مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد41 العدد (3) – 2025: 298-312

Damascus University Journal for engineering sciences
Vo 41 number (3) -2025: 298-312

تأثير بارامترات القص بليزر CO_2على عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة في جانبي الشق الناتج عن قص ألواح الأكريليك

حسن أسد*[1] محمد سعيد معروف[2]

*[1]. مهندس ميكاترونيكس – ماجستير من المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته – جامعة دمشق.
HasanAssad@Damascusuniversity.edu.sy

[2]. دكتور، رئيس مخبر تقانات الليزر في المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته – جامعة دمشق. عضو هيئة تدريسية في كلية الهندسة المعمارية – جامعة اليرموك الخاصة.
MohammadMarouf@Damascusuniversity.edu.sy

الملخص:

يهدف البحث لتحديد تأثير استطاعة الليزر، وسرعة القص، وسماكة الألواح، والبعد المحرقي، وضغط الغاز المساعد، على عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة الناتجة عن عملية قص ألواح الأكريليك بليزر CO_2النبضي ذو استطاعة عظمى تبلغ 160W، وقد تم تصميم التجربة وفق طريقة تاغوشي الإحصائية، والإعتماد على تحليل تاغوشي للحصول على القيم الإحصائية المطلوبة والمخططات البيانية التي توضح طبيعة العلاقة بين البارامترات المدروسة وبين الإستجابة الحاصلة، كما تم تنفيذ تحليل الإنحدار للحصول على معادلة انحدار تربط بين البارامترات المدروسة وبين عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة.

وقد بينت النتائج أن ضغط الغاز المساعد له التأثير الأكبر على عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة حيث تؤدي زيادة الضغط لإنقاص عرض هذه المنطقة، بينما يؤدي ازدياد استطاعة الليزر إلى انخفاضها حتى قيمة محددة يزداد بعدها عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة مع ازدياد الإستطاعة، بينما يؤدي ازدياد سرعة القص أو سماكة الألواح إلى ازدياد عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة حتى الوصول إلى قيمة محددة يبدأ بعدها عرض المنطقة بالنقصان مع زيادة كل من سرعة القص أو سماكة الألواح، أما ازدياد موضع البعد المحرقي فيؤدي إلى ازدياد عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة.

الكلمات المفتاحية: القص بالليزر، الأكريليك، عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، بارامترات القص، طريقة تاغوشي.

تاريخ الإيداع: 2023/3/15
تاريخ القبول: 2023/5/3

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

ISSN (online): 2789-6854
http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index

The impact of CO_2 laser cutting parameters on the heat affected zone width on both sides of the kerf while cutting acrylic sheets.

Hasan Assad*[1] Mohammad Saeed Marouf[2]

*[1]. Mechatronics Engineer - a master's from the Higher Institute for LaserResearch and its Applications - Damascus University.
HasanAssad@Damascusuniversity.edu.sy

[2]. Dr, Head of the Laser Technology Laboratory at theHigher Institute for Laser Research and Applications - Damascus University.
A faculty member at the Faculty of Architecture -Yarmouk Private University. MohammadMarouf@Damascusuniversity.edu.sy

Received: 15/3/2023
Accepted: 3/5/2023

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

Abstract:

The aim of this research is to investigate the affect of various parameters on the width of the heat affected zone during the process of cutting acrylic sheets with a pulse CO_2 laser having a maximum power of 160W. The parameters studied include laser power, cutting speed, sheet thickness, focal position, and auxiliary gas pressure. To achieve this objective, the researchers utilized the statistical Taguchi method to design the experiment and analyzed the results using regression analysis.

By analyzing the results, it was found that the auxiliary gas pressure has the most significant affecton the width of the heat-affected zone. As the pressure of the auxiliary gas increases, the width of the heat-affected zone decreases. Similarly, an increase in laser power leads to a decrease in the width of the heat-affected zone until a certain threshold is reached, beyond which the width starts to increase. On the other hand, an increase in cutting speed or sheet thickness leads to an increase in the width of the heat-affected zone until a certain point is reached, after which the width starts to decrease. Lastly, an increase in focal position results in an increase in the width of the heat-affected zone. It was obtained statistical values and charts that demonstrate the relationships between the studied parameters and the observed response.

Keywords: laser cutting, acrylic, cutting parameters, Taguchi method, heat affected zone.

المقدمة:

عملية القص بالليزر هي عملية يتم فيها امتصاص طاقة شعاع الليزر من قبل المادة المراد قصها، مما ينتج عنه تسامي فوري وانصهار وتبخير للمادة يتم إزالة المواد المنصهرة والأبخرة الناتجة بواسطة الغاز المساعد[1].

وقد اكتسبت عمليات القص بالليزر اهتمام كبير في مختلف المجالات بسبب الدقة العالية التي تحققها بالإضافة لكونها عملية نظيفة وذات كفاءة عالية وغير ذلك من المميزات التي لا يمكن تحقيقها في عمليات القص التقليدية الأخرى.

يعتبر الأكريليك أو البولي ميثيل ميثاكريلات Poly (methyl methacrylate) PMMA أحد أنواع بولميرات اللدائن الحرارية المتميز بشفافيته المرتفعة لذلك يطلق عليه إسم البلكسي غلاس وتتميز مادة PMMA بانتشارحراري منخفض($7*10^{-7}$ m^2/s) ونقطة تسامي منخفضة ($300C^o$)، مما يعزز جودة عملية القص ويقلل من وقته[2].

يتم استخدام ليزر ثاني أوكسيد الكربون بطول موجة 10.64) (µm على نطاق واسع لقص ألواح PMMA حيث يعمل الهيكل الجزيئي للأكريليك كوسيط معتم مع امتصاص عالي لطاقة الليزر [3-2].

في أثناء عملية القص بالليزر تزداد درجة الحرارة بسرعة في المنطقة المشعة بسبب دورة التسخين القصيرة، والإنتشار الحراري المنخفض لـ PMMA، وهذا ما يؤدي إلى تكوين منطقة متأثرة بالحرارة (HAZ) Heat Affected Zone، معخصائص ميكانيكية متغيرة في منطقة القطع وحولها.

قام الباحث Krzysztof Jarosz وزملائة عام (2016) بدراسة تأثير سرعة القص بالليزر على عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة (HAZ) وخشونة السطح في الفولاذ المقاوم للصدأ AISI316L، وتبين أن انخفاض سرعة القص، يزيد عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة ويقلل خشونة السطح [4].

عام (2016) قام الباحث Dalibor Petković وزملائه باستخدام نظام التنبؤ التكيفي الضبابي (adaptive neuro fuzzy inference system) للتنبؤ بقيم عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة الناتجة عن قص مركبات البلاستيك المقوى بالألياف الزجاجية وتحديد تأثير سرعة القص واستطاعة الليزر وضغط الغاز المساعد وقد تبين أن سرعة القص لها التأثير الأكبر وضغط الغاز المساعد له التأثير الأصغر [5].

قام الباحث عزام جاسمي وزملائه عام (2018) بدراسة عملية قص صفائح الفولاذ الطري St37 بواسطة الليزر بالإعتماد على طريقة العناصر المنتهية لإجراء عملية محاكاة، وطريقة استجابة السطح لتصميم التجربة، وتبين أن زيادة استطاعة الليزر تزيد من عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، وزيادة سرعة القص تقلل من عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، بينما لم يكن هناك تأثير كبير لضغط الغاز المساعد [6].

في دراسة للباحث إلياس حدادي وآخرون عام (2019) حول قص ألواح البوليستيرين بليزر CO_2تبين أن زيادة استطاعة الليزر وسرعة القص تنقص عرض المنطقة المتاثرة بالحرارة[7].

قام الباحث مرادي وآخرون عام (2020) بدراسة عملية قص ألواح البولي كربونات بليزر CO_2للتحقق من تأثير بارامترات القص على عرض الشق العلوي والسفلي، والمنطقة العلوية المتأثرة بالحرارة، ونسبة عرض الشق العلوي إلى عرض الشق السفلي للشق، بالإعتماد على تحليل التباين، وقد تبين أن زيادة سرعة القص وإنقاص استطاعة الليزر ينقص عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة [8].

في دراسة للباحث Tan Hoai Nguyen وزملائه عام (2020) تمت دراسة تأثير استطاعة الليزر وسرعة القص ومعدل تكرار النبض في عملية قص صفائح الفولاذ

السيليكوني وتم الإعتماد على النتائج التجريبية لتطوير نموذج ذكاء صناعي extreme learning machine (ELM) للتنبؤ بقيم عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة وتموج سطح القص وقد أظهرت النتائج أن هذه الإستجابات مرتبطة بقيم بارامترات القص المدروسة وأن (ELM) قادر على التنبؤ بقيم التموج وعرض المنطقة المتأثرة بالحرارة [9].

قام الباحث C. Leone وزملائه عام (2021) بدراسة عملية قص البلاستيك المقوى بألياف الكربون (CFRP) بواسطة ليزر الألياف النبضي وتبين أن زيادة استطاعة الليزر مع تقليل زمن النبضة يؤدي إلى تقليل عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة ويساعد على القص بسرعة أكبر[10].

1- هدف البحث:

الهدف الأساسي من هذا البحث هو تحسين جودة الشق الناتج عن عملية قص ألواح الأكريليك بليزر CO_2، وذلك من خلال تقليل عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة على جانبي الشق الناتج عند عملية قص الألواح، وذلك بدراسة تأثير بارامترات القص متمثلة باستطاعة الليزر، وسرعة القص، وضغط الغاز المساعد، وموضع البعد المحرقي، وسماكة الألواح المقصوصة، وذلك بالإعتماد على طريقة تاغوشي الإحصائية ضمن برنامج MINITAB 19 ، ومن ثم القيام بتحليل الإنحدار لإيجاد معادلة الإنحدار التي تربط البارامترات المدروسة بالإستجابة الحاصلة (عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة) حيث يمكن من خلال هذه المعادلة التنبؤ بقيم عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة الناتجة عن تطبيق قيم محددة للبارامترات المؤثرة في عملية القص بالليزر.

2.1 طريقة تاغوشي:

طريق تاغوشي والتي يعبر عنها بتصميم البارامترات الثابت robust parameter design (RPD) هي منهجية مطورة قدمها Genichi Taguchi لتحسين جودة المنتج، حيث حدد تاغوشي نوعين من بارامترات الدخل في العملية وهي: عوامل متحكم بها ويسهل معالجتها، وعوامل الضجيج يمكن التحكم بها في ظل ظروف المختبر ويصعب التحكم بها عندما يكون المنتج قيد الإستخدام الفعلي، لذلك تعتبر عوامل الضجيج هي سبب الإختلافات في الإستجابة عند تنفيذ العملية الإنتاجية في الظروف الطبيعية[11].

والهدف الرئيسي من تصميم البارامترات الثابت هو تحديد قيم العوامل المتحكم بها التي تحقق متوسط الإستجابة المرغوبة والتي تجعل العملية الإنتاجية ثابتة المواصفات، أو أقل حساسية لتأثيرات عوامل الضجيج، ولإنشاء التصميمات الثابتة، اقترح تاغوشي تصميم مصفوفتين، الأولى خاصة بالعوامل المتحكم بها وتسمى مصفوفة التحكم والثانية خاصة بعوامل الضجيج تسمى مصفوفة الضجيج، وعادةً ما تكون المصفوفتين متعامدتين، يتم بعد ذلك مقاطعة كل مجموعة من مستويات مصفوفة العوامل المتحكم بها مع جميع مستويات مصفوفة الضجيج للحصول على مصفوفة متقاطعة[11].

يمكن استخدام هذه الطريقة لتحديد أهمية بارامترات التصميم وتأثيرها على استجابة واحدة أو أكثر من إستجابات العملية المدروسة (والتي تعرف بأنها مواصفات ونتائج هذه العملية) 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 الإعداد الأمثل للبارامترات التي يمكن التحكم فيها للعملية، والتي تقلل من تأثير البارامترات التي لا يمكن السيطرة عليها[1].

وفي تطبيقات معالجة المواد، يمكن استغلال طريقة تاغوشي لتحديد المستويات المثلى لقيم البارامترات المؤثرة في العملية والتي تقلل من التباين في خصائص استجابات عملية المعالجة باختيار المستويات المناسبة لبارامترات الإدخال[1].

ومما سبق نلاحظ أن طريقة تاغوشي تعتبر حلاً جيداً لدراسة تأثير بارامترات القص بالليزر المؤثرة في عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة لتحديد القيم المثلى التي تحافظ على ثبات مواصفات القص وتقليل التأثر بعوامل الضجيج المختلفة التي لا يمكن التحكم بها.

2.2 البرنامج الإحصائي المستخدم:

يعتبر برنامج MINITAB أحد أهم البرامج الإحصائية المستخدمة لتصميم التجارب (Design Of Experiment (DOE)) بمختلف الطرق المعروفة، حيث تم تضمين خوارزميات خاصة بكل نوع من أنواع تصميم التجارب بحيث يقوم تلقائياً بإنشاء التصميم المطلوب حسب عدد البارامترات وقيمها وأهميتها.

يقدم هذا البرنامج العديد من الميزات مثل:

إدخال البيانات وإنشاء الرسوم البيانية الخاصة بنتائج هذه البيانات، ومن ثم إجراء التحليلات الإحصائية المرغوبة، **وبعدها يمكن تقييم الجودة، كما يمكن تصميم التجارب** وإجراء التحليلات التنبؤية [12].

وفي هذا البحث تم الإعتماد على هذا البرنامج لتنفيذ تصميم تاغوشي المطلوب بحيث يتم إختيار نوع التصميم ثم تحديد عدد البارامترات المدروسة وهو خمسة بارامترات ومن ثم نقوم بإدخال قيم كل بارامتر من هذه البارامترات وهي موضحة في الجدول (1)، فيقوم البرنامج وفق تصميم تاغوشي بإنشاء التصميم الإحصائي بحيث نحصل على مصفوفة تجارب موضحة في الجدول (2) حيث يمثل كل صف فيها قيم البارامترات الخاصة بكل تجربة.

الجدول (1) يوضح قيم البارامترات المعتمدة في الدراسة

البارامتر	الرمز			
موضع البعد المحرقيFocus	F	0	0.5	-
ضغط الغاز المساعد Pressure(Bar)	P	0.4	1	-
استطاعة الليزرPower(W)	PO	30	60	135
سرعة القص Speed(mm/s)	S	10	30	50
سماكةالألواح(mm)Thickness	T	2	6	10

2- مواد وطرائق البحث المستخدمة:

تم استخدام ثلاث سماكات مختلفة من ألواح الأكريليك موضحة في الجدول (1) لدراسة تأثير اختلاف سماكة الألواح في الإستجابة الحاصلة.

كما تم تطبيق ثلاث قيم لاستطاعة الليزر وسرعة القص، وقيمتين لضغط الغاز المساعد وموضع البعد المحرقي كما هو موضح في الجدول (1)، وبالإعتماد على برنامج MINITAB 19 لتصميم التجربة وفق طريقة تاغوشي تم الحصول على تصميم من النمط L36 حسب عدد قيم البارامترات المطبقة، ويوضح الجدول (2) تصميم تاغوشي الذي تم الحصول عليه حيث يمثل كل صف من المصفوفة قيم البارامترات الخاصة بكل تجربة من التجارب التي يجب تنفيذها.

تُعبر قيمة موضع البعد المحرقي عن نسبة بعد نقطة تمركز شعاع الليزر عن سطح العينة المدروسة، وقد تم دراسة قيمتين لموضع المحرقة الأولى (0%) وهي قيمة مرجعية متبعة في جميع العمليات الصناعية التي تم الإطلاع عليها دون أن يكون فيها توصية علمية، والثانية (50%) تم الإعتماد عليها لإحداث الفرق ودراسة تأثير التغيير في قيمة موضع المحرقة.

الجدول(2) قيم البارامترات المدروسة لكل تجربة حسب تصميم تاغوشي المعتمد

رقم العينة	Thickness (mm)	Speed (mm/s)	Power (watt)	Pressure (bar)	Focus
1	2	10	30	1	0
2	6	30	60	1	0
3	10	50	135	1	0
4	2	10	30	1	0
5	6	30	60	1	0
6	10	50	135	1	0
7	6	10	30	1	0
8	10	30	60	1	0
9	2	50	135	1	0
10	10	10	30	0.4	0
11	2	30	60	0.4	0
12	6	50	135	0.4	0
13	10	30	30	0.4	0
14	2	50	60	0.4	0
15	6	10	135	0.4	0
16	10	30	30	0.4	0
17	2	50	60	0.4	0
18	6	10	135	0.4	0
19	2	30	30	1	0.5
20	6	50	60	1	0.5
21	10	10	135	1	0.5
22	6	30	30	1	0.5
23	10	50	60	1	0.5
24	2	10	135	1	0.5
25	6	50	30	1	0.5
26	10	10	60	1	0.5
27	2	30	135	1	0.5
28	6	50	30	0.4	0.5
29	10	10	60	0.4	0.5
30	2	30	135	0.4	0.5
31	10	50	30	0.4	0.5
32	2	10	60	0.4	0.5
33	6	30	135	0.4	0.5
34	2	50	30	0.4	0.5
35	6	10	60	0.4	0.5
36	10	30	135	0.4	0.5

بسبب بنية آلة القص CNC المستخدمة في التجربة لم يتم التمكن من تحقيق قيمة البعد المحرقي الثانية في جميع العينات المدروسة، حيث اصطدم جسم رأس القص بسطح العينات ذات السماكة (6mm , 10mm) قبل وصول البعد المحرقي إلى منتصفها، لذلك كانت القيمة الثانية للبعد المحرقي في العينات ذات السماكة 6mm تساوي (30%)، وفي العينات ذات السماكة 10mm تساوي (20%)، ومع ذلك تم التعبير عن موضع البعد المحرقي الثاني لجميع العينات بالقيمة (50%) وذلك لتقليل عدد قيم البارامترات ضمن التصميم الإحصائي.

ضغط الغاز المساعد يعبر عن قيمة ضغط الغاز الذي يخرج من فوهة رأس القص الليزري بشكل متحد المحور مع رأس القص وهو يساعد على إزالة المواد المنصهرة من منطقة القص ويمنع تراكم الأبخرة والغازات على سطح العدسة، ولهذا الغاز قيمة ضغط موصى بها من قبل الشركة المصنعة لآلة القص وتبلغ هذه القيمة (0.4 bar) وقد تم اختيار قيمة ثانية لضغط الغاز من أجل دراسة تأثير تغير قيمة الضغط على الإستجابة الحاصلة.

قيم استطاعة الليزر وسرعة القص المدروسة تم اختيارها تجريبيا بحيث يتم تحقيق عملية قص فعال للألواح المدروسة، أي بحيث تتحقق عملية القص في العينة المدروسة، مع مراعاة القيمة العظمى لأنبوب الليزر والتي تبلغ (160W).

3- الأدوات المستخدمة لإجراء البحث:

لتنفيذ عمليات قص ألواح الأكريليك تم استخدام آلة القص المؤتمتة computer numerical control (CNC) مزودة بأنبوب ليزري مختوم من تصنيع شركة reci، استطاعته العظمى (P=160W)، يصدر حزمة غاوسية من النمط TEM00 وبتردد (f =20kHz)، ويبين الجدول (3) مواصفات الأنبوب الليزري حسب الشركة المصنعة[13].

الجدول (3) مواصفات أنبوب الليزر

Model Name	Length (mm)	Mounting Positio (mm)	Diameter (mm)	Ignition Voltage (KV)	Recommended Current (mA)	Target Power (W)	Max Power (W)
W6	1650	320	80	28	28	130	160

والعدسة المستخدمة في رأس القص لمحرقة شعاع الليزر مصنوعة من مادة سيلينيد الزنك ZnSe وهي ذات بعد محرقي يبلغ (101.6mm).

يتم التحكم بتشغيل آلة القص بالإعتماد على متحكم ماركةRuiDa.

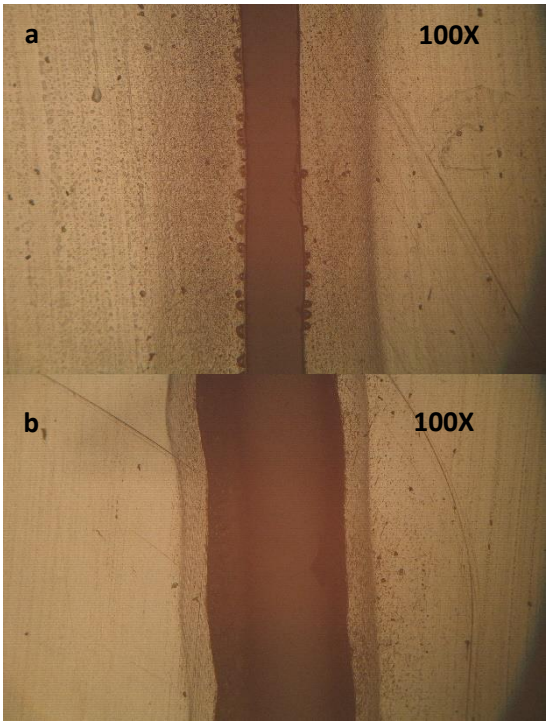
وبعد تنفيذ عمليات القص تم فحص العينات باستخدام مجهر ضوئي حيث كانت دقة القياس (نسبة الخطأ) تساوي (±50µm).

4- تنفيذ التجارب:

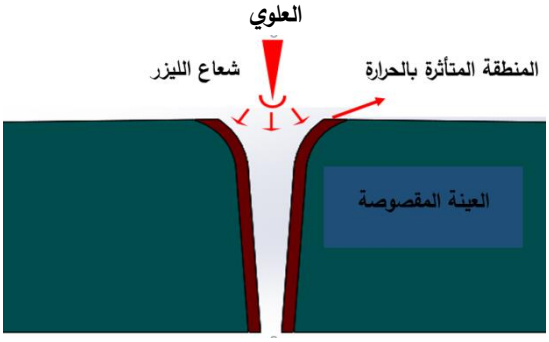
تم اختيار عينات مربعة الشكل وتنفيذ عملية القص بشكل خط بطول (2cm) في كل عينة بحسب قيم البارامترات التي تم الحصول عليها من تصميم تاغوشي والموضحة في الجدول (2).

يبين الشكل (1) الصورة المجهرية لإحدى العينات المدروسة، والشكل (2) يبين شكل توضيحي لعرض المنطقة المتأثرة بالحرارة.

تم أخذ ثلاث قراءات لكل من عرض الشق العلوي مع عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، وعرض الشق العلوي من دون المنطقة المتأثرة بالحرارة، وذلك من خلال فحص العينات تحت المجهر، ثم حساب المتوسط لكل من المجموعتين، واستخدام القيم الناتجة كقيمة عرض الشق العلوي مع المنطقة المتأثرة بالحرارة، وعرض الشق العلوي من دون المنطقة المتأثرة بالحرارة، ثم حُسب عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة بطرح القيمتين اللتين تم الحصول عليهما من بعضهما، وأُدخلت هذه القيم في البرنامج الإحصائي لتنفيذ التحليل المطلوب.



الشكل (1) العينة رقم 11: a) صورة الشق السفلي b) صورة الشق العلوي



الشكل (2) شكل توضيحي للمنطقة المتأثرة بالحرارة

5- مناقشة النتائج:

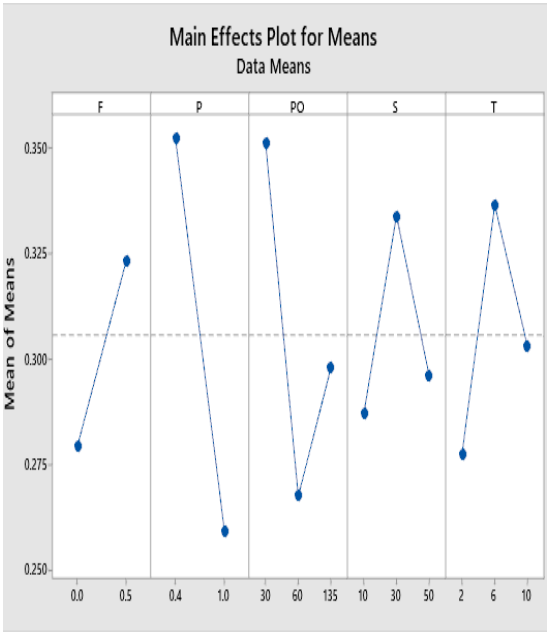
بعد الحصول على قيم عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة لكل عينة تم قصها نقوم بإدخال هذه القيم في البرنامج الإحصائي MINITAB بشكل متوافق مع قيم البارامترات التي تم الحصول عليها من تصميم تاغوشي والموضحة في

الجدول (2)، وبالتالي نكون قد سجلنا قيمة عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة الموافقة لكل تجربة من تجارب تصميم تاغوشي المعتمد، وبعد ذلك نقوم بتنفيذ تحليل تاغوشي للحصول على القيم الإحصائية والمخططات البيانية التي يمكن الإعتماد عليها لتفسير النتائج وإيجاد العلاقات بين البارامترات المدروسة والإستجابة الحاصلة.

من تحليل تاغوشي ضمن برنامج Minitab يمكننا الحصول على الجدول (4)، والذي يوضح متوسط قيم عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة المقابلة لقيم البارامترات التي تم فحصها، وترتيب أهمية هذه البارامترات، إذ نلاحظ أن لضغط الغاز المساعد الأهمية الأكبر من ناحية التأثير في عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، يليه إستطاعة شعاع الليزر، ثم سماكةالألواح، ثم سرعة القص، وأخيراً تأثير موضع البعد المحرقي.

الجدول (4) قيم استجابة المنطقة المتأثرة بالحرارة المقابلة لقيم البارامترات المدروسة وترتيب أهمية البارامترات على عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة

Level	F	P	PO	S	T
1	0.2792	0.3523	0.3515	0.2870	0.2775
2	0.3233	0.2590	0.2675	0.3340	0.3365
3			0.2980	0.2960	0.3030
Delta	0.0442	0.0933	0.0840	0.0470	0.0590
Rank	5	1	2	4	3



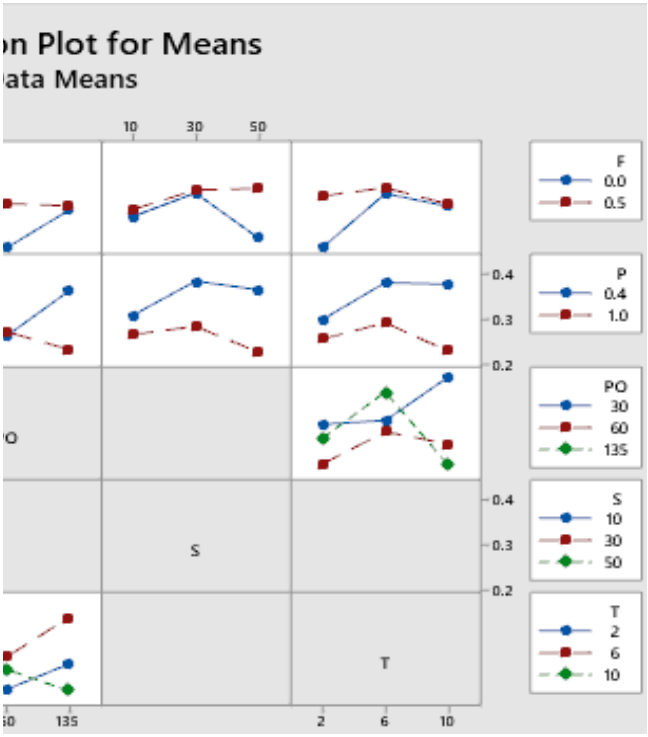
الشكل (3) مخطط بياني يوضح استجابة عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة لبارامترات القص المدروسة

كما يمكننا الحصول على مخطط بياني يبين طبيعة العلاقة بين متوسط قيمة عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة وبين قيم البارامترات المدروسة كما هو موضح في الشكل (3).

ومن الشكل (3) يمكننا ملاحظة تأثير ضغط الغاز المساعد على عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، إذ يؤدي ازدياد ضغط الغاز المساعد لنقصان عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، كما يؤدي ازدياد استطاعة شعاع الليزر أيضاً إلى نقصان عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة حتى الوصول إلى قيمة محددة تبدأ بعدها قيمة عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة بالإزدياد، أما بالنسبة لسرعة القص وسماكة الصفيحة، نلاحظ أن ازدياد سرعة القص يؤدي إلى ازدياد عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة حتى الوصول إلى القيمة (30 mm/s) ثم تنقص قيمة عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة مع ازدياد السرعة، ونلاحظ أيضاً أن ازدياد سماكة اللوح يؤدي إلى ازدياد عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة حتى القيمة (6 mm)

ثم تنقص قيمة عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة مع ازدياد السماكة، أما ازدياد قيمة البعد المحرقي يؤدي إلى ازدياد قيمة عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة بشكل مستمر.

كما يمكننا تحليل التأثيرات المتبادلة بين بارامترات عملية القص، وتأثيرها في عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، والحصول على المخطط البياني الموضح في الشكل (4). نلاحظ من خلال الشكل (4) أن ضغط الغاز المساعد له تأثير قوي ومسيطر على جميع البارامترات الأخرى بالنسبة لعرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، وهذا ما يمكن التأكد منه بالرجوع إلى قيم أهمية البارمترات الموضحة في الجدول (4) إذ يؤدي ازدياد ضغط الغاز المساعد إلى نقصان عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة.

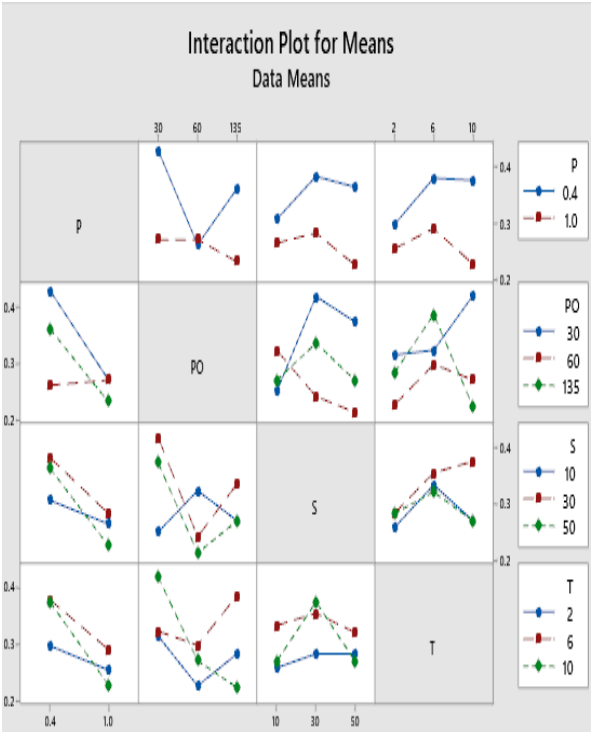


وموضع البعد المحرقي بالرغم من أنه ذو أقل تأثيراً على عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، إلا أنه أقل تأثراً أيضاً ببقية البارامترات، حيث يؤدي ازدياد موضع البعد المحرقي إلى ازدياد عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، ونلاحظ أيضاً أن ازدياد موضع البعد المحرقي يقلل من حدة استجابة عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة لتغيرات البارامترات الأخرى كاستطاعة الليزر وسرعة القص وسماكة الألواح.

الشكل (4) مخطط التأثيرات المتبادلة بين البارامترات المدروسة وتأثيرها في عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة

ولكننا في الشكل (4) نلاحظ عدم إمكانية تقدير العلاقات بين سرعة القص واستطاعة الليزر وسماكة الصفيحة، وذلك بسبب اختلاف عدد قيم البارامترات المدروسة (أي بما أنه كان لكل من إستطاعة الليزر، وسرعة القص، وسماكة الألواح ثلاث قيم متغيرة، في حين كان للبعد المحرقي، وضغط الغاز المساعد قيمتان فقط)،والذي يؤدي إلى عدم ظهور قيم البارامترات المدروسة بشكل متساوٍ في التجارب التي تم الحصول عليها، ومن ثم يؤدي إلى عدم إمكانية تقدير التفاعلات المتبادلة بين جميع البارامترات المدروسة، لذلك نلجأ إلى إزالة أحد البارامترات (ذات العدد المختلف من القيم) والمضمنة في التحليل المطلوب، أي نقوم بتضمين أربع بارامترات بدلاً من خمسة (نقوم مثلاً بتضمين إستطاعة الليزر وسرعة القص وسماكة الألواح وضغط الغاز المساعد، بصرف النظر عن البعد المحرقي)، ثم نقوم بإعادة التحليل مرة أخرى، ليتسنى لنا تحليل التأثيرات المتبادلة بين جميع البارامترات، فنحصل على المخطط البياني الموضح في الشكل (5).

ونلاحظ من الشكل (5) أن ازدياد استطاعة الليزر بشكل عام يؤدي إلى نقصان عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة حتى الوصول إلى قيمة معينة تبدأ بعدها قيمة عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة بالإزدياد، ولكن هذا التأثير للإستطاعة يكون أقل عند السماكات الكبيرة، كما نلاحظ أن هذه العلاقة تصبح عكسية عند سرعة القص المنخفضة، أو ضغط الغاز المرتفع، إذ يؤدي ازدياد الإستطاعة إلى ازدياد عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة ثم إلى نقصانها بعد قيمة معينة.



القص في المكان الذي يُضبط فيه البعد المحرقي، وعندما تُصهر المادة وتتحول إلى مادة سائلة منصهرة فإنها سوف تنقل الحرارة إلى النقاط المجاورة لها من المادة كما هو موضح في الشكل (6)، وهنا نلاحظ أن ازدياد ضغط الغاز المساعد يزيد من كفاءة إزالة المواد المنصهرة، ومن ثم يقلل من انتقال الحرارة إلى النقاط المجاورة للشق، أما ازدياد موضع البعد المحرقي فهو يؤدي إلى تعرض مساحة أكبر من المادة لشعاع الليزر، ومن ثم للحرارة الناتجة عن هذا الشعاع، وهذا ما يزيد من عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة على جانبي الشق.

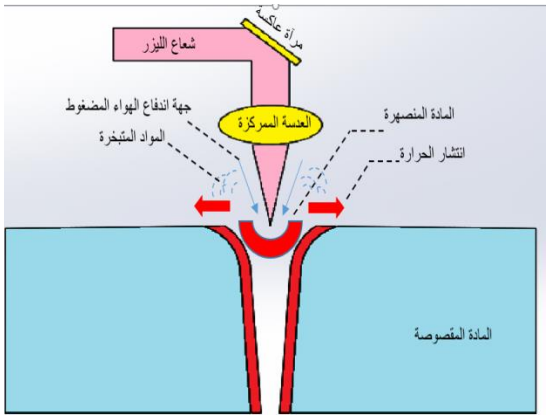
الشكل (5) مخطط التأثيرات المتبادلة بين (ضغط الغاز المساعد، استطاعة الليزر، سرعة القص، سماكة الألواح) وتأثيرها على عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة

ويؤدي ازدياد سرعة القص إلى ازدياد قيمة عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة إلى حد معين تعود بعده هذه القيمة إلى النقصان، ولكن شدة هذه التغيرات تكون أكبر عند السماكاتالأكبر والإستطاعات الأقل.

ويؤدي ازدياد سماكةالألواح إلى ازدياد عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة إلى قيمة محددة تبدأ بعدها قيمة عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة بالنقصان، إلا أن هذا التأثير يكون مختلفاً عند قيمة الإستطاعة المنخفضة، إذ يؤدي ازدياد السماكة إلى ازدياد عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، ويصبح هذا الإزدياد حاداً كلما زادت سماكةالألواح.

6- التحليل:

يمكن تفسير هذه التأثيرات المتبادلة بين البارامترات المختلفة بأنه وفي أثناء عملية القص يقوم شعاع الليزر بصهر منطقة



الشكل (6) رسم توضيحي لآلية تشكل المواد المنصهرة والإنتقال الحراري ضمن المادة

وبالنسبة لاستطاعة شعاع الليزر، ومن خلال النظر إلى المخطط البياني الذي يوضح العلاقة بين استطاعة الشعاع وعرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، يمكننا القول بأن طبيعة هذه العلاقة ليست بعلاقة خطية، فقد تكون علاقة من الدرجة الثانية أو الثالثة ما بين استطاعة الشعاع وعرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، وهذا ما يفسر وجود تغير في منحى الإستجابة عند قيم معينة لاستطاعة الليزر. ويمكن تفسير هذه العلاقة غير الخطية بأن استطاعة الليزر هي التي تسبب بالأساس عملية انصهار المادة قبل إزالتها لتحقيق الشق، لذلك فإن ازدياد شدة شعاع الليزر يؤدي إلى انصهار المواد بشكل أسرع، فإن تمت إزالتها بسرعة مناسبة عبر ضغط الغاز فهذا ينقص من عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، ولكن الإستمرار في ازدياد استطاعة الليزر لحد أعلى مما هو مطلوب سوف يؤدي إلى انتشار أكبر للحرارة حول منطقة القص، وهي الحرارة الناتجة عن الإستطاعة الإضافية والتي لن تستخدم في صهر المادة ضمن الشق، وهذا بدوره سوف يزيد من عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، ومما يعزز هذه النظرية هي ملاحظة أن ازدياد سرعة القص مع ازدياد استطاعة الليزر تقلل من تأثير استطاعة الليزر على عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، لأن ازدياد السرعة يقلل من زمن تعرض المادة للشعاع والإنتقال الحراري، كما أننا نلاحظ في السرعات المنخفضة جداً، أن حدود الإستطاعة الدنيا يؤدي وتبخيرها، ويقوم الغاز المساعد بإزالتها خلال زمن متناسق مع السرعة التي تسبب الإنتقال إلى نقطة أخرى من المادة قبل أن يحصل تأثر حراري في النقاط المجاورة للشق الناتج.

سماكة المادة المقصوصة لها دور في اختزان الطاقة ونشرها بشكل حرارة ضمن المادة، لذلك نلاحظ أن ازدياد السماكة يزيد عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة إلى حد ما، ولكن مع ازدياد السماكة أكثر يصبح لها تأثير مشتت للحرارة ومن ثم ينقص عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة.

إلى ازدياد عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، وبعد ازدياد الإستطاعة أكثر ستبدأ المادة التي تعرضت للحرارة بالإنصهار وتساهم في توسع الشق ونقصان عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، وهذا هو تفسير كون الخط البياني لاستجابة عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة بالنسبة لاستطاعة الليزر عند السرعات المنخفضة بهذا الشكل.

بالنسبة لسرعة القص، نلاحظ أن ازدياد السرعة يزيد من عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة حتى الوصول إلى قيمة معينة ينقص بعدها عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة مع ازدياد السرعة، وهذا يمكن تفسيره بأن ازدياد السرعة في المرحلة الأولى يؤدي إلى مرور شعاع الليزر على نقاط العينة دون أن يتمكن من صهر المادة بشكل كامل بسبب صغر زمن تعرض المادة للشعاع مع ازدياد السرعة، ولكن إن استمرت السرعة في الإزدياد فإن تأثير استطاعة الليزر على المادة سوف ينخفض أيضاً بسبب صغر زمن التعرض أكثر، ومن ثم سيقل تأثير الشعاع على المادة أكثر، حتى على مستوى التأثر بالحرارة، ولكننا نلاحظ أنه وعند قيمة معينة لاستطاعة الليزر فإن ازدياد سرعة القص يؤدي إلى نقصان عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة بشكل مستمر ضمن القيم المدروسة، وهذا يشير إلى الإرتباط القوي بين تأثير السرعة والإستطاعة على عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، إذ توجد قيمة محددة للإستطاعة تكون عندها قيم السرعات المدروسة مناسبة بحيث يقوم الشعاع بصهر المادة

وقد تم تسجيل العينات ذات القيم الأكبر والأصغر لعرض المنطقة المتأثرة بالحرارة في الجدول (5).

الجدول (5) يوضح العينات ذات القيم الأكبر والأصغر لعرض المنطقة المتأثرة بالحرارة

عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة (mm)	السماكة(mm)	السرعة(mm/s)	الإستطاعة (watt)	الضغط(bar)	البعد المحرقي
0.1	2	50	60	0.4	0
0.9	10	30	30	0.4	0

هذه القيم الموضحة في الجدول (5) تتفق مع المنحنيات البيانية إذ نلاحظ أنه وفي السماكة (2mm) فإنه لنقصان عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة ينبغي إنقاص موضع البعد المحرقي واختيار استطاعة متوسطة وأعظم سرعة.

في حين في السماكات ذات (10mm) فإن نقصان موضع البعد المحرقي واستطاعة الليزر واختيار سرعة قص متوسطة، يؤدي إلى ازدياد عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة.

7.1 معادلة الإنحدار الخاصة بعرض المنطقة المتأثرة بالحرارة:

يعد تحليل الإنحدار الخطي من أهم الطرق الإحصائية لفحص العلاقة الخطية بين استجابة واحدة وبين بارامتر واحد أو أكثر من البارامترات المستقلة المؤثرة في الإستجابة، ويعتبر معامل التحديد (R-Sq) مقياسلجودة ملائمة معادلة الإنحدار، وهو عبارة عن مربع معامل الإرتباط بين النتائج المسجلة وبين النتائج التي تم التنبؤ بها، وهو الذي يعطينا المعلومات المعبرة عما يستطيع هذا النموذج تفسيره من التغيرات (الإستجابة المقدرة)، وعما لا يستطيع تفسيره (الخطأ العشوائي)، أما اختبارات الأهمية لبارامترات الإنحدار فتتم عن طريق حساب"احتمال الخطأ " (Probability error)(P-Value) فإذا كان احتمال الخطأ أقل من 5%، فإن التأثير يُعدّ مهماً [14].

بتطبيق تحليل الانحدار على البيانات المدروسةيمكننا الحصول على معادلة إنحدار من الدرجة الثانية تربط البارامترات المدروسة بالإستجابة الحاصلة لعرض المنطقة المتأثرة بالحرارة كما هو موضح في العلاقة **(1)**:

$$\begin{aligned}\text{Heat Affected Zone} = {} & 0.137 + 0.182\,F - 0.089\,P - 0.00262\,PO + 0.0147\,S \\ & + 0.0629\,T + 0.000013\,PO*PO - 0.000262\,S*S - 0.00322\,T*T \\ & + 0.199\,F*P - 0.00420\,F*PO + 0.0066\,F*S - 0.0125\,F*T \\ & + 0.00204\,P*PO - 0.00872\,P*S - 0.0059\,P*T + 0.000037\,PO*S \\ & - 0.000179\,PO*T + 0.000151\,S*T\end{aligned}$$

وبملاحظة القيم الإحصائية التي تم الحصول عليها من تحليل الإنحدار نلاحظ أن قيمة معامل التحديد صغيرة كما هو موضح في الجدول (6)، وهذا يشير إلى ضعف قدرة هذه المعادلة عن التعبير عن العلاقة بين استجابة عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة وبين البارامترات المدروسة.

كما نلاحظ أن قيمة احتمال الخطأ P-Valueالتي تبلغ (0.535) تشير إلى ضعف معنوية معادلة الإنحدار في التعبير عن العلاقة بين البارامترات المدروسة وبين الإستجابة الحاصلة.

الجدول (6) يبين قيم معاملات الإرتباط الخاصة بمعادلة الانحدار

R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	P-Value
50.41%	0.00%	0.00%	0.535

7- الإستنتاجات:

- ضغط الغاز المساعد له التأثير الأهم على عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، يليه استطاعة شعاع الليزر، ثم سماكةالألواح، ثم سرعة القص، وأخيراً موضع البعد المحرقي.
- عدم إزالة المواد المنصهرة من منطقة القص يزيد من انتقال الحرارة إلى نقاط مجاورة من المادة، وهذا يحصل عندما ينقص ضغط الغاز المساعد.
- نقصان استطاعة شعاع الليزر إلى حدود معينة قد يؤدي إلى انتقال حراري ضمن مادة الأكريليك دون حدوث انصهار وتبخر، ومن ثم ازدياد عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة.
- ازدياد إستطاعة الليزر بشكل أكبر مما تتطلبه عملية الإنصهار والتبخر يؤدي إلى ازدياد عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة.
- ازدياد سرعة القص يقلل من شدة تعرض المادة لشعاع الليزر، ومن ثم يحدث انتقال حراري أكبر من نسبة انصهار المادة وتبخرها، وبالتالي يؤدي لازدياد عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة.

- ازدياد السرعة أكثر من قيمة حديةيقلل نسبة الإنتقال الحراري في المادة وبالتالي يقلل من عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة.

- سماكة الألواحهي التي يحدث فيها اكتساب الحرارة اللازمة للصهر والتبخير، لذلكفازدياد السماكة يعني ازدياد الإنتقال الحراري ضمن المادة بحدود أقل من الحرارة اللازمة للصهر والتبخير، مما يؤدي إلى ازدياد عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة أما مع الإستمرار في ازدياد سماكة الألواح فيحدث تشتت للحرارة، ومن ثم نقصان لعرض المنطقة المتأثرة بالحرارة.

- ازدياد موضع البعد المحرقي يؤدي إلى ازدياد عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة.

- لم يتم التمكن من الحصول على معادلة انحدار خطية تعبر عن العلاقة بين البارامترات المدروسة وعرض المنطقة المتأثرة بالحرارة، لأن هذه العلاقة على ما يبدو غير خطية أساساً.

8- المقترحات والتوصيات:

- الإستفادة من نتاج هذه الدراسة لتنفيذ عمليات محاكاة رقمية لعملية القص بالليزر لألواح الأكريليك وذلك لدراسة هذه العملية والتنبؤ بنتائجها.

- الإعتماد على تقنيات الذكاء الصناعي للتوصل إلى طريقة للتنبؤ بقيم البارامترات التي تقلل من عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة بشكل كبير وذلك دون الحاجة للقيام بعدد كبير من العمليات التجريبية المكلفة.

- الإعتماد على نتائج هذه الدراسة لفهم العلاقات المتبادلة بين بارامترات القص المدروسة وبين عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة التي تظهر على جانبي الشق الناتج عن عملية قص ألواح الأكريليك بليزر ثاني أوكسيد الكربون.

- الاستفادة من هذه الدراسةلتحديد قيم البارامترات المثلى التي تقلل من عرض المنطقة المتأثرة بالحرارة وهذا ما يساعد في تحسين جودة عملية القص بالليزر لألواح الاكريليك.

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

References:

1. 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.
2. 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.
3. J. Lawrence, J. Pou, D. K. Y. Low, E. Toyserkani " Advances in laser materials processing" (2010), Woodhead Publishing Limited, ISBN 978-1-84569-981-9.
4. Krzysztof Jarosz, Piotr Löschner, Piotr Niesłony "Effect of cutting speed on surface quality and heat-affected zone in laser cutting of 316L stainless steel" International Conference on Manufacturing Engineering and Materials (2016) ,doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.650.
5. Dalibor Petković, Vlastimir Nikolić, Miloš Milovančević, Lyubomir Lazov "Estimation of the most influential factors on the laser cutting process heat affected zone (HAZ) by adaptive neuro-fuzzy technique" Infrared Physics & Technology (2016), doi:http://dx .doi.org/10.1016/j.infrared.2016.05.005.
6. Mahsa Mokhtarian, Aazam Ghassemi "Experimental Study of the Effect of Laser-Cutting Process Parameters on Heat Distribution and Cutting Edge Quality of Steel Sheets" Journal of Simulation & Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering, 11 (1) (2018) 0035~0058.
7. E. Haddadi،M. Moradi،A. Karimzad Ghavidel،A. Karimzad Ghavidel،and S. Meiabadi،"Experimental and parametric evaluation of cut quality characteristics in CO_2 laser cutting of polystyrene " Optik (Stuttg).،vol. 184،no. February،pp. 103–114،2019 ،DOI: 10.1016/ j.ijleo.2019.03.040
8. Mahmoud Moradi،Mojtaba Karami Moghadam،Mahmoud ،Shamsborhan،Zeinab Malekshahi ،Beiranvand،Alireza Rasouli،Mahdi Vahdati،Arash Bakhtiari،Mahdi Bodaghi " Simulation،statistical modeling،and optimization of CO_2laser cutting process of polycarbonate sheets " . Optik 2020 .https://doi.org/10.1016/j.ijleo. 2020.164932.
9. Tan Hoai Nguyen , Chih-Kuang Lin , Pi-Cheng Tung , Cuong Nguyen-Van , Jeng-Rong Ho " An extreme learning machine for predicting kerf waviness and heat affected zone in pulsed laser cutting of thin non-oriented silicon steel" Optics and Lasers in Engineering 134 (2020) 106244,https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106 244.
10. C. Leone, E. Mingione, S. Genna "Laser cutting of CFRP by Quasi-Continuous Wave (QCW) fibre laser: Effect of process parameters and analysis of the HAZ index" Composites Part B 224 (2021),https://doi .org/10.1016/j.compositesb.2021.109146.
11. C. F. Jeff Wu, Michael S. Hamada "Experiments Planning, Analysis and Optimization" (Third Edition 2021), Wiley, ISBN 9781119470151.
12. Getting Started with Minitab Statistical Software, support.minitab.com/minitab/21
13. CO_2Laser Tube – Model W. Instruction Manual. By(Beijing Reci Laser Technology)
14. Bernd Skiera،Jochen Reiner،and Sönke Albers " Regression Analysis ". 2018. https:// doi.org/10.1007/978-3-319-05542-8_17-1.