

# تأثيرات معلمات عملية القطع بالبلازما على جودة منتجاتها: ورقة مراجعة

عبد العظيم سالم باله

كلية التقنية الصناعية، قسم الهندسة الصناعية، مصراتة-ليبيا

[abduladim.bala@cit.edu.ly](mailto:abduladim.bala@cit.edu.ly)

تم توظيف هذا المصدر الهائل من الطاقة المركزة في مساحة صغيرة جداً في قطع المعادن القاسية والفاسية جداً لسماكات قد تصل إلى 150 ملم وبسرعة عالية مقارنة بالتقنيات التقليدية. كما أن لهذه التقنية دقة كبيرة لاعتمادها على أنظمة السيطرة الرقمية (CNC) في قيادة مسار القطع، كما يساهم انتظام قوس البلازما في تعزيز دقة القطع لكل التصاميم مهما كانت درجة تعقيدها، إلا ما قل عن قطر مساحة مقطع القوس فإنه يكون خارج قدرات التقنية التي تقدر بتفاوت يتراوح بين 0.25 ملم إلى 0.51 ملم [1].

تقيم جودة عملية القطع بالبلازما من خلال ستة معايير رئيسية متمثلة في دقة المقاسات (Dimensions accuracy)، تفاوت المقاسات (Tolerances)، معدل إزالة المادة (removing rate)، خشونة سطح القطع (Surface roughness)، زاوية انحراف سطح القطع عن المستوى العمودي (Bevel angle)، معدل تكون الخبث عند حافة القطع السفلية (Dross). يمكن تحقيق أعلى مستويات الجودة من خلال تعظيم معيار معدل إزالة المادة وتصغير المعايير الأخرى. ولتحقيق ذلك يجب التحكم الرشيد في قيم معلمات العملية (مدخلات العملية) والتي لها تأثير مباشر على معايير جودة العملية (مخرجات العملية)، ومن أهم هذه المعلمات المؤثرة في جودة العملية؛ سرعة القطع، شدة التيار المستخدم، ارتفاع الفوهة على سطح الشغلة، ضغط الغاز المساعد، فرق الجهد. لهذه المعلمات تأثيرات مستقلة وأخرى مشتركة من شأنها أن تحسن جودة العملية أو تفسدها، ومنها من له تأثير على كل المخرجات ومنها من له تأثير على البعض. كما إن قوة تأثير هذه المتغيرات متفاوتة فمنها القوى ومنها الضعيف ومنها الإيجابي ومنها السلبي أو المحايد. لذلك فإن طبيعة العلاقة بين هذه المتغيرات (المستقلة والتابعة) علاقة معقدة ولها تأثير مباشر على عموم جودة العملية ورفع كفاءتها [3]. لذلك انصب اهتمام العديد من البحوث على دراسة طبيعة هذه العلاقة للوصول إلى الضبط الأمثل لقيم هذه المعلمات بهدف تحقيق أفضل مستويات الجودة الممكنة.

اختص هذا البحث بتقديم ملخص لنتائج أهم الأبحاث التي قُدمت في دراسة طبيعة تأثير معلمات عملية القطع بالبلازما على جودة مخرجاتها، وأمثلة العملية لتحقيق أعلى مستويات الجودة الممكنة. لقد تم تقديم مادة هذا البحث في صورة شمولية تضمنت أهم جوانب هذه التقنية، حيث بُدء البحث باستعراض العيوب التي يمكن أن تظهر في منتجات هذه التقنية والتي أُنشئت منها لاحقاً معايير جودة العملية التي يتم على أساسها تقييم نجاح العملية، تلى ذلك استعراض التعريف بمعلمات العملية وتأثيراتها المستقلة والمشاركة على كل معيار من معايير جودة العملية، ثم تعرض البحث للتعريف بمعايير جودة العملية وما هي المعلمات الأكثر تأثيراً بها، وخلال كل ذلك تم استعراض نتائج وتحليلات واستنتاجات الدراسات السابقة كلاً في محل سياقه. في نهاية البحث تم تقديم جداول تلخص كل ما تم تناوله من بحوث تسهل على القارئ الوصول لأي معلومة تتعلق بهذه البحوث؛ كمدى تأثير مستويات المعلمات التي اعتمدها هذه البحوث، القيم المثالية لمعلمات قيد كل دراسة، ومعلومات أخرى تخدم البحوث في تكوين فكرة شاملة على أهم تفاصيل نتائج هذه البحوث. أنتهى البحث إلى تقديم استنتاجات تلخص ما تم تقديمه خلال هذا البحث وكذلك بعض التوصيات تتعلق بما يؤمل من أعمال وبحاث مستقبلية.

الملخص-تعتبر تقنية القطع بالبلازما المسيرة حاسوبياً من أهم التقنيات الحديثة التي تلبي تنامي احتياجات السوق الصناعي من المنتجات المسطحة ذات التصاميم المعقدة وفي أوقات تشغيل قياسية. تعتمد هذه التقنية على استغلال الكم الهائل من الحرارة المنبعثة من التفريغ الكهربائي عبر الغازات المتأينة لقطع أقسى المعادن ولسمكات كبيرة جداً. لكي تحقق هذه التقنية الكفاءة المثلى وللحد من ظهور المنتجات المعيبة، يتطلب الأمر المحافظة على جودة العملية. تُقيم جودة عملية القطع بهذه التقنية من خلال أربعة معايير هامة؛ خشونة سطح القطع، عرض الشق، زاوية الشطف، معدل تكون الخبث السفلي، وكلها مبنية على أساس استراتيجية الأقل قيمة الأفضل جودة. في حين أن جودة عملية القطع تعتمد على أربع معلمات رئيسية؛ شدة التيار، سرعة القطع، ارتفاع الفوهة، وضغط الغاز، ولا سبيل لتحقيق الجودة المرجوة إلا عن طريق الضبط الرشيد لقيم هذه المعلمات. أختص هذا العمل بمراجعة وتلخيص البحوث المهمة بتحسين جودة عملية القطع باستخدام تقنية البلازما من خلال الكشف عن طبيعة وقوة تأثير معلمات العملية على معايير الجودة، وتحديد القيم المثلى لهذه المعلمات اللازمة لتحقيق أعلى مستويات الجودة. لقد تم صياغة هذا العمل بطريقة مبسطة ليساعد المهندسين المستخدمين لهذه التقنية والباحث في تحديد الأسباب وراء تدني مستويات الجودة لمنتجاتهم، وكذلك صياغة استنتاجات لتكون نقاط استرشادية لهم للوصول للقيم المثلى لمعلمات العملية وتحقيق أعلى مستويات الجودة ورفع الكفاءة الإنتاجية للتقنية. لقد اجتمعت جُل البحوث على أن شدة التيار وسرعة القطع هما الأكثر تأثيراً على كل معايير الجودة، تليهما ارتفاع الفوهة وضغط الغاز. وأن لكل معلمة من هذه المعلمات طبيعة تأثير تختلف عن المعلمات الأخرى، غير أن لها تأثيرات مشتركة تدخل في معادلة تحسين جودة العملية ولا يمكن إهمالها. كما أن الفهم الجيد لطبيعة تأثير هذه المعلمات يُسهل على المستخدمين والباحثين الضبط الرشيد لهذه المعلمات.

الكلمات المفتاحية: تقنية القطع بالبلازما المبرمجة، أمثلة عملية القطع بالبلازما، الخبث السفلي، زاوية انحراف مستوى القطع، عرض الشق.

## 1. المقدمة

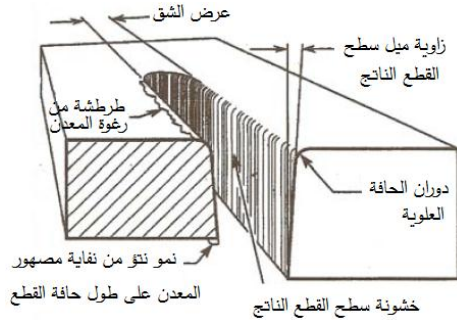
تقنية القطع بالبلازما هي إحدى أهم التقنيات الحديثة المستخدمة في قطع المعادن، وهي تعتمد على أنظمة التحكم الرقمي في تنفيذ عملياتها. فلقد أدى التطور الكبير في التقنيات الرقمية إلى تجاوز التقنيات التقليدية المعتمدة على المهارات اليدوية، فصار من السهل جداً قطع أشكال وتصاميم غاية في التعقيد وبدقة لا يمكن للتقنيات التقليدية مجاراتها [1].

البلازما هو مصطلح يطلق على المادة عندما تكون في درجة حرارتها عالية جداً. فكما هو معلوم أنه عندما ترتفع درجة حرارة المادة تنشط ذراتها وتزداد حركتها فتتحرر من الروابط التي بينها فتتحول من حالة صلبة إلى سائلة، ومع ازدياد الحرارة يزداد نشاط الذرات فتتحول إلى الحالة الغازية، فإذا استمر ارتفاع درجة الحرارة يزداد نشاط الذرات بشكل فائق فتفقد إلكترونات لتتحول إلى أيونات. فالبلازما عبارة عن غاز متأين ذي حرارة عالية جداً تتراوح بين 20,000 و 30,000 درجة مئوية [2]

استلمت الورقة بالكامل في 30 إبريل 2023 وروجعت في 07 مايو 2023

وقبلت للنشر في 20 يوليو 2023

ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 29 فبراير 2024.



الشكل 2. عيوب القطع المحتمل ظهورها في منتجات تقنية القطع بالبلازما [6]

### 3. معلمات عملية القطع بالبلازما

كما هو الحال في أي عملية (تتضمن مدخلات، معالجات، مخرجات) تتوقف جودة المخرجات على مجموعة من العوامل يكون لها تأثير مباشر أو غير مباشر على أداء العملية، وبالتالي التأثير على مخرجاتها. كذلك الحال في عملية القطع بالبلازما فإنها تقع تحت تأثير مجموعة من المتغيرات (المعلمات) تؤثر بشكل مباشر على جودة مخرجاتها، والضبط الرشيد لقيم هذه المعلمات هو الطريق الوحيد لتحقيق أفضل مستويات الجودة الممكنة. من الممكن حصر معلمات عملية القطع بالبلازما من خلال معاينة المكونات الأساسية لهذه العملية والمتمثلة في: قوس البلازما المسؤول على تنفيذ عملية القطع؛ هذا المكون هو نتاج من تدفق تيار كهربائي قوي، وبالتالي سيكون لشدة التيار وفرق جهده تأثير على قوة وهيئة القوس. أما المكون الثاني للعملية فهو حركة القوس اللازمة لاستمرار عملية القطع؛ وبالتالي سيكون لسرعة القطع تأثير مباشر على العملية. أما المكون الثالث فهو شكل وهيئة القوس ونقطة اتصاله بمنطقة القطع؛ وهذا يتحكم فيه ارتفاع الفوهة على سطح المعدن. المكون الرابع للعملية هو آلية نثر المعدن المنصهر بفعل القوس عن منطقة القطع لفتح شق بين جزئي المعدن وهذه العملية يقوم بها الغاز المساعد لذلك فإن لضغط الغاز المستخدم تأثير على اتمام العملية وبالتالي جودة مخرجاتها. ومما تقدم فإن عملية القطع ستكون خاضعة لتأثير شدة وفرق جهد التيار المستخدم، سرعة القطع، ارتفاع الفوهة، وضغط الغاز المساعد [3].

لكل معلمة من هذه المعلمات قوة وطبيعة تأثير تختلف عن باقي المعلمات، كما أنها تختلف فيما بينها في نوع المخرج (خشونة السطح، أو زاوية الشطف، إلخ) الذي تؤثر فيه. ومن الجدير بالذكر أنه لا توجد قيم مثالية ثابتة لهذه المعلمات يمكن استخدامها عند قطع أي معدن، بأي سمك، وبأي معدل إنتاج مطلوب؛ لذلك من المهم الفهم الجيد لطبيعة تأثير هذه المعلمات على كل مخرج من مخرجات العملية. كما تجدر الإشارة هنا أيضاً إلى التأثير الواقعي لهذه المعلمات يكون بشكل مشترك وليس تأثيراً أحادياً مستقلاً. فعلى سبيل المثال؛ القيمة المثالية لشدة التيار عند المستوى (أ) من سرعة القطع ليس هي نفسها القيمة (القيمة المثالية لشدة التيار) عند المستوى (ب) من سرعة القطع، فلكل معلمة من معلمات العملية تأثير على تأثيرات المعلمات الأخرى. عملياً ومن خلال الفهم الجيد لطبيعة هذه العلاقات يمكن تقدير القيم المثالية باستخدام طريقة المحاولة وتصحيح الخطأ، لكننا نحتاج إلى دراسة مختبرية لدراسة التأثير المشترك لهذه المعلمات وإجراء تحليل إحصائي لنتائج هذه الدراسة لكي تتمكن من التحديد الدقيق لقيم المعلمات المثالية.

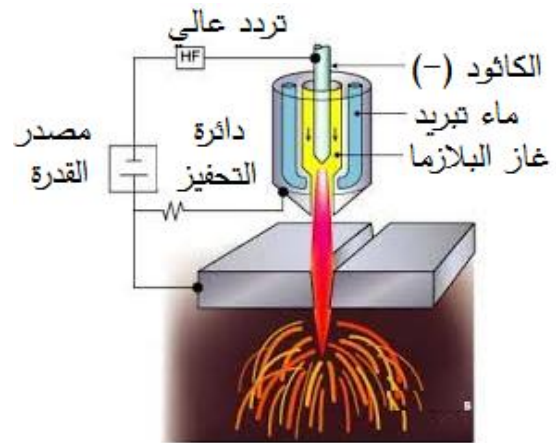
#### أ. تأثيرات شدة التيار على جودة العملية

تعتمد كمية الطاقة التي يطلقها قوس البلازما اعتماداً مباشراً على شدة التيار المستخدم. وكما هو الحال في أغلب العمليات ترتبط الحالة المثالية لعملية القطع ارتباطاً وثيقاً بحالة التوازن بين الطاقة المنتجة والمستهلكة. فقصور الطاقة المنتجة عن الوصول إلى الحد الأدنى لطاقة القطع ينتج عنها قصور عن إنجاز عملية القطع بشكل كامل، أما تجاوزها للحد الأقصى فينتج عنه صهر مزيد من المعدن؛ الأمر الذي ينتج عنه توسع في الشق وسوء حالة سطح القطع. بالإضافة إلى ذلك يعتبر توليد كمية زائدة من الطاقة عن الكمية الكافية هدراً للطاقة وزيادة في تكاليف العملية. لذلك بات من المهم البحث عن حالة التوازن بين كمية الطاقتين. وللوصول لنقطة الاتزان يجب الموازنة بين ثلاثة عناصر أساسية لعملية القطع: شدة التيار، سرعة القطع، وسمك المعدن؛ فزيادة سرعة القطع أو سمك المعدن يتطلب زيادة شدة التيار، وفي حالة زيادة كلاهما معاً يحتاج الأمر إلى مضاعفة الزيادة في شدة التيار والعكس بالعكس، وكذلك الحال لو تطلب الأمر زيادة

### 2. تقنية القطع بالبلازما

تعتمد فكرة عمل التقنية على استغلال الطاقة الحرارية الهائلة التي تتولد في تيار من الغاز المتأين المنفوخ تحت ضغط عالي من فوهة قمعية الشكل (Nozzle) اتجاه قطعة الشغل المراد قطعها. يتولد قوس البلازما كما هو موضح في الشكل (1) من خلال استثارة الكاثود (-) بواسطة الفوهة القمعية المحيطة بالكاثود والموصلة بالدائرة لغرض تحفيز الكاثود لإطلاق الشرارة المطلوبة. هذه الشرارة تعمل على تأين الغاز (الهواء) المدفوع من الفوهة المحيطة بالكاثود وهو بدوره يعمل على نقل قوس الشرارة المتولدة بين الكاثود والفوهة، إلى قطعة الشغل الموصلة بالقطب الموجب للدائرة، فتنتقل الشرارة المتولدة من حافة الفوهة إلى سطح الشغلة (الأنود (+))، وبالتالي يتولد قوس البلازما بين الكاثود والشغلة لتبدأ عملية الاختراق والقطع، وبفعل الحرارة العالية والتركيز العالي للمساحة المعرضة للقوس تتصهر مادة الشغلة بسرعة عالية جداً وبفعل التيار الهوائي المسلط يتم نفخ المادة المنصهرة بعيداً عن الشغلة فيتم اختراق المادة. تتواصل عملية قطع المعدن من خلال تحريك الفوهة في اتجاه القطع الأمر الذي يولد شق في الشغلة ينتج عنه قطع كامل لمادة الشغلة [4]. من خلال هذا المفهوم فإنه يضح أن جودة عملية القطع تعتمد بشكل أساسي على انتظام هيئة وشكل قوس البلازما، شدة التيار المستخدم لتوليد القوس، سرعة أو ضغط الغاز المنفوخ، بعد الفوهة عن سطح الشغلة، سرعة حركة الفوهة في اتجاه القطع (سرعة القطع)؛ فكل هذه المعلمات تتحكم في جودة العملية لذلك يتوجب التحكم في قيمها بما يضمن أعلى جودة ممكنة.

عملياً تقيم جودة عملية القطع بالبلازما من خلال أربعة معايير أساسية مبين مفهومها في الشكل (2) في صورة العيوب التي يمكن ظهورها في منتجات عملية القطع بتقنية البلازما؛ جودة سطح القطع (أقل خشونة ممكنة)، عرض الشق (أصغر ما يمكن لتقليل كمية الفاقد في المادة و تحسين دقة المقاسات)، تعامد أسطح القطع أو ما يعرف بزاوية الشطف (Bevel angle) على أن تكون أصغر ما يمكن، خلو حافة الشق السفلية من تكتل بعض المصهور يعرف بـ (Dross). وقد يضاف إلى هذه المعايير الأساسية معيار خامس غير أنه ضعيف التأثير ويمكن التغاضي عنه؛ وهو ظهور طرطشة من رغوة المعدن المنصهر على حافة سطح المعدن العلوية. من المهم قبل الخوض في تفاصيل معايير تقييم جودة عملية القطع بالبلازما أن نتعرف على مفهوم معلمات العملية وطبيعة علاقتها بمخرجات العملية، لكي يسهل شرح سبل التحكم في هذه المعلمات لتحقيق أفضل مستويات الجودة لمخرجات العملية.



الشكل 1. فكرة عمل تقنية القطع بالبلازما [5]

سنة 2015 اختبر *Maity* تأثير سرعة القطع، شدة التيار، فرق جهد التيار، ارتفاع الفوهة على كل من اتساع الشق، زاوية الشطف، تكون الخبث السفلي، جودة السطح، معدل إزالة المادة. فوجد أن أكبر تأثير كان لارتفاع الفوهة بالاشتراك مع معدل التغذية الذي قدر بنسبة 56%، بينما قُدرت نسبة تأثير ارتفاع الفوهة بنسبة 16% وذلك على كل معايير الجودة المختبرة في هذه الدراسة [12].

#### د. تأثيرات ضغط الغاز المساعد على جودة العملية

الغاز المساعد لعملية القطع هو غاز قابل للتأين يُنفث من فوهة رأس القطع وبشكل يحيط بالأنود المسؤول على إنتاج قوس البلازما. تستخدم عدة أنواع من الغازات لهذا الغرض أشهرها: النيتروجين، الأرجون، الهيدروجين، الهواء الجوي، بخار الماء، وخليط من بعض الغازات. للغاز المساعد عدة أغراض أهمها العمل كناقل للحرارة من المصدر (القوس) إلى سطح المعدن، منع القوس من الانتشار وتوجيهه إلى منطقة القطع، نثر المعدن المنصهر بعيداً عن منطقة القطع، حماية الأجزاء الداخلية لرأس القطع (الأنود) من الإهلاك الحراري. لتأدية كل هذه المهام المرجوة من الغاز المساعد يتوجب اتصافه ببعض الخصائص أهمها: قدرته على إطلاق الحرارة الأولى للقوس، الموصلية العالية للحرارة لتحسين قدرته على نقل الحرارة وكذلك كفاءته في تبريد الأنود، الكثافة العالية لزيادة الزخم الحركي للغاز لتمكنه من نثر المعدن المنصهر والاتصال الجيد بالمعدن لمزيد من التوصيل الحراري، رخص التكلفة وعدم السمية [9].

يعتمد اختيار نوع الغاز المساعد على نوع المعدن المقطوع، سمك المعدن، طريقة القطع. فعلى سبيل المثال يفضل استخدام غاز النيتروجين عند قطع النحاس عالي الموصلية الكهربائية والحديد المقاوم للصدأ للوقوف لأفضل مستويات الجودة. كما يجب ألا تقل نسبة نفاوة النيتروجين عن 99.5%، فوجود نسبة ولو ضئيلة من الأكسجين وبخار الماء سيسبب في تآكل واحتراق تتجسدت الإلكترود لرأس القطع. غاز الأرجون غير أن قوس أكثر استقراراً مما هو عليه في حال استخدام النيتروجين غير أن تكلفته عالية نسبياً لذلك يفضل استخدامه عند قطع التصاميم الهامة أو المعادن المكلفة لتحقيق أفضل مستويات جودة القطع. رغم أن طاقة الاحتراق المتولدة من قوس البلازما عند استخدام الهواء المضغوط أقل مما هو عليه عند استخدام الغازات الصناعية؛ إلا أن تكاليفها تكون أقل بكثير مما هو عليه في الغازات الأخرى؛ وذلك لحاجة التقنية للصيانة العادية غير المكلفة، علاوة على انعدام تكلفة الغاز المستخدم وخلوه من السمية [10].

لضغط الغاز المستخدم تأثيرات على بعض جوانب جودة عملية القطع، ولكنها بنسبة أقل مما هو عليه الحال في المعلمات الأخرى. من الممكن القول بأن لضغط الغاز تأثيراً غير كبير على توجيهه واستقرار القوس؛ إلا أنه كلما كان تيار الهواء المضغوط مركزاً وغير منتشر كلما زاد القوس استقراراً وتركيزاً في النقطة المقابلة للفوهة، والعكس بالعكس. كما أن لضغط الغاز تأثيراً على آلية نثر مصهور المعدن بعيداً عن منطقة القطع؛ فبالتالي يجب زيادة ضغط الغاز عند الحاجة لزيادة سرعة القطع بغرض رفع إنتاجية العملية. ومن الجدير بالذكر أن المبالغة في رفع ضغط الغاز يعمل على زيادة معدل الفقد الحراري للعملية؛ الأمر الذي يخفض من الكفاءة الحرارية للقوس. وبالمقابل فإن انخفاض ضغط الغاز عن المستوى الأدنى يؤثر سلباً على مقدرة القوس للتغلغل في سمك المعدن مما يهيئ الفرصة لتكثُر رغوة المعدن عند حافة القطع [2], [3], [7].

#### 4. معايير تقييم جودة عملية القطع بالبلازما

كما تم الإشارة إليه فيما سبق أن تقييم جودة عملية القطع تعتمد بعض المعايير يتم من خلالها قبول المنتج أو رفضه؛ أو بمفهوم أبسط أهم العيوب التي يمكن أن تظهر في منتجات عملية القطع بالبلازما، وكيفية الحد أو التقليل من ظهورها قدر الإمكان. الفهم الجيد لهذه العيوب والمشاكل يُمكن المستخدمين لهذه التقنية من تحسين جودة منتجاتهم والحد من ظهور المعيبات بما يضمن استمرار استخدام التقنية وتحقيق عوائد اقتصادية عالية.

#### أ. جودة سطح القطع

في أغلب التطبيقات الصناعية يسعى المصنعون لإعداد منتجاتهم بأسطح ذات جودة عالية قدر الإمكان وذلك لعدة أسباب أهمها: تحسين دقة المقاسات، تعزيز الخصائص الميكانيكية للمنتج، تحسين عمليات التجميع واللحام، وغيرها من المكتسبات التي عادة ما يسعى المصنع لتحقيقها.

شدة التيار لنفس سمك المعدن لأي سبب كان؛ كزيادة الإنتاجية فإنه يستوجب زيادة سرعة القطع للعودة لنقطة التوازن [7] [8] [9]. كما تعتبر شدة التيار المسؤولة عن اتساع وضيق دائرة القوس، فكلما زادت شدة التيار زاد انتشار القوس الأمر الذي ينتج عنه اتساع عرض الشق وسوء جودة القطع بشكل عام [10].

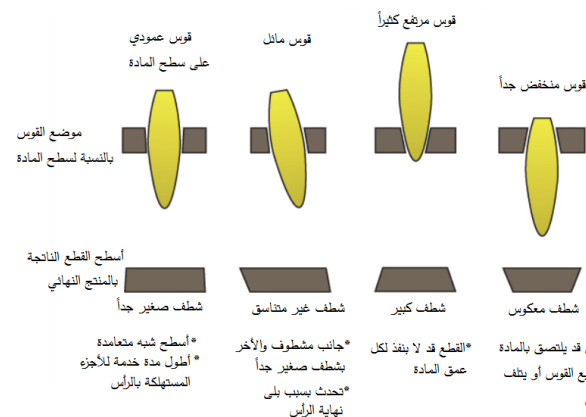
في الواقع العملي يقوم المستخدمون لهذه التقنية بمحاولة الوصول إلى نقطة التوازن عن طريق التغيير التدريجي لقيم المعلمات وتقييم النتائج حتى الوصول إلى النتيجة المرجوة، غير أن هذه الطريقة تستنزف الكثير من المادة الخام الأمر الذي يرفع التكلفة الكلية للعملية، كما يصعب الاعتماد عليها في الوصول الدقيق للقيم المثالية للمعلمات والتي تجعل التقنية تعمل بأقصى كفاءة وتحقق أفضل مستويات الجودة الممكنة.

#### ب. تأثيرات سرعة القطع على جودة العملية

حركة القطع هي العنصر المسؤول على استمرار عملية القطع، فعندما يقوم قوس البلازما باختراق المعدن يبدأ رأس القطع بالحركة بسرعة منتظمة (يقوم المستخدم بتثبيتها وفق معطيات العملية حسب نوع وسمك المعدن) لتحقيق الاستمرار في عملية القطع. تعتبر هذه المعلمة من أهم معلمات عملية القطع بالبلازما تأثيراً، فهي تؤثر في كل مخرجات العملية وغالباً ما يكون له التأثير الأكبر مقارنة بالمعلمات الأخرى. عند الرغبة في تحديد سرعة القطع لحالة قطع جديدة يجب مراعاة خصائص الحالة المتمثلة في سمك المعدن، درجة انصهاره، درجة الموصلية الحرارية للمعدن، قوة التوتر السطحي للمعدن بعد انصهاره فكل هذه الخصائص لها تأثير على قيم معلمات العملية المثالية. بشكل عام يؤدي الارتفاع المتوسط في سرعة القطع إلى تحسين جودة القطع وأهمها جودة سطح القطع، بينما الارتفاع المفرط في السرعة يؤدي إلى تأخر القوس عن الفوهة التي تنفث الهواء المضغوط مما لا يعطي الفرصة الكافية لنثر المصهور بشكل كامل بسبب في تجمع كتل من رغوة المصهور على طول الحافة السفلية للشق وهو ما يعرف بخبث السرعات العالية. وكذلك الحال عند محاولة القطع باستخدام سرعات قطع بطيئة يترتب عليها صهر مزيد من المعدن فلا يتأثر للهواء المضغوط نثر كل المصهور فيبقى جزء من المصهور وخاصة الملامس لحافة القطع فيكون ما يعرف بخبث السرعات المنخفضة [11].

#### ج. تأثيرات ارتفاع الفوهة على جودة العملية

يمثل ارتفاع الفوهة المسافة العمودية بين فوهة رأس القطع وسطح المعدن. يكمن تأثير هذا المتغير في تحديد نقطة التماس بين القوس ومادة المعدن كما هو موضح بالشكل (2). فكلما هو مبين بالشكل يظهر القوس بنهائيتين مدببتين عند الأطراف وشبه منظم عند المنتصف؛ فارتفاع الفوهة على سطح المعدن يحدد أين من أجزاء القوس سيباشر عملية القطع، وبالتالي فإن حجم وشكل زاوية الشطف يتأثران كثيراً بارتفاع الفوهة. المبالغة في ارتفاع الفوهة يولد شقاً واسعاً عند الحافة العلوية وضيقاً عند الحافة السفلية، أما المبالغة في قرب الفوهة فيولد شق ضيق من أعلى وواسعاً من أسفل. بالإضافة لذلك فإن ارتفاع الفوهة يحقق قرب أو بعد مصدر النفث الهوائي المسئول عن نثر المعدن المنصهر، لذلك فإن لارتفاع الفوهة سيكون له تأثير ولو جزئي على تكون الخبث السفلي وجودة سطح القطع [10].



الشكل 3. تأثير شكل قوس البلازما على زاوية ميل مستوى القطع [8]

المعلمة لا يمكن أن تعطي صورة حقيقية على سلوك المعلمة الخاضعة للدراسة. فمما يؤخذ على هذه الدراسة وغيرها تقارب قيم المستويات التي اعتمدها الباحثون للدراسة، فالمستوى المتوسط والعالي لمعلمة السرعة (214, 217 mm/min) قيم متقاربة جداً لا يمكن اعتبارها مستويات مختلفة، كذلك الحال بالنسبة لقيم ضغط الغاز (0.6, 0.7, 0.8 MPa) فهي متقاربة أيضاً. وبغض الطرف عن تقارب مستويات المعلمات الذي يمنع إبراز التأثير الحقيقي للمعلمات، تشير النتائج إلى أن هذان المستويين المتعكسين وبغض النظر عن وصفها بعالية أو منخفضة، يحققان استقرار لقوس البلازما الأمر الذي ينتج عنه استقراراً أكبر لعملية القطع وبالتالي تنتج سطح أكثر استواءً. فانخفاض الضغط إلى المستوى 0.6 MPa يحقق تدفقاً مستقراً للتيار الهوائي (Steady flow). أما ارتفاع سرعة القطع يقلل من تعرض سطح القطع إلى حمل حراري، والذي يؤدي إلى صهر جائر لسطح القطع وبالتالي سوء حالته.

أما Ramakrishnan وآخرون فقد أثبتت دراستهم التي أجروها سنة 2018 أن التأثير الأقوى على جودة السطح الناتج كان لشدة تيار القطع المستخدم تلاه ضغط الغاز المساعد ثم ارتفاع الفوهة، في حين عدم رصد أي تأثير يذكر لسرعة القطع [21]. لقد أظهرت الدراسة أن نسبة تأثير شدة التيار أكبر بكثير من تأثيرات المعلمات الأخرى؛ فكانت 82.71% لشدة التيار، 10.17% لارتفاع الفوهة، 6.35% لضغط الغاز؛ وهذه النسب تظهر مدى سيطرة شدة التيار على خشونة سطح القطع وهذه نتيجة متوقعة وتتوافق مع أغلب البحوث الأخرى، لكن نتيجة تدني تأثير سرعة القطع رغم اتساع مدى قيم الاختبار مخالفة لنتائج البحوث الأخرى، وهي محل استغراب لا يمكن تجاوزه.

قدم Gautam وآخرون سنة 2019 دراسة حول تأثير ضغط الغاز، شدة التيار، سرعة القطع، ارتفاع الفوهة في مستويين على معدل إزالة المادة وخشونة سطح القطع، حيث أشارت نتائجها إلى أن الزيادة في سرعة القطع تؤدي إلى تقليل خشونة السطح. بينما تؤدي المبالغة في شدة التيار إلى زيادة خشونة السطح [23]. نتيجة منطوقية متوافقة مع باقي الدراسات الأخرى وقد تم الإشارة إلى آلية تأثير هذا المتغير في قيم المعلمات محل الدراسة.

سنة 2020 Agbonoga وآخرون قدموا دراسة حول تأثير شدة التيار، ضغط الغاز، وسرعة القطع في ثلاثة مستويات، على كلاً من خشونة سطح القطع واتساع الشق. أشارت نتائج تحليل التباين ومؤشر نسبة الإشارة إلى التشويش (S/N) (Signal to Noise ratio) إلى أن التأثير الأكبر على خشونة السطح كانت لشدة التيار، تلاها ضغط الغاز ثم سرعة القطع في نسب متقاربة. بينما كان ضغط الغاز هو المؤثر الأقوى على عرض الشق، ثم سرعة القطع وضغط الغاز في نسب متقاربة أيضاً [24]. هذه النتيجة متطابقة مع المفاهيم الأساسية لميكانيكية القطع بقوس البلازما؛ فشدة التيار تؤثر بشكل كبير على ضيق أو انتشار قوس البلازما، وبالتالي يكون السطح الناتج تبعاً لهيئة القوس؛ فكلما كان القوس أكثر ضيقاً وانتظماً كلما كان السطح أكثر انتظاماً وأقل خشونة، والعكس بالعكس. كما سجلت النتائج انخفاضاً في خشونة السطح مع الارتفاع المحدود لسرعة القطع، في حين أثر مزيد الارتفاع في السرعة تأثيراً سلبياً ليحقق ارتفاعاً ملحوظاً في خشونة السطح؛ حيث علل الباحثون هذا السلوك إلى أن الارتفاع في السرعة يسبب اضطراب القوس مما ينتج عنه تذبذب حد القطع. بينما يحقق ارتفاع ضغط الغاز زيادة في سرعة التدفق مما يحقق معدل تبريد أكبر، وبالتالي تجمد المعدن المجاور لمنطقة القطع الذي يؤدي بدوره إلى ضيق عرض الشق. بينما المبالغة في رفع ضغط الغاز يعكس النتيجة، وذلك بسبب ارتفاع قوة الزخم الناتجة عن الزيادة في سرعة حركة التيار، الأمر الذي يُمكنه من نثر المادة المنصهرة والشبه المنصهرة أيضاً مما يوسع عرض الشق الناتج.

ب. زاوية ميل سطح القطع

يعد تعامد أسطح القطع (السطح العلوي والسفلي لحافة القطع) في عمليات القطع بالبلازما أحد أهم معايير تقييم جودة العملية؛ لما لها من تأثير كبير على دقة المقاسات وخاصة في قطع الدوائر وبالذات الصغيرة منها، هذا الانحراف عن التعامد المفترض يشوه أسطوانية التقوُّب مما يجعل عملية إزواجها مع أعمدة بمقاسات صغيرة التقاوُّب شبه مستحيل. نظرياً تعد أسطح القطع عن عملية القطع عمودية على السطحين العلوي والسفلي للمادة المقطوعة؛ على اعتبار أن قوس البلازما يسلط عمودياً على هذه الأسطح؛ غير أن الواقع العملي يُظهر زاوية ميل صغيرة نسبياً تحول دون أسطوانية التقب كما هو موضح بالشكل (4). من المهم الإشارة إلى أن الميل البسيط لسطح القطع من الأمور التي لا مفر منها ولكن تبدل

جودة سطح القطع من القطع باستخدام البلازما؛ هي خلو سطح القطع من التمرجات التي عادة ما تنشأ عن اضطراب وتذبذب قوس البلازما؛ وهذا الأخير عادة ما ينتج بسبب تطرف قيمة أحد المعلمات عند تنفيذ عملية القطع مثل استخدام سرعة قطع عالية جداً، أو المبالغة في شدة التيار المستخدم وهي أقوى المعلمات تأثيراً على خشونة السطح. من الممكن القول أن خشونة أسطح القطع من عمليات القطع بالبلازما تتراوح عملياً ما بين  $1 \mu m$  إلى  $6 \mu m$  [15].

Tejas سنة 2015 وآخرون اختبروا تأثير شدة التيار، سرعة القطع، وارتفاع الفوهة على معدل إزالة المادة وخشونة سطح القطع. وأشارت نتائج الدراسة إلى أن التأثير الأكبر لشدة التيار وسرعة القطع وينسب متقاربة؛ وذلك لحكهما المباشر في توازن طاقة القطع، في حين سُجل انخفاض ملحوظ في تأثير ارتفاع الفوهة مقارنة بالمعلمات الأخرى [16].

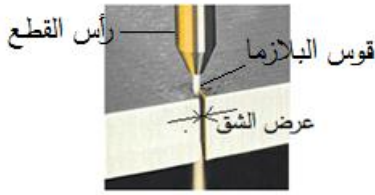
بينما أشارت نتائج الدراسة التي أجراها Kumar وآخرون سنة 2018 لتحديد طبيعة تأثير شدة التيار، ضغط الغاز، سرعة القطع، ارتفاع الفوهة إلى أن ترتيب قوة تأثير هذه المعلمات على خشونة سطح القطع كانت الأولوية لشدة التيار، ثم ضغط الغاز، ثم سرعة القطع، ثم ارتفاع الفوهة. كما أشارت أيضاً إلى أن العلاقة بين المعلمات وخشونة السطح كانت متغيرة من الطردية في بداية مدى الاختبار إلى عكسية في كل المتغيرات باستثناء ارتفاع الفوهة فقد كانت في علاقة طردية متوسطة القوة [17]. من الواضح أن المبالغة في قيمة شدة التيار تخرج عملية القطع عن طور الاستقرار ويزيد من انتشار القوس الأمر الذي يسبب في سوء حالة سطح حافة القطع. بينما يقع الترتيب الذي قدمه Kumar لقوة تأثير المعلمات محل الاستغراب؛ فضغط الغاز له تأثير بسيط، فكثير من الشركات المنتجة للآلات البلازما تحدد قيمة ثابتة للضغط لجميع حالات القطع بينما لا تفعل ذلك مع باقي المعلمات، وهذا يدل على ضعف تأثير هذه المعلمة. بالإضافة لذلك فهذه النتيجة مخالفة لأغلب البحوث الأخرى، إلا إذا كانت هناك خصوصية في ظروف القطع لم يشير إليها الباحث أثرت على قوة هذه المعلمات.

أما Utsav فقد أثبتت دراسته التي قدمها مع آخرون سنة 2017، أن سرعة القطع هي الأكبر تأثيراً على جودة سطح القطع، فقد أشار التحليل الإحصائي للدراسة إلى أن نسبة تأثير سرعة القطع تصل إلى 73.24%، تلاها ارتفاع الفوهة الذي قدر تأثيره بنسبة 13.74%، ثم فرق الجهد الذي وصلت نسبة تأثيره إلى 10.89%، وكانت شدة التيار هي الأقل تأثيراً حيث تضاءلت إلى 1.13% [16]. يلاحظ هنا أيضاً تأخر ترتيب تأثير شدة التيار وظهورها بنسبة ضعيفة جداً؛ وهذا راجع لضيق مدى الاختبار الذي اعتمده الباحث لشدة التيار (40-45 A)، فالتغير في مقدار A 5 لا يعد فارق ولا يُتوقع منه تأثير يذكر [18].

أشارت نتائج دراسة Masoudi سنة 2018 إلى أن استخدام سرعة القطع وشدة التيار عند المستويات الدنيا مع رفع ضغط الغاز يؤدي إلى تحسين جودة سطح القطع [18]؛ يفسر هذا التحسن بسبب استقرار عملية القطع الناتجة عن توافق بين مستويات شدة التيار وسرعة القطع، بينما يؤدي ارتفاع ضغط الغاز المساعد إلى مزيد من التركيز لقوس البلازما، نثر كامل للمادة المنصهرة الأمر الذي يمنع بقاء جسيمات عينية من المادة المقطوعة تنتشبت بحافة القطع مكونة نتوءات مشوهة لسطح حافة القطع. Pate وآخرون أجروا دراسة سنة 2018 لتحديد طبيعة وقوة تأثير سرعة القطع وضغط الغاز المساعد على جودة سطح القطع، فأظهرت النتائج أن جودة سطح القطع تتأثر بسرعة القطع أكثر بكثير مما تتأثر بضغط الغاز. حيث سجلت النتائج انخفاض ملحوظ في خشونة سطح القطع مع زيادة سرعة القطع [20]. هذا راجع إلى ما تم الإشارة إليه سابقاً بسبب اعتماد التوازن بين طاقتي القطع اعتماداً كبيراً على سرعة القطع، فزيادة السرعة يحد من تعريض سطح القطع إلى حمل حراري إضافي يضر بحالة السطح. بالإضافة إلى ذلك فإن زيادة السرعة تحقق مزيد من الاستقرار لحركة رأس القطع والحد من تأثير الاهتزازات الناتجة عن حركة المنصة الحاملة لرأس القطع، بشرط عدم المبالغة في السرعة حتى لا تتعكس الحالة وتصبح السرعة الفائقة هي المصدر للاهتزازات.

أظهرت نتائج الدراسة التي قدمها Bhowmick وآخرون سنة 2018 أن أقل قيمة لخشونة السطح قد سُجلت عند المستويات الدنيا لضغط الغاز والمستويات العليا لسرعة القطع بينما لم يظهر أي تأثير لسمك المادة على خشونة سطح القطع [21]. من المهم في مثل هذه الدراسات الحرص على التحديد الدقيق لمستويات المعلمات المعتمدة في الدراسة، فمن المفترض أن هذه المستويات تكون عند أطراف ووسط المدى الفعال لقيم هذه المعلمات، أما اعتماد قيم متقاربة وقد تكون واقعة في أحد أطراف المدى الفعال لقيم





الشكل 5. عرض الشق [31]

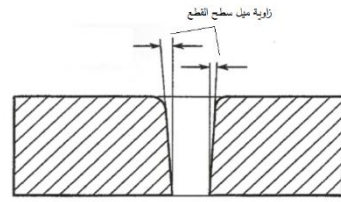
يتأثر عرض الشق الناتج في عمليات القطع بالبلازما بمعلمات العملية (سرعة القطع، شدة التيار، ارتفاع الفوهة، ضغط الغاز، فرق الجهد). لقد أجريت العديد من البحوث والدراسات على طبيعة تأثير معلمات العملية على حجم وانتظام عرض الشق وكانت أغلب النتائج متفقة على عموماً تأثير هذه المعلمات مع بعض الفوارق البسيطة التي يُرجح سببها إلى اختلاف سمك المادة المقطوعة. فكما هو معلوم أن قوس البلازما ليس بثابت فهو يتغير في شكله وعرضه، وذلك بفعل تأثير معلمات العملية سالفة الذكر. فعلى سبيل المثال يزداد قوس البلازما انتشاراً كلما زادت قيمة شدة التيار المستخدمة مما يؤدي إلى اتساع وعدم انتظام عرض الشق، كذلك يؤدي مقدار ارتفاع الفوهة عن السطح واقتربها منه إلى تغير شكل القوس المباشر لمنطقة القطع، مما يؤثر بشكل مباشر على اتساع وشكل الشق الناتج. بالإضافة إلى ذلك فإن لقطر الفوهة تأثيراً على عرض الشق الناتج، غير أن هذا التأثير يكون بقيمة ثابتة، ويتم تحديد قطر الفوهة المناسب بناءً على قيمة شدة التيار المراد استخدامها، فقطر الفوهة يتناسب طردياً مع قيمة شدة التيار المخطط لاستخدامها [31].

لقد أظهرت نتائج التحليل الإحصائي ANOVA للتجربة التي نفذها Agbonoga سنة 2020 وآخرون ترتيب أولوية أهمية تأثير معلمات عملية القطع على عرض الشق؛ فكان أقرها تأثيراً هو ضغط الغاز الذي كان بنسبة تأثير 41.99%، ثم شدة التيار التي كانت بنسبة 27.51% بينما كان تأثير سرعة القطع الأقل، حيث لم تتجاوز 22.62%. من الممكن تفسير هيمنة تأثير ضغط الغاز على عرض الشق باعتباره المسؤول بشكل مباشر على نثر المعدن المنصهر بفعل حرارة قوس البلازما؛ لذلك فإن المبالغة في ضغط الغاز يؤدي إلى اقتلاع مزيد من المعدن الأمر الذي يؤدي إلى توسيع الشق [24]. كما أكدت نتائج الدراسة التي أجراها Masoudi وآخرون سنة 2019 النتيجة التي خلص إليها Agbonoga ولكن بترتيب مختلف فكانت الأولوية عنده لشدة التيار وليس لضغط الغاز المستخدم [19]. أما Mittal وآخرون في دراستهم التي أجروها سنة 2018 توصلوا لترتيب أهمية تأثير معلمات العملية على عرض الشق فكانت على رأسها شدة التيار تلاها ارتفاع الفوهة ثم سرعة القطع [32]. ومن خلال التوفيق بين نتائج هذه البحوث المتنوعة يمكن القول عامةً أن ضغط الغاز هو المؤثر الأقوى يليه شدة التيار ثم ارتفاع الفوهة وأقلهم تأثيراً هي سرعة القطع.

#### د. الخبث السفلي

الخبث السفلي (Dross) هو تجمع أو تكتل لرغوة المعدن المنصهر من المادة المقطوعة على طول حافة الشق السفلية كما هو موضح بالشكل (6)، غير أنه يمكن إزالتها باستخدام أدوات يدوية كأعمال تشطيب. كما يوجد نوع آخر من هذا التكتل ولكن بنسبة أقل بكثير مما هو عليه عند حافة الشق السفلية وتكون على هيئة طرطشة لرغوة المعدن منتشرة على طول الحافة العلوية للشق تعرف بـ (Spatter) كما هو مبين بالشكل (2). يعتبر التكتل لرغوة المعدن المنصهر عند الحافة السفلية هو الأكثر إضراراً بالعملية لما تحتاجه من أعمال تشطيب إضافية تزيد من تكلفة القطع الكلية، أما ما يعرف بالطرطشة عند الحافة العلوية فهي محدودة جداً ويمكن إهمالها لأنها عادة ما تنفصل عن الحافة بشكل تلقائي أثناء أعمال المناولة العادية. لذلك اهتمت أغلب البحوث والدراسات بالبحث عن سبل التقليل من تكون الخبث السفلي. للخبث السفلي نوعين؛ خبث السرعات العالية، وخبث السرعات البطيئة. وكما يُفهم من المسميات فإن النوع الأول ينشأ بسبب القطع باستخدام سرعات قطع عالية، وذلك بسبب تأخر قوس البلازما عن الفوهة مما يؤدي إلى انحراف مسار القوس عن المسار العمودي المباشر، وبالتالي يُفقد جزء من الطاقة اللازمة لإتمام عملية القطع بشكل تام، بالإضافة إلى ذلك لا يتمكن تيار الهواء المنفوخ من نثر كامل المعدن بعيداً عن منطقة القطع، لذلك يبقى جزء من المصهور ملتصقاً بحافة الشق السفلية. أما النوع الثاني فهو خبث السرعات البطيئة؛ فإن بُطء حركة القطع تعطي وقتاً أطول من اللازم لإنجاز عملية القطع فتعمل الطاقة الإضافية على صهر كمية أكبر من المادة التي ليس بوسع تيار الهواء

الجهود لتقليل هذا العيب إلى أقل حد ممكن؛ فهو ينشأ بسبب هيئة القوس المتسعة عند الوسط ومذبذبة عند الطرفين كما هو موضح بالشكل (3). هذه الهيئة هي المسؤولة بشكل مباشر على هذه الشظفة في شق القطع. فكما كان القوس أكثر انتظاماً وأقل اتساعاً كلما صغر عرض الشق واعتدل مستوى القطع لينتج سطوح أقل ميلاً.



الشكل 4. زاوية ميل سطح القطع [23]

ينتج قوس البلازما في شكل دوامة تدور في اتجاه عقارب الساعة لذلك فإن اتجاه حركة القطع بالنسبة لاتجاه دوران دوامة القوس تؤثر على حدة زاوية الشطف الناتجة. يقسم اتجاه حركة القطع إلى نوعين؛ النوع الأول ويعرف بالقطع الاعتيادي (Conventional) وفيه تكون الحركة عكس عقارب الساعة عند القطع من الخارج ومع عقارب الساعة عند القطع الداخلي. والعكس وهو ما يعرف بالقطع التصاعدي (Climbing) وفيه تكون حركة القطع مع عقارب الساعة للقطع الخارجي وعكس عقارب الساعة عند القطع الداخلي؛ وعادة ما يفضل استخدام النوع التصاعدي لتقليل زاوية الشطف [25].

ومن الملاحظ من الدراسات السابقة التي أجريت بهدف تقليل زاوية الشطف أن شدة التيار وسرعة القطع هما أكثر معلمات عملية القطع تأثيراً على مقدار زاوية الشطف المتكونة. فلقد أشارت نتائج الدراسة التي قام بها Peko وزملائه سنة 2020 لغرض تقليل زاوية الشطف إلى أن سرعة القطع وشدة التيار كان لهما التأثير الأقوى على زاوية الشطف حيث أوضحت نتيجة التحليل الإحصائي ANOVA نسبة تأثير كلا منها فكانتا: 42.55%، 39.05% مرتبة على التوالي [26]. أما الدراسة التي قدمها Patel وزملائه سنة 2017 أشارت إلى أن نسبة تأثير شدة التيار على تحسين زاوية الشطف كانت 44.36% [26]، وهي ليست ببعيدة عن نتيجة الدراسة السابقة. فحين أشارت الدراسة التي قدمها Najm سنة 2019 إلى أن زاوية الشطف تزداد مع ازدياد شدة التيار وسرعة القطع، والعكس بالعكس. بينما يؤدي ازدياد ارتفاع الفوهة إلى حد معين من تقليل زاوية الشطف الناتجة [28]. ويرجع السبب في ذلك إلى ما تم الإشارة إليه سابقاً عند الحديث على تأثير ارتفاع الفوهة وكما تم توضيحه بالشكل (3). Kenan أشار في دراسته سنة 2018 إلى أن تأثير سرعة القطع أقوى بكثير من تأثير ضغط الغاز وفرق الجهد المستخدم [29]. كذلك أثبتت نتائج الدراسة التي قدمها Kechagias وآخرون سنة 2014 أن أكبر تأثير لمعلمات عملية القطع على قيمة زاوية الشطف كان تأثير شدة التيار المستخدم التي وصلت إلى 58.7% في حين أن تأثير سرعة القطع وارتفاع الفوهة لم يتجاوز 19%، 15.7% مرتبة على التوالي [30].

#### ج. عرض الشق

تتم عملية القطع في تقنية البلازما نتيجة لتسليط تيار من الغاز المنفوخ من الفوهة (nozzle) على المنطقة المنصهرة من المعدن بفعل درجة الحرارة العالية التي ينتجها قوس البلازما عند اصطدامه بسطح المعدن فيتترك شقاً في المادة يؤدي إلى قطع المادة إلى قطعتين كما هو موضح بالشكل (5). يؤثر عرض الشق الناتج على دقة مقاسات المادة المقطوعة؛ ففي حالة تجاوز عرض الشق القيمة المتوقعة فإنه يؤدي إلى إنتاج قطع بمقاسات غير صحيحة فينتج عن ذلك خسارة المادة، وبالتالي يُضطر إلى إعادة العمل مرة ثانية فتصبح التكاليف مضاعفة. بالإضافة إلى ذلك تعتبر كمية المادة المنثورة على طول الشق فاقداً لا يمكن الاستفادة منه. لذلك من المهم تقليل عرض الشق إلى أقل قدر ممكن وأن يكون عرض الشق الناتج من عملية القطع قريب قدر الإمكان من القيمة المتوقعة حتى نضمن دقة المقاسات ونقل كمية الفاقد إلى أقل قدر ممكن.

بقوس البلازما تتم بواسطة إزالة جزء من المعدن على هيئة خط (بعرض 2 ملم تقريباً) يعتمد عرضه على تأثير معاملات عملية القطع كما تم الإشارة إليه في الفقرة السابقة. ومع الضبط الأمثل لمعاملات عملية القطع والوصول لأقل عرض للشق يظل الهدف تنفيذ عملية القطع (معدل إزالة المادة) بأسرع وقت ممكن مع المحافظة على جودة القطع المطلوبة؛ أي بمعنى المحافظة على جودة سطح القطع، أقل عرض للشق، أقل مقدار لزاوية الشطف. وكما هو الحال في معايير الجودة الأخرى فإن معدل إزالة المادة يتأثر بمعلمات العملية [39].

أشارت نتائج الدراسة التي قدمها Tejas سنة 2015 والتي تم الاستشهاد بها في الفقرة المتعلقة بخشونة السطح الناتج؛ إلى أن لشدة التيار التأثير الأقوى؛ وفسر ذلك لكونه المصدر المباشر لطاقة القطع. تلاه سرعة القطع لكونها تقلل من زمن القطع بشرط عدم تجاوز حد التوازن بين الطاقين؛ المنتجة والمطلوبة. بينما يأتي ارتفاع الفوهة في المرتبة الأخيرة ولكن بنسبة غير قليلة؛ لكونها المسؤولة على توجيه مركز الطاقة المنتجة إلى نقطة القطع [16].

Sharma سنة 2017 اختبر تأثير سرعة القطع، شدة التيار، ارتفاع الفوهة، وضغط الغاز في أربعة مستويات على معدل إزالة المادة. أشارت نتائج S/N & ANOVA إلى وجود تأثير قيم لكل المعلمات، حيث كان أقوى تأثير لسرعة القطع وأقله لارتفاع الفوهة. كما أظهرت نتائج التحليل S/N أن تأثير سرعة القطع كان إيجابياً طردياً، وبالعكس فإن تأثير ضغط الغاز كان عكسياً ثم تحول إلى إيجابياً طردياً، وكانت أفضل نتائجه عند أعلى مستوى للضغط. وقد فسر الباحثون ذلك إلى أن زيادة الضغط تزيد من فرق جهد القوس مما يولد مزيداً من الطاقة الحرارية التي ترفع معدل الإزالة. أما شدة التيار فكانت في البداية إيجابية طردية حتى بلوغ القمة عند المستوى الثالث ثم تحولت إلى عكسية، وعلل الباحثون ذلك بسبب اضطراب قوس البلازما وفقدان انتظامه عند المبالغة في قيمة شدة التيار. وبنفس أسلوب تأثير شدة التيار ولكن بمستوى أقل كان تأثير ارتفاع الفوهة [35].

Patel سنة 2018 درس تأثير سرعة القطع في ستة مستويات وضغط الغاز المساعد في ثلاثة مستويات فقط على خشونة السطح ومعدل إزالة المادة. أشارت نتائج الدراسة إلى أن سرعة القطع تأثيراً ملحوظاً على كلا المخرجين، بينما يقتصر تأثير ضغط الغاز على معدل إزالة المادة فقط [20].

سنة 2018 قدم Kumar وآخرون بحثاً تناولوا فيه دراسة تأثير كل من شدة التيار، ضغط الغاز المساعد، سرعة القطع، وارتفاع الفوهة في ثلاثة مستويات على أربعة معايير من معايير جودة القطع إحداهما معدل إزالة المادة MRR. لقد أشارت نتائج الدراسة إلى فاعلية المعلمات الأربعة على مجمل معايير الجودة ولم يورد تفصيل تأثير هذه المعلمات على المعايير بشكل مستقل لإتباعه لإستراتيجية التحسين متعدد المعايير، كما أشارت نتائج التحليل الإحصائي ANOVA إلى أن شدة التيار هي المعلمة الأقوى تأثيراً تلاها ضغط الغاز، سرعة القطع ثم ارتفاع الفوهة [17].

سنة 2019 قدم Gautam وآخرون دراسة عن تأثير ضغط الغاز، سرعة القطع، شدة التيار، بعد الفوهة في مستويين، على معدل إزالة المادة MRR. أشارت نتائج التحليلات إلى أن أكبر تأثير كان لسرعة القطع، حيث أشارت النتائج إلى أن زيادة سرعة القطع تؤدي إلى زيادة معدل إزالة المادة، بالمقابل لم تسجل الدراسة تأثيراً يذكر لباقي المعلمات. علل الباحث السبب في عدم ظهور تأثير يذكر لباقي المتغيرات بسبب قلة عدد المحاولات (L9)، لكن ذلك غير مؤكد وذلك لكثرة الدراسات التي أنجزت بنفس عدد المحاولات وقدمت نتائج منطقية، لكن السبب الأقرب هو قلة وتقارب قيم المستويات فقد كانت الدراسة لمستويين فقط وهذا نادر وغير معمول به [23].

سنة 2018 قدم Bhowmick وآخرون بحثاً تناولوا فيه دراسة تأثير سرعة القطع، ضغط الغاز، سمك المادة الخام على معدل إزالة المادة. لقد أشارت نتائج البحث إلى أن أعلى قيمة لمعدل إزالة المادة قد تحقق عن المستويات العليا للمتغيرات الثلاثة؛ وهو المتوقع لطبيعة العلاقة الطردية المباشرة لهذه المتغيرات مع هذا المخرج تحديداً. فزيادة السرعة وسمك المادة تأثيرهما مباشر وواضح، أما ضغط الغاز فهو يكمن في التمكين من إزالة المادة رغم ارتفاع سرعة القطع فلو انخفض ضغط الغاز مع ارتفاع سرعة القطع قد ينتج عنها عدم إنجاز عملية القطع، كما أن ارتفاع ضغط الغاز يزيد من كفاءة عملية نثر المادة وبالتالي رفع معدل الإزالة [21].

سنة 2017 قدم Utsav وآخرون دراسة حول تأثير ارتفاع الفوهة، سرعة القطع، جهد وشدة تيار قوس البلازما في ثلاثة مستويات، على جودة سطح القطع ومعدل إزالة المادة، وذلك عند قطع صفائح Steel

عبد العظيم سالم باله / تأثيرات معاملات عملية لقطع البلازما على جودة منتجها

نثرها بشكل كامل؛ فيعمل تيار الهواء على نثر الجزء المقابل له بشكل مباشر ويبقى الجزء الغير المقابل للتيار ملتصقاً بحافة القطع مكوناً ما يعرف بخبث السرعات البطيئة. لعلاج هذا النوع من العيوب يكون عن طريق إعادة ضبط سرعة القطع، تحديد شدة التيار بما يتناسب مع سرعة القطع المستخدمة، بالإضافة إلى ضبط ارتفاع الفوهة لما له من تأثير على تقريب وإبعاد نقطة النفث من منطقة القطع [33].



الشكل 6. خبث حافة القطع السفلية [34]

بالرغم من ندرة الدراسات المنجزة في هذا الجانب إلا أنه يمكننا التذليل على ما تقدمه بنتائج الدراسة التي توصل إليها Sharma وآخرون سنة 2020؛ التي أجروها لدراسة تأثير شدة التيار، فرق الجهد، سرعة القطع وسمك المعدن المقطوع على معدل تكون الخبث. لقد أشارت الدراسة إلى التأثير المتداخل للمعاملات؛ ففي حالة تكون خبث السرعات العالية ينخفض معدل تكونه مع زيادة شدة التيار المستخدمة؛ أي بمعنى يجب زيادة شدة التيار عند القطع بسرعات مرتفعة للحصول على منتجات خالية من الخبث؛ وذلك لأن ارتفاع طاقة القوس يسرع عملية القطع (صهر المعدن ثم نثره) وتعويض تقلص زمن القطع بسبب ارتفاع السرعة، كما إن زيادة شدة التيار تعمل على رفع درجة الحرارة الناتجة مما يرفع من كفاءة عملية الصهر وزيادة سيولة المصهور مما يسهل من عملية النثر. بالإضافة إلى ذلك لاحظ الباحثون ارتفاع معدل تكون الخبث مع ازدياد فرق الجهد نظراً لضعف طاقة القوس وانتشار اللهب بسبب زيادة فرق الجهد مما يساعد في تكون ونمو الخبث. كما لاحظ الباحثون ارتفاع معدل تكون الخبث مع ازدياد سمك المعدن عند المستويات المنخفضة لشدة التيار، ويحدث العكس عند المستويات العالية لشدة التيار؛ أي تقلص معدل تكون الخبث مع ازدياد سمك المعدن [35].

قام Gani وآخرون سنة 2021 بإجراء دراسة حول إمكانية استخدام تقنية البلازما في قطع النماذج الثلاثية الأبعاد؛ حيث صمموا عينات مزودة بفتحة يفصل بينها فراغ. من ضمن النتائج التي توصل إليها الباحثون أن معدل الخبث المتكون في الصاج السفلي أكبر من ذلك المتكون عند حافة القطع في الصاج العلوي. ومن الممكن تفسير هذه الظاهرة أن موضع القوس بالنسبة للصاج العلوي أكثر ملائمة من موضعه بالنسبة للصاج السفلي مما ترتب عليه زيادة نسبة الخبث. وبالإضافة إلى ذلك فإن تيار الهواء المنفوث سيتأثر بسبب وضعية القطع الاستثنائية؛ فوجود صاجين بينهما فراغ يعمل على تشتيت جزء من التيار فيضعف عن نثر كافة المصهور المتكون عند حافة القطع الثانية [36].

Nedić وآخرون سنة 2020 استخدموا تقنية الذكاء الاصطناعي fuzzy logic model لمحاكاة العلاقة بين معاملات عملية القطع (سرعة القطع، شدة التيار، ارتفاع الفوهة) على ارتفاع الخبث المتكون عند قطع سبيكة الألومنيوم 5083. أشارت نتائج الدراسة أن سرعة القطع لها التأثير الأكبر على ارتفاع الخبث المتكون تليها شدة التيار بينما يبقى التأثير الأقل لارتفاع الفوهة. كما أوضحت الدراسة تأثيرات مشتركة متفاوتة لتفاعلات المعلمات؛ حيث كان التأثير المشترك لسرعة القطع مع شدة التيار التأثير الأبرز بالمقارنة مع التفاعلات الأخرى، وكان أقلها التأثير المشترك بين ارتفاع الفوهة مع شدة التيار [37].

أشارت الدراسة التي قدمها Rajamani وآخرون سنة 2018 أن القطع بمستوى مرتفع لارتفاع الفوهة يزيد من معدل تكون الخبث؛ وأشاروا إلى أن الصور الميكروسكوبية للحافة بعد تعريضها وأوضحت وجود خط من إعادة تصلب المادة المنصهرة ممتد على طول حافة القطع، فارتفاع الفوهة لمستوى عال يبعد الحافة السفلية لحافة القطع عن مواجهة تيار الهواء المنفوث مما يسمح لالتصاق وإعادة تصلب جزء من المادة المنصهرة [38].

معدل إزالة المادة

قد لا يُعد هذا المعيار من المعايير الرئيسية لجودة القطع بالبلازما، فهو لا يتصل بعملية القطع في حد ذاتها ولكن يُعنى بكفاءة العملية. عملية القطع

## 5. الاستنتاجات

اختص هذا العمل بمراجعة وتلخيص مضامين البحوث التي أُنجزت بهدف تحسين جودة عمليات القطع باستخدام تقنية البلازما الهوائية، وذلك من خلال دراسة تأثير معلمات عملية القطع على عناصر جودة العملية، وتحديد القيم المثلى لهذه المعلمات لتحقيق أعلى مستويات الجودة للعملية حسب الظروف التشغيلية للعملية. اتبعت جُلّ البحوث نفس الأسلوب البحثي المتمثل في تخصيص عدد معين من معلمات العملية التي يراها الباحث أنها الأكثر أهمية حسب أولوية معايير جودة العملية التي يقدمها على غيرها، وباستخدام أحد الطرق الإحصائية لتصميم التجارب لدراسة تأثير هذه المعلمات على جودة العملية والكشف عن طبيعة العلاقة بينهما وتحديد القيم المثلى لها لتحقيق أعلى مستويات الجودة. من الممكن تلخيص مضمون ما تم استعراضه من بحوث في النقاط التالية، مع ملاحظة أن بعض البحوث قد شذت ببعض نتائجها عن عموم الاستنتاجات التي توصلت إليها أغلب البحوث المعروضة في هذه الدراسة؛ بسبب بعض الظروف الاستثنائية للعملية لهذه البحوث الشاذة أو لضيق حدود مستويات قيم المعلمات التي تم دراستها في هذه البحوث.

1. تعتبر تقنية القطع بالبلازما المُسيرة حاسوبياً (CNC Plasma) من أهم التقنيات الغير تقليدية لقطع التصاميم المعقدة وبكفاءة وإنتاجية عاليين.
2. تتوقف جودة عملية القطع بهذه التقنية على عدة معلمات منها رئيسية: شدة تيار، سرعة القطع، ضغط الغاز المساعد، ارتفاع الفوهة. وأخرى ثانوية أقل تأثيراً: فرق الجهد ومعدل تدفق الغاز المساعد. وأن الضبط الرشيد لقيم هذه المعلمات هو السبيل الوحيد لتحقيق جودة القطع المرجوة.
3. تُقيم جودة العملية من خلال أربعة معايير: جودة سطح القطع، عرض الشق، زاوية الشطف، الخلو من الخبث السُفلي.
4. لا توجد قيم مثالية ثابتة يمكن استخدامها في جميع حالات القطع، بل لكل حالة قطع قيم مثالية مختلفة؛ ويقصد بحالة القطع نوع وسمك المعدن.
5. تتباين قوة تأثير المعلمات فيما بينها على حسب معيار الجودة الخاضع للدراسة، ولكنه بالعموم يمكن القول بأن شدة التيار وسرعة القطع هما أقوى تأثيراً من ضغط الغاز وارتفاع الفوهة.
6. شدة التيار. تعتمد آلية تأثير شدة التيار على قاعدة التوازن بين الطاقة المنتجة والطاقة الكافية لإنجاز عملية القطع؛ فإذا قلت الطاقة المنتجة عن الطاقة الكافية فشلة العملية ولن تنجز عملية القطع بشكل كامل، أما إذا زادت الطاقة المنتجة عن الطاقة الكافية فإن المقدار الفائض من الطاقة يعمل في اتجاه سلبي يضر بجودة العملية. وبالتالي الميزان في تحديد مقدار شدة التيار هو تحقيق التوازن بين الطائفتين.
7. سرعة القطع. تقع القيمة المثالية لسرعة القطع عند المنطقة الوسطى بين السرعة العالية التي لا تمنح القوس الوقت الكافي للتغلغل في سمك المعدن والسرعة البطيئة التي تبقى القوس لمزيد من الوقت بعد انجاز عملية القطع مما يعطي المنطقة المقطوعة مزيد من الطاقة تؤثر سلباً على جودة العملية. كما أن هذه المعلمة مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بشدة التيار، فمن الواجب ضبط كلا المعلمتين بشكل متزامن وبمراعاة خصائص المعدن المقطوع.
8. ارتفاع الفوهة. هي المعلمة المسؤولة على تحديد الجزء (من القوس) المباشر لعملية القطع الأمر الذي يحدد شكل ومقدار زاوية الشطف. الارتفاع المبالغ فيه ينتج قوس بلازما طويل غير مستقر وفاقد التركيز مما يوسع منطقة القطع وهذا يؤثر سلباً على جودة العملية، أما الاقتراب الكبير للفوهة يدفع القوس تحت السطح السفلي للمعدن فيفقد القوس جزء كبير من الطاقة مما يضر بجودة العملية أيضاً.
9. ضغط الغاز. يُعد هذا المعلم الأقل تأثيراً تقريباً، فالقيمة المثالية لضغط الغاز تغطي مدى واسع من أنواع المعادن وسمكات كبيرة مما يجعل هذا المعلم أقل تأثيراً، ولكن في نفس الوقت يجب ملاحظة أهمية هذا المعلم في تحديد قوة زخم الحركة لتدفق الغاز اللازمة لنثر المعدن المصهور بعيداً عن منطقة القطع، والذي بدوره ينجز عملية القطع.
10. الجودة الشاملة للعملية تكمن في تحقيق التوازن بين المعلمات الأربعة الرئيسية سالفة الذكر وبهدف تحقيق أقصى مستويات الجودة لكل معيار من معايير الجودة الأربعة مع عدم الإضرار بالمعايير الأخرى.

E250-IS 2062. أشارت نتائج التحليل ANOVA إلى أن أعلى تأثير لمعلمت العملية فيما يخص معدل إزالة المادة كان لفولتية القوس والذي وصلت نسبته إلى 54.89% ثم سرعة القطع ثم ارتفاع الفوهة وأخيراً لشدة التيار التي كانت نسبة مساهمته 8.46% [18].

سنة 2018 قدم Mittal وآخرون دراسة حول تأثير شدة التيار، سرعة القطع وارتفاع الفوهة في ثلاثة مستويات على معدل إزالة المادة وعرض الشق. لقد أشارت نتيجة الدراسة إلى أن شدة التيار له التأثير الأقوى بين المعلمات المذكورة. كما أظهرت الدراسة اختلاف القيم المثلى للمعلمات عند اعتبار كل مخرج على حده، وكذلك الحال فإن القيم المثلى عند اعتبار المخرجين معاً (استراتيجية التحسين المتعدد) تكون مختلفة عن الحالة الأولى. ويرجع السبب في ذلك إلى أن استراتيجية تحسين معدل إزالة المادة تقوم على تعظيم النتيجة بينما العكس في حالة عرض الشق [32].

سنة 2018 قدم Suresh وآخرون دراسة حول تأثير فرق الجهد وشدة التيار المستخدم، سرعة القطع في ثلاثة مستويات على معدل إزالة المادة، خشونة السطح، وزمن القطع. سجلت الدراسة أن تأثير شدة التيار على معدل إزالة المادة يأتي في المرتبة الثانية بعد تأثير سرعة القطع ولكنه يسبق تأثيره تأثير فرق الجهد، وأن تأثيره يكون طردياً عند المستويات المتوسطة إلى العالية قليلاً، ثم تنقلب إلى علاقة عكسية عند ارتفاع شدة التيار إلى المستويات العالية والعالية جداً [40].

من خلال ما تم عرضه من أهم البحوث التي أُنجزت في هذه المساحة والنتائج والتحليلات التي توصل إليها الباحثون، يمكن فهم طبيعة العلاقة بين معلمات العملية وجودة مخرجاتها من خلال تصور طبيعة كل معلمة ومخرج، فشدة التيار هي مصدر الطاقة المنتجة لإنجاز عملية القطع، سرعة القطع هي معدل التغذية بالمعدن المراد صهره وإزالته، ضغط الغاز هو مصدر التغذية بالأكسجين اللازم لعملية الاحتراق وكذلك نثر المعدن المنصهر بعيداً عن منطقة القطع، ارتفاع الفوهة تتحكم في هيئة قوس البلازما وتركيز الطاقة عند نقطة القطع، فرق الجهد يؤثر جزئياً على كمية الطاقة المنتجة. وبالتالي فإن تأثير كل معلمة من هذه المعلمات يتحدد بناءً على طبيعته، فشدة التيار تتحكم في زيادة أو نقصان كمية الطاقة المتولدة في وحدة الزمن، أما سرعة التغذية تحدد كمية الطاقة المطلوبة بناءً على كمية المعدن التي تعرضها للقطع في وحدة الزمن، ولتحقيق أعلى مستوى جودة ممكن، يجب تحقيق التوازن بين الطاقة المتولدة والمطلوبة، فتغلب أحدهما عن الأخرى يخل بجودة العملية. كذلك يدخل ضغط الغاز في رفع كفاءة الطاقة المنتجة من خلال توفير الكمية الكافية من الأكسجين فهو بذلك يشترك مع شدة التيار في تحديد كمية الطاقة المنتجة من جهه وكفاءة نثره للمعدن المنصهر من جهة أخرى. أما ارتفاع الفوهة فهو أيضاً من جهة يشترك مع شدة التيار وضغط الغاز في تحديد كفاءة الاحتراق من خلال السيطرة على هيئة القوس وتحديد موضع مركز الطاقة المتولدة، ومن جهة ثانية يؤثر على كفاءة ميكانيكية نثر الغاز المنفوث للمعدن المنصهر من خلال قرب وبعد الفوهة من نقطة القطع.

كما يمكن القول بأن ظهور عيوب عملية القطع الرئيسية متوقف على نسبة الخلل في التوازن بين تأثيرات معلمات العملية؛ فتكون الخبث يزداد بسبب زيادة كمية المعدن المصهور الناتج عن زيادة شدة التيار أو انخفاض سرعة القطع، كذلك يمكن أن يكون بسبب انخفاض خزم الهواء المنفوث الناتج عن بعد الفوهة الزائد عن حده أو انخفاض ضغط الغاز. بينما تسوء حالة سطح القطع يكون بسبب المبالغة في السرعة أو شدة التيار. أما اتساع عرض فإنه يكون بسبب زيادة كمية الطاقة المنتجة عم هو مطلوب أو زيادة ضغط الغاز عن الحد الكافي مما يؤدي إلى نثر كمية أكبر من المعدن. في حين أن زاوية ميل مستوى القطع فهي تنتج بسبب ضعف في طاقة القوس مما ينتج عنه نقص في كمية المعدن المصهور كلما تغلغل القوس في سمك المعدن أو المبالغة في السرعة مما لا يبقى الوقت كافي لإتمام عملية القطع على امتداد عمق المعدن.

ومن خلال فهم هذه العلاقات وملاحظته طبيعة الخلل في عملية القطع يمكن للمستخدم إعادة ضبط إعدادات العملية بما يحقق التوازن بين تأثيرات معلماتها. ولكي تكون الصورة الكلية لكل هذه البحوث واضحة للقرّاء تم تلخيص مضمون هذه البحوث في الملحقين 1-2 حيث تم فيها حصر: المعلمات ومدياتها والمخرجات التي تم العمل عليها، قيمة تأثير كل معلمة على كل مخرج، القيم المثالية لكل معلمة مقابل كل مخرج أو المخرجات بشكل مشترك.

material using grey relational analysis. *Technix International Journal for Engineering Research*, 2(3), 120-127.

- [17] Kumar, S. (2018). Experimental study on parameters optimization in CNC plasma arc cutting (AISI 206 steel) using Taguchi approach. *International Journal of Technical Research and Science*, 3(6), 198-205.
- [18] Desai, U., Barodiya, D., Rathod, S., & Lad, A. (2017). Plasma Arc Cutting Response to IS 2062 (E250) Material. *IJRST-International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 3(09).
- [19] Masoudi, S., Mirabdolahi, M., Dayyani, M., Jafarian, F., Vafadar, A., & Dorali, M. R. (2019). Development of an intelligent model to optimize heat-affected zone, kerf, and roughness in 309 stainless steel plasma cutting by using experimental results. *Materials and Manufacturing Processes*, 34(3), 345-356.
- [20] Patel, P., Soni, S., Kotkunde, N., & Khanna, N. (2018). Study the effect of process parameters in plasma arc cutting on Quard-400 material using analysis of variance. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 6023-6029.
- [21] Bhowmick, S., Basu, J., Majumdar, G., & Bandyopadhyay, A. (2018). Experimental study of plasma arc cutting of AISI 304 stainless steel. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 4541-4550.
- [22] Ramakrishnan, H., Balasundaram, R., Ganesh, N., & Karthikeyan, N. (2018). Experimental investigation of cut quality characteristics on SS321 using plasma arc cutting. *Journal of the Brazilian society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(2), 1-11.
- [23] Gautam, P. K., & Gupta, V. (2019). Analysis of Process Parameters of Plasma Arc Cutting Using Design of Experiment. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* e-ISSN, 2395-0056.
- [24] Agbonoga, E. A., Adedipe, O., Okoro, U. G., Usman, F. J., Obanimomo, K. T., & Lawal, S. A. (2020). Effect of Process Parameters on the Surface Roughness and Kerf Width of Mild Steel during Plasma Arc Cutting Using Response Surface Methodology.
- [25] <https://torchmate.com/news/78/121/Basic-Cut-Troubleshooting>, 22/9/2022; 08:20.
- [26] Peko, I., Nedić, B., Dunder, M., & Samardžić, I. (2020). Taguchi optimization of bevel angle in plasma jet cutting process of aluminium alloy 5083. *J. Prod. Eng.*, 23, 1-6.
- [27] Patel, S. B., & Vyas, T. K. (2017, June). Parametric Investigation of Plasma Arc Cutting on Aluminium Alloy 6082. In *Proceedings of the International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering*, Pune, India (pp. 1-2).
- [28] Najm, V. N. (2019, December). Optimization of plasma cutting parameters on HAZ and bevel angle for low carbon steel using response surface methodology. In *AIP Conference Proceedings (Vol. 2201, No. 1, p. 020019)*. AIP Publishing LLC.
- [29] Kenan, M., Derzija, B., Mugdim, P., & Ahmet, C. (2018). Optimization of process parameters in plasma arc cutting using Tosi's method. In *Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium (pp. 0202-0209)*.
- [30] Kechagias, J., Stavropoulos, P., Maropoulos, S., & Salonitis, K. (2014). On the multi-parameter optimization of CNC plasma-arc cutting process quality indicators using Taguchi Design of Experiments. *Recent Advances in Electrical Engineering*, 6, 128-133.
- [31] <https://www.hypertherm.com/support/system-support/maintenance-and-use/cut-quality/cut-angularity/#:~:text=A%20good%20rule%20of%20thumb%20for%20estimating%20the,cutting%20have%20an%20adjustable%20parameter%20called%20kerf%20compensation.> 24/9/2022, 10:15.
- [32] Mittal, S., & Mahajan, M. D. (2018). Multi-response parameter optimization of CNC plasma arc machining using Taguchi methodology. *Industrial Engineering Journal*, 11(12), 1550-1559.
- [33] <https://americantorchtip.com/blog/how-to-reduce-dross-and-slag-during-plasma-cutting/>, 27/9/2022, 12:43.
- [34] <https://www.lincolnelectric.com/en/welding-and-cutting-resource-center/plasma-cutting-resource-center/cutting-solutions/cut-quality-problem---dross-in-carbon-steel>, 29/9/2022, 10:05.
- [35] Sharma, D. N., & Kumar, J. R. (2020). Optimization of dross formation rate in plasma arc cutting process by response surface method. *Materials Today: Proceedings*, 32, 354-357.
- [36] Sharma, S., Gupta, M., Kumar, R., & Bindra, N. S. (2017). Experimental Analysis and Optimization of Process Parameters in

## 6. التوصيات

من خلال ما تم استعراضه من ملخص لم تم التوصل إليه من نتائج للبحوث المتعلقة بتحسين جودة عملية القطع باستخدام تقنية البلازما، ومن خلال ملاحظة التباين والتوافق الواقع بين نتائج هذه البحوث يوصي الباحث بالنقاط التالية:

1. التحري الدقيق لمدى قيم المعلمت التي تخضع للدراسة، فضيق المدى يقد لا يظهر التأثير الحقيقي للمعلمة قيد الدراسة، وبالتالي تكون نتائج المرصودة غير دقيقة.
2. استخدام الطرق الإحصائية متعددة الأهداف يعطي نتائج أقرب للواقعية من استخدام الطرق ذات الهدف الواحد.

## المراجع

- [1] Agrawal, P. K., Bagal, D. K., Pattanaik, A. K., Barua, A., Jeet, S., Parida, B., & Panda, S. N. (2019). Experimental investigation of cutting parameters in plasma arc cutting using advanced optimization approach: a comprehensive review. *International Journal of Applied Engineering Research*, 14(13), 27-30.
- [2] Bogaerts, A., & Neyts, E. C. (2018). Plasma technology: an emerging technology for energy storage. *ACS Energy Letters*, 3(4), 1013-1027.
- [3] Lazarevic, A., & Lazarevic, D. (2022). Effects of plasma arc cutting process parameters on the cutting speed optimization based on the required cut quality. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 38, 836-843.
- [4] Ilii, S. M., Coteata, M., & Munteanu, A. (2010). Experimental results concerning the variation of surface roughness parameter (Ra) at plasma arc cutting of a stainless steel workpiece. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2(1), 31-36.
- [5] Karthick, M., Anand, P., Meikandan, M., Sekar, S., Natrayan, L., & Bobe, K. (2022). Optimization of plasma arc cutting parameters on machining of Inconel 718 superalloy. *Journal of Nanomaterials*, 2022.
- [6] Kechagias, J., Billis, M., & Maropoulos, S. (2010). A parameter design of CNC plasma-arc cutting of carbon steel plates using robust design. *International Journal of Experimental Design and Process Optimisation*, 1(4), 315-326.
- [7] Panchal, K. S., & Mungla, M. J. (2020). A review on optimization of plasma arc cutting parameters using taguchi method for EN19. *Journal of Science and Technology*, 5(3), 172-191.
- [8] Ramakrishnan, H., Balasundaram, R., Ganesh, N., & Karthikeyan, N. (2018). Experimental investigation of cut quality characteristics on SS321 using plasma arc cutting. *Journal of the Brazilian society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(2), 1-11.
- [9] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/cutting-processes-plasma-arc-cutting-process-and-equipment-considerations-051>
- [10] <https://www.machinemfg.com/plasma-cutting-machine-guide/> 04/10/2022, 12:10.
- [11] <https://thebestcnc.com/research-on-cnc-plasma-cutting-technology-and-application/> 08/10/2022, 10:34.
- [12] Maity, K. P., & Bagal, D. K. (2015). Effect of process parameters on cut quality of stainless steel of plasma arc cutting using hybrid approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(1-4), 161-175.
- [13] Özek, C., Çaydaş, U., & Unal, E. (2012). A fuzzy model for predicting surface roughness in plasma arc cutting of AISI 4140 steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(1), 95-102.
- [14] Tsiolikas, A., Kechagias, J., Salonitis, K., & Mastorakis, N. (2016). Optimization of cut surface quality during CNC Plasma Arc Cutting process.
- [15] Patel, P., Nakum, B., Abhishek, K., Kumar, V. R., & Kumar, A. (2018). Optimization of surface roughness in plasma arc cutting of AISID2 steel using TLBO. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 18927-18932.
- [16] Tejas, P., Patel, V., & Patel, P. (2015). Parametric optimization of plasma arc cutting process parameter for inconel718 alloy



- Plasma Arc Cutting Machine of EN-45A Material Using Taguchi and ANOVA Method. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 11(7), 1394-1398.
- [37] Gani, A., Ion, W., & Yang, E. (2021). Experimental investigation of plasma cutting two separate thin steel sheets simultaneously and parameters optimisation using taguchi approach. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 1013-1023.
- [38] Nedić, B., Dunder, M., & Samardžić, I. (2020). Modelling of dross height in plasma jet cutting process of aluminium alloy 5083 using fuzzy logic technique. *Tehnički vjesnik*, 27(6), 1767-1773.
- [39] Rajamani, D., Ananthakumar, K., Balasubramanian, E., & Paulo Davim, J. (2018). Experimental investigation and optimization of PAC parameters on Monel 400™ superalloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(16), 1864-1873.
- [40] Suresh, A., & Diwakar, G. (2021). Optimization of process parameters in plasma arc cutting for TWIP steel plates. *Materials Today: Proceedings*, 38, 2417-2424.

القيم المثالية للمعاملات مقابل معايير تقييم جودة العملية						نسبة تأثير (%) / ترتيب المعلمات						مديات المعلمات						م	المرجع	
منطقة التآثر الحراري HAZ	معدل إزالة المادة MMR	خشونة السطح Ra	زاوية الميل B.a	معدل الخبث dross	عرض الشق Kerf	سمك المعدن (t) [mm]	فرق الجهد (v) [V]	ضغط الغاز (P) [Par]	ارتفاع الفوهة (ST) [mm]	شدة التيار (I) [A]	سرعة القطع (S) [mm/min]	سمك المعدن (t) [mm]	فرق الجهد (v) [V]	ضغط الغاز (P) [Bar]	ارتفاع الفوهة (ST) [mm]	شدة التيار (I) [A]	سرعة القطع (S) [mm/min]			
	✓		✓		✓													1م	[1]	
S=500, I=40, ST=2, P=4.5						--	--	--	--	--	--			4	1.5	30	150	2م		
														4.5	2	35	325	3م		
		✓				1.47	--	--	--	4.8	6.8	4	--	--	--	45	1000	1م	[4]	
S=1000, t=4, I=130											6				130	1800	2م			
			✓			6.22	V.S	V.S	15.9	50.89	V.S	6.5	100	4.5	3.3	30	1000	1م	[5]	
S=4000, I=110, ST=3.3, P=4.8, V=100, t=6.5											10	130	4.65	6.4	70	2500	2م			
											--	160	4.8	9.5	110	4000	3م			
✓		✓			✓	--	--	6.35 (Ra)	10.17 (Ra)	82.71 (Ra)	0.75 (Ra)	--	--	48	2	40	1500	1م	[7]	
For Ra. I=40, SOD=2, P=796.812								V. small (Kerf)	V. small (Kerf)	97.5 (Kerf)	V. small (Kerf)									2م
For Kerf. I=79.99, SOD= 2.014, P=791.27														52	3	60	3000			
For HAZ. I=40, SOD=2, P=774.66														55	4	80	4500	3م		
		✓				37.69	--	--	--	8.28	42.46	6	--	--	--	80	500	1م	[11]	
لا توجد											8					130	750	2م		
											10					1000	3م			
											12					1500	4م			
											15					2000	5م			
		✓				--	11.6	--	5.3	--	5.9	--		145	3	--	2000	1م	[12]	
S=2000, SOD=3.6, V=155														150	3.6	--	2600	2م		
														155	4.2	--	3200	3م		
	✓	✓				--	--	9.27 (MRR) not. seg (Ra)	--	--	84.8 (MRR) 82.4 (Ra)	--		4.8	--	--	1000	1م	[13]	
S=4000, P=6.2														5.51	--	--	1500	2م		
														6.20	--	--	2500	3م		
															--	--	3000	4م		
															--	--	3500	5م		
✓	✓	✓				--	--	--	--	--	--	--		--	2.5	200	2500	1م	[14]	
I=300, S=3500, ST=3.5														3.5	250	3000	2م			
														4.5	300	3500	3م			
	✓	✓				--	54.89 (MMR) 11.89 (Ra)	--	--	8.46 (MMR) 1.13 (Ra)	20.56 (MMR) 73.27 (Ra)	--		130	--	--	40	600	1م	[16]
S=600, V=130, I=40														140	--	--	42.5	700	2م	
														150	--	--	45	800	3م	

تابع الملحق-1

القيم المثالية للمعاملات مقابل معايير تقييم جودة العملية						نسبة تأثير (%) أو ترتيب المعاملات						مستويات المعاملات						م	المرجع
منطقة التأثير الحراري HAZ	معدل إزالة المادة MMR	خشونة السطح Ra	زاوية الميل B.a	معدل الخبث dross	عرض الشق Kerf	سمك المعدن (t) [mm]	فرق الجهد (v) [V]	ضغط الغاز (P) [Par]	ارتفاع الفوهة (ST) [mm]	شدة التيار (I) [A]	سرعة القطع (S) [mm/min]	سمك المعدن (t) [mm]	فرق الجهد (v) [V]	ضغط الغاز (P) [Bar]	ارتفاع الفوهة (ST) [mm]	شدة التيار (I) [A]	سرعة القطع (S) [mm/min]		
✓		✓			✓									3		80	1500	1م	[17]
For Ra (S=1500, I=80, P=6.7)														5		105	1800	2م	
For HAZ (S=2100, I=80, P=4.55)														7		130	2100	3م	
For Kerf (S=2100, I=80, P=4.45)																			
	✓	✓						9.27 (Ra)			84.8 (MMR)			4.48			1000	1م	[18]
S=400, P=6.2											82.4 (Ra)			5.5		1500	2م		
													6.2			2500	3م		
																3000	4م		
																3500	5م		
																4000	6م		
	✓	✓				20.5 (MRR)		Not sig. (MRR)			66.1 (MRR)	4		6			151	1م	[19]
P=8, S=417, t=8						Not sig. (Ra)		67.9 (Ra)				6		7			214	2م	
												8		8			217	3م	
✓		✓			✓			6.35 (Ra)	10.17 (Ra)	82.71 (Ra)	0.75 (Ra)			48.2	2	40	1500	1م	[20]
For Ra (S=1612.87, I=40, ST=2, P=54.9)														51.7	3	60	3000	2م	
For Kerf (S4437.4, I=80, ST=2.01, P=54.5)														55.1	4	80	4500	3م	
For HAZ (S=1679, I=40, ST=2, P=53.4)										99.7 (HAZ)									
	✓	✓												6	2	150	400	1م	[21]
For Ra (P=6, I=150, S=400, ST=2)														7	4	200	600	2م	
For MMR (P=5, I=150, S=600, ST=4)																			
		✓			✓			32.16 (Ra)		33.43 (Ra)	27.97 (Ra)			5.5		60	1000	1م	[22]
For Kerf (S=1000, I=100, P=5)								41.99 (kerf)		27.51 (kerf)	22.62 (kerf)			6		80	1500	2م	
For Ra (S=2000, I=100, P=5)														6.5		100	2000	3م	
			✓						4.08	39.05	42.55				1	45	2000	1م	[24]
S=2000, I=85, ST=2														1.5	65	4000	2م		
														2	85	6000	3م		

تابع الملحق-1

القيم المثالية للمعاملات مقابل معايير تقييم جودة العملية						نسبة تأثير (%) / ترتيب المعلمات						مديات المعلمات						م	المرجع
منطقة التأثير الحراري	معدل إزالة المادة	خشونة السطح Ra	زاوية الميل B.a	معدل الخبث dross	عرض الشق Kerf	سمك المعدن (t) [mm]	فرق الجهد (v) [V]	ضغط الغاز (P) [Par]	ارتفاع الفوهة (ST) [mm]	شدة التيار (I) [A]	سرعة القطع (S) [mm/min]	سمك المعدن (t) [mm]	فرق الجهد (v) [V]	ضغط الغاز (P) [Bar]	ارتفاع الفوهة (ST) [mm]	شدة التيار (I) [A]	سرعة القطع (S) [mm/min]		
HAZ	MMR		✓		✓													1م	[25]
	✓																	2م	
																		3م	
																		4م	
																		1م	[26]
																		2م	
																		3م	
																		4م	
			✓	✓														1م	[27]
																		2م	
																		3م	
																		4م	
																		1م	[28]
																		2م	
																		3م	
																		1م	[30]
																		2م	
																		3م	
																		1م	[32]
																		2م	
																		3م	
																		4م	
																		5م	
																		1م	[33]
																		2م	
																		3م	
																		4م	
																		1م	[35]
																		2م	
																		3م	



تابع الملحق-1

القيم المثالية للمعلّات مقابل معايير تقييم جودة العملية						نسبة تأثير (%) / ترتيب المعلّات						مديّات المعلّات						م	المرجع	
منطقة التأثير الحراري HAZ	معدل إزالة المادة MMR	خشونة السطح Ra	زاوية الميل B.a	معدل الخبث dross	عرض الشق Kerf	سمك المعدن (t) [mm]	فرق الجهد (v) [V]	ضغط الغاز (P) [Pa]	ارتفاع الفوهة (ST) [mm]	شدة التيار (I) [A]	سرعة القطع (S) [mm/min]	سمك المعدن (t) [mm]	فرق الجهد (v) [V]	ضغط الغاز (P) [Bar]	ارتفاع الفوهة (ST) [mm]	شدة التيار (I) [A]	سرعة القطع (S) [mm/min]			
		✓			✓			8.22 Kerf	1.5 Kerf	0.95 Kerf	15.6 Kerf			3	2	45	2200	1م	[36]	
S=2427.08, P=3.83, ST=2.14, I=45						--	--	4.77 Ra	7.1 Ra	6.38 Ra	5.1 Ra	--	--	3.5	2.5	50	2400	2م		
														4	3	55	2600	3م		
	✓							Kerf						Kerf	--		--			[37]
S=1600, ST=7, Kerf=2.52						--	--	0.516	0.203	--	99.26	--	--	1.92	5	--	1400	1م		
														2.22	6		1500	2م		
														2.52	7		1600	3م		
	✓	✓				44.05	--	--	--	29.69	26.25	4	240	--	--	65	30	1م	[38]	
V=240, I=65, S=90												5	270			70	60	2م		
												6	290			75	90	3م		

م: المستويات

S: cutting speed, I: Intensity of current, ST: Stand off distance, P: Gas Pressure, V: Voltage, t: material thickness, B.a: Bevel angle, Ra: surface roughness, MMR: Material removal rate, HAZ: Heat effected zone.

الملحق-2 ملخص الدراسات السابقة (الطرق الإحصائية المستخدمة في التصميم والتحليل، مادة المعدن المقطوع)

المعدن المقطوع	طريقة التحليل والأمثلة	طريقة التصميم	المرجع	المعدن المقطوع	طريقة التحليل والأمثلة	طريقة التصميم	المرجع
Stainless Steel (316 L)	Main effect plot and ANOVA table	Taguchi	[21]	Structural steel IS 2062 E250 BR	Grey Relational Analysis	Response Surface Methodology	[1]
low carbon steel	S/N Ratio and ANOVA	response surface methodology	[22]	stainless steel AISI 304 (X5CrNi18-10)	ANOVA	Full Factorial	[4]
Aluminum alloy	ANOM and ANOVA	Taguchi	[24]	St37 mild steel	ANOM ANOVA	Orthogonal Matrix	[5]
Aluminum Alloy 6082	ANOVA	Taguchi	[25]	SS321	GA ANOVA	Taguchi	[7]
low carbon steel 1010	RSM ANOVA	One Parameter change in time	[26]	AISI 4140 steel	fuzzy logic model ANOVA	Taguchi	[11]
X5CrNi18-10 stainless steel	(TOPSIS) ANOVA	Taguchi	[27]	St37 carbon steel	ANOVA ANOM	full factorial design	[12]
St37 mild steel	ANOM and ANOVA	Taguchi	[28]	Quard – 400	ANOVA -RSM	Full Factorial Design	[13]
mild steel	ANOM & S/N	Taguchi	[30]	INCONAL 718	GRA and AHP/MOORA	Taguchi	[14]
mild steel	Response surface method	CCD design	[32]	IS 2062 (E250) Steel Material	ANOVA and GRA	Taguchi design methods	[16]
medium alloy carbon steel EN-A45	ANOM and ANOVA	Taguchi	[33]	stainless steel 309	GA and ANN	full factorial design	[17]
aluminum alloy 5083	fuzzy logic model	Taguchi	[35]	Quard – 400	full factorial-RSM	full factorial design	[18]
Monel 400 superalloy	ANOVA	BBC & RSM	[36]	AISI 304 stainless steel	RSM	full factorial design	[19]
(TWIP) steel	ANOVA RSM	Taguchi's	[38]	SS321 (X6CrNiTi18-10)	Genetic Algorithm ANOVA	Taguchi	[20]

**GRA:** Grey Relation Analysis, **MOORA:** Multi-Objective Optimization on the Basis of Ratio Analysis, **AHP:** Analytic Hierarchy Process, **ANN:** Artificial Neural Network

**GA:** genetic algorithm, **TOPSIS:** Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, **BBD:** Box–Behnken design, **TWIP:** Twinning Induced plasticity

**ANOVA:** Analysis of Variance, **ANOM:** Analysis of Means, **RSM:** Response surface methodology. **S/N:** Signal