

Laboratory Study on the Effect of CNC Plasma Cutting Process Parameters on Product Quality

Abdaladim S. Bala^{1*}

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Technology, Misurata, Libya.

*Corresponding author email: abduladim.bala@cit.edu.ly.

Received: 03-5-2023* | Accepted: 14-5-2023 | Available online: 15-6-2023 | DOI:10.26629/jtr.2023.03

ABSTRACT

CNC Plasma Cutting Technology is one of the most important cutting techniques that are widely used in the metal industries, due to its high ability to cut complex designs with great accuracy and low production cost. The quality of the products of this technology mainly depends on the rational control of the process parameters. In this study the effect of process parameters such as cutting speed, cutting current, and standoff distance on Kerf width and dross formation rate has been investigated using Taguchi method. The obtained results indicate that the cutting speed dominates both quality criteria with an impact rate of more than 57%, followed by cutting current which was around 12%, while the nozzle height showed very low impact on the quality criteria. Furthermore, the results of the conformation experiment indicate a high convergence between model and practical results in case of crack width and a lower level of congruence in case of the slag rate formation model due to narrow of testing levels.

Keywords: CNC Plasma cutting process, Kerf, Dross, Optimization of plasma cutting parameters.

دراسة معملية لتأثير معلمات عملية القطع بالبلازما المُسيرة بالحاسوب على جودة منتجاتها

عبد العظيم سالم باله¹

¹ قسم الهندسة الصناعية، كلية التقنية الصناعية، مصراتة، ليبيا.

ملخص البحث

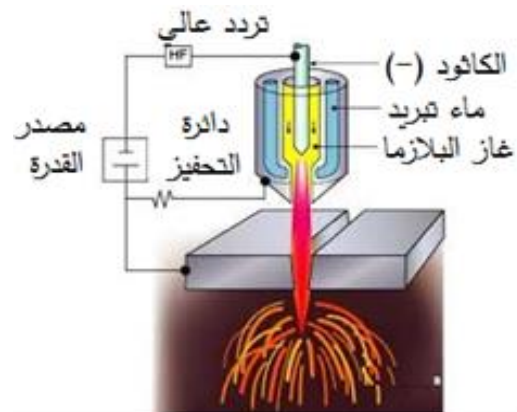
القطع بالبلازما المسيرة بالحاسوب هي أحد أهم تقنيات القطع التي تستخدم بشكل واسع في الصناعات المعدنية، وذلك لما تقدمه من مقدرة عالية في قطع التصاميم المعقدة وبدقة كبيرة وبتكلفة إنتاجية منخفضة فيما لو قُرنَت بتقنيات القطع التقليدية. تعتمد جودة منتجات هذه التقنية بشكل أساسي على التحكم الرشيد في المعلمات الحاكمة لهذه العملية. اختص هذا البحث بدراسة تأثير سرعة القطع، شدة التيار، وارتفاع الفوهة كأهم المعلمات على معيارين من معايير جودة العملية هما عرض الشق ومعدل تكون الخبث السفلي، وذلك باستخدام طريقة تافوشي لتصميم التجارب وتحليل نتائجها إحصائياً، كما تم تعزيز هذه التحليلات باستخدام تحليل نموذج الانحدار وتصميم العامل والاشتقاق منها في استنباط النماذج الرياضية للعلاقات بين المعلمات والاستجابة وكذلك إجراء عملية التحسين لتحديد القيم المثالية للمعلمات. أشارت النتائج إلى سيطرة سرعة القطع على كلا المعيارين بنسبة تأثير فاقت 57% لكلا المعيارين تلتها في الترتيب شدة التيار التي تجاوزت 12% بقليل، ثم ارتفاع الفوهة الذي كان الأقل تأثيراً. كما أشارت نتائج تجارب اختبار النماذج تقارب كبير بين نتائج النموذج والتطبيق العملي في حالة عرض الشق، وبمستوى أقل من التطابق في حالة نموذج معدل الخبث.

الكلمات الدالة: عملية قطع البلازما باستخدام الحاسب الآلي، الشق، الخبث، تحسين معلمات قطع البلازما.

1. المقدمة

تُعد عملية قطع الصفائح أحد أهم العمليات الصناعية التي تعتمد عليها صناعة الكثير من المنتجات الصناعية كهيكل الآلات والمعدات الصناعية، مركبات النقل الثقيل، معدات الحفر والإنشاء. ومع تطور التطبيقات الصناعية، ظهرت الحاجة لتقنيات قطع تفوق التقنيات التقليدية المعتمدة على المهارات اليدوية وخاصة عند قطع تصاميم معقدة، فكانت تقنية القطع بالبلازما المسيرة بالحاسوب (CNC Plasma cutting Technology) أحد التقنيات المتطورة التي يمكن أن تفي بهذا الغرض [1]. لقد أتاح اعتماد هذه التقنية على السيطرة الرقمية في قيادة حركة رأس القطع إمكانية قطع تصاميم معقدة جداً لا يمكن تنفيذها بالتقنيات اليدوية، كما أتاححت الطاقة الحرارية الهائلة التي يولدها قوس البلازما من قطع ألواح معدنية تصل إلى 40 ملم، لذلك حققت هذه التقنية انتشاراً واسعاً في أغلب الشركات الصناعية العاملة في الصناعات الحديدية [2].

توصف البلازما بأنها الحالة الرابعة للمادة بعد الحالات الثلاثة الأساسية (الصلبة، السائلة، الغازية) والتي تتحول فيها جزيئات المادة بسبب الارتفاع الفائق للحرارة إلى أيونات بسبب فقدها للإلكترونات. يتولد عن هذا النشاط طاقة هائلة من الحرارة تصل إلى 20000 م° . الشكل (1) يوضح مكونات ومفهوم عملية القطع بالبلازما.



شكل 1: مكونات ومفهوم عملية القطع بالبلازما.

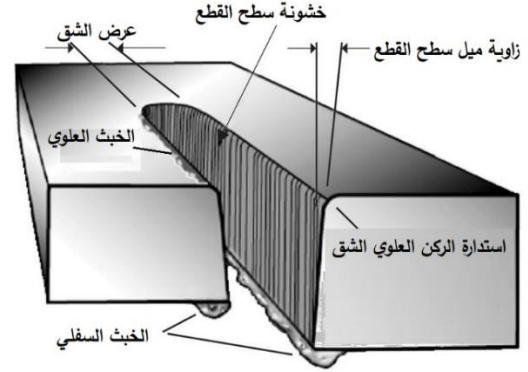
تقوم دائرة التحفيز بإنتاج الشرارة الأولى بين رأس القطع ووسط المعدن، ينتج عنها توصيل الدائرة بين الغاز المتأين والمعدن كما يعمل الغاز المدفوع بقوة على توجيه قوس البلازما في منطقة ضيقة ينتج عنها رفع درجة حرارة هذه المنطقة إلى درجة عالية جداً ينتج عنها صهر المعدن في زمن قصير جداً، وفي نفس الوقت يعمل تيار الغاز المدفوع على نشر المعدن المنصهر بعيداً عن منطقة القطع مكوناً شق يفصل اللوح إلى قسمين [3].

عملية القطع بالبلازما هي عملية إنتاجية كأي عملية صناعية أخرى، تتكون من مدخلات، معالجات، ومخرجات؛ وبالتالي فإن جودة مخرجاتها تعتمد بشكل مباشر على جودة مدخلاتها والمعالجات التي تقوم بها العملية لتحويل هذه المدخلات إلى مخرجات ذات قيمة. المعالجات هي عبارة عن تفاعل مجموعة من العناصر المؤثرة في العملية (متغيرات، معلمات، أو بارامترات) تؤدي إلى تحويل صورة المدخلات إلى منتجات محددة. لذلك فإن جودة مخرجات العملية تعتمد على طبيعة وقوة تأثير معلمات العملية التي تتحدد بناءً على قيمة هذه المتغيرات، فالضبط الرشيد لقيم هذه المعلمات هو السبيل الوحيد لتحسين جودة العملية [4]. ونظراً لأهمية هذا الموضوع عملت العديد من البحوث والدراسات على تحديد القيم المثالية لمعاملات عملية القطع بالبلازما التي من شأنها تحقيق أفضل مستويات الجودة الممكنة. ولقد اتفقت أغلب البحوث المتخصصة في هذا الموضوع على أن سرعة القطع، شدة التيار المستخدم، ارتفاع الفوهة، ضغط الغاز المساعد وفرق جهد التيار المستخدم هي المعلمات المسيطرة على العملية [5]. كما يجدر الإشارة إلى أن جودة هذه العملية تُقيم من خلال أربعة معايير أساسية كما هي مبينة بالشكل (2) وهي: دقة المقاسات (متمثلة بشكل أساسي في ضبط عرض الشق)، معدل تكون الخبث السفلي، زاوية ميل وخشونة سطح القطع الناشئ.

في ذلك يؤدي إلى ظهور تموجات ترفع بشكل ملحوظ من خشونة السطح [6]، في حين أشارت الدراسة التي قدمها Massoudi إلى أن القطع بمستويات سرعة منخفضة متزامنة مع مستوى منخفض لشدة التيار يحقق تحسن ملحوظ في خشونة سطح القطع الناتج. بينما يؤدي القطع بمستويات عالية لسرعة القطع وضغط الغاز المساعد متزامنة مع المستوى المنخفض لشدة تيار إلى انحسار منطقة التأثير الحراري وضيق عرض الشق الناتج [7]. اختلفت نتائج دراسة Agbonoga في ترتيب تأثيرات المعلومات عن الدراسات الأخرى؛ حيث أشار إلى أن تأثير سرعة القطع على جودة السطح يأتي في المرتبة الثالثة بعد شدة التيار وارتفاع الفوهة، وتتساوى تقريباً مع تأثير شدة التيار في تأثيرهما على عرض الشق وهما تأنيان في المرتبة الثانية بعد ارتفاع الفوهة [8]. هذا الاختلاف نشأ عن القصور وعدم الشمولية في مدى المعلومات الخاضعة للدراسة في بعض البحوث، فضيق المدى للمعلمة لا يحدث تغييراً ملحوظاً في الاستجابة (معايير الجودة). أشار Patel في دراسته إلى أن زيادة سرعة القطع تؤدي إلى زيادة مباشرة وفعالة في معدل إزالة المادة، التي ينتج عنها تقليل زمن القطع ومن ثم تعزيز إنتاجية العملية [6]. Sami أشار في دراسته إلى أن لسرعة القطع تأثير طردي إيجابي على دقة المقاسات وخاصة عند تزامنهما مع ارتفاع مستوى شدة التيار [9]. بينما أشار Peko في دراسته إلى وجود تأثير لسرعة القطع أيضاً على زاوية ميل سطح القطع؛ حيث أشار إلى تساؤل الزاوية مع تراجع سرعة القطع المتزامنة مع زيادة شدة التيار؛ وهذا راجع إلى أن انخفاض سرعة القطع مع زيادة شدة التيار يعطي الفرصة الكافية لقوس البلازما أن ينجز عملية الصهر والنثر على عمق سمك المعدن، وهذا يعطي سطح قطع عمودي تقريباً [10].

(ب) تأثيرات مستويات شدة التيار

يلعب التغير في مستويات شدة التيار المستخدم في عملية القطع دوراً هاماً، لا يبتعد كثيراً عن دور سرعة القطع؛ فهما مشتركتين في تحقيق نظرية التوازن بين



شكل 2: معايير قياس جودة عملية القطع بالبلازما [3].

ترتبط معلومات العملية ومخرجاتها بعلاقات مستقلة مباشرة وأخرى مشتركة، أحياناً تكون طردية وأحياناً عكسية، وأحياناً أخرى تكون مترددة بين الحالتين. لذلك يمكن القول بأن العلاقة بين معلومات العملية ومخرجاتها علاقة معقدة تحتاج إلى فهم دقيق حتى يمكن للمستخدم السيطرة عليها وتوجيهها إلى تحسين جودة العملية. ولأهمية الموضوع سنورد شرحاً موجزاً لتأثير معلومات العملية على كل معيار من معايير تقييم جودة عملية القطع بالبلازما.

(أ) تأثيرات مستويات سرعة القطع

تعتبر سرعة القطع أهم معلومات عملية القطع بالبلازما تأثيراً على كل معايير جودة العملية، وهذا ليس لباقي المعلومات. لسرعة القطع تأثيرات مستقلة وأخرى مشتركة أهمها تأثيراتها المشتركة مع شدة التيار. يركز تأثير سرعة القطع على مفهوم التوازن بين الطاقة اللازمة لإنجاز عملية القطع والطاقة الناتجة من قوس البلازما. نظرياً يحقق التوازن بين هاتين الطاقتين انجازاً كاملاً لعملية وبدون عيوب. وبالمقابل الحيود عن هذا التوازن ينتج عيوباً حسب اتجاه هذا الحيود، فزيادة السرعة عن القيمة المثالية لحالة القطع ينتج خبث السرعات العالية (عجز الغاز المساعد عن نثر كامل المعدن المصهور من منطقة القطع نظراً لسرعة حركة رأس القطع العالية)، بينما يؤدي انخفاض سرعة القطع عن السرعة المثالية لصهر مزيد من المعدن الأمر الذي يؤدي إلى توسع الشق وسوء حالة سطح القطع الناتج. أشارت نتائج الدراسة التي قدمها Patel إلى أن الزيادة في سرعة القطع يحسن من جودة سطح القطع الناتج، غير أن المبالغة

على معدل إزالة المادة، وتأثيرها الطردي السلبي على خشونة سطح القطع الناتج [13].

(ت) تأثيرات مستويات ارتفاع الفوهة

يمثل ارتفاع الفوهة المسافة العمودية بين فوهة رأس القطع وسطح المعدن المراد قطعه، حيث ينتقل قوس البلازما خلال هذه المسافة. ومن المهم الإشارة إلى أن لقوس البلازما هيئة تعتمد على شدة التيار المستخدم، ولكنه بشكل عام يكون مدبباً عند نهايته وشبه مستقيم عند المنتصف، لذلك فإن قرب وبعد الفوهة عن سطح المعدن يحدد أي جزء من القوس سيشارك في عملية القطع، فإذا كانت المنطقة المستقيمة من القوس هي من سيقوم بعملية القطع فإن مستوى القطع الناتج سيكون عمودياً تقريباً وتكون زاوية الميل أقل ما يمكن، أما إذا كانت إحدى النهايتين هي من سيشارك في عملية القطع فينتج عنه مستوى سطح مائل نسبياً. كما يؤثر ارتفاع الفوهة في تحديد معدل تكون الخبث السفلي من خلال تحديد بعد مصدر (الفوهة) تيار الغاز المساعد عن منطقة القطع مما يؤثر على كفاءة عملية نثر المعدن [14].

أشارت الدراسة التي قدمها Sharma إلى انعدام تأثير ارتفاع الفوهة تقريباً على معدل إزالة المادة [4]، كما أضاف Patela أنه ليس لارتفاع الفوهة تأثير على خشونة سطح القطع الناتج [6]. أشارت نتائج دراسته لوجود علاقة طردية متوسطة التأثير لارتفاع الفوهة على عرض الشق [2].

(ث) ضغط الغاز المساعد

تستخدم غازات مثل النيتروجين أو الأكسجين أو الهواء كمساعد لإنجاز عملية القطع، حيث يتم دفع تيار من الغاز من فوهة رأس القطع تحت ضغط عالي ليقوم بنثر المعدن المنصهر بفعل الحرارة المتولدة من القوس بعيداً عن منطقة القطع. يؤثر ضغط الغاز بشكل مباشر على هيئة التيار المنفوث من الفوهة إلى منطقة القطع، فارتفاع الضغط يؤدي إلى زيادة سرعة التيار مما يساعد في تركيزه وعدم انتشاره، وهذا يساهم في إعطاء التيار الزخم الكافي لنثر المعدن بكفاءة عالية، أما انخفاض

الطاقة المطلوبة لإنجاز عملية القطع والطاقة المنتجة من قوس البلازما. وجود فائض في الطاقة عند منطقة القطع إما بسبب تأخر سرعة القطع أو ارتفاع مستوى شدة التيار المستخدم يؤدي إلى توسع عرض الشق الذي بدوره يؤثر على مقاسات المنتج، سوء حالة سطح القطع الناتج عن صهر كمية زائدة من المعدن، ظهور الخبث السفلي بسبب تعاطم كمية المعدن المنصهر وعدم كفاية الغاز المضغوط على نثر كل الكمية. بينما يؤدي وجود عجز في الطاقة المطلوبة إلى زيادة زاوية ميل سطح القطع الناتج بسبب عدم إنجاز عملية القطع بشكل كامل وخاصة عند الحافة السفلية للمعدن مما يخلق شق متسع من الأعلى وضيق من الأسفل. أشارت العديد من البحوث المنجزة مؤخراً إلى أهمية تأثير هذه المعلمة، كما توصلت هذه البحوث إلى نتائج تشير إلى طبيعة تأثير هذه المعلمة. أشار Kechagias في دراسته إلى تقدم أهمية تأثير شدة التيار على تأثير باقي المعلمات (سرعة القطع، فرق الجهد، ضغط الغاز، بعد الفوهة) وذلك فيما يخص زاوية ميل سطح القطع الناتج، بالإضافة لذلك أشارت الدراسة إلى حدوث انخفاض التدريجي في زاوية الميل مع زيادة شدة التيار [11]. أما Massoudi فقد أشارت نتائج دراسته إلى بروز تأثير شدة التيار بالنسبة لانتساع منطقة التأثير الحراري، اتساع عرض الشق، خشونة السطح الناتج، حيث تؤدي الزيادة في شدة التيار إلى اتساع كلاً من منطقة التأثير الحراري وعرض الشق وكذلك زيادة خشونة السطح الناتج والعكس بالعكس مع مراعاة تأثيرات المعلمات الأخرى كسرعة القطع [7]. كما رجحت نتائج دراسة kumar تأثير شدة التيار على تأثير ضغط الغاز، سرعة القطع وارتفاع الفوهة وذلك فيما يخص معدل إزالة المادة وخشونة السطح الناتج، حيث أشارت الدراسة إلى وجود علاقة طردية قوية بينهم [12]. بينما أثبتت الدراسة التي قدمها Sami أن الزيادة في شدة التيار تقلل من دقة المقاسات ولكنها تقلل من مقدار الانحرافات في مقاسات المنتجات [6]. أشار Gautam في استعراض نتائج دراسته إلى ضعف تأثير شدة التيار

التقليدية، لذلك اعتمدها الباحث لإجراء جميع التجارب المعملية.

(ب) تحديد معايير قياس جودة العملية

كما هو الحال في أي عملية صناعية تحدد مجموعة من المعايير يقاس على ضوءها جودة العملية أو المنتج وذلك حسب وظيفة المنتج أو طبيعة العملية، فإن لعملية القطع باستخدام تقنية البلازما مجموعة من المعايير تتعلق بمواصفات ووظيفة المنتج التي أنشئ من أجلها وهي: دقة المقاسات (متمثلة في دقة عرض الشق)، الخلو من الخبث السفلي، تعامد سطح القطع الناتج (زاوية ميل سطح القطع)، زمن العملية (متمثل في معدل إزالة المادة)، خشونة سطح القطع الناتج. ولصعوبة تغطية كل هذه المعايير في عمل واحد، اختص هذا البحث بدراسة أهمها (عرض الشق ومعدل تكون الخبث السفلي) وما يتوفر من إمكانيات لقياسها.

(ت) تحديد معلمات التجربة ومدياتها

من خلال متابعة نتائج وتحليلات الدراسات السابقة تبين أن أهم معلمات العملية والتي لها التأثير الأكبر على مخرجات العملية وهي المسئولة عن الحد من ظهور عيوب عملية القطع بالبلازما هي: شدة التيار، سرعة القطع، وارتفاع الفوهة، لذلك اعتمدها الباحث كنطاق للبحث. ونظراً لأهمية التحديد الدقيق لمديات تأثير هذه المعلمات، وحرصاً من الباحث على عدم إهمال أي قيم لهذه المعلمات يمكن أن تتضمن القيم المثالية التي يسعى الباحث إلى تحديدها. تم تنفيذ تجارب معملية بهدف تحديد المدى الفعال لكل معلمة من المعلمات قيد الدراسة، حيث تم تغيير قيم المعلمة المقصودة بالتجربة من أقل قيمة ممكنة إلى أعلى قيمة مع تثبيت قيم المعلمات الأخرى عند أفضل قيم متوقعة حسب ما أشارت إليه الدراسات السابقة. الجدول (1) يوضح نتائج هذه التجربة. لقد تم تسجيل القيم الفعالة لكل معلمة (قيم المعلمة التي يمكن عندها تنفيذ العملية بغض النظر عن جودتها) والقيم المثالية (القيمة التي تم تسجيل عندها أقل قيمة للعيوب خلال مدى الاختبار) التي تم تسجيلها خلال

ضغطه يؤدي إلى انخفاض سرعته، وبالتالي انتشاره مما يفقده التركيز المطلوب والزخم الكافي لنشر كل كمية المعدن المنصهر مما يساهم في زيادة تكون الخبث السفلي.

أشار Sharma في دراسته إلى أن ارتفاع ضغط الغاز يساهم في زيادة معدل إزالة المادة، وعلل ذلك إلى أن ارتفاع الضغط يزيد من فرق جهد القوس الأمر الذي يولد مزيداً من طاقة القوس الحرارية، وبالتالي زيادة كفاءة القوس في صهر المعدن [4]. وأكد نفس النتيجة Patel وأضاف أنه ليس لضغط الغاز علاقة بخشونة سطح القطع الناتج [6]. بينما أظهرت نتائج دراسة Massoudi أن ارتفاع ضغط الغاز المتزامن مع ارتفاع سرعة القطع وانخفاض شدة التيار يساهم في تضيق عرض الشق [7]. Agbonoga أشار في دراسته إلى أن لضغط الغاز تأثيراً قوياً يفوق باقي معلمات العملية في تأثيره على عرض الشق، وأن له بعض التأثير على خشونة سطح القطع الناتج [8].

(ج) فرق الجهد

يعتبر فرق الجهد من أقل معلمات عملية القطع بالبلازما تأثيراً على جودة العملية، حيث يقتصر تأثيره على تغيير بسيط في كمية الطاقة الحرارية التي ينتجها القوس. فارتفاع فرق الجهد يولد مزيداً من الحرارة ولكن ليست بالقدر الذي يؤثر على كفاءة العملية، لذلك تشير العديد من البحوث إلى تثبيت قيمة فرق الجهد على توصيات الشركة المصنعة للتقنية [3].

2. التجربة المعملية للبحث

(أ) المواد

نظراً لكثرة استخدام صفائح الصلب الطري (St37-2) سمك 4 ملم (إحدى منتجات الشركة الليبية للحديد والصلب مصراتة) من قبل الشركات والورش المنتجة لحماية الأبواب والنوافذ والتي عادة ما تنتج بنقوش غاية في التعقيد والتي يصعب إنتاجها باستخدام تقنيات القطع

جدول رقم (2): مستويات معلمات العملية قيد الاختبار.

المعلمة	المستوى-1	المستوى-2	المستوى-3
سرعة القطع [mm/min]	1000	1700	2400
شدة التيار [A]	65	75	85
ارتفاع الفوهة [mm]	8	11	14

(ح) تنفيذ التجربة

لقد تم تنفيذ جميع جولات التجربة وفق التصميم المعد من قبل برنامج المني تاب، على نفس آلة القطع بالبلازما المبينة بالشكل (4) والتابعة لشركة الهندسة الحديثة-مصراتة للأعمال الحديدية. ومن خلال قياس المعايير المخصصة للدراسة كانت النتائج كما هي موضح بالجدول (3).



شكل 3: آلة القطع بالبلازما المسيرة بالحاسوب.

هذه المديات، ومن ثم استبعاد القيم التي لم تنجز عندها العملية بشكل كامل أو ظهرت عندها العيوب بشكل غير مقبول.

جدول رقم (1): نتائج تجربة تحديد مديات معلمات العملية.

المعلمة	معايير جودة القطع بالبلازما				معدل الخبث السفلي	
	عرض الشق	زاوية الشطف	القيمة المدية	القيمة المثالية	المدى الفعال	القيمة المثالية
شدة التيار [A]	85-65	80-55	55	90-60	90	85-60
سرعة القطع [mm/min]	2400-1000	2200-1000	2200	2000-600	600	2600-1000
ارتفاع الفوهة [mm]	14-8	14-4	10	14-8	14	14-4

(ج) تصميم التجربة

كما تم الإشارة إليه سابقاً، أنه قد تم اعتماد دراسة تأثير معلمات العملية (سرعة القطع، شدة التيار، ارتفاع الفوهة) على معيارين هما: عرض الشق ومعدل تكون الخبث السفلي. كما تم تحديد ثلاث ممستويات لكل معلمة، وبذلك يكون عدد جولات

التجربة الكاملة (Full factorial Design) هو:

$$no. of runs = k^n = 3^3 = 27 runs$$

عدد المستويات k & عدد المتغيرات n

وباستخدام طريقة تافوشي (Minitab-17) تم تصميم جولات التجربة وفق المعطيات المشار إليها سابقاً والمديات التي تم تحديدها والمبينة بالجدول (1)، وهي موضحة بالجدول (2).

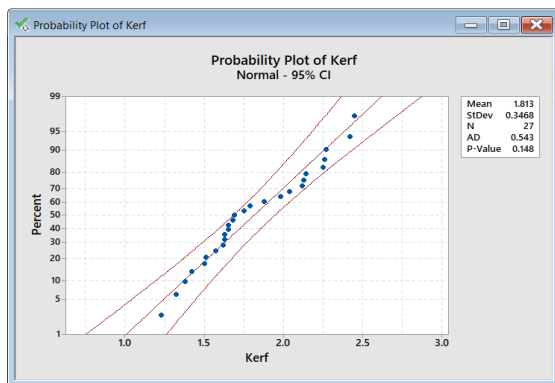
جدول رقم (3): نتائج تجربة تأثير المعلمات على معايير جودة العملية حسب تصميم تافوشي					
رقم	شدة التيار	سرعة القطع [mm/min]	ارتفاع الفوهة [mm]	عرض الشق	معدل الخبث
1	65	1000	8	2.04	17.30
2	65	1000	11	2.13	14.55
3	65	1000	14	2.14	13.00
4	65	1700	8	1.63	15.10
5	65	1700	11	1.65	14.35
6	65	1700	14	1.69	14.2
7	65	2400	8	1.38	1.05
8	65	2400	11	1.32	0.95
9	65	2400	14	1.23	0.90
10	75	1000	8	2.25	17.20
11	75	1000	11	2.26	15.75
12	75	1000	14	2.27	16.05

يتبع جدول رقم (3)

13.60	1.50	8	1700	75	13
12.30	1.57	11	1700	75	14
12.95	1.79	14	1700	75	15
5.90	1.42	8	2400	75	16
10.4	1.51	11	2400	75	17
9.70	1.62	14	2400	75	18
14.05	2.12	8	1000	85	19
14.45	2.42	11	1000	85	20
11.15	2.45	14	1000	85	21
6.05	1.75	8	1700	85	22
9.75	1.98	11	1700	85	23
3.25	1.88	14	1700	85	24
3.00	1.63	8	2400	85	25
4.45	1.65	11	2400	85	26
2.00	1.68	14	2400	85	27

طبيعة توزيع البيانات أنها تتبع التوزيع الطبيعي كما هو مبين بالشكل (4) وليس فيها أي تحيز يمكن أن يؤثر على صحة ودقة النتائج؛ تشير قيمة $P\text{-value}=0.148$ ($P>0.05$) إلى أن البيانات تتبع التوزيع الطبيعي [15].

وللكشف عن طبيعة تأثير معلمات العملية على عرض الشق تم استخدام مؤشر نسبة الإشارة للتلويش (S/N) Single to noise ratio (ratio). تشير نتائج التحليل إلى ترتيب قوة تأثير



شكل 4: توزيع بيانات تأثير المعلمات على عرض الشق.

3. التحليل الإحصائي للنتائج

سيتم استعراض التحليل الإحصائي لتأثير معلمات العملية على كل معيار بشكل منفرد، ثم تلخيص النتائج لكامل التجربة.

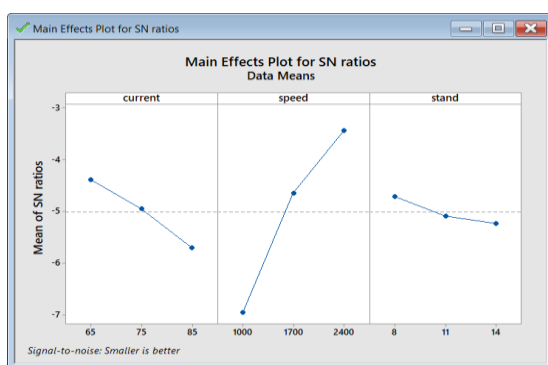
(أ) تأثير المعلمات على عرض الشق

لدعم نتائج التحليلات التي سيتم إجراؤها باستخدام طريقة تاقوشي ولاستنباط بعض المؤشرات التي لا تقدمها هذه الطريقة، سيتم إعادة التحليل باستخدام طريقة نموذج الانحدار (Regression model) لاستنباط النموذج الرياضي الممثل للعلاقات والتنبؤ بقيم المعايير حسب ما يحدده المستخدم من مستويات المعلمات الحاكمة. بالإضافة إلى استخدام التصميم العامل (Design Factorial) لإجراء عملية الأمثلة للعملية (Optimization) وتحديد القيم المثالية للمعلمات.

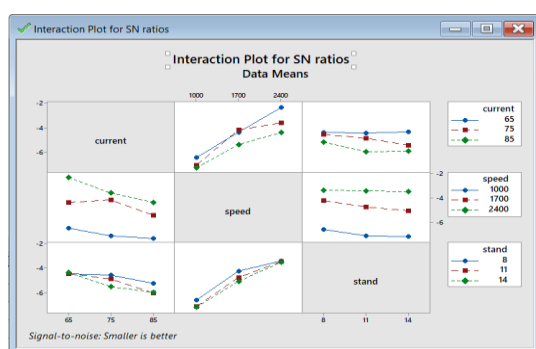
أولاً: التحليل الإحصائي لتأثير المعلمات على

عرض الشق باستخدام طريقة تاقوشي

قبل البدء في سرد وتفسير نتائج التجربة المتعلقة بتأثير المعلمات على عرض الشق، تم التحقق من



شكل 5: مخطط مؤشر (S/N ratio) للتأثيرات المستقلة على عرض الشق



شكل 6: مخطط مؤشر (S/N ratio) للتأثيرات المشتركة للمعاملات على عرض الشق.

في الجدول (5) لتحليل التباين تشير قيمة R (R=98.2, R-seq (Adj)= 94.0) إلى قوة النموذج في تمثيل البيانات. في حين تشير قيم P (المقابلة للمعاملات المستقلة والمشاركة إلى عدم وجود تأثير ذو قيمة إحصائية مؤثرة باستثناء التأثير المستقل لكلاً من شدة التيار وسرعة القطع. كما يمكن ملاحظة اقتراب التأثير المشترك لشدة التيار وسرعة القطع من الحد الأدنى ($P=0.05$) لاعتبارها كقيمة مؤثرة. تؤكد نتائج هذا الجدول على اعتماد اتساع عرض الشق بشكل أساسي على فكرة التوازن بين الطاقة المنتجة من القوس والطاق

المعاملات؛ حيث كان لسرعة القطع التأثير الأكبر بما يعادل ثلاثة أضعاف تأثير شدة التيار، وما يقارب سبعة أضعاف تأثير ارتفاع الفوهة كما هو مشار إليه في الفارق بين تأثير المستويات لكل معلمة (Delta)، تلاها شدة التيار، ثم ارتفاع الفوهة التي تقدم التأثير الأضعف. الشكل (5) المبني على نتائج الجدول (4)، يبين طبيعة تأثير معلمات العملية قيد الدراسة، حيث يمكن ملاحظة قوة تأثير كل معلمة في هذا المخطط، وكذلك من خلال ملاحظة الفارق بين نتيجة تأثير مستويات المعلمة، أما اتجاه ميل العلاقة فهو يشير لطبيعة العلاقة هل هي طردية أم عكسية. كما هو موضح والمخطط أن زيادة سرعة القطع تحقق زيادة في النسبة (S/N) وهذا إشارة إلى نقص في عرض الشق على اعتبار أن استراتيجية التحليل قائمة على الأقل هو الأفضل). أما زيادة شدة التيار أو ارتفاع الفوهة يؤدي إلى زيادة عرض الشق. أما المخطط المبين بالشكل (6) يوضح التأثير المشترك للمعاملات على عرض الشق، حيث تشير المخططات لعدم وجود تأثير مشترك له قيمة إحصائية معتبرة، باستثناء التأثير المشترك لسرعة القطع وشدة التيار فهي تقترب نوعاً ما من القيمة المعتبرة إحصائياً كما ستراه عند استعراض جدول تحليل التباين. كما يمكن ملاحظة ضعف التأثيرات المشتركة من عدم وجود تقاطعات بين العلاقات وأنها شبه متوازية.

جدول رقم (4): مؤشر نسبة الإشارة للتشويش (S/N ratio) للاستجابة (عرض الشق).

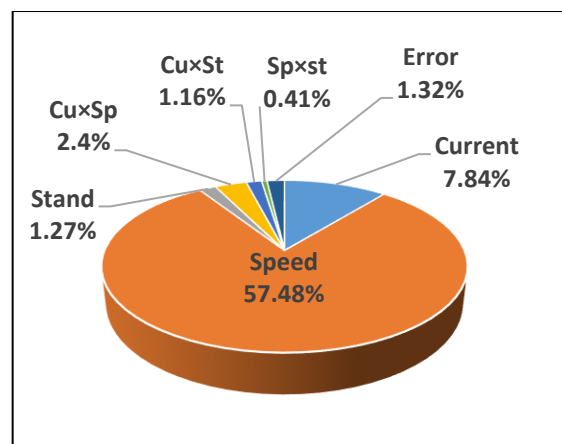
Level	current	speed	stand
1	-4.392	-6.956	-4.720
2	-4.951	-4.658	-5.096
3	-5.707	-3.436	-5.234
Delta	1.315	3.520	0.514
Rank	2	1	3
Analysis strategy: smaller is better			

جدول رقم (5): جدول تحليل التباين لنتائج تأثير المعلمات على عرض الشق (ANOVA table)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Current	2	7.8415	7.8415	3.9208	23.68	0.000
Speed	2	57.4852	57.482	28.7426	173.58	0.000
Stand	2	1.2760	1.2760	0.6380	3.85	0.067
Speed×Current	4	2.4093	2.4093	0.6023	3.64	0.057
Stand×Current	4	1.1673	1.1673	0.2918	1.76	0.229
Stand×Speed	4	0.4112	0.4112	0.1028	0.62	0.661
Residual Error	8	1.3247	1.3247	0.1656		
Total	26	71.9152				
$R - seq = 98.2\%$ $R - Sq(Adj) = 94.0\%$						

للاستفادة من نقاط القوة في كل تحليل وتحاشي نقاط الضعف؛ كاستخدام طريقة تافوشي لتصميم التجربة لكونها أكثر الطرق اختصاراً في عدد التجارب المطلوبة لتنفيذ التحليل، وتستخدم طرق أخرى لإجراء التحاليل المطلوبة. الجدول (8) يستعرض نتائج تحليل نموذج الانحدار. تظهر قيمة (P-value=0.000) المقابلة للنموذج وهذا مؤشر على النموذج الممثل لهذه العلاقة أنه قادر على تمثيل هذا البيانات بشكل ممتاز. علاوة على ذلك فإن النموذج يشير بأنه يوجد تأثير ذي قيمة إحصائية معتبرة للمعلمات الثلاثة، في حين التحليل السابق أشار لعدم وجود تأثير ذو قيمة لارتفاع الفوهة. وهذا الاختلاف بسبب وقوع قيمة تأثير هذه المعلمة قريبة جداً من الحد الفاصل بين الحالتين، وبالتالي فإن الاختلاف الطفيف بين التحليلين أدى إلى تغير التصنيف بين التحليلين. كذلك لا يشير التحليل إلى وجود تأثير مشترك للمعلمات. المعادلة (1) تعرض النموذج الرياضي الممثل للعلاقة بين المعلمات والاستجابة (عرض الشق)، والتي يمكن استخدامها لتوقع قيمة الاستجابة عند اختيار قيم معينة للمعلمات وبدرجة ثقة 86.74%.

اللازمة للقطع، وأن هذا التوازن يتأثر بالتغير في سرعة القطع أكثر بكثير مما يتأثر بشدة التيار. فكما هو موضح بالشكل (7) فإن نسبة تأثير سرعة



شكل 7: نسب تأثير معلمات العملية على عرض الشق.

القطع المستقلة على عرض الشق تجاوزت 57% من تأثير كل المعلمات مجتمعة.

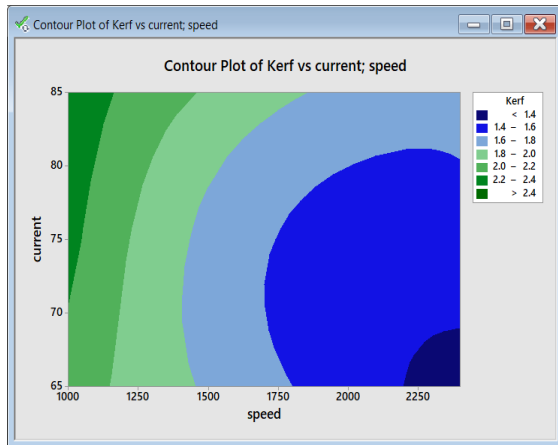
ثانياً: تحليل تأثير المعلمات على عرض الشق

باستخدام نموذج الانحدار (Regression)

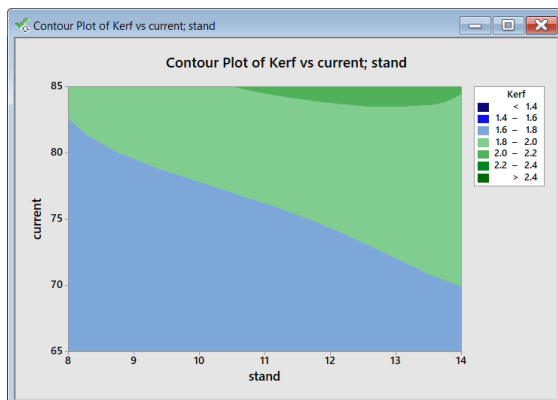
بالإضافة إلى ما يقدمه هذا التحليل من دعم موثوقة نتائج التحليل السابق، فإنه يقدم النموذج الرياضي الممثل للعلاقة بين معلمات العملية والاستجابة بشكل سلس ومباشر، وإضافة إلى ذلك فإن كثير من البحوث تستخدم أكثر من تحليل

2. قلة المساحات الكنتورية في الشكل (9) تشير لضعف التأثير المشترك لشدة التيار مع ارتفاع الفوهة، وأن طبيعة تأثيرهما تتغير فقط عند التحول للعمل بمستويات شدة التيار العالية، ويمكن تفسير ذلك بأن ارتفاع مستوى شدة التيار يغير من شكل قوس البلازما الأمر الذي يعطي مجالاً لتأثير ارتفاع الفوهة.

3. من الملاحظ على مخطط العلاقة (10) أن تأثير سرعة القطع يطغى على تأثير ارتفاع الفوهة فالمساحات تكاد تكون أفقية الأمر الذي يعكس ضعف ارتفاع الفوهة، مقابل سرعة القطع.



شكل 8: التأثير المشترك لشدة التيار وسرعة القطع.



شكل 9: التأثير المشترك لشدة التيار وارتفاع الفوهة.

جدول رقم (8): نتائج تحليل نموذج الانحدار.

Regression Analysis: Kerf versus current; speed; stand					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	2.81517	0.93839	69.04	0.000
current	1	0.30681	0.30681	22.57	0.000
speed	1	2.44942	2.44942	180.20	0.000
stand	1	0.05894	0.05894	4.34	0.049
Error	23	0.31263	0.01359		
Total	26	3.12780			
Model Summary					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
0.116588	90.00%	88.70%	86.74%		

$$\text{Kerf} = 1.52 + 0.01306 \text{ current} - 0.000527 \text{ speed} + 0.01907 \text{ stand} \dots (1)$$

ثالثاً: التمثيل البياني للتأثير المشترك للمعاملات على عرض الشق

يُعد التمثيل البياني لتأثير المعاملات المشترك على الاستجابة من أفضل الطرق في عرض الصورة العامة للعلاقة بين المعاملات والاستجابة، فهي تمكن المستخدم من تقدير قيمة عرض الشق الذي سينتج عن أي توليفة يقترحها لمستويات هذه المعاملات. ومن خلال مراجعة المخططات البيانية الموضحة بالأشكال (8-10) يمكن تسجيل النقاط التالية:

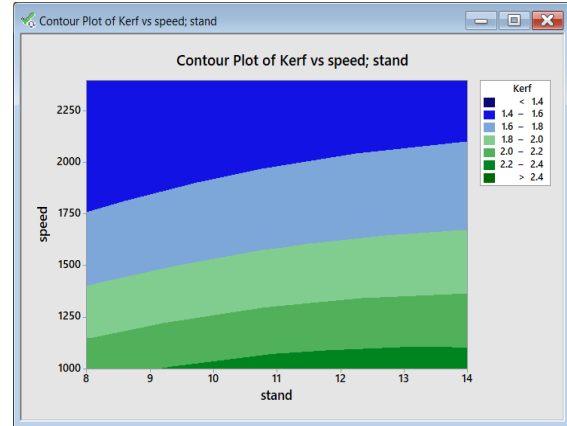
1. الشكل (8) يشير إلى وجود نوع من التأثير المشترك لسرعة القطع وشدة التيار؛ حيث يوضح المخطط أن أقل عرض للشق يمكن أن يكون عند أعلى مستوى للسرعة مقابل أقل مستوى لشدة التيار. يفسر ذلك هو تحقيق التوازن بين الطاقة المتولدة من القوس مع الطاقة المستحقة لإنجاز عملية القطع، فلا يتبقى أي جزء من الطاقة تؤدي إلى توسع الشق. يؤكد هذا المفهوم ما يحدث في المنطقة المعاكسة التي تقع عند أقل مستوى للسرعة مقابل أعلى مستوى لشدة التيار؛ هذه التوليفة ينتج عنها مزيداً من الطاقة الزائدة التي تعمل على توسيع الشق.

(ب) تأثير المعلمات على معدل تكون الخبث

سيتم عرض تفاصيل هذا التحليل بنفس الطريقة التي تم اتباعها في التحليل السابق، أي بمعنى سيتم تحليل النتائج المتعلقة بمعدل تكون الخبث أولاً باستخدام طريقة تاقوشي، ثم باستخدام نموذج الانحدار، ثم عرض التأثيرات المشتركة باستخدام التمثيل البياني، ثم ختاماً تحديد القيم المثالية للمعلمات باستخدام تحليل التصميم العاملي (Factorial Design). كل هذه التحليلات سيتم تنفيذها باستخدام برنامج التحليل الاحصائي (Minitab-17).

أولاً: التحليل باستخدام طريقة تاقوشي

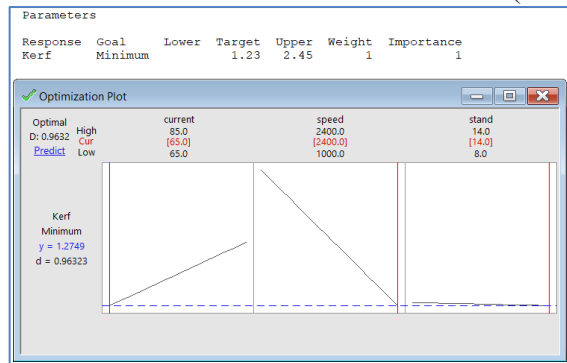
تم انجاز التحليل وفق المعطيات (عدد المستويات (3)، درجة الثقة (95%)، استراتيجية التحليل (الأقل هو الأفضل). ومن خلال استعراض نتائج فحص نوع توزيع البيانات كما هو مبين بالشكل (13)، أشارت النتائج إلى أن البيانات لا تتبع التوزيع الطبيعي بسبب أن قيمة (P-value < 0.005) كما هو مبين بالشكل (12). غير أنه يمكن ملاحظة محور النقاط حول الخط المستقيم وضمن حدود الانحراف المسموح بها. كما تشير الكثير من المراجع أنه يمكن اعتبار توزيع البيانات يتبع التوزيع الطبيعي حتى وإن لم يكن كذلك، إذا كان عدد فراغ العينات 25 فما فوق ولكنها تكون أكثر تمثلاً بالتوزيع الطبيعي عندما تساوي أو تفوق عدد عيناتها (30) عينة، وبالتالي يمكن اعتبارها تابعة للتوزيع الطبيعي [15]. حيث حاول الباحث زيادة عدد العينات لبلوغ الحد الأدنى لكن نظام التحليل تاقوشي لا يقبل ذلك بسبب تغير نوع مصفوفة التصميم، فلا تصبح المصفوفة متعامدة. بالإضافة لذلك أن جميع نتائج التحليل التي تم اجراؤها على النتائج كانت طبيعية ومتوافقة مع كثير من الدراسات السابقة. كذلك تم التأكد من صحة ودقة جميع النتائج وأنها منطقية جداً وهي



شكل 10: التأثير المشترك لسرعة القطع وارتفاع الفوهة.

رابعاً: الضبط الأمثل للمعلمات باستخدام التصميم العاملي (Factorial Design)

يقدم التحليل الاحصائي باستخدام التصميم العاملي نموذج تحسين العملية من خلال تحديد القيم المثالية لمعلمات العملية التي تقود إلى إنجاز عملية القطع بأقل عرض شق ممكن. وكما هو مبين بالشكل (11) فإن هدف عملية التحسين مبني على تحقيق أقل قيمة لعرض الشق، وأن أقل قيمة نظرية يمكن الوصول إليها هي 1.23 ملم، وأن أقصى قيمة نظرية لا يتوقع أن تتجاوز 2.45 ملم، في حين أن قيمة عرض الشق المحسوبة باستخدام النموذج الرياضي هي 1.2749 ملم. ومن خلال إجراء عملية التحسين، أشارت نتيجة التحليل إلى أن المستويات المثالية لمعلمات العملية هي: (C=65 A, V=2400 mm/min, St=14 mm).



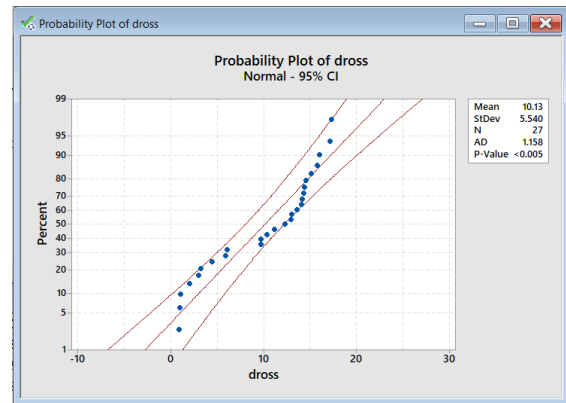
شكل 11: نتائج عملية التحسين باستخدام (Factorial design) (القيم المثالية).

الجدول (9) تحليل نسبة الإشارة للتشويش (S/N ratio)

Level	current	speed	stand
1	-15.458	-23.351	-17.744
2	-21.664	-20.237	-18.664
3	-15.698	-9.232	-16.412
Delta	6.206	14.119	2.253
Rank	2	1	3
Smaller is better			

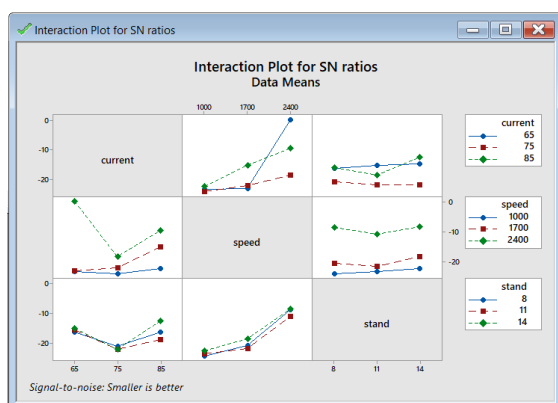
يُشير مخطط نسبة الإشارة إلى التشويش الخاص بالتأثيرات الرئيسية المبين بالشكل (13) إلى وجود تأثير معتبر لكل المعلومات على معدل تكون الخبث من خلال ملاحظة ميل الدوال الممثلة للعلاقات بين المعلومات والاستجابة؛ ويمكن ملاحظة قوة هذا التأثير من خلال ملاحظة مقدار ميل الدالة. كما تدل القيمة الأكبر للنسبة على انخفاض لمعدل الخبث؛ لأن التحليل بُني على أساس الأقل هو الأفضل. فمن خلال ملاحظة سلوك تأثير شدة التيار على معدل الخبث في مخطط مؤشر الـ (S/N) نلاحظ أن أقل معدل الخبث يكون عند المستويين الأدنى والأعلى وينفس المعدل تقريباً، بينما يؤدي المستوى المتوسط إلى زيادة ملحوظة في معدل الخبث. يمكن تفسير هذا السلوك أن شدة التيار في حالة المستوى الأدنى تتزن عندها الطاقة المنتجة مع مقدار الطاقة الكافية للقطع، وبالتالي ليس هناك مقدار إضافي من مصهور المعدن يؤدي إلى تكون الخبث، أما عند المستوى الأعلى فإن الطاقة الزائدة تؤدي إلى رفع درجة حرارة المصهور مما يزيد من سيولته وبالتالي يسهل عملية نثره بعيداً عن حافة القطع، بينما عند المستوى المتوسط يتم صهر مزيد من المعدن ولا توجد الطاقة الكافية لرفع سيولته وبالتالي تسنح الفرصة لتكون مزيد من الخبث. أما سرعة القطع فتأثيرها عكسي قوي؛ فزيادة سرعة القطع تحقق مزيداً من التوازن بين الطاقة المنتجة والطاقة المطلوبة للقطع فيقل عندها معدل تكون الخبث. بينما يظهر ضعف تأثير ارتفاع الفوهة على معدل الخبث، ولكن أقل معدل لتكون الخبث كان عند أعلى مستوى لارتفاع الفوهة، والسبب في ذلك يرجع إلى أن هذا الارتفاع يضع

ضمن المتوقع، وأن التطرف الحاصل في بعض النتائج كان بسبب قيم مستويات المعلومات المحددة في التصميم. وبما أن عدد العينات ليس بعيداً عن الحد الأدنى رأى الباحث اعتبار التوزيع يتبع التوزيع الطبيعي. علاوة على كل ما تقدم، تشير قيمة ($R\text{-sq}=99.0\%$, $R\text{-sq(Adj)}=96.6\%$) إلى إمكانية الثقة في التحليل، فهي بنسبة عالية جداً تمكن من اعتماد هذا النموذج كممثل جيد لهذه البيانات.



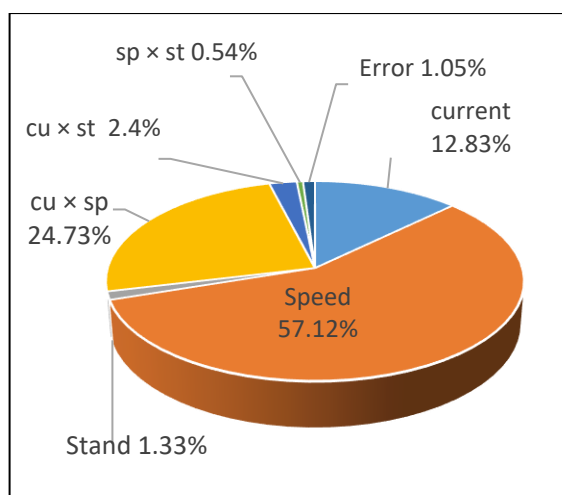
شكل 12: توزيع بيانات تجربة معدل تكون الخبث.

الجدول (9) المتضمن لنتائج تحليل نسبة الإشارة إلى التشويش يشير إلى ترتيب قوة تأثير معلومات العملية على معدل تكون الخبث؛ حيث أشار إلى أن سرعة القطع هي المعلمة الأكثر تأثيراً وهذا يتوافق مع ما تم التوصل إليه في البحوث السابقة لحالات دراسية أخرى. كما تشير قيمة الفرق في مؤشر النسبة في صف الـ (Delta) إلى فارق كبير (14.119) بين تأثير مستويات المعلمة، ويمكن ملاحظة ذلك بالمقارنة مع المعلومات الأخرى. يلي سرعة القطع في التأثير شدة التيار، الذي يتركز تأثيره من خلال التحكم في كمية الحرارة المتولدة عن قوس البلازما، الأمر الذي يزيد أو يقلل من درجة سيولة المصهور. أما ارتفاع الفوهة وهو الأقل تأثيراً فهو المسؤول عن بعد وقرب الفوهة من منطقة القطع؛ الأمر الذي يؤثر على كفاءة تيار الهواء المنفوخ في نثر المصهور بعيداً عن منطقة القطع.



شكل 14: مخطط مؤشر (S/N ratio) للتأثيرات المشتركة على معدل تكون الخبث.

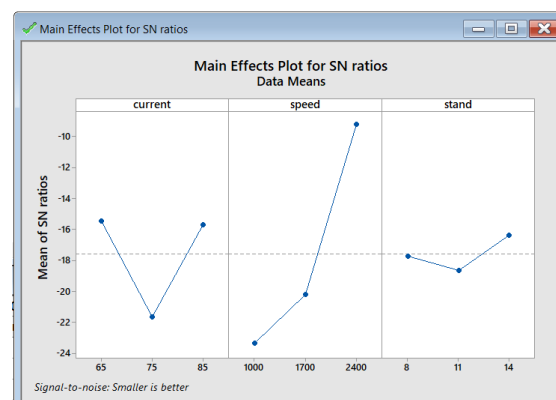
يتضح من الشكل (15) سيطرة سرعة القطع على معدل تكون الخبث، وهذا راجع إلى أن معلمة السرعة هي الأكثر تأثيراً في توازن الطاقة بين المنتجة والمستحقة. وكان في المرتبة الثانية التأثير المشترك لشدة التيار مع سرعة القطع؛ مع ملاحظة



شكل 15: نسب تأثير معلمات العملية الأساسية والمشاركة على معدل الخبث.

أن هذا الترتيب لم يظهر في جدول مؤشر نسبة الإشارة لأن الجدول يعرض التأثيرات المستقلة فقط. وبنسبة تعادل نصف نسبة التأثير المشترك لشدة التيار وسرعة القطع يظهر تأثير شدة التيار. أما باقي التأثيرات فهي صغيرة جداً بالمقارنة مع ما تم الإشارة إليه آنفاً.

الفوهة في نقطة أكثر مناسبة لتنفيذ مهمة النثر وبالتالي حققت أقل معدل خبث.



شكل 13: مخطط مؤشر (S/N ratio) للتأثيرات المستقلة على معدل تكون الخبث.

يشير مخطط الـ (S/N) للتأثيرات المشتركة المبين بالشكل (14) لوجود تأثيرات ذات قيمة للتأثيرات المشتركة بين سرعة القطع وشدة التيار، شدة التيار وارتفاع الفوهة؛ كما يشير إليه تقاطع الدوال. ولقد ظهر هذا التأثير القوي والواضح لهذا الاشتراك بسبب علاقته المباشرة بتحقيق التوازن بين طاقتي القطع (المنتجة والمطلوبة). فكما يشير المخطط أن اشتراك المستوى الأعلى لسرعة القطع مع المستوى الأدنى لشدة التيار حقق أعلى نسبة للمؤشر وبالتالي أقل معدل تكون للخبث.

تشير نتائج تحليل التباين الموضحة بالجدول (10) ضمن عمود قيمة (P-value) وجود تأثير ذو قيمة إحصائية معتبرة لكل المعلمات قيد الدراسة، بالإضافة إلى التأثير المشترك لشدة التيار مع سرعة القطع، شدة التيار مع ارتفاع الفوهة؛ غير أن التأثير المشترك لشدة التيار مع ارتفاع الفوهة أقل من تأثيرها المشترك مع سرعة القطع، وذلك لضعف تأثير ارتفاع الفوهة بالمقارنة مع المعلمات الأخرى. وبالإستعانة بنتائج هذا التحليل يمكن حساب نسبة مشاركة لكل معلمة من هذه المعلمات على معدل تكون الخبث وهي مبينة بالشكل (16).

جدول رقم (10): نتائج تحليل التباين لتأثير المعلمات على معدل تكون الخبث

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Current	2	222.48	222.480	111.240	49.07	0.000
Speed	2	990.47	990.468	495.234	218.45	0.000
Stand	2	23.09	23.090	11.545	5.09	0.037
Current*Speed	4	428.88	428.885	107.221	47.29	0.000
Current*Stand	4	41.64	41.640	10.410	4.59	0.032
Speed*Stand	4	9.44	9.443	2.361	1.04	0.443
Residual Error	8	18.14	18.137	2.267		
Total	26	1734.14				
$R - seq = 99.0\%$ $R - Sq(Adj) = 96.6\%$						

$$Dross = 37.70 - 0.1292 \text{ current} \\ - 0.00755 \text{ speed} \\ - 0.186 \text{ stand} \dots (2)$$

ثالثاً: التمثيل البياني للتأثير المشترك للمعلمات

من خلال النظرة العامة لمخطط التأثير المشترك لشدة التيار وسرعة القطع على معدل تكون الخبث الموضح بالشكل (16)، يمكن ملاحظة تعدد المساحات الكنتورية، الأمر الذي يشير إلى وجود تأثير مشترك ذي قيمة إحصائية عالية. كما يمكن ملاحظة إثبات نظرية التوازن بين الطاقة الناتجة والطاقة اللازمة لإنجاز العملية، ففي المنطقة الخضراء الغامقة للمعدل (12-15) والتي تشير لأعلى مستويات معدل تكون الخبث أنها ناتجة من الاشتراك بين المستوى ما دون المتوسط لسرعة القطع مع المستوى المتوسط وما دونه لشدة التيار. وكما لاحظنا عند استعراض المؤشرات السابقة أن سرعة القطع هي الأكثر تأثراً وبالتالي فإن انخفاض سرعة القطع أدى إلى تكوين منطقة كبيرة لمعدل تكون الخبث المرتفع. كما تتدرج باقي المساحات الكنتورية مشيرةً إلى انخفاض معدل تكون الخبث مع زيادة السرعة، حيث يمكن ملاحظة محافظة معدل الخبث على مستوى منخفض رغم العمل بمستويات مرتفعة لشدة التيار.

يشير مخطط العلاقة للتأثير المشترك لشدة التيار وارتفاع الفوهة الموضح بالشكل (17) إلى ضعف تأثيرهما

ثانياً: التحليل باستخدام نموذج الانحدار

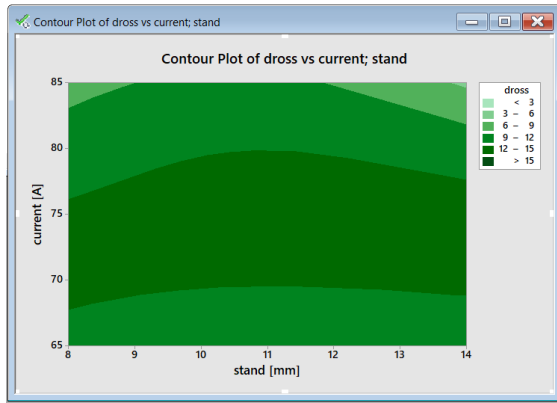
تختلف نتائج تحليل الانحدار نوعاً ما عن نتائج تحليلات تاقوشي؛ حيث أظهرت نتائج تحليل التباين المبينة بالجدول (11) وجود تأثير لسرعة القطع فقط. ولكن ورغم ما يمكن ملاحظته من اختلاف، إلا أن التوجه العام لتأثير المعلمات يبقى نفسه، والسبب في هذا الاختلاف راجع إلى القيود التي يستخدمها تحليل الانحدار فهي أكثر صرامة من تلك التي يستخدمها تحليل تاقوشي، كما يمكن ملاحظة ذلك أيضاً من قيمة $R - seq$ في التحليلين. المعادلة (2) تقدم النموذج الرياضي لتمثيل البيانات وحساب القيم المتوقعة عند أي مستويات مقترحة لمعلمات العملية من قبل المستخدم، حيث ستكشف الاختبارات التأكيدية على قوة النموذج والتي يتوقع الباحث وجود تقارب مقبول بين نتائج النموذج ونتائج التجربة العملية.

جدول رقم (11): تحليل التباين لنموذج الانحدار

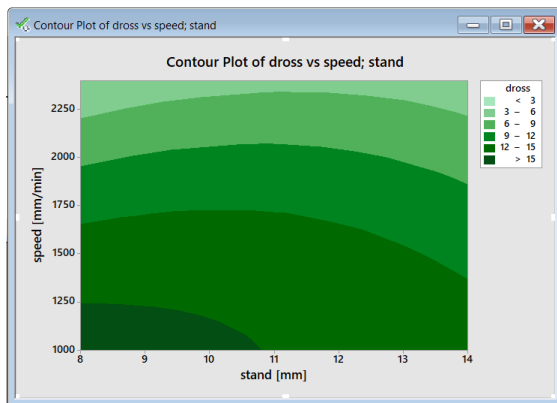
Regression Analysis: dross versus current; speed; stand						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Regression	3	538.616	179.539	15.92	0.000	
current	1	30.031	30.031	2.66	0.116	
speed	1	502.973	502.973	44.59	0.000	
stand	1	5.611	5.611	0.50	0.488	
Error	23	259.411	11.279			
Total	26	798.027				

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3.35838	67.49%	63.25%	54.83%



شكل 17: التأثير المشترك لشدة التيار وارتفاع الفوهة على معدل الخبث.



شكل 18: التأثير المشترك لسرعة القطع وارتفاع الفوهة على معدل الخبث.

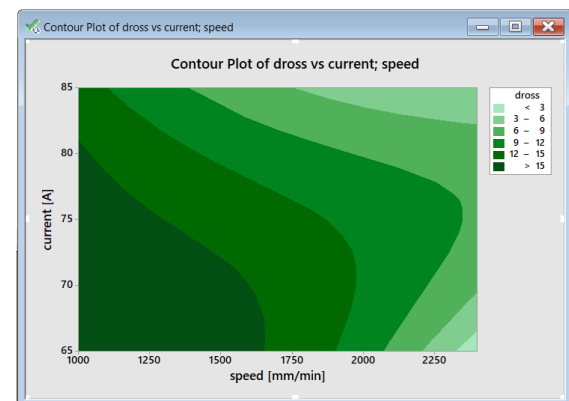
رابعاً: الضبط الأمثل للمعاملات على معدل الخبث باستخدام التصميم العاملي

أشارت نتائج مهمة التحسين للعمليات (optimization) المتاحة في التصميم العاملي الموضحة بالشكل (19) أن القطع بالمستويات العليا لشدة التيار وسرعة القطع بالتزامن مع المستوى الأدنى لارتفاع الفوهة يحقق أقل معدل تكون للخبث بالقيمة ($y=4.2815$) وانحراف قدره 0.79381. هذه النتيجة تتوافق مع ما أشارت إليه المخططات السابقة. وبالتالي فإن القيم المثالية لمعاملات عملية القطع بظروف هذه الحالة تكون عند هذه المستويات

(Current=85, speed=2400, stand off=8).

المشترك من خلال محدودية عدد المساحات الكنتورية الممثلة لمعدلات تكون الخبث. كما أن امتداد هذه المساحات على طول المحور الأفقي يشير لضعف مشاركة تأثير ارتفاع الفوهة بالمقارنة مع تأثير شدة التيار؛ فالتغير في مستويات ارتفاع الفوهة لا يغير من قيمة معدل الخبث، بينما التغير في مستويات شدة التيار له تأثير معتبر يمكن ملاحظته بتعدد المساحات الكنتورية مقابل التغير في مستويات شدة التيار. كما يشير هذا المخطط لصغر المساحات التي تحقق معدل خبث منخفض والتي تقع عند التقاطع بين المستويات العليا للمعلمتين.

أما المخطط الممثل للتأثير المشترك لسرعة القطع وارتفاع الفوهة المبين بالشكل (18) يشير أيضاً إلى ضعف مشاركة ارتفاع الفوهة وأن النسبة الأكبر لسرعة القطع، فالمخطط يشير إلى تغير سريع لمعدل الخبث الناتج مع تغير سرعة القطع. كما أن أقل معدل للخبث يمكن تحقيقه عند المستوى الأعلى لسرعة القطع مع الابتعاد عن المستوى المتوسط لارتفاع الفوهة.



شكل 16: التأثير المشترك لشدة التيار وسرعة القطع على معدل الخبث.

دقة المقاسات (عرض الشق)، زاوية ميل سطح القطع الناتج (زاوية الشطف)، خشونة سطح القطع الناتج.

3. تخضع جودة عملية القطع بتقنية البلازما لسيطرة ثلاث معلمات رئيسية هي: شدة التيار، سرعة القطع، ارتفاع الفوهة. وأخرى ثانوية هي: ضغط الغاز المساعد، فرق الجهد.

4. أشارت نتائج التحليلات الإحصائية للتجارب العملية إلى أن سرعة القطع هي المعلمة الأقوى تأثيراً على جميع معايير جودة العملية، تليها شدة التيار، ثم وبمستوى منخفض نسبياً ارتفاع الفوهة. وبشكل عام يمكن تلخيص طبيعة تأثير المعلمات قيد الدراسة في النقاط التالية:

- يؤدي زيادة سرعة القطع إلى تقليل عرض الشق وخفض معدل تكون الخبث السفلي.
- تؤدي زيادة شدة تيار القطع إلى اتساع الشق، بينما يتأرجح معدل تكون الخبث بين الزيادة عند المستوى المتوسط لشدة التيار ثم للانخفاض عند المستوى الأعلى.

- يتسم تأثير ارتفاع الفوهة بالتأثير المتوسط إلى المنخفض بالنسبة لعرض الشق ومعدل تكون الخبث وبصورة متعكسة؛ فتؤدي زيادة ارتفاع الفوهة إلى اتساع الشق وانخفاض معدل تكون الخبث باستثناء زيادة طفيفة عند المستوى المتوسط.

5. حددت القيم المثالية للمعلمات حسب معيار الجودة المقصود فكانت:

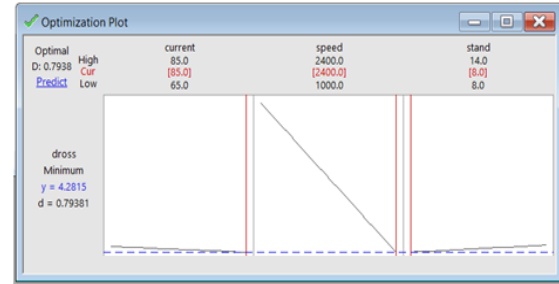
- بهدف تقليل عرض الشق:

$$C=65 \text{ A}, V=2400 \text{ mm/min}, h=14 \text{ mm}$$

- بهدف تقليل معدل الخبث:

$$C=85 \text{ A}, V=2400 \text{ mm/min}, h=8 \text{ mm}$$

6. يُرجح الباحث سبب القصور الواقع في النموذج الرياضي الخاص بحساب معدل تكون الخبث، والذي ظهرت نتائجه في تجربة التأكيد، إلى قصور



شكل 19: القيم المثالية للمعلمات وفق عملية التحسين (ت) تجربة اختبار النماذج.

تتضمن هذه التجربة اختبار موثوقية النماذج الرياضية والقيم المثالية التي تم الحصول عليها من التحليلات الإحصائية لنتائج التجارب العملية. الجدول (12) يوضح نتائج اختبار النماذج. لقد تم اعتماد عدد 5 عينات عند تنفيذ كل تجربة اختبار، ثم تسجل القيمة المتوسطة لنتائج هذه العينات في عمود الاختبار العملي. لقد أظهرت النتائج أن النموذج الخاص بعرض الشق أكثر موثوقية من النموذج الخاص بمعدل تكون الخبث. جدول رقم (12): نتائج اختبار النماذج الرياضية.

المعيار المقاس	قيم المعلمات	النموذج الرياضي	الاختبار العملي
عرض الشق [mm]	$c = 65$ $v = 2400$ $h = 14$	1.274	1.31
معدل الخبث [mg/mm]	$c = 85$ $v = 2400$ $h = 8$	4.11	3

4. الاستنتاجات

من خلال المبحث النظري للدراسات السابقة، والتجارب العملية التي أجراها الباحث، ونتائج التحليلات الإحصائية التي تم رصدها، يمكن حوصلة الدراسة في الاستنتاجات التالية:

1. تعتبر تقنية القطع بالبلازما من التقنيات المتقدمة، والتي لها دور كبير في إنتاج المنتجات المعدنية الهامة وذات التصميم المعقدة، لذلك يجب توطيد هذه التقنية ومحاولة فهم تفاصيلها وأسرارها للاستفادة منها بأكبر قدر ممكن.

2. تقيم جودة منتجات هذه التقنية من خلال أربعة معايير رئيسية هي: معدل تكون الخبث السفلي،

- [5] Ramakrishnan H, Balasundaram R, Ganesh N, Karthikeyan N. Experimental investigation of cut quality characteristics on SS321 using plasma arc cutting. *J Braz Soc Mech Sci Eng*. 2018;40(2):60.
- [6] Patel P, Soni S, Kotkunde N, Khanna N. Study the effect of process parameters in plasma arc cutting on Quard-400 material using analysis of variance. *Mater Today Proc*. 2018;5(2):6023-9.
- [7] Masoudi S, Mirabdolahi M, Dayyani M, Jafarian F, Vafadar A, Doral MR. Development of an intelligent model to optimize heat-affected zone, kerf, and roughness in 309 stainless steel plasma cutting by using experimental results. *Mater Manuf Process*. 2019;34(3):345-56.
- [8] Agbonoga EA, Adedipe O, Okoro UG, Usman FJ, Obanimomo KT, Lawal SA. Effect of process parameters on the surface roughness and kerf width of mild steel during plasma arc cutting using response surface methodology. *FUOYE J Eng Technol*. 2020.
- [9] Hamood SA, Najm VN. Optimization of plasma cutting parameters on dimensional accuracy and machining time for low carbon steel. *Eng Technol J*. 2020;38(8):1160-8.
- [10] Peko I, Nedić B, Dunder M, Samardžić I. Taguchi optimization of bevel angle in plasma jet cutting process of aluminum alloy 5083. *J Prod Eng*. 2020;23:1.
- [11] Kechagias J, Billis M, Maropoulos S. A parameter design of CNC plasma-arc cutting of carbon steel plates using robust design. *Int J Exp Des Process Optim*. 2010;1(4):315-26.
- [12] Naik DK, Maity KP. An optimization and experimental analysis of plasma arc cutting of Hardox-400 using Taguchi based desirability analysis. *Mater Today Proc*. 2018;5(5):13157-65.
- [13] Gautam PK, Gupta V. Analysis of process parameters of plasma arc cutting using design of experiment. *Int Res J Eng Technol (IRJET)*. 2019; e-ISSN 2395-0056.
- [14] MachineMfg. Plasma cutting machine guide [Internet]. 2022 Oct 4 [cited 2022 Oct 4]. Available from: <https://www.machinemfg.com/plasma-cutting-machine-guide/>

مديات المعلمات التي تم اعتمادها للدراسة، فكان من المفيد توسيع المديات أكثر لزيادة التأكيد على شمولية المديات.

5. التوصيات

ومن خلال ما واجهه البحث من عراقيل وتحديات يرى الباحث التوصية بالنقاط التالية:

1. على الباحثين ضرورة توخي الدقة في تحديد مدى مستويات معلمات العمليات المحددة للدراسة لأن نتائج عملية التحسين الإحصائية لجودة العمليات تعتمد اعتماداً كبيراً على التحديد الدقيق لمدى قيم مستويات معلمات العملية، فالتوسع الكبير في مدى المستويات يقلل من دقة النتائج، بينما يؤدي تضيق المدى إلى احتمالية خروج قيم مثالية من مدى الاختبار. وبالتالي
2. ضرورة العمل على استكمال البحث في اختبار معايير الجودة الأخرى مثل زاوية ميل سطح القطع الناتج، خشونة سطح القطع الناتج، وكذلك استخدام الطرق الإحصائية المتخصصة في تحسين العمليات متعددة الأهداف لتحديد القيم المثالية للمعلمات بمراعاة معايير الجودة مجتمعة.

5.المراجع

- [1] Panchal KS, Mungla M. A review on optimization of plasma arc cutting parameters using Taguchi method for EN19. *Mater Sci*. 2020;10:172-91.
- [2] Kumar S. Experimental study on parameters optimization in CNC plasma arc cutting (AISI 206 steel) using Taguchi approach. *Int J Tech Res Sci*. 2018;3(6):198-205.
- [3] Tsiolikas A, et al. Optimization of cut surface quality during CNC plasma arc cutting process. *Int J Syst Appl Eng Dev*. 2016;10:305-8.
- [4] Sharma S, Gupta M, Kumar R, Bindra NS. Experimental analysis and optimization of process parameters in plasma arc cutting machine of EN-45A material using Taguchi and ANOVA method. *Int J Mech Ind Eng*. 2017;11(7):1394-8.