

## دراسة زاوية انحراف الشق الناتج عن عملية قص ألواح الأكريليك بليزر ثاني أكسيد الكربون

حسن محمد أسد<sup>1\*</sup> محمد سعيد معروف<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>. مهندس ميكاترونيكس طالب ماجستير في المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته

– جامعة دمشق. [hasan.assad@Damascus.edu.sy](mailto:hasan.assad@Damascus.edu.sy)

<sup>2</sup>. رئيس مخبر تقانات الليزر في المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته –

جامعة دمشق، عضو هيئة تدريسية في كلية العمارة-جامعة اليرموك الخاصة.

MohamadMaarouf@Damascusuniversity.edu.sy.

### الملخص:

تم في هذا البحث تحليل عملية قص ألواح الأكريليك باستخدام ليزر ثاني أكسيد الكربون من خلال دراسة تأثير بعض بارامترات القص، مثل المسافة المحرقة عن سطح المادة، وضغط الغاز المساعد، وإستطاعة الليزر، وسرعة القص، وثخانة الألواح، على زاوية إنحراف الشق الناتج عن عملية القص.

تم تنفيذ التجارب باستخدام آلة القص بالليزر CNC ذات إستطاعة متوسطة تبلغ 150W ، وفق تصميم تاكوشي المختلط L36.

تبين أن ازدياد المسافة المحرقة وثخانة الألواح ينقص من إنحراف الشق، بينما كان تأثير ضغط الغاز المساعد أقل أهمية بين جميع البارامترات، وأن ازدياد طاقة الشعاع يؤدي إلى ازدياد الإنحراف حتى قيمة حدية وبعدها يتناقص بشكل حاد، وأن ازدياد سرعة القص يؤدي إلى نقصان إنحراف الشق حتى قيمة حدية وبعدها يزداد مع ازدياد سرعة القص.

**الكلمات المفتاحية :** القص بالليزر، الأكريليك، إنحراف الشق، بارامترات القص، طريقة تاكوشي

تاريخ الإيداع: 2022/9/19

تاريخ القبول: 2022/11/1



حقوق النشر: جامعة دمشق –  
سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق  
النشر بموجب CC BY-NC-  
SA

# Study of the kerf taper produced by the process of cutting acrylic sheets using a carbon dioxide laser

## Hasan Mohmmad Assad\*<sup>1</sup> Mohammad Saeed Marouf<sup>2</sup>

\* <sup>1</sup>. Mechatronics Engineer - a master's student at the Higher Institute for Laser Research and its Applications - Damascus University. [hasan.assad@Damascus](mailto:hasan.assad@Damascus).

<sup>2</sup>. Head of the Laser Technology Laboratory at the Higher Institute for Laser Research and Applications - Damascus University, A faculty member at the Faculty of Architecture- Yarmouk Private University. [MohamadMaaroufDamascusuniversityedusy](mailto:MohamadMaaroufDamascusuniversityedusy)

### Abstract:

In this research, the process of cutting acrylic sheets using a carbon dioxide laser was analyzed to study the effect of some cutting parameters, such as the focal position from the surface of the material, auxiliary gas pressure, laser power, cutting speed, and sheet thickness, on the kerf taper resulting from the cutting process. The experiments were carried out using a CNC laser cutting machine with an average power of (150 W), according to Taguchi's L36 mixed design, and it was found Increasing the focal position and sheet thickness decreases the kerf taper, while the effect of auxiliary gas pressure was less important among all parameters, and that increasing the laser power leads to an increase in the deviation until a limit value and then the deviation decreases sharply, and that increasing the cutting speed leads to a decrease in the kerf taper until the limit value and then, the kerf taper increases with the increase in cutting speed.

### Keywords:

laser cutting, acrylic, cutting parameters, Taguchi method, kerf tape.

Received:19/9/2022

Accepted:1/11/2022



**Copyright:** Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a **CC BY- NC-SA**

**المقدمة:**

العناصر المنتهية وقد تبين أن زيادة سرعة القص وانقاص استطاعة الليزر ينقص عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة [6].

قام الباحث عارف فارسي وآخرون بدراسة تأثير بارامترات القص بالليزر على زاوية انحراف الشق الناتج عن عمليات قص ألواح PMMA بليزر ثاني أوكسيد الكربون باعتماد تحليل الإنحدار وقد تبين أن ازدياد استطاعة الليزر ونقصان سرعة القص وزيادة عدد تمريرات عملية القص ينقص زاوية انحراف الشق [7].

قام الباحث شين وآخرون باعتماد طريقة تاكوشي لتحليل تأثير استطاعة الليزر وسرعة المسح وزمن المعالجة على خشونة سطح حواف الشق الناتج عن عملية قص ألواح الأكريليك باستخدام ليزر CO<sub>2</sub> وقد تم الحصول على القيم المثلى للبارامترات المدروسة بحيث وصل متوسط الخشونة الحسابي الى (110 nm) [8].

قام الباحث عارف فارسي وآخرون بتطوير خوارزمية للتنبؤ بعمق القص لعدد معين من التمريرات، وخوارزمية أخرى للتنبؤ بعدد التمريرات لتحقيق عمق القص المطلوب، خلال عمليات قص ألواح PMMA باستخدام ليزر CO<sub>2</sub> وقد أظهرت الخوارزميات المقترحة تقارب جيد مع النتائج التجريبية [9].

اعتمد الباحث Jozef Meško وآخرون على طريقة العناصر المنتهية لنمذجة ومحاكاة عملية قص صفائح من الفولاذ باستخدام الليزر [10].

قام الباحث Karim Kheloufi بتنفيذ نمذجة ومحاكاة رقمية لدراسة تأثير بارامترات القص على إنتشار الحرارة وهندسة الشق المتشكل عن عملية قص الفولاذ الطري بليزر CO<sub>2</sub> [11].

قام بينتون وآخرون بدراسة تأثير بارامترات القص باستخدام ليزر CO<sub>2</sub> والخواص الحرارية للمادة على عمق وعرض الشق الناتج خلال عملية قص ألواح PMMA وذلك بالإعتماد على طريقة العناصر المنتهية وقد تبين أن استطاعة الليزر وسرعة القص يؤثران بشكل

من المعلوم أن: (Polymethyl methacrylate) (PMMA) يحظى بتطبيقات عديدة في مجال الطب والبصريات وغيرها، وله الصيغة الكيميائية  $(C_5O_2H_8)_n$ ، كما يتمتع بقيمة مرتفعة لمعامل يونغ وإستطالة منخفضة عند الكسر، ولا يتأثر بالمحاليل المائية لمعظم المواد الكيميائية المخبرية، ومقاومته منخفضة للإسترات، أو الكيتونات [1].

إن وجود مجموعة الميثيل المجاورة  $(CH_3)$  في هيكل PMMA يمنع من الدوران بحرية حول روابط C-C، ومن التراصف بطريقة بلورية، لذلك، يُعدّ البولي ميثيل ميثاكريلات بمثابة بوليمير حراري لدن غير متبلور [2]. يتأثر PMMA بشكل جيد جداً بطول موجة ليزر ثاني أوكسيد الكربون (10.64 um)، وهذا يرجع إلى حقيقة أن التركيب الجزيئي لـ PMMA يجعله معتمداً بالنسبة إلى ليزر ثاني أوكسيد الكربون مع هذا الطول الموجي، ويبدأ في امتصاص طاقة الليزر [3].

يؤدي امتصاص طاقة الليزر إلى صهر المادة وتبخيرها ثم إزالة المواد المنصهرة بواسطة الغاز المساعد مما ينتج عنه شق في المادة، وهذا ما يسمى بعملية القص باستخدام الليزر والتي تستخدم بشكل واسع في عمليات القص المختلفة [4]، ومنها قص البوليميرات في العديد من التطبيقات الصناعية، ويرجع ذلك إلى جودة المنتج النهائي، والتكلفة المنخفضة نسبياً، وزمن المعالجة القصير [5].

قام الباحث مرادي وآخرون بدراسة تأثير استطاعة الليزر، وسرعة القص، وموضع محرقة الليزر على عرض الشق العلوي والسفلي، والمنطقة العلوية المتأثرة بالحرارة، ونسبة عرض الشق العلوي إلى عرض الشق السفلي للشق الناتج عن قص ألواح البولي كربونات بليزر CO<sub>2</sub> بالاعتماد على تحليل التباين، كما قاموا بتنفيذ محاكاة رقمية لعملية القص باعتماد طريقة

**1- هدف البحث:**

ترتبط بارامترات القص بالليزر بعلاقات معقدة مع استجابات العملية، وخصوصاً في عمليات قص المواد البوليميرية بالليزر نظراً للتركيب الجزيئي المعقد لهذه المواد، وبسبب الاستخدام الواسع لألواح الأكريليك PMMA في العديد من المجالات، تظهر ضرورة إجراء دراسات لتحسين جودة الشق الناتج عن عملية القص، وفي هذا البحث اعتمدت طريقة تاكوشي في تصميم وتحليل التجارب لدراسة تأثير موضع البعد المحرق، وضغط الغاز المساعد، واستطاعة الليزر، وسرعة القص، وثخانة الألواح، على زاوية انحراف الشق الناتج عن عملية قص ألواح الأكريليك بليزر CO<sub>2</sub> ذو استطاعة عظمى تبلغ 150 W.

وكان الهدف من هذا البحث تحديد قيم البارامترات المثلى للحصول على أقل زاوية انحراف للشق الناتج عن عملية القص، وتحديد وفهم طبيعة العلاقات بين البارامترات المدروسة والتي تمكن من اختيار قيم هذه البارامترات بحيث يتم تحسين مواصفات الشق الناتج عن عملية القص.

وتم في هذا البحث الاعتماد على برنامج MINITAB كأحد البرامج الإحصائية والتي يتم استخدامها لتصميم التجارب ((Design Of Experiment (DOE)) بحيث يتم في هذا البرنامج ادخال قيم البارامترات المدروسة فيقوم حسب خوارزمية محددة تبعاً لطريقة تصميم التجربة التي يتم اختيارها ضمن البرنامج بتوليد مجموعة من التجارب وفي كل تجربة يقوم بتوزيع قيم البارامترات حسب أسلوب معين تلقائي مضبوط بخوارزمية طريقة تصميم التجربة.

وقد تم اختيار طريقة تاكوشي لتصميم التجربة ضمن برنامج MINITAB كأحد طرق تصميم التجارب، حيث تعتبر طريقة تاكوشي أداة إحصائية تستخدم في تصميم التجارب التي يُجرى فيها عدد قليل من التجارب، وتقدم منهجاً مباشراً ومنهجياً للتصميم، يعتمد على

كبير على عمق القص، بينما يؤثر موضع المحرقة في عمق القص وعرض الشق الناتج، كما تبين أن الموصلية الحرارية العالية للمادة المقصوفة تؤدي لزيادة عمق القص [12].

قام الباحث نيون وآخرون بالتنبؤ بعرض الشق المتشكل والإجهاد الحراري الناتج عن عملية القص للسبيكة Inconel 718 بليزر غازي مستمر، وذلك بالاعتماد على تقنية العناصر المنتهية لتنفيذ محاكاة رقمية لعملية القص وقد تم الحصول على تقارب جيد بين نتائج عملية المحاكاة والنتائج التجريبية [13].

قام الباحث إلياس حدادي وآخرون بدراسة تأثير بارامترات القص على عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة وعرض الشق العلوي والسفلي وإرتفاع الخبث الناتج عن عملية قص لوح من البوليستيرين ذو ثخانة 3 mm بليزر CO<sub>2</sub> مستمر باستطاعة 60 W وقد تبين أن زيادة استطاعة الليزر وسرعة القص تنقص عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، كما تم الحصول على أقل قيمة لعرض الشق العلوي وتحقيق نسبة تساوي (1) ما بين عرض الشق العلوي والسفلي [14].

قام الباحثان شريفي وعكباري بدراسة تأثير بارامترات عملية القص على درجة حرارة منطقة القص وجودة الشق الناتج عن عملية قص سبائك AL6061T6 باستخدام الليزر وتبين أن استطاعة الليزر لها التأثير الأكبر على درجة حرارة منطقة القص ويمكن للاختيار المتناسب ما بين استطاعة الليزر وسرعة القص أن يحدد درجة الحرارة المناسبة لمنطقة القص [15].

قام الباحث ماريموثو بتحليل تأثير بارامترات القص في مواصفات الشق الناتج عن عملية قص ألياف من Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> باستخدام ليزر مستمر باستطاعة 2000 W وقد تبين أن آليات القص بالليزر لهذا النوع من المواد يختلف عن آليات القص للمعادن والسبائك المتجانسة [16].

- خمس بارامترات مؤثرة للدراسة وهي (استطاعة الليزر، سرعة القص، ثخانة الألواح، ضغط الغاز المساعد، موضع المحرقة).
- برنامج التصميم الإحصائي 19 MINITAB لتصميم التجربة حسب طريقة تاكوشي، وبما أن قيم البارامترات المدروسة كما هي موضحة في الجدول (1) فإن تصميم تاكوشي يكون من النمط المختلط L36.

الجدول (1) يوضح قيم البارامترات المعتمدة في الدراسة

البارامتر	الرمز			
موضع المحرقة Focus	F	0	0.5	-
ضغط الغاز المساعد Pressure(Bar)	P	0.4	1	-
استطاعة الليزر Power(W)	PO	30	60	135
سرعة القص Speed(mm/s)	S	10	30	50
ثخانة الألواح Thickness(mm)	T	2	6	10

تُعبّر قيمة موضع المحرقة عن نسبة بعد نقطة تمرکز شعاع الليزر عن سطح العينة المدروسة، وقد تم اختيار قيمة موضع المحرقة الأولى (0%) من سماكة العينة أي أن تمرکز الشعاع يكون على سطح العينة وذلك بناءً على الأسلوب العملي المتبع لعمليات القص بالليزر باستخدام آلات القص CNC، كما تم اختيار القيمة الثانية لموضع التبيير (50%) من سماكة العينة أي أن تمرکز الشعاع يكون في منتصف العينة وذلك لدراسة تأثير تغيير موضع المحرقة على زاوية انحراف الشق الناتج عن عملية القص، واختيار هذه القيمة كان بالإعتماد على القيم التي تم الاطلاع عليها في أبحاث سابقة.

حيث بلغت القيمة الثانية للبعد المحرقي:

- 50% من ثخانة العينة لحالة العينات ذات الثخانة 2mm.

مصنوفة متعامدة، تستخدم لتجنب إجراء عدد كبير من التجارب المركبة. وتعتبر أحد الطرق الإحصائية التي يتم فيها دراسة تأثير مجموعة من البارامترات على استجابة معينة لتجربة ما، بحيث يتم في هذه الطريقة إنشاء مصنوفة متعامدة تحتوي على مجموعة من التجارب في هذه المصنوفة المتعامدة تُستخدم مستويات مختلفة من بارامترات الإدخال كعناصر مصنوفة، في حين تمثل عناصر كل صف شروط تجربة معينة، تتميز المصنوفة المتعامدة بخاصية موازنة، وهذا يعني أن جميع مستويات البارامترات تظهر لعدد متساو من المرات، وأن جميع مجموعات مستويات البارامترات تظهر في أي زوج من الأعمدة، فعدد أعمدة المصنوفة المتعامدة يساوي عدد عناصر الإدخال للعملية، في حين يُحدد عدد صفوف المصنوفة المتعامدة (عدد التجارب) وفقاً لعدد البارامترات وتفاعلاتها، وعدد المستويات لكل بارامتر، والدقة المطلوبة وتكلفة التجارب [2].

يمكن استخدام هذه الطريقة لتحديد أهمية بارامترات التصميم وتأثيرها على استجابة واحدة أو أكثر، علاوة على ذلك، يمكن اختيار مستويات بارامترات التحكم في الإدخال، بحيث يتم إبطال التباين في استجابات العملية بسبب بارامترات لا يمكن السيطرة عليها، عن طريق تحديد الأعداد الأمثل للبارامترات التي يمكن التحكم فيها للعملية، والتي تقلل من تأثير البارامترات التي لا يمكن السيطرة عليها [2].

## 2- مواد وطرائق البحث المستخدمة:

تم في هذا البحث الاعتماد على ما يأتي:

- ألواح البولي ميثيل ميثاكريلات PMMA ذات عدة سماكات (2mm, 6mm, 10mm) لتنفيذ عمليات القص عليها ودراسة مواصفات الشق الناتج في هذه الألواح.

- 2- مجهر إلكتروني لأخذ القياسات المطلوبة لحساب زاوية انحراف الشق المدروس.
- 4- تنفيذ التجارب:
- تم قص العينات المدروسة بشكل مربع أبعاده 3\*3 CM (كنموذج هندسي عشوائي لا يؤثر على نتائج التجربة) وتم فيه تنفيذ شق بطول 2 CM ، كما هو موضح في الشكل (1)، حسب قيم البارامترات المحددة لكل تجربة كما هو موضح في الجدول (2).

- 30% من ثخانة العينة لحالة العينات ذات الثخانة 6mm، لأن تمركز الشعاع كان على مسافة 2 mm بعيداً عن سطح العينة .
- 20% من ثخانة العينة لحالة العينات ذات الثخانة 10mm، لأن تمركز الشعاع كان على مسافة 2 mm بعيداً عن سطح العينة .
- وذلك بسبب القيود التصميمية لآلة القص التي تمنع إنخفاض رأس القص لأكثر من حد معين ( أي أن رأس القص يصطدم بسطح العينة قبل أن يحقق البعد المحرقى 50% من ثخانة العينات السمكية) ومع ذلك تم التعبير عن موضع البعد المحرقى الثاني لجميع العينات بالقيمة 0.5 وذلك لتقليل عدد قيم البارامترات ضمن التصميم الإحصائي.

أما قيم ضغط الغاز التي تم دراستها والموضحة في الجدول (1) فقد تم اعتمادها بناء على القيم التي تم الاطلاع عليها في أبحاث سابقة، وعلى القيم الموصى بها من قبل الشركة المصنعة لآلة القص بالليزر CNC. وبالنسبة لقيم استطاعة الليزر وسرعة القص المدروسة فقد تم اختيارها بحيث يتم تحقيق عملية قص فعال للألواح المدروسة، أي بحيث تتحقق عملية القص في العينة المدروسة، وذلك بناء على القيم العملية التي يتم تطبيقها خلال عمليات القص لألواح الأكريليك باستخدام آلة القص CNC وضمن حدود استطاعة العظمى لأنبوب توليد الليزر (150 W)، كما تم الاطلاع على القيم المدروسة في عدد من الأبحاث السابقة لاختيار هذه القيم الموضحة في الجدول (1).

### 3- الأدوات المستخدمة لإجراء البحث:

- 1- تم استخدام آلة القص بالليزر ذات أنبوب ليزي مختم باستطاعة عظمى تبلغ  $P=150\text{ W}$ ، يعطي حزمة غاوسية TEM00 بتردد 20 kHz، مزودة بعنسة ذات بعد بؤري  $F=101.6\text{ mm}$  حيث تستخدم آلة القص لتنفيذ عمليات القص على الألواح المدروسة.



الشكل (1): أحد العينات المقصودة

الجدول (2): قيم البارامترات المدروسة لكل تجربة حسب تصميم

تاكوشي المعتمد

Focus	Pressure (bar)	Power (watt)	Speed (mm/s)	Thickness (mm)	رقم العينة
0	1	30	10	2	1.1
0	1	60	30	6	5.1
0	1	135	50	10	8.1
0	1	30	10	2	1.2
0	1	60	30	6	5.2
0	1	135	50	10	8.2
0	1	30	10	6	5.3
0	1	60	30	10	8.3
0	1	135	50	2	1.3
0	0.4	30	10	10	7.1
0	0.4	60	30	2	2.1
0	0.4	135	50	6	6.1
0	0.4	30	30	10	7.2
0	0.4	60	50	2	2.2
0	0.4	135	10	6	6.2
0	0.4	30	30	10	7.3
0	0.4	60	50	2	2.3
0	0.4	135	10	6	6.3
0.5	1	30	30	2	4.1
0.5	1	60	50	6	1.4
0.5	1	135	10	10	9.1
0.5	1	30	30	6	1.5
0.5	1	60	50	10	9.2
0.5	1	135	10	2	4.2
0.5	1	30	50	6	1.6
0.5	1	60	10	10	9.3
0.5	1	135	30	2	4.3
0.5	0.4	30	50	6	2.4
0.5	0.4	60	10	10	10.1
0.5	0.4	135	30	2	3.1
0.5	0.4	30	50	10	10.2
0.5	0.4	60	10	2	3.2
0.5	0.4	135	30	6	2.5
0.5	0.4	30	50	2	3.3
0.5	0.4	60	10	6	2.6
0.5	0.4	135	30	10	10.3

## 5- مناقشة النتائج:

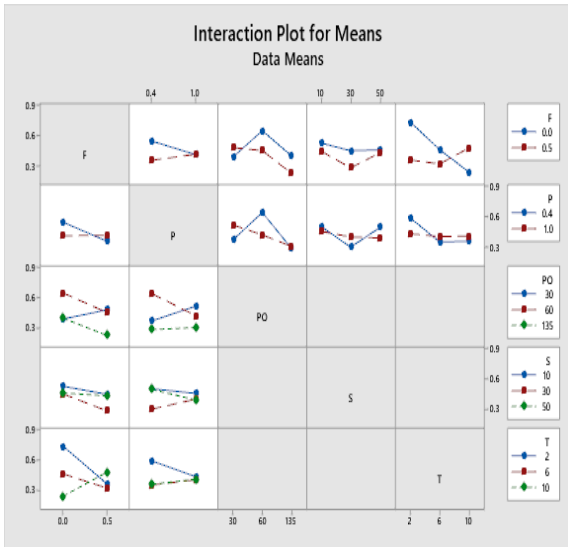
تم الاستفادة من تحليل تاكوشي باستخدام البرنامج الاحصائي MINITAB الذي تم ذكره سابقاً، بحيث يتم ادخال قيم القياسات التي تم الحصول عليها لزاوية انحراف الشق والمقابلة لكل تجربة تم تحديدها وفق تصميم تاكوشي في البرنامج الاحصائي ومن ثم يمكن من خلال البرنامج تنفيذ التحليل بشكل برمجي حسب الخوارزمية الخاصة بطريقة تاكوشي، وبذلك يتم تحليل القياسات المأخوذة من العينات، بعد أن تم حساب زاوية الإنحراف من العلاقة (1) والتي يمكن استنتاجها هندسياً من الشكل (2) بتقريب ظل الزاوية الى قياس الزاوية نفسها كون الزاوية صغيرة:

$$kerf\ taper = \frac{(Twidt - Bwidth) \times 180}{2t \times \pi} \quad (1)$$

حيث

 $Twidt$  : هو عرض الشق العلوي. $Bwidth$  : هو عرض الشق السفلي. $t$  : هو ثخانة العينة.

المدرسة من هذا البارامتر، وقد تم اعتماد قيمتين فقط لكل من موضع المحرقة وضغط الغاز المساعد لتقليل عدد التجارب التي يجب تنفيذها حسب تصميم تاكوشي. الشكل (3): يوضح تأثير البارامترات المدرسة على إنحراف الشق يلاحظ من الشكل (3) أن ازدياد إستطاعة الليزر يؤدي إلى ازدياد إنحراف الشق حتى الوصول إلى قيمة حدية، يؤدي بعدها أي إزدياد لإستطاعة الليزر إلى نقصان قيمة إنحراف الشق، وأن ازدياد موضع المحرقة يؤدي إلى نقصان قيمة انحراف الشق، كما وأن ازدياد ثخانة الألواح يؤدي إلى نقصان إنحراف الشق بشكل ملحوظ، ويلاحظ أن الإنحراف يزداد قليلاً بدلاً من إستمراره في التناقص من أجل الثخانة 10 mm، ويُفسر ذلك بقيمة نسبة البعد المحرقي التي تكون عند الثخانة 10 mm أقل منها عند الثخانة 6 mm .

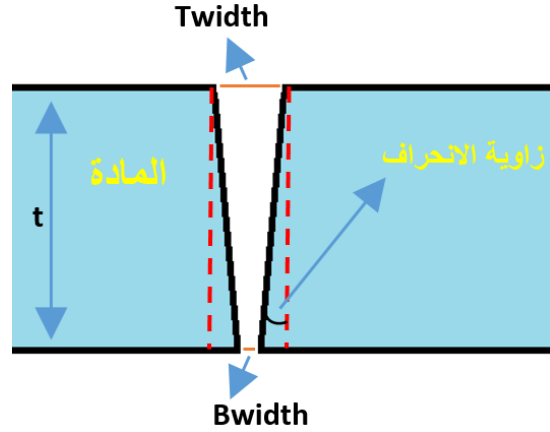


الشكل (4): يوضح التأثيرات المتبادلة بين البارامترات المدرسة

#### وتأثيرها على إنحراف الشق

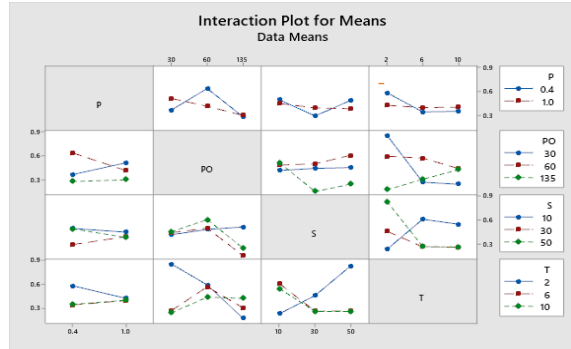
ويلاحظ أن قيمة الإنحراف بعد قيمة محددة لسرعة القص تزداد بوضوح، وأن تأثير ضغط الغاز المساعد على إنحراف الشق يكون طفيفاً، حيث يؤدي إزدياد ضغط الغاز المساعد إلى نقصان إنحراف الشق .

لدراسة التأثيرات المتبادلة بين البارامترات المعتمدة المختلفة ننمّن النظر في الشكل (4)، ومنه يلاحظ أن ازدياد ضغط الغاز المساعد وإنقاص إستطاعة الليزر

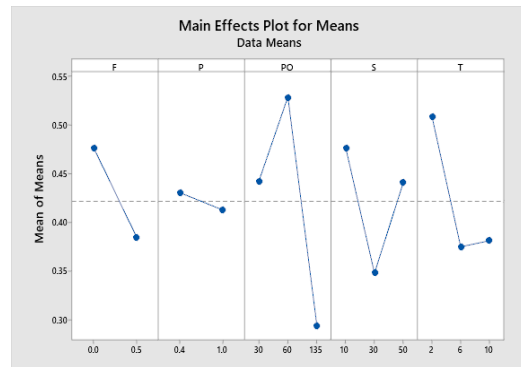


الشكل (2): يوضح الشكل الهندسي للشق الناتج عن عملية

القص



يوضح الشكل (3) المخططات التي تم الحصول عليها نتيجة لعملية التحليل، حيث يعرض هذا الشكل قيم متوسطات الاستجابة الحاصلة لزاوية انحراف الشق المقابلة لكل قيمة من قيم البارامترات التي تم استخدامها في الدراسة، وذلك بعد ادخال قيم زاوية الانحراف المقابلة



لكل تجربة من التجارب التي تم الحصول عليها من تصميم تاكوشي، لذلك يكون عدد قيم متوسط زاوية انحراف الشق بالنسبة لكل بارامتر يساوي عدد القيم



ازدياد ثخانة الألواح إلى ازدياد عرض المنطقة التي يحصل فيها القص ومنه انخفاض تلقائي لقيمة زاوية الانحراف هندسياً، وهذا يمكن ملاحظته بالعودة إلى العلاقة (1) والتي تبين أن ازدياد ثخانة الألواح في المقام سوف يؤدي إلى نقصان زاوية الانحراف، وأن ازدياد استطاعة الليزر في البداية يؤدي إلى ازدياد نسبة إزالة المواد نقطياً، ومع ازدياد قيمة الإستطاعة بشكل أكبر تنصهر المادة بشكل عمودي مما يزيد عرض وعمق المنطقة المقصوفة وينقص من انحراف الشق.

ويمكن تلخيص النتائج بما يأتي:

- ثخانة الألواح لها التأثير الأكبر على انحراف الشق حيث يؤدي ازدياد ثخانة الألواح إلى نقصان انحراف الشق بشكل ملحوظ .
- ازدياد موضع المحرقة يؤدي إلى نقصان انحراف الشق.
- سرعة القص المنخفضة تؤدي إلى ازدياد انحراف الشق مع ازدياد ثخانة الألواح على عكس السرعات الأعلى التي تؤدي إلى نقصان انحراف الشق مع ازدياد الثخانة.
- يؤدي ازدياد استطاعة الليزر إلى ازدياد انحراف الشق حتى الوصول إلى قيمة حدية يبدأ بعدها الانحراف بالتناقص.
- ضغط الغاز الأكبر والثخانات الأصغر يساعدان على نقصان انحراف الشق مع ازدياد استطاعة الليزر بشكل طردي مستمر من القيم المنخفضة إلى القيم المرتفعة.

#### 7- مقترحات وتوصيات:

يمكن الاعتماد على النتائج التي تم الحصول عليها في تحديد القيم الأفضل من ضمن قيم البارامترات التي درست والتي يمكن من خلالها الحصول على أفضل قيمة لانحراف الشق .

تقل من تأثير موضع المحرقة على انحراف الشق، وأن ازدياد استطاعة الليزر في الضغوط المرتفعة والثخانات المنخفضة يؤدي إلى إنقاص انحراف الشق بشكل طردي مستمر، بينما في الضغوط المنخفضة والثخانات المتوسطة فإن ازدياد استطاعة الليزر يؤدي إلى ازدياد انحراف الشق ثم إنقاصه، وفي السرعات المنخفضة يؤدي ازدياد استطاعة الليزر إلى ازدياد انحراف الشق بشكل طفيف، بينما في السرعات الأكبر فإن ازدياد استطاعة الليزر يزيد انحراف الشق قليلاً ثم يؤدي إلى إنقاصه بشكل ملحوظ.

ويمكن تجاهل تأثير ضغط الغاز المساعد على سرعة القص أمام باقي البارامترات، حيث يؤدي ازدياد سرعة القص عند قيم الإستطاعة المرتفعة إلى نقصان انحراف الشق بوضوح، بينما يكون التأثير في الإستطاعات المنخفضة قليل ويميل إلى ازدياد الانحراف، أما في الثخانات القليلة فإن ازدياد سرعة القص يؤدي إلى ازدياد الانحراف بشكل كبير، على عكس الثخانات الكبيرة حيث يؤدي ازدياد سرعة القص إلى نقصان انحراف الشق.

ويؤدي ازدياد الثخانة في قيم الإستطاعة المنخفضة إلى نقصان انحراف الشق بشكل ملحوظ، ومع ازدياد الإستطاعة يبدأ تأثير الثخانة على الانحراف بالإنخفاض، وفي السرعات المنخفضة يؤدي ازدياد الثخانة إلى ازدياد الانحراف على عكس السرعات الأكبر.

#### 6- الإستنتاجات:

يمكن تفسير النتائج التي تم الحصول عليها من المخططات البيانية بفهم آلية عملية القص باستخدام الليزر، والتي تتلخص بإمتصاص طاقة شعاع الليزر بواسطة المادة المراد قصها، وبالتالي فمن المنطقي أن ينقص انحراف الشق إذا أصبح موضع نقطة تمركز الشعاع في منتصف العينة بحيث تتوزع طاقة الشعاع بشكل متساوي ضمن العينة وتؤدي إلى صهر وإزالة المواد بشكل متناسب من جميع الجهات، بينما يؤدي

إن العلاقات المتبادلة بين البارامترات المدروسة وتأثيرها المتبادل في انحراف الشق الناتج عن عملية القص كما يبدو علاقات معقدة ومن الصعب التنبؤ بقيمة الاستجابة المقابلة لقيم بارامترات محددة ، لذلك يمكن الاستفادة من تقنيات الذكاء الصناعي مثل الشبكات العصبونية و المنطق الضبابي ، كما يمكن الاعتماد على تقنيات المحاكاة المبنية على طريقة العناصر المنتهية أو غيرها من الطرق والأساليب، وذلك لتنفيذ عمليات محاكاة رقمية لعمليات القص والتنبؤ بقيم انحراف الشق قبل التنفيذ العملي.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

- 7- Arif M. Varsi , and Abdul Hafiz Shaikh “ Experimental and statistical study on kerf taper angle during CO2 laser cutting of thermoplastic material” J. Laser Appl. 31, 032010 (2019); <https://doi.org/10.2351/1.5087846>
- 8- Xueye Chen , Tiechuan Li , Ke zhai , Zengliang Hu , Mengde Zhou “Using orthogonal experimental method optimizing surface quality of CO2 laser cutting process for PMMA microchannels” Adv Manuf Technol 2016 . DOI 10.1007/s00170-016-8887-7 .
- 9- Arif M. Varsi , and Abdul Hafiz Shaikh “ Developing an algorithm for predicting depth as well as number of passes during CO2 laser machining on thermoplastic material “ J. Laser Appl. 30, 042007 (2018).
- 10- Jozef Meško, Andrej Zrak, Rastislav Nigrovič, Milan Žmindák “ Finite element simulation of laser cutting process of steel sheet “ 2018 . <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815702030>
- 11- Karim Kheloufi , El Hachemi Amara , Ahmed Benzaoui “ Numerical Simulation of Transient Three-Dimensional Temperature and Kerf Formation in Laser Fusion Cutting” Journal of Heat Transfer 2015 . DOI: 10.1115/1.4030658.
- 12- Matthew Benton , Mohammad Robiul Hossan , Prashanth Reddy Konari and Sanjeewa Gamagedara” Effect of Process Parameters and Material Properties on Laser Micromachining of Microchannels” Micromachines 2019, 10, 123; doi:10.3390/mi10020123
- 13- K. Y. Nyon , C. Y. Nyeoh ,Mohzani Mokhtar , Razi Abdul-Rahman” Finite element analysis of laser inert gas cutting on Inconel 718” J Adv Manuf Technol (2012) 60:995–1007 . DOI 10.1007/s00170-011-3655-1
- References:**
- 1- Umar Ali, Khairil Juhanni Bt. Abd Karim & Nor Aziah Buang.” A Review of the Properties and Applications of Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA)” Taylor & Francis , Polymer Reviews, 0:1–28,2015.DOI: 10.1080/15583724.2015.1031377.
- 2- Ammar H. Elsheikh, Wu Deng, Ezzat A. Showaib ” Improving laser cutting quality of polymethylmethacrylate sheet: experimental investigation and optimization” j of materials Research and technology .2020;9(2):1325–1339 . <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.059>
- 3- Ahmed B. Khoshaim, Ammar H. Elsheikh, Essam B. Moustafa, Muhammad Basha, Ezzat A. Showaib “Experimental investigation on laser cutting of PMMA sheets: Effects of process factors on kerf characteristics “journal of materials research and technology 2021;11:235e246. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.012> .
- 4- Devinder Singh, Jaswinder Singh, Kulwinder Singh, Sahil Kalra, Charanjit Singh, Amanpreet Singh “ A Review on Current Research Trends in Laser Beam Machining” J. Adv. Res. Prod. Ind. Eng. 2017; 4(3&4). <https://orcid.org/0000-0001-8836-704X>
- 5- L Santo and F Trovalusci, JP Davim “ Laser Applications in the Field of Plastics” Comprehensive Materials Processing, Volume 9 .2014 . <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00911-0>.
- 6- Mahmoud Moradi, Mojtaba Karami Moghadam, Mahmoud ,Shamsborhan, Zeinab Malekshahi ,Beiranvand, Alireza Rasouli, Mahdi Vahdati, Arash Bakhtiari, Mahdi Bodaghi “ Simulation, statistical modeling, and optimization of CO2 laser cutting process of polycarbonate sheets “ . Optik 2020 . <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164932>.

- 14- E. Haddadi, M. Moradi, A. Karimzad Ghavidel, A. Karimzad Ghavidel, and S. Meiabadi, “Experimental and parametric evaluation of cut quality characteristics in CO2 laser cutting of polystyrene ” *Optik (Stuttg)*, vol. 184, no. February, pp. 103–114, 2019, DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.03.040
- 15- Maziar Sharifi, Mohammad Akbari “ Experimental investigation of the effect of process parameters on cutting region temperature and cutting edge quality in laser cutting of AL6061T6 alloy” *Optics* 184 (2019) 457–463 .
- 16- S. Marimuthu , J. Dunleavey, Y. Liu, M. Antar, B. Smith “ Laser cutting of aluminium alumina metal matrix composite “ *Optics and Laser Technology* 117 (2019) 251–259 .