ARTICLE INFO
Article history:
Received 20 Jan, 2025
Accepted 14 Apr , 2025
Published 17 Apr 2025

دراسة معملية لتأثير معلمات العملية على جودة قطـع الصلـب منخفض الكربون باستخدام تقنية الليزر البصري

عبد العظيم سالم باله كلية التقنية الصناعية –مصراته–ليبيا Abduladim.bala@cit.edu.ly
إبراهيم علي إبشير– المعهد العالي للعلوم التقنية – مصراته –ليبيا eglila2013@gmail.com

---

–الملخص لقد انتشر في الآونة الأخيرة استخدام تقنيات القطع بالليزر في الوسط الصناعي المحلي، لذلك بات من المهم تسليط الضوء على هذه التقنية وإيضاح الوسائل الفعالة في تحسين وأمثلة مخرجات هذه العملية. لقد أُنجز هذا البحث لغرض تحسين جودة عملية القطع باستخدام تقنية الليزر، وذلك من خلال تحديد القيم المثالية لأهم معلمات هذه العملية المتمثلة في سرعة القطع، قدرة الليزر، والبعد البؤري للشعاع، بالإضافة إلى استنباط نموذج رياضي يمثل العلاقة بين معلمات العملية وجودة مخرجاتها المتمثلة في التقليل من معدل تكون الخبث السفلي، عرض الشق، زاوية ميل سطح القطع. لقد اعتمد هذا البحث في إنجاز دراسته التحليلية على استخدام برنامج (MiniTab–18) لتصميم التجربة وتحليل نتائجها باستخدام طريقة تاقوشي المتضمنة لجدول الاستجابة، مخططات تأثيرات المعلمات المستقلة والمشتركة، جدول تحليل التباين. كما تم الاستعانة بطريقة نموذج الانحدار لاستنباط النموذج الرياضي الذي يمكن الاعتماد عليه في التنبؤ بقيم المعايير (المخرجات) بناءً على مستويات المعلمات المفترضة. بالإضافة إلى المخططات الكنتورية لتوضيح التأثير المشترك للمعلمات. لقد أشارت نتائج الدراسة إلى أن سرعة القطع هي المعلمة الأكثر تأثيراً على معايير الجودة الثلاثة (تكون الخبث، زاوية الميل، عرض الشق)، ويليها البعد البؤري في حالتي تكون الخبث وعرض الشق، بينما في حالة زاوية الميل فإن قدرة الشعاع لها تأثيراً أكبر من البعد البؤري. كما انتهت الدراسة إلى تحديد القيم المثالية للمعلمات لتحقيق أعلى جودة حسب كل معيار من معايير الجودة المعتبرة.

Abstract

The utilization of laser cutting methodologies has witnessed a widespread adoption in the local industrial sector recently, thereby emphasizing the necessity of elucidating this technology and elucidating effective strategies for enhancing and elucidating the outcomes of this procedure. This investigation was undertaken with the aim of enhancing the precision of the cutting process through laser technology by ascertaining the optimal values for key parameters associated with this procedure, specifically the cutting speed, laser power, and beam focal length. Moreover, a mathematical model was developed to depict the correlation between the process parameters and the quality of its results, including the reduction of bottom slag formation, kerf width, and bevel angle. The research relied on the utilization of the MiniTab-18 software to design the experiment and analyze its findings utilizing the Taguchi method, encompassing the response table, independent and interaction parameter effects charts, and analysis of variance table. Furthermore, the regression model technique was employed to derive the mathematical model capable of forecasting the criteria values based on the presumed parameter levels. Additionally, contour plots

were implemented to illustrate the interaction impact of the parameters. The study outcomes underscored that cutting speed exerts the most significant influence on the three process quality criteria (slag formation, inclination angle, and kerf width), followed by focal length concerning slag formation and kerf width. However, beam power demonstrated a greater impact than focal length in relation to the inclination angle. The study concluded by identifying the optimal parameter values for attaining superior quality based on each considered criterion.

الكلمات المفتاحية: معايير عملية القطع بالليزر، الأمثلة، طريقة تاقوشي، نموذج الانحدار ,MiniTab−18.

1. المقدمة

لقد أدى التطور المستمر لتحسين خصائص المواد المعدنية إلى إنتاج معادن فائقة القوة والصلادة، مما صعَّب على التقنيات التقليدية تشغيل هذه المواد، وزاد من تكلفة استخدامها. كما زاد التطور الكبير في المنتجات الصناعية المختلفة إلى إنتاج تصاميم غاية في التعقيد فأصبح من المستحيل الاعتماد على التقنيات التقليدية في تنفيذها. وللتغلب على هذه التحديات ظهرت العديد من التقنيات التي تعتمد على التقنية الرقمية اعتماداً كلياً في تنفيذ عملياتها. ومن أهم هذه التقنيات تقنية القطع التي من أمثلتها تقنية القطع بالسلك، تقنية القطع بالنفث المائي، تقنية القطع بالبلازما، تقنية القطع بالليزر.

وتعتبر عملية القطع باستخدام تقنية الليزر من أكثر التقنيات استخداماً في المجال الصناعي؛ وذلك لدقتها العالية، وإمكاناتها الجبارة في قطع المعادن القاسية، الصلدة، وذات المتانة العالية، بأقل فاقد في المعدن وأقل زمن تشغيل. ولكن هذه العملية كغيرها من العمليات قد تظهر على منتجاتها بعض العيوب تحول دون قبولها أو تقلل من جودتها. ومن أشهر العيوب التي يمكن أن تظهر في منتجات عملية القطع بتقنية الليزر؛ خشونة سطح القطع الناتج، انحراف سطح القطع الناتج عن المستوى العمودي، التصاق الخبث (Dross) بالسطح السفلي للمعدن، تدني دقة المقاسات بسبب زيادة عرض الشق. هذه العيوب عادة ما تنشأ بسبب خلل في تحديد قيم إعدادات العملية. فمن المهم ملاحظة أن كفاءة وجودة عملية القطع بهذه التقنية تخضع لتأثير عدة متغيرات تحدد معالم وظروف العملية أهمها: قدرة الليزر، سرعة القطع، البعد البؤري، ارتفاع الفوهة عن سطح الشغلة، تردد نبضات الليزر، ضغط الغاز المساعد [1]. ولذلك يتوجب البحث عن القيم المثالية لمتغيرات العملية، والتي تحقق أعلى مستوىً من الجودة.

سنة 2019 قدم Rajesh وآخرون بحثاً تناولوا فيه دراسة تأثير كل من سرعة القطع، قدرة الليزر، وضغط الغاز المساعد، في ثلاثة مستويات، على جودة سطح القطع الناتج، وعرض الشق، عند قطع صفائح الحديد المقاوم للصدأ (SS− 304 ، بسمك (3 mm)، باستخدام تقنية الليزر (CO2 laser). أظهرت نتائج جدول (ANOVA) أولويات نسبة تأثير المتغيرات على جودة السطح، فكانت الأولوية لقدرة الليزر بنسبة (66.11%)، ثم لسرعة القطع بنسبة (14.08%) تلاهما ضغط الغاز بنسبة (1.88%). أما بالنسبة لعرض الشق فكانت الأولوية متقاربة لكل من قدرة الليزر وسرعة القطع بنسبتي (36.75%) و (33.33%) على التوالي، أما ضغط الغاز فكانت بنسبة ضعيفة (1.59%) [2].

سنة 2020 قدم Muthuramalingam وآخرون دراسة معملية؛ لمعرفة تأثير قدرة الليزر، بعد فوهة رأس القطع، البعد البؤري، وضغط الغاز المساعد، في أربعة مستويات، على جودة مقاسات الدوائر، ودقة استدارتها، وذلك عند قطع صفائح التيتانيوم (Ti−6Al−4V) بسمك 3مم، حيث تم استخدام الأكسجين كغاز مساعد لعملية القطع. استخدم الباحثون طريقة تاقوشي لتصميم جولات التجربة، واستخدموا تحليل الانحدار لتحليل النتائج، وإيجاد العلاقة بين

متغيرات ومخرجات العملية قيد الدراسة. أشارت النتائج إلى أن أقوى تأثير على دقة المقاسات ودقة الاستدارة، كانت لمستويات قدرة الليزر المستخدمة؛ حيث أشارت النتائج إلى أن المستوى المنخفض للقدرة يحقق أعلى مستوى لدقة استدارة الثقوب عند سطحي القطع العلوي والسفلي. أما ضغط الغاز فكان تأثيره الواضح على دقة المقاسات عند السطحين، بينما ظهر تأثير بعد الفوهة على دقة استدارة الثقوب. كما حققت قيم التركيبة المثالية لقيم المتغيرات أفضل انتظام لانتشار عمود بلازما الليزر، وبالتالي حققت أفضل جودة قطع.[3]

سنة 2021 قدم Muthuramalingam وآخرون دراسة حول تأثير قدرة الليزر، بعد الفوهة، ضغط الغاز، والبعد البؤري، على خشونة سطح القطع الناتج، وزاوية انحراف السطح عن التعامد، وذلك عند قطع ثقوب دائرية في صفائح التيتانيوم (Ti − 6 Al − 4 V) بسمك 5 مم، باستخدام تقنية الليزر(CO2). استخدم الباحثون طريقة تاقوشي لتصميم التجربة وتحليل النتائج، بالإضافة إلى إيجاد القيم المثالية للمتغيرات. أثبتت نتائج الدراسة أن استخدام قدرة الليزر في مستويات عالية مع قرب الفوهة يحقق تحسيناً ملحوظاً في جودة سطح القطع الناتج، وأرجع الباحثون السبب في ذلك إلى أن التركيز الشديد للقدرة في نقطة البؤرة ينتج عنه سطح جيد. كما أشارت نتائج التحليل إلى أن أقل زاوية انحراف عن التعامد للسطح الناتج تكون عند استخدام مستوى قدرة منخفض مع فوهة قريبة، بالتزامن مع ضغط غاز مرتفع. بالإضافة إلى ذلك توصل الباحثون إلى التوليفة المثالية لقيم المتغيرات التي حققت أقل خشونة سطح، وزاوية انحراف [4].

سنة 2021 قدم Girdu وآخرون دراسة حول تأثير ضغط الغاز المساعد، قدرة الليزر، وسرعة القطع، في ثلاثة مستويات، على خشونة سطح القطع الناتج، عند قطع صفائح الحديد (HARDOX 400 steel) بسمك10 مم، باستخدام تقنية الليزر. استخدم الباحثون طريقة fractionated) (Factorial، لتصميم جولات التجربة .كما استخدم الباحثون طريقة Response surface Methodology لتحليل النتائج، وتمثيل العلاقة المشتركة بين المتغيرات، وتأثيرها على خشونة السطح. وبالإضافة إلى ذلك استخدم الباحثون تحليلات جدول التباين؛ لتحديد مقدار ونسبة تأثير كل متغير على حدة، أو بالاشتراك مع المتغيرات الأخرى. أثبتت النتائج أن التأثير الأقوى لهذه المتغيرات كان لضغط الغاز، مع وجود تأثير قيّم لمستويات القدرة المستخدمة، حيث أشارت النتائج أن أقل خشونة سطح يمكن تحقيقها تكون عند المستويات المنخفضة لضغط الغاز، وقدرة الليزر. كما توصل الباحثون إلى تحديد القيم المثالية للمتغيرات، والتي يمكن من خلالها تحقيق أقل خشونة ممكنة.[5]

سنة 2021 قدم Patel وآخرون بحثاً تناولوا فيه دراسة تأثير كل من سرعة القطع، قدرة الليزر، تردد النبضات، وضغط الغاز، في ثلاثة مستويات، على زاوية انحراف سطح القطع الناتج، خشونة السطح، ومنطقة التأثر الحراري، وذلك عند قطع صفائح الحديد الصلد EN−31 بسمك 10 مم. قام الباحثون برفع صلادة المادة الخام من 22 HRC إلى 58 HRC؛ لغرض أن تكون الدراسة على تحسين جودة قطع المعادن عالية الصلادة. استخدم الباحثون طريقة RSM للتحليل ؛ لتصميم جولات التجربة، ودراسة العلاقة بين المتغيرات المستقلة، والمتغيرات التابعة لعملية القطع. أشارت نتائج الاختبارات التأكيدية إلى موثوقية النماذج الرياضية التي تحصل عليها الباحثون من نتائج التحليل الإحصائي. كما أظهرت نتائج التحليلات ANOVA & S/N Ratio أن القطع بالمستويات المتطرفة لقيم المتغيرات تضر بجودة العملية. ومنها أن القطع بمستوى قدرة عالي يؤثر سلباً على خشونة السطح. وأن القطع بسرعة قطع منخفضة يُمكّن شعاع الليزر من خرق المعدن بشكل منتظم، كما أنه يقلل من زاوية انحراف سطح القطع الناتج. ولكن بالمقابل فإن القطع بضغط غاز مرتفع يحقق انخفاضاً ملحوظاً في قيمة زاوية الانحراف. بالإضافة إلى ذلك، ومن خلال الفحص المجهري الإلكتروني (SEM) لمنطقة القطع

لاحظ الباحثون وجود تموجات وتشققات مفسدة لاستواء سطح القطع، وخاصة في العينات التي تم قطعها بمستويات متطرفة لمتغيرات العملية قيد الدراسة؛ لذلك حث الباحثون على التدقيق في اختيار القيم المثالية للمتغيرات؛ لما لها من تأثير مباشر وغير مباشر على جودة منتجات هذه التقنية. ومن الأمور المهمة التي لاحظها الباحثون أن منطقة التأثر الحراري عند الحافة العلوية أكبر مما هي عليه عند الحافة السفلية. كما خلُص الباحثون إلى تحديد القيم المثالية التي تحقق أقل قيمة لزاوية الانحراف، وخشونة سطح القطع.[6]

قدم Madic سنة 2022 وآخرون دراسة معملية لرفع معدل إزالة المادة عند قطع الفولاذ الطري باستخدام تقنية CO2 laser؛ بهدف تعزيز الإنتاجية لهذه التقنية، وبأقل تكلفة ممكنة، مع مراعاة خمس محددات: الخبث الملتصق عند حافة القطع السفلى، عرض شق القطع، ميل سطح القطع الناتج، خشونة سطح القطع، قدرة القطع وبأن تكون ضمن الحدود المسموح بها حسب المواصفة (ISO9013). استخدم الباحثون تصميمين هما (Taguchi's L25, full factorial design 33)، بدرجة دقة مختلفة؛ لدراسة تأثير متغيرات عملية القطع المتمثلة في قدرة الليزر، سرعة القطع، وضغط الغاز المساعد، على معدل إزالة المادة مع الالتزام بالحدود المسموح بها لقيم محددات العملية الخمسة، كما استخدم الباحثون خوارزمية (Exhaustive Iterative Search Algorithm)؛ لتحديد قيم متغيرات عملية القطع المثالية، والتي حققت أعلى معدل إزالة للمادة، مع المحافظة على قيم المحددات حسب ما حددته المواصفة. واستخدم الباحثون حالة دراسية متمثلة في قطع أحد أجزاء فرن صناعي؛ للتأكد من فاعلية النماذج التي تم التوصل إليها، ومقارنة نتائجها بنتائج التجارب الحقيقية، فكانت النتائج متقاربة جداً[7].

من خلال مراجعة النتائج التي توصل إليها الباحثون في هذا الموضوع نستطيع ملاحظة تنوع النتائج التي قد تصل في بعض الأحيان إلى حد التعارض ويرجع السبب في ذلك لعدة أسباب منها: تنوع المادة الخام، اختلاف مستويات المعلمات الخاضعة للاختبار، تنوع المعلمات المخصصة للدراسة في كل بحث؛ هذا كله يقود حتماً إلى اختلاف النتائج. لذلك رأى الباحث اجراء هذه الدراسة على مادة خام محلية يشيع استخدامها في الوسط الصناعي المحلي، بالإضافة إلى اختيار سمك المعدن الأكثر استخداماً، لكي يقدم للشركات المحلية دراسة حقلية منفذة في نفس الظروف التي تعمل فيها هذه الشركات. ولقد تم اختيار شركة أبو فاس للصناعات الحديدة الواقعة بالمنطقة الصناعية بطريق الحامية مصراته كموقع لتنفيذ التجربة.

2. طريقة البحث

اعتمد البحث المنهج التحليلي لنتائج التجربة التي تم تصميم مفرداتها باستخدام طريقة تاقوشي، بهدف تقليل عدد جولات التجربة وفق تصميم قوي، ينتج جميع المؤشرات الإحصائية التي يحتاجها الباحث للوصول إلى أهداف البحث، المتمثلة في: الكشف عن طبيعة وقوة العلاقة المستقلة بين معلمات العملية ومعايير جودة العملية المتمثلة في عرض الشق، زاوية ميل سطح القطع، معدل تكون الخبث السفلي، ولقد تم اختيار هذه المعلمات بناءً على ما أشارت إليه الدراسات السابقة وأهم عيوب المنتجات التي تم رصدها في مجموعة من الشركات الصناعية المحلية، طبيعة العلاقة المشتركة للمعلمات مع معايير جودة العملية، أمثلة العملية من خلال تحديد المستويات المثالية لمعلمات عمليات القطع موضوع الدراسة (سرعة القطع، قدرة الشعاع، البعد البؤري). كما تم الاستعانة بنموذج الانحدار لاستنباط النموذج الرياضي الممثل للعلاقة بين المعلمات والمعايير لغرض التنبؤ بقيمة معايير الجودة عن أي مستويات لمعلمات العملية.

لتحقيق أهداف البحث سالفة الذكر تم قطع عدد 27 عينة (3 قطع لكل عينة) وفق تصميم تاقوشي المبني على عدد ثلاثة معلمات كل معلمة في ثلاثة مستويات. ولقد تم اختيار هذا التصميم لكي يتسنى للباحث الكشف عن

التأثير المشترك للمعلمات على معايير جودة العملية. كما تم تنفيذ عملية القطع لجميع العينات على نفس الآلة (شركة بوفارس للصناعات الحديدة) في وجبة واحدة لتقليل التأثيرات الخارجية للظروف المحيطة على نتائج العملية. تمت عملية القياس لعرض الشق باستخدام قدمه رقمية بدقة 0.05 ملم ولثلاثة مرات لكل عينة عند ثلاثة نقاطة مختلفة ثم تم احتساب متوسط هذه القراءات، كذلك الأمر فيما يخص حساب زاوية ميل سطح القطع الناتج. أما فيما يخص معدل تكون الخبث فقد تم استخدام ميزان حساس رقمي لوزن كمية الخبث المتكونة بالنسبة لوحدة الطول (محيط العينة).

بعد الانتهاء من رصد النتائج تم تحميلها لبرنامج الـMiniTab−18 لتحليل النتائج وفق طريقة تاقوشي، نموذج الانحدار. ووفق هذه الطرق تم أمثلة العملية وفق استراتيجية الهدف المستقل، حيث يتم في كل مرة أمثلة العملية بتحديد القيم المثالية للمعلمات بما يضمن تحقيق أفضل نتائج وفق أحد معايير الجودة دون غيره من المعايير الثلاثة.

3. التجربة

في هذا البحث تم تنفيذ جميع التجارب باستخدام آلة القطع باستخدام تقنية الليزر (Fiber laser) وهي الأكثر استخداماً في الوسط الصناعي المحلي، وذلك لقطع صفائح من الصلب منخفض الكربون بسمك 4 ملم أحد منتجات الشركة الليبية للحديد والصلب في عينات على شكل مربع 50مم ×50مم. لقد تم اختيار أهم معلمات العملية والمتمثلة في قدرة الليزر، سرعة القطع، البعد البؤري لدراسة تأثيرها على جودة العملية المتمثلة هي أيضاً في عرض الشق (Kerf)، زاوية ميل سطح القطع الناتج (Bevel angle)، معدل تكون الخبث (Dross). لقد تحديد مستويات المعلمات بناءً على قدرات آلة القطع المستخدمة في الاختبار كما هو مبين بالجدول (1). وباستخدام طريقة تاقوشي لتصميم التجارب وباعتبار محددات التجربة المتمثلة في وجود ثلاثة متغيرات في ثلاثة

الجدول (1) مستويات معلمات عملية القطع

المتغير / المستوى	المستوى1	المستوى2	المستوى3
قدرة الليزر [Watt]	1200	1350	1500
سرعة القطع[m/min]	0.5	1.25	1.6
البعد البؤري[mm]	2	2.25	2.5

مستويات، ولإظهار التأثير المستقل والمشترك للمعلمات يتوجب اعتماد التصميم ذي 27 جولة المطروح من ضمن المقترحات التي تقدمها الطريقة لتصميم التجربة، ولقد اعتماد هذا التصميم لأن اعتماد التصميم المتضمن لعدد جولات أقل من 27 جولة لا يمكن للطريقة استشعار التأثيرات المشتركة للمعلمات.

لقد تم تنفيذ التجربة بشكل متتابع وفي وردية واحدة لاستبعاد التأثيرات الخارجية الخارجة عن سيطرة الباحث كدرجة الرطوبة، حالة آلة القطع، حالة المادة الخام. ولقد تم قياس معايير جودة القطع المتمثلة في معدل تكون الخبث، عرض الشق، زاوية الانحراف، على النحو التالي:

1. قياس عرض الشق باستخدام قدمه رقمية بدقة 0.05 mm، عند ثلاث نقاط موزعة على طول الشق، وحساب متوسط هذه القياسات لكل عينة، ثم يُحسب متوسط المتوسطات للعينات الثلاث.
2. قياس زاوية الانحراف باستخدام قاعدة حساب المثلثات، وذلك بحساب فرق طول حافتي القطع عند ثلاث نقاط ثم حساب المتوسط ومتوسط المتوسطات. وتحدد قيمة زاوية الانحراف باستخدام المعادلة (1.2):

$$\theta = tan^{-1}\frac{Wd - Wb}{2h}$$

حيث إن (θ) هي زاوية الانحراف، (Wd) هو عرض السطح العلوي، (Wb) هو عرض السطح السفلي، (h) هو سمك الصفيحة [49].

3. حساب معدل تكون الخبث بوحدة (g) بواسطة ميزان إلكتروني حساس، وذلك بوزن العينة بعد عملية القطع، ثم

تنظيفها من الخبث وإعادة وزنها، وحساب فرق القراءتين، حساب المتوسط لكل العينات.

تم قطع 3 عينات لكل جولة من جولات التجربة أي بإجمالي 3×27 عينة، كما تم قطع جميع العينات بمقاس 50×50 mm. وبقياس معايير الجودة لكل العينات كانت النتائج كما هي مبينة بالجدول (2).

الجدول (2) نتائج اختبار تأثير معلمات القطع

العينة	معلمات العملية			معايير تقييم جودة العملية		
	قدرة الليزر [Watt]	سرعة القطع [m/min]	البعد البؤري [mm]	الخبث [g]	زاوية الانحراف [º]	عرض الشق [mm]
1	1200	0.5	2	1.183	2.68	0.98
2	1200	0.5	2.25	0.797	3.26	0.94
3	1200	0.5	2.5	0.863	2.31	1.045
4	1350	0.5	2	0.737	2.76	0.99
5	1350	0.5	2.25	1.56	1.26	1.019
6	1350	0.5	2.5	0.61	1.80	1.15
7	1500	0.5	2	1.357	1.64	1.1
8	1500	0.5	2.25	0.53	1.36	1.161
9	1500	0.5	2.5	0.613	1.41	1.15
10	1200	1.25	2	0.013	0.69	0.44
11	1200	1.25	2.25	0.003	0.76	0.49
12	1200	1.25	2.5	0.003	0.64	0.54
13	1350	1.25	2	0.02	0.61	0.476
14	1350	1.25	2.25	0.03	0.47	0.511
15	1350	1.25	2.5	0.02	0.37	0.53
16	1500	1.25	2	0.01	0.38	0.51
17	1500	1.25	2.25	0.04	0.31	0.528
18	1500	1.25	2.5	0.02	0.35	0.56
19	1200	1.6	2	0.04	0.29	0.42
20	1200	1.6	2.25	0.06	0.29	0.47
21	1200	1.6	2.5	0.06	0.46	0.51
22	1350	1.6	2	0.02	0.44	0.43
23	1350	1.6	2.25	0.02	0.53	0.47
24	1350	1.6	2.5	0.02	0.61	0.51
25	1500	1.6	2	0.01	0.41	0.47
26	1500	1.6	2.25	0.01	0.44	0.51
27	1500	1.6	2.5	0.03	0.36	60.5

4. تحليل النتائج

سنورد في هذا البند مناقشة مستفيضة لنتائج اختبار تأثير معلمات عملية القطع على معايير الجودة، على أن يتم ترتيب عرض مؤشرات التحليلات لكل معيار على النحو التالي:

- تحليلات طريقة تاقوشي المتمثلة في: جدول الاستجابة، التمثيل البياني للتأثيرات المستقلة والمشتركة للمعلمات على معايير الجودة، التمثيل الكنتوري للمعلمات.
- تحليلات نموذج تحليل الانحدار المتمثلة في: الأمثلة لتحديد القيم المثالية لمعلمات العملية، النموذج الرياضي الخاص بالتنبؤ بقيم المعايير عند أي مستويات يحددها المستخدم لمعلمات العملية.

أولاً: تأثير المعلمات على عرض الشق

أ- جدول متوسطات الاستجابة

باعتماد استراتيجية الأقل هو الأفضل تم حساب متوسطات الاستجابة كما هو مبين بالجدول (3). حيث يظهر ترتيب أهمية معلمات القطع حسب القيم المُدرجة في صف "الترتيب"، والتي بنيت على الفرق بين أكبر وأصغر قيمة لمتوسطات الاستجابة التي تناظر كل مستوى من مستويات المعلمات الذي يوضحه صف "الفارق"، فالقيمة الأعلى لهذا الفرق تدل على أن تأثير المعلمة أقوى من تأثير غيرها من المعلمات. فمن الملاحظ أن التأثير الأقوى على عرض الشق كان لسرعة القطع، يليه البعد البؤري، بينما تأتي قدرة الليزر في المرتبة الأخيرة.

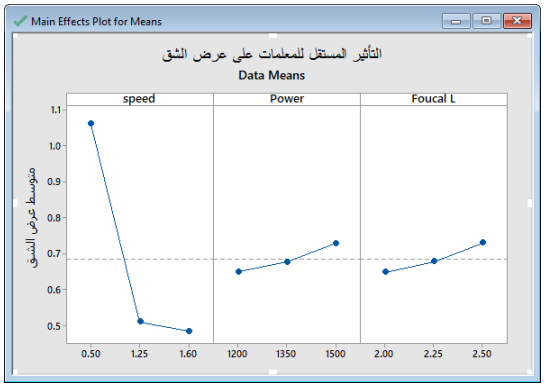
الجدول (3) متوسط الاستجابات لعرض الشق

المستويات	سرعة القطع	قدرة الليزر	البعد البؤري
1	1.0602	0.6492	0.6483
2	0.5107	0.6772	0.6776
3	0.4842	0.7287	0.7292
الفارق	0.5760	0.0794	0.0809
الترتيب	1	3	2
الأقل هو الأفضل			

ب- المخططات البيانية لتأثيرات المستقلة والمشتركة

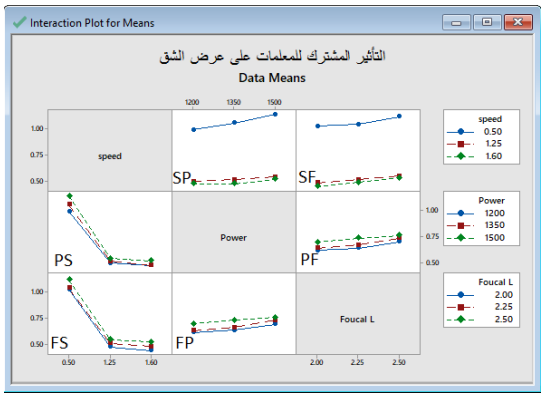
يوضح المخطط (1) التأثير المستقل للمعلمات، حيث تشير العلاقة الخاصة بالسرعة إلى التأثير السلبي القوي لها على عرض الشق، فزيادة السرعة يقلل من عرض الشق وبشكل ملحوظ. وهذا يتفق مع ما تم عرضه في جدول متوسطات الاستجابة، فميل علاقة السرعة الكبير تشير إلى قوة تأثير السرعة، وبمقارنته بميل العلاقات الأخرى يتضح تفوق تأثير معلمة السرعة على المعلمتين الأخريين اللتان يُظهران تأثير متقارب. ويمكن تفسير قوة تأثير سرعة القطع بمفهوم كمية الطاقة التي ينقلها الشعاع للمادة المقطوعة؛ فكلما انخفضت السرعة اتاحت فرصة أكبر لنقل كمية طاقة أكبر لمنطقة القطع، فينتج عنها صهر كمية أكبر من المادة مما ينتج عنه توسع الشق، والعكس بالعكس. أما البعد البؤري الذي يأتي في المرتبة الثانية فهو المسؤول عن تحديد موضع البؤرة التي تتركز فيها الطاقة المنقولة، فزيادة البعد البؤري يضع البؤرة في موضع يحقق تراكم كمية أكبر من الطاقة في منطقة القطع ومنها ينتج مزيد من المادة المنصهرة الأمر الذي يزيد من توسع الشق. أما قدرة الشعاع فلها تأثير طردي مباشر على كمية المادة المنصهرة، غير أن تأثير هذا المعيار يتضاءل سبب قوة سيطرة المعلمات الأخرى.

يوضح الشكل (2) التأثير المشترك للمعلمات على عرض الشق. المخطط SP يعرض تطرفاً في نتيجة عرض الشق بسبب انخفاض السرعة، وتزداد قيمته مع ازدياد قدرة الشعاع. أما مع المستويين الآخرين للسرعة فيظهر تقلص



الشكل (1) عرض الشق المقابل لمستويات المعلمات

واضح في عرض الشق، بالإضافة إلى ضعف التأثير للقدرة على الشق في هذه المستويات أيضاً. فبالتالي فإن القص بسرعات عالية يؤمن انضباطاً أكبر في عرض الشق. أما المخطط PS فيعرض تطابقاً كبيراً لتأثير السرعة عند مستويات القدرة المختلفة، فزيادة السرعة تؤدي إلى ضيق الشق عند مستويات القدرة الثلاثة.



الشكل (2) التأثيرات المشتركة للمعلمات على عرض الشق

المخططSF وبنفس الكيفية، أدى القطع بمستوى سرعة منخفض إلى توسع الشق بشكل متطرف عن المستويات الأخرى كما هو الحال في المخطط السابق، وهذا راجع إلى قوة تأثير سرعة القطع على عرض الشق. كما يمكن ملاحظة ضعف تأثير البعد البؤري على الشق عند جميع مستويات سرعة القطع. كذلك الحال يعرض المخطط FS سلوك مشابه للتأثير المشترك للسرعة مع القدرة. فزيادة السرعة أدت إلى ضيق الشق لجميع مستويات البعد البؤري.

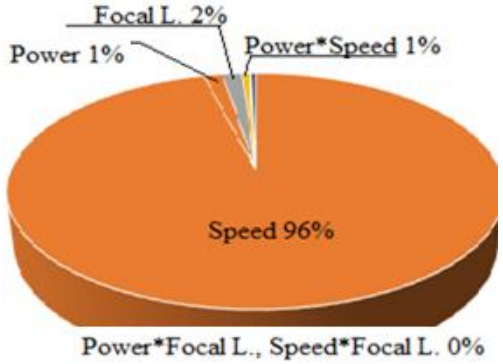
المخطط PF يشير إلى ضعف التأثير المشترك للقدرة مع البعد البؤري، فالتغير في عرض الشق بسيط جداً عند جميع مستويات القدرة والبعد البؤري أيضاً كما يظهر في المخطط FP. إجمالاً يمكن القول بأن التأثيرات المشتركة للمعلمات كلها ضعيفة باستثناء تلك التي تشارك فيها معلمة السرعة. لذلك من المهم أخذها بعين الاعتبار عند الرغبة في القطع بعرض شق دقيق.

ج- جدول تحليل التباين للمتوسطات الخاص بعرض الشق

تشير نتائج تحليل التباين لقيمة P-value بجدول ANOVA للمتوسطات الموضحة بالجدول (4) إلى أن التأثيرات المستقلة للمعلمات ذوات قيمة إحصائية عالية، بينما يقترب كثيراً التأثير المشترك للقدرة وسرعة القطع من القيمة الإحصائية الفاصلة، أما باقي التأثيرات الأخرى المشتركة فلا يظهر لها تأثير يذكر. الشكل (3) يوضح نسب تأثير المعلمات التي تظهر سيطرة معلمة السرعة.

الجدول (4) تحليل التباين لمتوسطات نتيجة عرض الشق

Source	DF	Seq	Adj	Adj MS	F	P
Speed	2	1.90	1.93	0.951	1229.6	0.00
Power	2	0.03	0.02	0.014	18.88	0.00
Focal L.	2	0.03	0.03	0.015	19.51	0.00
Speed *	4	0.01	0.01	0.002	3.68	0.05
Sp* F L.	4	0.001	0.00	0.001	0.47	0.55
P * F L.	4	0.001	0.00	0.001	0.60	0.67
R. Error	8	0.006	0.00	0.001		
Total	26	1.983				
R-Sq = 99.69 %			R – Sq (adj) = 98.99 %			



الشكل (3) نسب تأثير معلمات العملية على عرض الشق

د- التمثيل الكنتوري للتأثير المشترك للمعلمات على عرض الشق

يشير مخطط العلاقة بين القدرة وسرعة القطع الموضح بالشكل (4) إلى أن أقل قيمة لعرض الشق يمكن تحقيقها عند جميع مستويات القدرة بشرط المحافظة على سرعة القطع عند المستوى الأعلى. كما يمكن ملاحظة اتساع الشق الناتج عند انخفاض السرعة إلى المستوى الأدنى، ويزيد اتساعه بزيادة مستوى القدرة المستخدم. يرتكز مدار هذه العلاقة بشكل أساسي على كمية الطاقة التي يسلطها شعاع الليزر على الوحدة الواحدة من كتلة المادة في منطقة القطع؛ لذلك فإن زيادة السرعة تقلل من زمن مد المنطقة بالطاقة، بينما انخفاض السرعة أو ارتفاع مستوى القدرة المستخدم يؤدي إلى ضخ كمية طاقة أكبر تؤدي إلى صهر مزيد من المادة في منطقة القطع الأمر الذي يسبب اتساع الشق [9،8].

يشير مخطط العلاقة بين سرعة القطع والبعد البؤري على عرض الشق الموضح بالشكل (5) إلى تشابه كبير مع العلاقة السابقة وهذا راجع إلى سيطرة تأثير سرعة القطع على تأثيرات المعلمات الأخرى. يشير المخطط إلى أن القطع بالمستوى المتوسط فما فوق يؤمن عدم اتساع عرض الشق حتى وإن تم القطع باستخدام بعد بؤري كبير. أما تنفيذ عملية القطع بمستوى دون المتوسط فيؤدي إلى اتساع الشق الناتج ويزيد اتساعه بازدياد البعد البؤري القطع المستخدم.

أما مخطط العلاقة بين القدرة والبعد البؤري للشعاع الموضح بالشكل (6) يشير إلى ضعف التأثير المشترك لهما؛ وذلك لبقاء الاستجابة في نفس المستوى رغم التغير في مستويات المعلمتين على طول المدى المخصص لهما في هذه الدراسة. كما يشير المخطط إلى عدم اتساع الشق حتى عند القطع بمستويات متطرفة للمعلمتين وهذا يشير لضعف التأثير المشترك لهما.

عرض الشق. هذه العلاقة الرياضية يمكن استخدامها للتنبؤ بقيمة عرض الشق عند القطع بأي قيم يحددها المستخدم لمعلمات العملية.

Kerf = 0.1354 - 0.096 Speed + 0.000646 Power + 0.1618 Foucal. L. - 0.000342 Speed*Power …… (1)

هـ- أمثلة عملية القطع وتحديد المستويات المثالية للمعلمات لتقليل عرض الشق

باستخدام نموذج الانحدار وبالتحديد باستخدام وظيفة الأمثلة (Response Optimizer) تم تحديد القيم المثالية للمعلمات التي من شأنها أن تنجز عملية القطع بأقل عرض شق ممكن، وباعتماد استراتيجية الأقل هو الأفضل أشارت نتائج الأمثلة إلى أن الضبط الأمثل للمعلمات تكون عند القيم التالية:

Parameters	speed	Power	Foucal L.
Ideal value	1.6 m/min	1200 W	2 mm

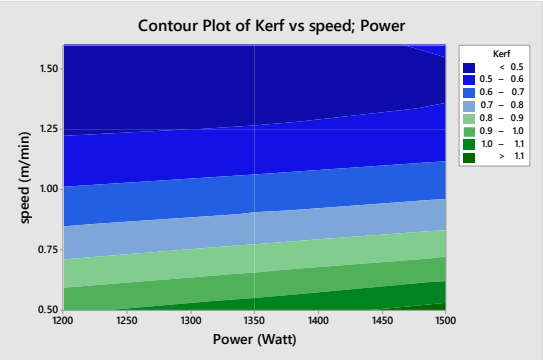
ثانياً: تأثير المعلمات على معدل تكون الخبث السفلي

أ- جدول متوسطات الاستجابة

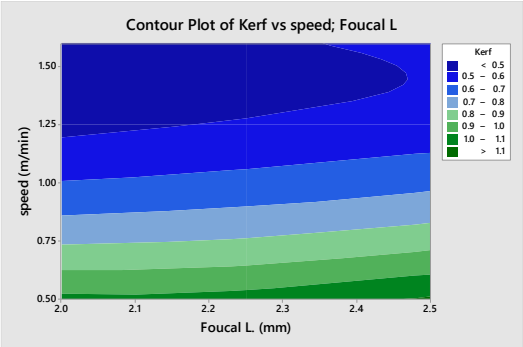
ترتب نتائج تحليل جدول الاستجابة أهمية تأثير معلمات العملية على معدل الخبث السفلي كما هو موضح بالجدول (5). أشارت نتيجة التحليل إلى أن لسرعة القطع الأهمية الكبرى في التأثير على معدل الخبث، يليها البعد البؤري ثم قدرة الشعاع.

الجدول (5) متوسطات الاستجابة للخبث السفلي

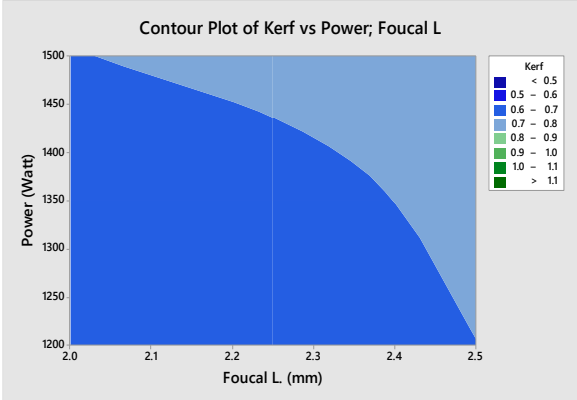
Level	Speed	Power	Focal L.
1	0.91667	0.33644	0.37700
2	0.01867	0.33711	0.33889
3	0.03000	0.29178	0.24944
Delta	0.89800	0.04533	0.12756
Rank	1	3	2



الشكل (4) مخطط التأثير المشترك لسرعة القطع والقدرة



الشكل (5) التأثير المشترك لسرعة القطع والبعد البؤري



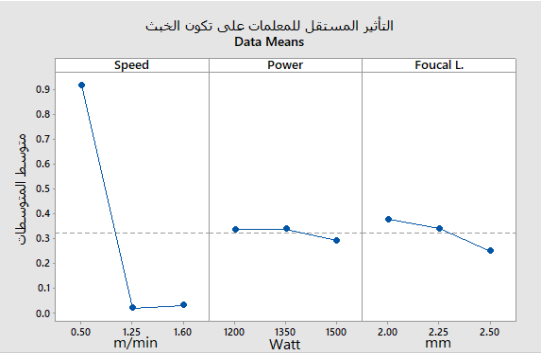
الشكل (6) التأثير المشترك للقدرة والبعد البؤري

و- التمثيل الرياضي لعلاقة تأثير المعلمات على عرض الشق

نظراً لعدم توفر التمثيل الرياضي للعلاقة بين المعلمات ومخرجات العملية بشكل مباشر في تحليل تاقوشي، تم الاستعانة بنموذج تحليل الانحدار؛ لاستنباط هذه العلاقة التي تحاكي علاقة هذه المعلمات بمخرج العملية المتمثل في

ب- مخططات العلاقة للتأثيرات المستقلة والمشتركة للمعلمات على معدل تكون الخبث

يشير مخطط علاقة السرعة بمعدل تكون الخبث إلى تأثير عكسي قوي، فمع انتقال السرعة من المستوى الأدنى إلى المتوسط انخفض معدل الخبث بشكل كبير جداً لدرجة اقترابه من الصفر، وهذا يعكس التأثير القوي لهذه المعلمة. أما المستوى الثالث للسرعة فلم يضيف مزيداً من التحسين لكونه قريباً من العدم. أما تأثيرات القدرة والبعد البؤري فلم تكن ذات قيمة تعتبر؛ فتغير المستويات لم يحدث أي تغيير في النتيجة.

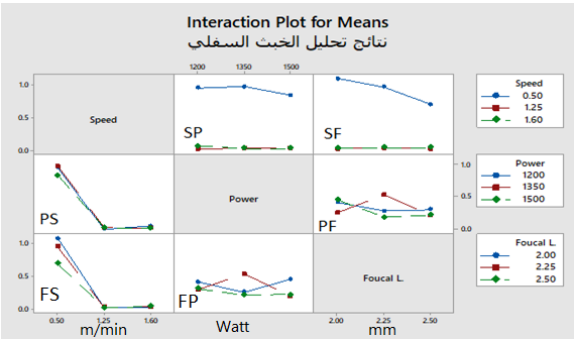


الشكل (7) متوسط الخبث المقابل لمستويات معلمات العملية

يعرض الشكل (8) التأثيرات المشتركة للمعلمات ويشير كل مخطط منها إلى التأثير المشترك لكل معلمتين. المخطط SP يعرض تأثير التغير في القدرة مع تأثير السرعة بالنسبة لمعدل الخبث. يشير المخطط إلى أن القطع بمستوى منخفض من السرعة يقود إلى ارتفاع معدل الخبث المتكون، في حين لا يضيف التغير في القدرة أي تغيير يذكر على هذا النمط. في المقابل عند القطع بمستويات متوسطة ومرتفعة من سرعة القطع يحدث تقلص كبير في معدل الخبث المتكون، وكذلك الحال لا يظهر تأثير يذكر لمستويات القدرة على تأثير السرعة. مما سبق طرحه يمكن القول بأنه لا يوجد تأثير لقدرة الشعاع على تأثير سرعة القطع، لذلك يجب التحري الدقيق في تحديد مستوى السرعة بما يتناسب مع باقي المتغيرات مثل نوع وسمك المعدن المقطوع.

المخطط SF يعرض هذا المخطط تأثيراً مشابهاً جداً للعلاقة السابقة باستثناء وجود شيء من التأثير للبعد البؤري على تأثير سرعة القطع المنخفضة؛ فزيادة البعد البؤري عند المستوى المنخفض للسرعة يحقق بعض الانخفاض في معدل الخبث المتكون. أما باقي المستويات الأخرى للسرعة فلا يوجد للبعد البؤري أي تأثير يذكر. في حين يعرض المخطط FS تأثيراً واضحاً لسرعة القطع على تأثير البعد البؤري في تحديد معدل الخبث المتكون. فالقطع بالمستوى المتوسط وما فوق يحقق انخفاضاً حاداً في معدل الخبث لجميع مستويات البعد البؤري. فكما هو معلوم أن موضع البؤرة يحدد المركز الحراري للشعاع، فوجود البؤرة فوق السطح يقلل من التراكم الحراري للشعاع داخل المادة، بينما يحقق وجود البؤرة داخل عمق المادة مزيداً من التراكم الحراري داخل المادة مما يؤدي إلى صهر المزيد من المعدن، الأمر الذي قد يعجز عنده تيار الغاز المنفوث من نثر كامل المصهور بعيداً عن منطقة القطع، وهذا قد يساهم في زيادة معدل الخبث[8] .

مخطط القدرة/البعد البؤري PF يشير إلى تأثير بسيط للتغير في البعد البؤري على تأثير القدرة عند المستوى المتوسط، بينما يختفي تأثير البعد البؤري في المستويات الأخرى للقدرة. وبنفس السلوك يعرض المخطط FP تأثير التغير في مستويات القدرة على تأثير مستويات البعد البؤري. هذا التقارب الكبير بين المخططين يشير لضعف التأثير المشترك للمعلمتين على معدل الخبث.



الشكل (8) التأثيرات المشتركة للمعلمات على تكون الخبث

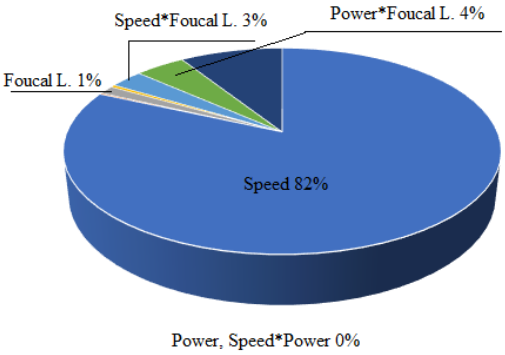
ج- جدول تحليل التباين لمتوسطات تكون الخبث

تشير نتائج تحليل التباين الموضحة بالجدول (6) والمدرجة بعمود قيمة (P-Value) إلى عدم وجود تأثير ذي قيمة إحصائية للمعلمات على تكون الخبث باستثناء سرعة القطع. ويمكن تفسير ذلك؛ بأن سرعة القطع هي المعلمة المتحكمة وبشدة في كمية الحرارة المنقولة للمعدن بالإضافة إلى التحكم في زمن نثر المصهور بعيداً عن منطقة القطع بواسطة الغاز المنفوث فوهة القطع. هذان العاملان هما المؤثران وبشكل قوي على تحقيق التوازن بين إنجاز عملية القطع بشكل كامل، وإزالة المصهور من منطقة القطع ليكون سطح القطع نظيفاً تماماً من أي بقايا تظهر في صورة خبث.

الجدول (6) حليل التباين لمتوسطات معدل تكون الخبث

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Speed	2	4.778	4.778	2.389	36.1	0.00
Power	2	0.012	0.012	0.006	0.09	0.91
Focal L.	2	0.077	0.077	0.038	0.58	0.58
Speed * Power	4	0.023	0.023	0.005	0.09	0.98
Speed * Foucal L.	4	0.169	0.169	0.042	0.64	0.65
Power * Foucal L.	4	0.257	0.257	0.064	0.97	0.47
Residual Error	8	0.529	0.529	0.066		
Total	26	5.846				
R-sq 90.94% R-sq(adj) 70.56%						

يبين الشكل (9) نسب التأثير المستقل والمشترك للمعلمات، حيث كانت النسبة الأعلى لسرعة القطع (82%)، تلاها نسبة التأثير المشترك للبعد البؤري وقدرة الشعاع، نسبة تأثير السرعة مع البعد البؤري، نسبة تأثير البعد البؤري، نسبة تأثير السرعة مع القدرة، وأخيراً نسبة تأثير القدرة.



الشكل (9) نسب تأثير معلمات العملية على تكون الخبث

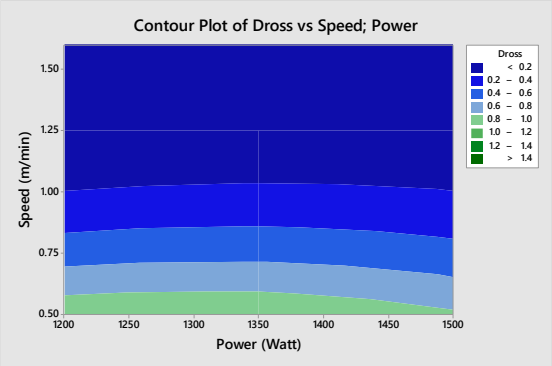
د- التمثيل الكنتوري للتأثير المشترك للمعلمات على معدل الخبث

يعرض الشكل (10) التأثير المشترك لسرعة القطع وقدرة الشعاع على معدل الخبث. وبكل وضوح يشير المخطط إلى اتساع المساحة المشتركة للمعلمتين التي يمكنها تقليل كمية الخبث الناتجة إلى أقل حد ممكن، فهي محددة بالمستوى المتوسط فما فوق لسرعة القطع بالتقاطع مع جميع مستويات القدرة محل الدراسة. أي أنه يمكن للمستخدم العمل بأي مستوى للقدرة ما دامت سرعة القطع أكبر من(1m/min) .

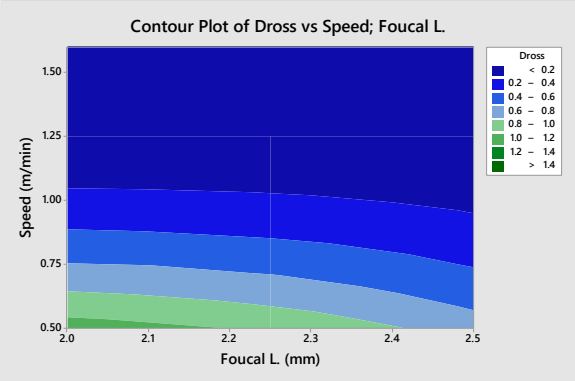
يعرض الشكل (11) يعرض العلاقة الممثلة للتأثير المشترك لسرعة القطع مع البعد البؤري. بأسلوب مشابه للعلاقة السابقة تظهر مساحة واسعة مشتركة للمعلمتين يمكنها تحقيق خفض كبير في معدل الخبث المتكون، وهي محددة بنفس المستويات المذكورة بالعلاقة السابقة. وهذا التقارب يضع المستخدم في حرية كبيرة لاختيار مستويات البعد البؤري وقدرة الشعاع بشرط القطع باستخدام سرعات قطع عالية.

الشكل (12) يعرض العلاقة الممثلة للتأثير المشترك لقدرة الشعاع والبعد البؤري على معدل الخبث. يقتصر المخطط على مساحتين متقاربتين لمستوى معدل الخبث الناتج. ولتحقيق أفضل النتائج يفضل الابتعاد عن المنطقة الوسطى لمستويات المعلمتين معاً، فهي تقود إلى ارتفاع نسبي لمعدل الخبث، بينما يشير المخطط إلى أن العمل

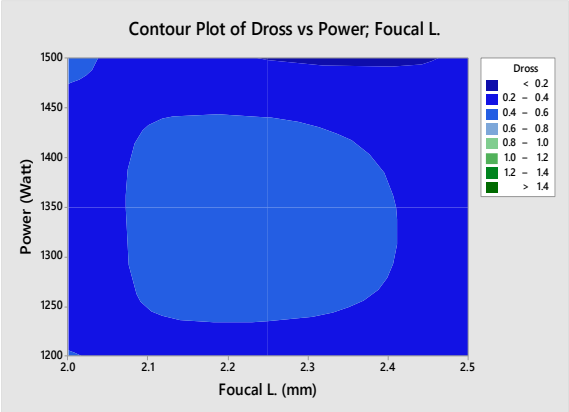
بالحدود الدنيا والعظمي لكلى المعلمتين يحقق الهدف من العملية.



الشكل (10) التأثير المشترك للسرعة والقدرة على الخبث



الشكل (11) التأثير المشترك للسرعة والبعد البؤري على معدل تكون الخبث



الشكل (12) التأثير المشترك للقدرة والبعد البؤري على معدل تكون الخبث

و- تحليل نموذج الانحدار لتأثير المعلمات على معدل الخبث

تمثل المعادلة (2) النموذج الرياضي الذي يمثل العلاقة بين معلمات العملية ومعدل الخبث، والذي يقدمه نموذج الانحدار ويستفاد منه في التبوء بكمية الخبث مقابل أي توليفة لمستويات المعلمات.

$$Dross=1.84055 - 0.868\ Speed - 0.000149\ Power - 0.255\ Foucal.\ L \quad .....(2)$$

و- أمثلة العملية وتحديد المستويات المثالية للمعلمات لتقليل معدل الخبث

باستخدام نموذج الانحدار وبالتحديد باستخدام وظيفة الأمثلة (Response Optimizer) تم تحديد القيم المثالية للمعلمات التي من شأنها أن تنجز عملية القطع بأقل معدل تكون خبث ممكن، وباعتماد استراتيجية الأقل هو الأفضل أشارت نتائج الأمثلة إلى أن الضبط الأمثل للمعلمات تكون عند القيم التالية:

Parameters	speed	Power	Foucal L.
Ideal value	1.25 m/min	1200 W	2.25 mm

ثالثاً: تحليل نتائج تأثير معلمات عملية القطع على زاوية الانحراف

أ- جدول متوسطات الاستجابة لزاوية الانحراف

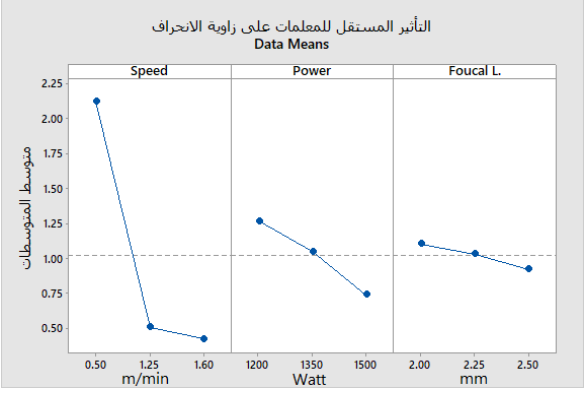
الجدول (7) لمتوسطات الاستجابة لزاوية انحراف سطح القطع يوضح ترتيب أهمية معلمات القطع. تشير نتائج التحليل إلى أن التأثير الأقوى على زاوية الانحراف كان لسرعة القطع، ثم قدرة الشعاع المستخدم، ثم البعد البؤري الذي كان له التأثير الأضعف على زاوية الانحراف. والجدير بالذكر أن سرعة القطع كان لها التأثير الأكبر في هذه النتيجة والنتائج السابقة، بينما تفاوت تأثير المعلمتين الأخريين من نتيجة إلى أخرى ولكن بنسب متقاربة.

جدول (7) متوسطات الاستجابة لزاوية الانحراف

Level	Speed	Power	Focal L.
1	2.1207	1.2644	1.1010
2	0.5101	1.0499	1.0312
3	0.4238	0.7402	0.9223
Delta	1.6969	0.5242	0.1787
Rank	1	2	3

ب-المخططات البيانية للتأثيرات المستقلة والمشتركة للمعلمات على زاوية الانحراف

بسلوك مشابه لمخططات التأثيرات المستقلة للنتائج السابقة وخاصة فيما يخص تأثير السرعة المستقل. فكما هو مبين بالشكل (13) يظهر تأثير عكسي قوي للسرعة على زاوية الانحراف عند التحول من المستوى الأدنى إلى المتوسط. وبذلك يمكن القول بأن القطع بسرعة فوق المستوى المتوسط يؤمن القطع بعرض شق ضيق، وخالي من الخبث السفلي تقريباً، بالإضافة إلى استقامة سطح القطع الناتج. كما تشير مخططات القدرة والبعد البؤري إلى تقارب كبير بين تأثيرهما على زاوية السطح مع شيء من التميز للقدرة على تأثير البعد البؤري الذي لا يظهر له تأثير يذكر.



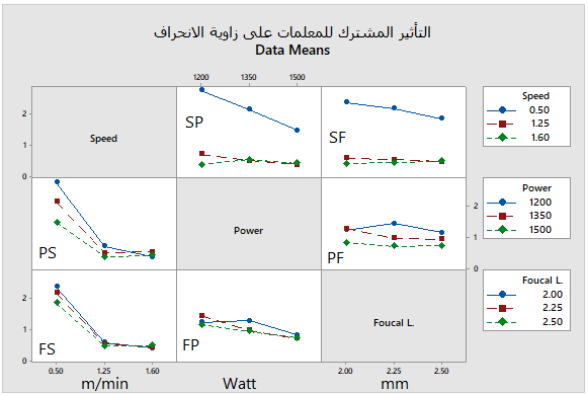
الشكل (13) زاوية الانحراف المقابلة لمستويات المعلمات

في المخطط الموضح بالشكل (14) يظهر تأثير المعلمات المشترك على زاوية الانحراف بنفس السلوك الذي ظهر في الحالتين السابقتين تقريباً، ويرجع السبب في هذا التشابه إلى سيطرة تأثير سرعة القطع على كامل العملية وبفارق كبير عن المعلمات الأخرى.

يشير المخطط SP إلى انخفاض زاوية انحراف المستوى بشكل ملحوظ مع زيادة سرعة القطع إلى المستويين المتوسط والعالي، كما يساهم زيادة مستوى القدرة المستخدم في تراجع زاوية الانحراف في حالة القطع بمستوى السرعة الأقل، ولا يظهر للتغير في القدرة تأثير يذكر على مستويات السرعة الأخرى (المتوسط والعالي). يجدر الإشارة هنا إلى أن تأثير المستوى الأول (500 ملم/د) سبب في زيادة واضحة في زاوية ميل سطح القطع ناتج عن بطء حركة الشعاع الذي تسبب في تراكم حراري عند السطح العلوي أكثر مما هو عند السطح السفلي؛ مما أدى إلى مزيد من صهر المعدن عند هذه الحافة، وينتج عن ذلك ميل السطح الناتج. وعلى النقيض من ذلك فإن ارتفاع السرعة يحقق التوازن بين الطاقة المطلوبة والطاقة المتاحة؛ مما ينتج قطعاً متساوياً عند الحافتين أي انتاج سطحاً قائماً [9]. أما المخطط PS فيعرض تأثير التغير في السرعة على مستويات قدرة الشعاع. يشير المخطط إلى أن التغير في السرعة يحقق انخفاضاً واضحاً في زاوية الميل عند جميع مستويات القدرة، وتكون أقل ما يمكن عند المستوى الأعلى للسرعة .

المخطط SF يعرض تأثير التغير في البعد البؤري على زاوية الميل عند مستويات السرعة المختلفة. وبنفس الأسلوب السابق فإن انخفاض السرعة يؤدي إلى زيادة زاوية الميل، كما ان زيادة البعد البؤري يحقق مزيد من التحسين في زاوية ميل مستوى القطع. أما عند مستويان سرعة القطع المتوسط والعالي لا يظهر أي تأثير يذكر للبعد البؤري. أما المخطط FS فإنه يشير إلى تأثير قوي للتغير في السرعة على زاوية الميل عند مختلف مستويات البعد البؤري، وبالأخص عند الانتقال من المستوى الأدنى إلى المتوسط، الأمر الذي يشير أن المستوى المتوسط للبعد البؤري يحقق توزيع أكثر انتظاما للطاقة الحرارية الناتجة.

المخطط PF يشير إلى ضعف تأثير المشترك للبعد البؤري وقدرة الشعاع، ويكون أقل انحراف ممكن لمستوى القطع عند مستوى القدرة الأعلى. وكما تم الإشارة إليه سابقاً بأن البعد البؤري يحدد موضع البؤرة بالنسبة لسطح المعدن، وهذا التموضع يحدد مكان مركز الاشعاع الحراري للشعاع. كما إن ارتفاع مستوى القدرة المستخدم يقلل من تأثير تغير موضع البؤرة [10]. أما تأثير التغير في القدرة على زاوية انحراف المستوى عند مستويات البعد البؤري المعروض بالمخطط FP يشير إلى ضعف التأثير المشترك للمعلمتين.



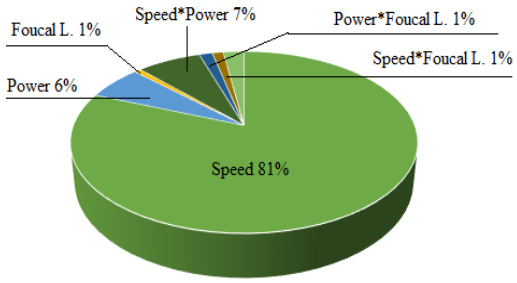
الشكل (14) التأثيرات المشتركة للمعلمات على زاوية الانحراف

ج–جدول تحليل التباين للمتوسطات– زاوية الانحراف

أشارت نتائج تحليل التباين المعروضة بالجدول (8) إلى أن سرعة القطع، القدرة، التأثير المشترك لسرعة القطع وقدرة الشعاع لهن تأثير إحصائي معتبر. ويوضح التمثيل القطاعي المبين بالشكل (15) سيطرة سرعة القطع الذي تجاوز 80% من نسبة تأثير المعلمات. في حين انحسار تأثير باقي المعلمات فيما مجمله 15% من التأثير الكلي للمعلمات.

الجدول (8) تحليل التباين (ANOVA) للمتوسطات

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Speed	2	16.44	16.44	8.22	140.5	0.000
Power	2	1.25	1.25	0.63	10.7	0.006
Focal L.	2	0.15	0.146	0.07	1.3	0.338
Speed * Power	4	1.45	1.45	0.36	6.2	0.014
Speed * Focal L.	4	0.29	0.29	0.07	1.3	0.354
Power * Focal L.	4	0.249	0.249	0.06	1.1	0.434
Residual Error	8	0.47	0.46	0.059		
Total	26	20.30				
R-sq = 97.69 % R-sq(adj) = 92.50 %						



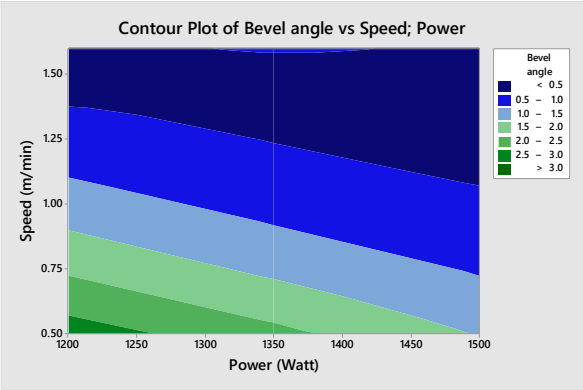
الشكل (15) نسب تأثير معلمات العملية

د– التمثيل الكنتوري للتأثير المشترك لمعلمات العملية

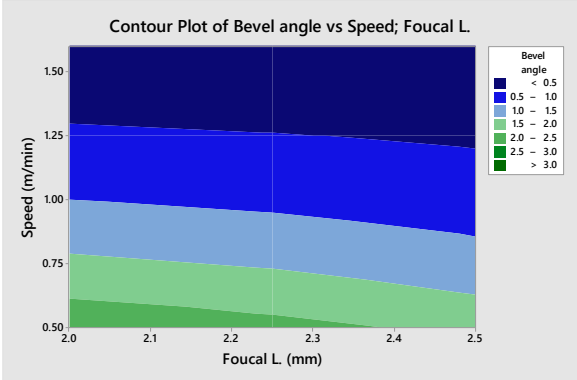
توضح المخططات الكنتورية بالأشكال (16)، (17)، (18) التأثير المشترك لمعلمات العملية على زاوية الانحراف.

يشير مخطط التأثير المشترك لسرعة القطع وقدرة الشعاع الموضحة بالشكل (16) إلى وجود مساحة كبيرة للقطع بزاوية انحراف صغيرة جداً، تتحدد بالمستوى المتوسط للسرعة مع جميع مستويات القدرة الممكنة. فقط المنطقة المحصورة بين المستويات الدنيا للمعلمتين تظهر زاوية الانحراف عندها أكبر ما يمكن. التأثير المشترك للسرعة والبعد البؤري للشعاع الموضح بالشكل (17) يعرض هو الآخر مساحة مثل أو أكبر من سابقتها، تكون عندها زاوية انحراف مستوى القطع أقل ما يمكن. هذا التوافق يسهل عملية الضبط للمعلمات، فاختيار أي قيم للمعلمات داخل هذه المساحة يحقق قطعاً

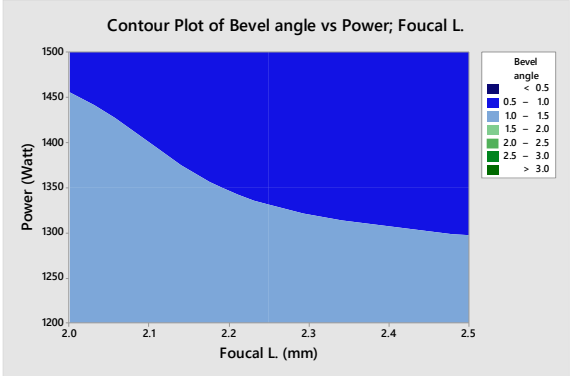
بمواصفات جيدة. بينما يشير مخطط العلاقة المشترك للقدرة مع البعد البؤري الموضح بالشكل (18) إلى تضاؤل قيمة الزاوية عند كل المستويات للمعلمتين، وتكون أقل ما يمكن عند المستوى المتوسط فما فوق.



الشكل (16) التأثير المشترك لسرعة القطع والقدرة



الشكل (17) التأثير المشترك لسرعة القطع والبعد البؤري



الشكل (18) التأثير المشترك للقدرة والبعد البؤري على

و- تحليل نموذج الانحدار لتأثير المعلمات على زاوية انحراف سطح القطع

باستخدام نموذج الانحدار تم استنباط المعادلة (3) التي تحاكي العلاقة بين معلمات العملية وزاوية الانحراف، والتي يمكن استخدامه للتنبؤ بقيمة الزاوية عند أي مستويات ممكنة.

Bevel angle = 7.13 - 11.34 Speed - 0.00629 Power + 0.00407 Speed*Power……(3)

هـ- أمثلة العملية وتحديد المستويات المثالية للمعلمات لتصغير زاوية انحراف سطح القطع

بتطبيق وظيفة الأمثلة المتاحة على نموذج الانحدار أثبتت نتائج التحليل أن القيم المثالية للمعلمات التي تنتج أقل قيمة ممكنة لزاوية ميل سطح القطع هي:

Parameters	speed	Power	Foucal L.
Ideal value	1.6 m/min	1200 W	2 mm

5. الاستنتاجات

لقد تم في هذا البحث دراسة التأثيرات المستقلة والمشتركة لمعلمات عملية القطع المتمثلة في قدرة الليزر، سرعة القطع، والبعد البؤري، على مخرجات العملية المحددة في معدل تكون الخبث السفلي، عرض الشق، وزاوية انحراف مستوى القطع. ولقد تم تصميم التجربة وتحليل نتائجها باستخدام طريقة تاقوشي بالإضافة إلى نموذج الانحدار. ومن خلال تحليل النتائج التي تم رصدها توصل الباحث لاستنتاج النقاط التالية:

1. تبرز أهمية معرفة القيم المثالية للمعلمات في الحد من ظهور المنتجات المعيبة، والتي تؤدي إلى تكاليف إضافية، ناهيك عن نقص الحصة السوقية للشركات العاملة في هذا المجال بسبب فقدان سمعتها عند الزبائن .
2. ضعف التأثير المستقل لأي معلمة لا يعني بالضرورة انعدام تأثيرها بالكلية، فقد يظهر لها تأثير بالاشتراك مع معلمة أخرى.

3. تم تحديد القيم المثالية لتحقيق أفضل مخرجات العملية باعتبار استراتيجية الهدف الواحد فكانت عند نفس مستوى القدرة للمعايير الثلاثة، واختلفت بالنسبة لمستوى السرعة والبعد البؤري، حيث كانت عند المستوى الأعلى عند الرغبة في تحقيق أقل عرض شق وزاوية الانحراف، وعند المتوسط في حالة الرغبة في تقليل معدل تكون الخبث. أما البعد البؤري عند المستوى الأدنى في حالتي تقليل عرض الشق وزاوية الانحراف بينما كانت عند المستوى المتوسط عند الرغبة في تقليل معدل تكون الخبث.

4. وضوح سيطرة سرعة القطع في جميع الحالات، تلاها البعد البؤري ثم القدرة في حالة معدل تكون الخبث. بينما كان تأثير القدرة على زاوية الميل أقوى من تأثير البعد البؤري، وحدث تقارب كبير بين الاثنين في حالة تقليل عرض الشق.

5. القطع بسرعات عالية يؤمن الحصول على سطح نظيف خال من الخبث، وعرض شق أضيق، وزاوية ميل أقل، وذلك عند جميع مستويات المعلمتين الأخريين.

6. ضعف تأثير كلا من البعد البؤري والقدرة على مخرجات العملية إذا ما قورنا بتأثير السرعة

7. تطبيق مفهوم التوازن بين الطاقة المنتجة والمستهلكة في عملية القطع يسهل فهم طبيعة تأثير المعلمات على مخرجات العملية.

6. التوصيات

1. يوصي الباحث الشركة محل الدراسة بالأخذ بالقيم المثالية لمعلمات عملية القطع التي تم التوصل إليها؛ لكي يتسنى لها تحقيق الجودة المطلوبة، والحد من ظهور المنتجات المعيبة، وبالتالي زيادة الأرباح بأقل التكاليف الممكنة.

2. تطبيق طرق الأمثلة ذات استراتيجية الأهداف المتعددة مثل Grey Relation Analysis يؤمن مزيد من التحسين في جودة العملية.

7. المراجع

[1] R. Dewil, P. Vansteenwegen, and D. Cattrysse, “A review of cutting path algorithms for laser cutters,” International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 87, no. 5–8, pp. 1865–1884, 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8609-1.

[2] K. Rajesh, V. V. Murali Krishnam Raju, S. Rajesh, and N. Sudheer Kumar Varma, “Effect of process parameters on machinability characteristics of CO2 laser process used for cutting SS-304 stainless steels,” *Mater Today Proc*, vol. 18, pp. 2065–2072, 2019, doi: 10.1016/J.MATPR.2019.06.261.

[3] T. Muthuramalingam *et al.*, “Influence of process parameters on dimensional accuracy of machined Titanium (Ti-6Al-4V) alloy in Laser Beam Machining Process,” *Opt Laser Technol*, vol. 132, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106494.

[4] T. Muthuramalingam, R. Akash, S. Krishnan, N. Huu, V. Ngoc, and A. H. Elsheikh, “Surface quality measures analysis and optimization on machining titanium alloy using CO 2 based laser beam drilling process,” *J Manuf Process*, vol. 62, no. October 2020, pp. 1–6, 2021, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.12.008.

[5] [5] C. C. Girdu, M. V. Dragoi, M. Mileșan, L. A. Mihail, L. Cirtina, and C. Radulescu, “Study of input parameters influence on the surface quality at laser processing of Hardox 400 steel,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, Jan. 2021. doi: 10.1088/1757-899X/1009/1/012022.

[6] [6] C. C. Girdu, M. V. Dragoi, M. Mileșan, L. A. Mihail, L. Cirtina, and C. Radulescu, “Study of input parameters influence on the surface quality at laser processing of Hardox 400 steel,” in *IOP Conference Series:*

Materials Science and Engineering, IOP Publishing Ltd, Jan. 2021. doi: 10.1088/1757-899X/1009/1/012022.

[7] M. Madić, S. Mladenović, M. Gostimirović, M. Radovanović, and P. Janković, "Laser cutting optimization model with constraints: Maximization of material removal rate in CO2 laser cutting of mild steel," *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, vol. 234, no. 10, pp. 1323–1332, Aug. 2020, doi: 10.1177/0954405420911529

[8] R. Spena, "CO2 laser cutting of hot stamping boron steel sheets," Metals (Basel), vol. 7, no. 11, 2017, doi: 10.3390/met7110456.

[9] C. Leone, S. Genna, A. Caggiano, V. Tagliaferri, and R. Molitierno, "Influence of process parameters on kerf geometry and surface roughness in Nd:YAG laser cutting of Al 6061T6 alloy sheet," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, no. 9–12, pp. 2745–2762, Dec. 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8667-4.

[10] T. Zlámal, Š. Malotová, J. Petrů, Z. Brytan, and V. Musil, "The evaluation of the surface quality after laser cutting," in *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, Dec. 2018. doi: 10.1051/matecconf/20182402009.