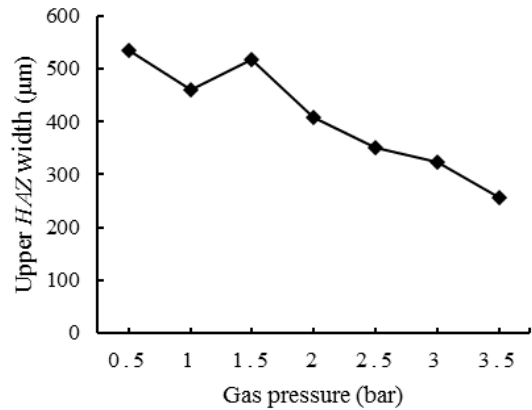


Fig. 12 The effect of gas pressure on Upper HAZ

شکل 12 تأثیر فشار گاز بر منطقه متأثر از حرارت بالایی

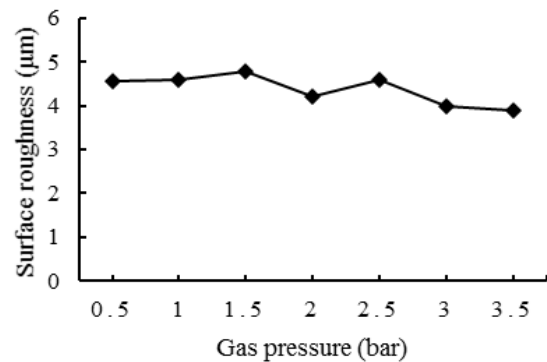


Fig. 13 The effect of gas pressure on surface roughness

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 بودن 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 بودن 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 بودن 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 می‌کند، ولی این امر تا فشار گاز 2 بار می‌باشد و بعد از آن اندازه عرض بریدگی بالایی و پایینی تقریباً ثابت می‌ماند. مواد مذاب در شیار بالایی در اثر افزایش فشار راحت‌تر زدوده می‌شود چون در معرض مستقیم فشار گاز می‌باشد. اما زدوده شدن مواد مذاب در شیار پایینی به راحتی شیار بالایی نمی‌باشد چون اثر فشار در عرض قطعه رفته رفته کمتر می‌شود. بنابراین تأثیر افزایش فشار گاز در افزایش عرض بریدگی پایینی بسیار بیشتر و چشمگیرتر از عرض بریدگی بالایی می‌باشد.

- با افزایش فشار گاز میزان مخروطی بودن شیار برش و منطقه متأثر از حرارت بالایی کاهش پیدا می‌کند و در فشار گاز 3.5 بار، کمترین مقدار منطقه متأثر از حرارت 265.3 میکرومتر بدست می‌آید.

- با کاهش موقعیت نقطه کانونی از 0 تا -4 میلی‌متر عرض بریدگی بالایی و پایینی کاهش پیدا می‌کند ولی این کاهش تا موقعیت نقطه کانونی -3 می‌باشد بعد از آن با کاهش بیشتر موقعیت نقطه کانونی عرض بریدگی بالایی و پایینی افزایش پیدا می‌کند. علت این امر نحوه توزیع انرژی پرتو لیزر در قطعه می‌باشد.

- کمترین مقدار منطقه متأثر از حرارت و میزان مخروطی بودن شیار برش به ترتیب 265.30 و 12.75 میکرومتر، در موقعیت نقطه کانونی -4 بدست آمدند.

- کاهش موقعیت نقطه کانونی باعث کاهش صافی سطح شیار برش می‌گردد و مناسب‌ترین صافی سطح شیار برش مربوط به موقعیت نقطه کانونی -3 میلی‌متر با مقدار 3.22 میکرومتر می‌باشد.

- با توجه به ابعاد هندسی مطلوب و صافی سطح مناسب، موقعیت نقطه کانونی -3 میلی‌متر و فشار گاز 3 بار به عنوان مناسب‌ترین پارامترها برای برش کاری لیزری ورق پلی‌کربنات 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. Iar, 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. Eltawhni, A. G. Olabi, K. Y. Benyounis, Effect of process parameters and optimization of CO<sub>2</sub> laser cutting of ultrahigh-

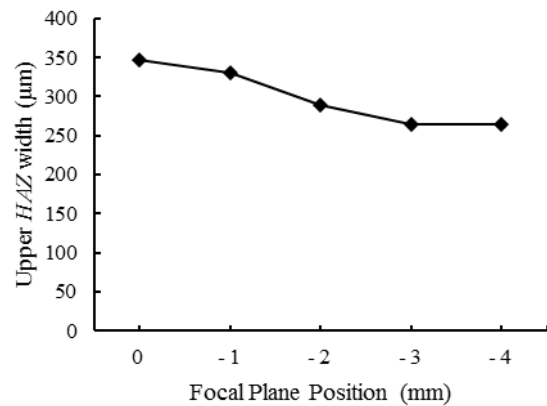


Fig. 17 The effect of Focal Plane Position on Upper HAZ

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

نمودار شکل 18 تأثیر موقعیت نقطه کانونی بر زبری سطح نمونه‌ها را نشان می‌دهد، آنچه مشخص است با کاهش موقعیت نقطه کانونی صافی سطح شیار برش کاهش پیدا می‌کند. هرچه موقعیت نقطه کانونی به سمت مرکز قطعه می‌رود، انرژی متمرکزتر لیزر با ماده در ارتباط است (با توجه به مفهوم DOF) و منجر به باریکتر شدن درز برش می‌شود. با بالارفتن کیفیت درز برش فاصله قله تا دره در بحث صافی سطح هم کمتر می‌شود و بنابراین صافی سطح بهبود می‌یابد. با قرارگیری FPP=-4 mm ناحیه تعامل اثر پرتو لیزر با ماده بیشتر می‌شود و ماده بیشتری ذوب می‌شود و پهنای برش هم بیشتر می‌شود و حجم ناحیه مذاب نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه صافی سطح نسبت به FPP=-3 mm بدتر می‌شود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد بهترین کیفیت سطح مربوط به موقعیت نقطه کانونی -3 (زبری سطح 3.52 میکرومتر) می‌باشد.

## 4- نتیجه‌گیری

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

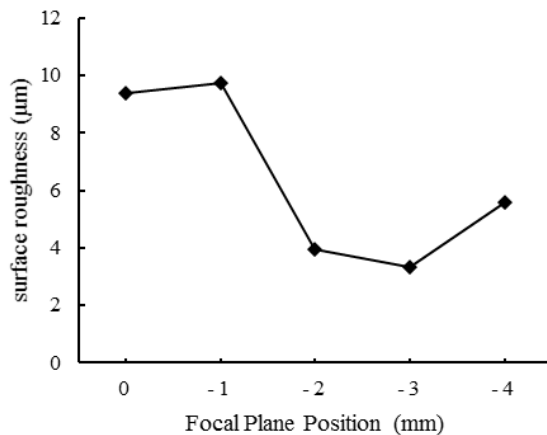


Fig. 18 The effect of Focal Plane Position on surface roughness

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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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*